

5 Optimierung der Signalverarbeitung mit den gewonnenen Erkenntnissen aus den Untersuchungen der Signal- und Störprozesse

Die Signalverarbeitung von optischen Partikelzählern hat die wesentliche Aufgabe Streulichtsignale von Partikeln zu erkennen, die Signalamplitude zu bestimmen und sie einer Partikelgröße zuzuordnen. Den Partikelsignalen sind jedoch Störungen überlagert, die es erschweren oder unmöglich machen, ein Signal zu erkennen und zu klassieren (Kapitel 3.4).

Die Signalverarbeitung wird in zwei Aufgabengebiete gegliedert. Die erste Aufgabe der Signalverarbeitung besteht darin, das Rauschen zu vermindern bzw. den Signal-Rauschabstand zu erhöhen. Das Signal ist dann zwar weniger verrauscht, aber immer noch mit einer stochastischen Größe überlagert. Die Signalamplitude kann somit nicht eindeutig bestimmt werden. Das zweite Aufgabengebiet der Signalverarbeitung besteht darin, die Signalamplitude zu schätzen und sie dann mittels der Kalibrierkurve einer Partikelgröße zuzuordnen.

5.1 Signalverarbeitungsmethoden zur Erhöhung des Signal-Rauschabstandes

In den folgenden Kapiteln werden analoge und digitale Methoden vorgestellt, die den Signal-Rauschabstand durch Filterung vergrößern. Als Maß für die Verbesserung des Signal-Rauschabstandes wird der SNR-Gewinn g angegeben. Er berechnet sich aus dem Verhältnis des Signal-Rauschabstandes (SNR: Signal to Noise Ratio) am Ausgang zum SNR am Eingang des Filters (Gleichung 5.1). Der SNR berechnet sich aus dem Verhältnis der momentanen Signalleistung $S(t_0)$ zum Zeitpunkt t_0 und der Rauschleistung N_R .

$$g = \frac{S_2/N_2}{S_1/N_1} = \frac{SNR_{Ausgang}}{SNR_{Eingang}} \quad (5.1)$$

Die momentane Leistung $S(t_0)$ eines Nutzsignals berechnet sich aus dem Quadrat der Signalamplitude zum Zeitpunkt t_0 bezogen auf einen Normwiderstand von 1Ω .

Die Leistung N_R des Rauschens $s(t)$ berechnet sich wie folgt [43, 57, 65]:

$$N_R = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2 \cdot T} \cdot \int_{-T}^{+T} s^2(t) dt \quad (5.2)$$

5.1.1 Herkömmliche Signalverarbeitungsmethoden

In jedem kommerziellen optischen Partikelzähler wird der Signal-Rauschabstand mit einer Tiefpaßfilterung erhöht. Ein Tiefpaß filtert die höher frequenten Rauschsignalanteile oberhalb der Grenzfrequenz f_g heraus und reduziert somit das Rauschen. Die Übertragungsfunktion eines einfachen Tiefpaßfilters $H(\omega)$ in Abhängigkeit von der Kreisfrequenz ω lautet:

$$H(\omega) = \frac{1}{1 + \frac{j \cdot \omega}{2 \cdot \pi \cdot f_g}} \quad (5.3)$$

Das Filter dämpft nicht nur das Eingangsausgangsrauschsignal, sondern auch das Eingangsnutzsignal über dem gesamten Frequenzbereich. Das Signalgemisch wird am stärksten oberhalb der Grenzfrequenz des Tiefpaßfilters gedämpft. Die Amplitude des gefilterten Nutzsignals in der Abbildung 5.1 ist um den Faktor 3,3 gedämpft worden, obwohl die Grenzfrequenz des Tiefpaßfilters um den Faktor 6 größer ist als die Grenzfrequenz des Signals. Ein Tiefpaßfilter muß also eine viel größere Grenzfrequenz besitzen, damit das Nutzsignal nicht zu stark gedämpft wird.

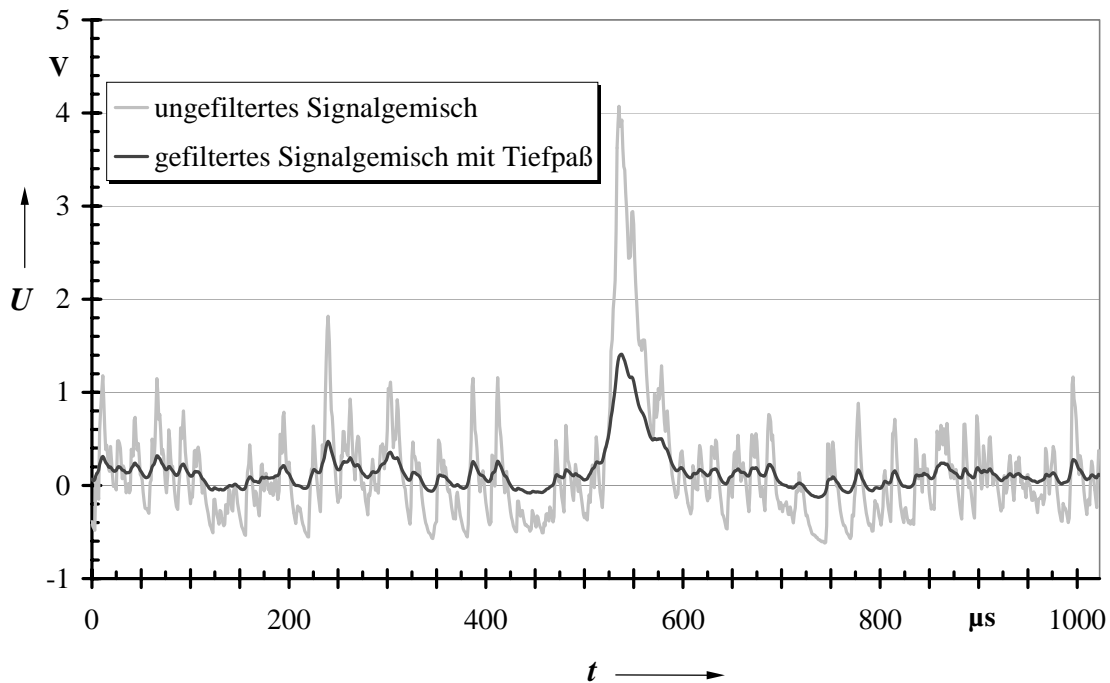


Abbildung 5.1 *Signalgemisch, gefiltert mit einem Tiefpaß und ungefiltert*

Der Signal-Rauschabstand (Abbildung 5.1) hat sich um 4 dB verbessert, obwohl das Signal stark gedämpft wurde.

Mit einer schmaleren Bandbreite des Signals kann die Grenzfrequenz des Tiefpaßfilters herabgesetzt werden. Der Tiefpaß filtert mehr spektrale Rauschanteile heraus und der Signal-Rauschabstand erhöht sich.

Bei einem optischen Partikelzähler kann sich die Grenzfrequenz der Partikelsignale durch Erhöhung des Volumenstromes ändern. Ein größerer Volumenstrom erhöht die Partikelgeschwindigkeit und reduziert die Länge des Partikelsignals. Ein kürzeres Signal besitzt höhere spektrale Anteile, die durch das Tiefpaßfilter gedämpft werden. Das Partikelsignal wird stärker gedämpft und der SNR-Gewinn verringert sich.

Das stärker gedämpfte Partikelsignal besitzt eine geringere Amplitude und wird dann als ein zu kleines Partikel gezählt.

Die Grenzfrequenz des Tiefpaßfilters müßte für jeden Volumenstrom bzw. Bandbreite des Partikelsignals neu eingestellt werden, um keine Schwankungen in den Amplituden und in die daraus resultierenden falschen Klassierung der Partikel zu bekommen.

Dies ist jedoch nur mit einem hohen Aufwand möglich, weil der Tiefpaß in optischen Partikelzählern mit elektrischen Bauelementen (Kondensatoren, Widerstände) realisiert wird. Für eine neue Grenzfrequenz des Tiefpasses müßten die Kondensatoren und Widerstände ausgetauscht werden.

In einigen kommerziellen optischen Partikelzählern besitzen die Partikelsignale die Form eines Rechteckes. Ein Tiefpaß würde bei solchen Signalformen keinen großen SNR-Gewinn erzielen, da diese Signale steile Flanken und somit hohe Frequenzanteile besitzen. Die folgende Abbildung 5.2 zeigt ein verrauschtes, nahezu rechteckförmiges und ein reproduziertes unverraushtes Partikelsignal eines kommerziellen Partikelzählers (PCS-2000 von der Firma PALLAS).

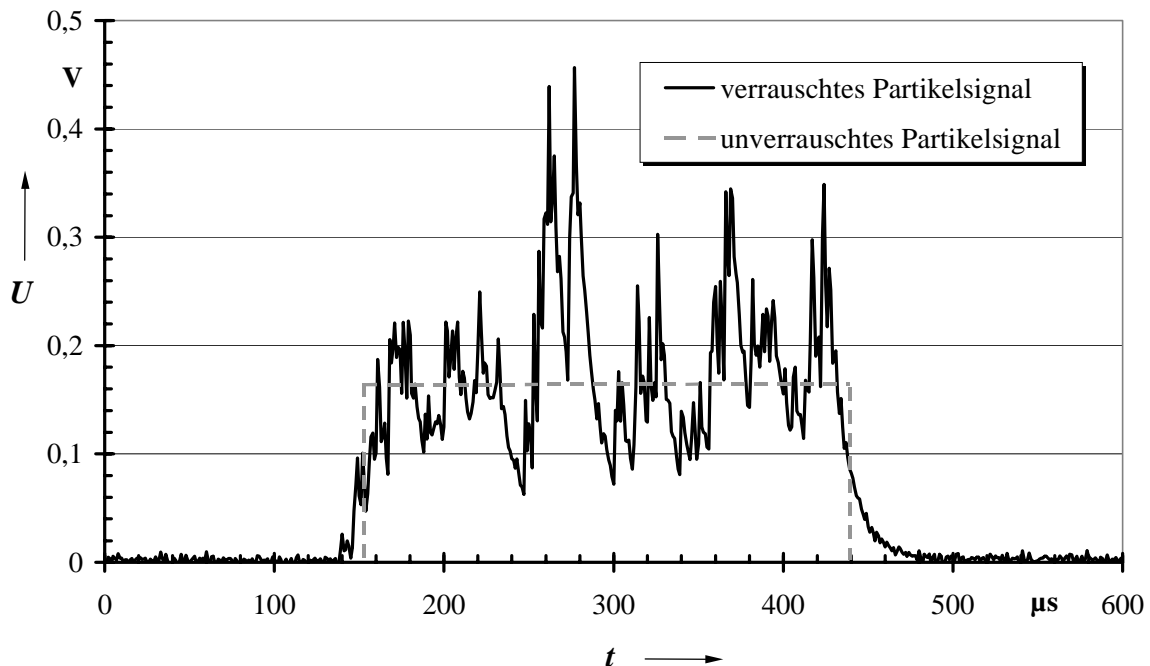


Abbildung 5.2 Rechteckförmiges Partikelsignal eines kommerziellen Partikelzählers (PCS-2000)

Einen weit aus flexibler einstellbaren und evtl. größeren Filtergewinn als der mit einem analogen Tiefpaß gewonnene können digitale Signalverarbeitungsmethoden erzielen. In den nächsten Kapiteln werden unterschiedliche Signalverarbeitungsmethoden zur Erhöhung des Signal-Rauschabstandes vorgestellt.

5.1.2 Matched Filter für weißes und farbiges Rauschen

Das Matched Filter wurde ursprünglich zur Detektion von Radar- und Sonarechos entwickelt [42] und nimmt dort eine zentrale Stellung ein. Das Filter hat die Aufgabe, das Verhältnis („Kontrast“) zu einem geeigneten Zeitpunkt t_0 der momentanen Signalspitzenleistung zur mittleren Rauschleistung zu maximieren. Dieses Kriterium wurde erstmalig von North [51] beschrieben. In der Signaltheorie ist die momentane Signalspitzenleistung das Quadrat der Signalamplitude $s^2(t_0)$ (an einem gedachten Lastwiderstand von 1Ω) und für komplexe Signale $|s(t_0)|^2$. Daraus ergibt sich folgende Forderung an das Filter [2, 43, 65, 71, 72]:

$$SNR = \frac{\text{momentane Signalspitzenleistung}}{\text{mittlere Rauschleistung}} = \frac{|s(t_0)|^2}{E\{|n(t)|^2\}} = \text{maximal} \quad (5.4)$$

Aus diesem Kriterium wird die allgemeine Übertragungsfunktion $H(\omega)$ des Filters hergeleitet [A.1].

$$H(\omega) = \beta \cdot \frac{S^*(\omega)}{S_{nn}(\omega)} \cdot e^{-j\omega t_0} \quad (5.5)$$

$S^*(\omega) \hat{=}$ fouriertransformiertes Signal $s(t)$

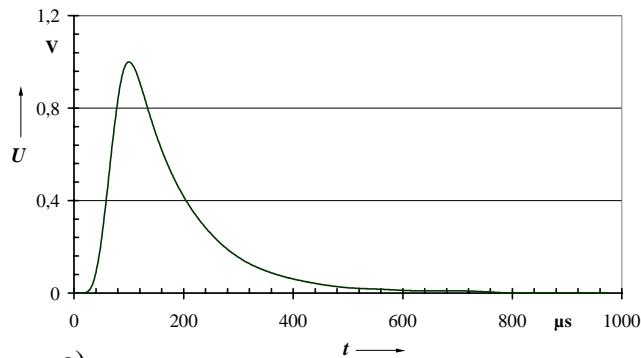
$S_{nn} \hat{=}$ Leistungsdichtespektrum des Rauschsignals am Ausgang des Transimpedanzverstärkers eines optischen Partikelzählers

$\beta \hat{=}$ Konstante

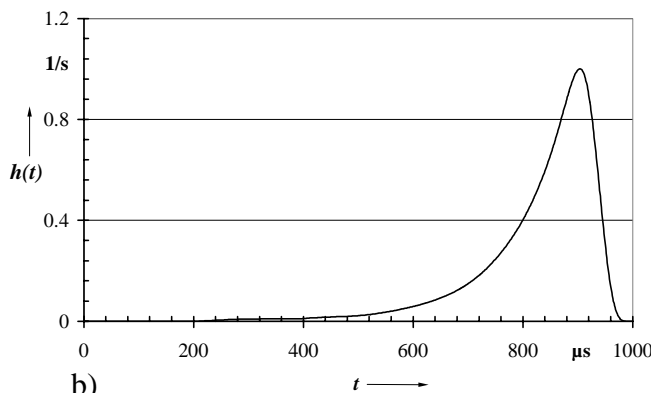
Bei weißem Rauschen (konstante Leistungsdichte) und vorgegebenen Signal $s(t)$ am Eingang des Matched Filters ist $S_{nn}(\omega) = S_0$ und die rücktransformierte Übertragungsfunktion, die sogenannte Stoßantwort $h(t)$:

$$h(t) = \alpha \cdot s(T_0 - t) \quad (5.6)$$

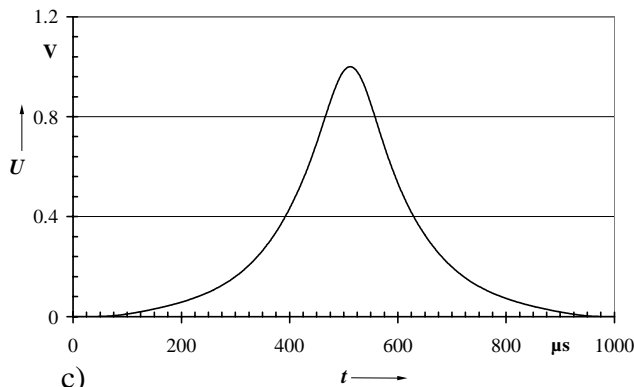
Dies bedeutet, daß die Impulsantwort des Filters dem gespiegelten Signalimpuls, mit einem



a)



b)



c)

Abbildung 5.3 a) Partikelsignal b) Impulsantwort des Matched-Filters c) Ausgangssignal

Faktor α multipliziert, entspricht. Ein solches Filter ist an das Nutzsignal angepaßt und wird deswegen als Matched Filter bezeichnet.

Das Ausgangssignal eines Filters entsteht durch Faltung des Eingangssignals mit der Impulsfunktion des Filters. Die nebenstehende Abbildung 5.3 zeigt ein Beispiel für die Filterung eines Partikelsignals (a) mit der Filterantwort (b) für weißes Rauschen und dem Ausgangssignal (c).

Das Ausgangssignal ist doppelt so lang als die Impulsfunktion des Filters und entspricht der Autokorrelation des Nutzsignals. Der ursprüngliche Verlauf des Nutzsignals geht bei der Filterung verloren, die Signalamplitude bleibt jedoch bis auf einen konstanten Faktor gleich.

In der Regel besteht das Rauschen nicht aus einem konstanten Leistungsdichtespektrum (weißes Rauschen), sondern aus farbigem Rauschen. Die Übertragungsfunktion des Matched-Filters berechnet

sich dann aus dem Verhältnis vom konjugiert komplexen Frequenzspektrums des Signals zum Leistungsdichtespektrum des Rauschens (Gleichung 5.5).

Es ist also notwendig, die Signalform von $s(t)$ und das Leistungsdichtespektrum des Eingangsausens zu kennen, um die Impulsfunktion bzw. Übertragungsfunktion des Matched-Filters berechnen zu können.

Der Signal-Rauschabstand am Ausgang des Filters für weißes Rauschen berechnet sich aus dem Verhältnis des Ausgangssignals zur Rauschleistung N_R .

$$SNR = \frac{|s(t_0)|^2}{N_R} = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} H(f) \cdot S(f) \cdot e^{j2\pi \cdot f \cdot t_0} df}{N_{R,0} \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} H(f) df} = \frac{\left| \int_{-\infty}^{+\infty} |S(f)| df \right|^2}{N_{R,0} \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} |S(f)|^2 df} = \frac{E}{N_{R,0}} \quad (5.7)$$

Der maximale Signal-Rauschabstand und damit die Entdeckbarkeit eines Partikelsignals hängen also nicht von den einzelnen Merkmalen Signalform, Signaldauer oder Signalbandbreite ab, sondern von der Signalenergie E_S und der Rauschleistungsdichte $E_{R,0}$.

Bei einer digitalen Filterung liegen die Meßwerte in diskreter Form vor. Das Nutzsignal besteht aus N Werten, deren Anzahl von der Länge des Signals T_0 und der Abtastfrequenz f_{ab} abhängig ist.

$$N = \frac{T_0}{f_{ab}} \quad (5.8)$$

Die Impulsantwort $h(k)$ des digitalen Matched Filters für weißes Rauschen entspricht dem gespiegelten Signal $s(k)$ und besitzt auch die gleiche Anzahl von Abtastwerten, die als Filterordnung bezeichnet wird.

Das Matched-Filter erreicht nur dann den maximalen Signal-Rauschabstand, wenn die Impulsantwort des Filters genau an das Nutzsignal und dem Leistungsdichtespektrum des

Rauschens angepaßt ist. Verändert sich das Leistungsdichtespektrum oder die Form des Signals, so verringert sich der Signal-Rauschabstand am Ausgang des Filters.

Die Eigenschaften des Signalgemisches ändern sich im optischen Partikelzähler durch einen veränderten Volumenstrom oder einen anderen thermodynamischen Zustand des Aerosols. Ein größerer Volumenstrom erhöht die Partikelgeschwindigkeit und somit verringert sich die Signallänge (Gleichung 4.1). Das Leistungsdichtespektrum des Rauschens kann sich durch einen anderen thermodynamischer Zustand des Aerosols verändern (Kapitel 4.2.2.2).

Wenn das Matched-Filter immer den größten SNR-Gewinn erzielen soll, muß die Signalform und das Leistungsdichtespektrum vor jeder Messung neu ermittelt werden, um dann die Impuls- bzw. Übertragungsfunktion des Filters neu berechnen zu können.

5.1.3 Matched Filter mit Verwendung höherer Momente

In der Signaltheorie wird oft davon ausgegangen, daß die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion des Rauschens einer Gaußverteilung entspricht. Diese Verteilung bzw. das Rauschen (ohne Mittelwert) kann dann mit nur einer Größe vollständig beschrieben werden und zwar mit der Standardabweichung. Die Standardabweichung der Gaußverteilung entspricht dem Effektivwert (RMS) des Rauschens.

In der Wahrscheinlichkeitstheorie beschreiben die Momente die Dichtefunktion [21, A.2].

1. Moment: $m_x^{(1)} = E\{x(k)\} \quad \hat{=} \text{linearer Mittelwert}$

2. zentrales Moment: $m_x^{(2)} = E\{(x(k) - m_x^{(1)})^2\} \quad \hat{=} \text{Varianz}$

n-tes zentrales Moment: $m_x^{(n)} = E\{(x(k) - m_x^{(1)})^n\} \quad (5.9)$

Das dritte zentrale Moment wird häufig als Maß für die Asymmetrie der Dichtefunktion bzw. der Wahrscheinlichkeitsverteilung bezüglich ihres Mittelwertes m_x benutzt. Eine Dichtefunktion $w(x)$ ist symmetrisch, wenn

$$w(x + m_x) = w(-x + m_x) \quad (5.10)$$

erfüllt ist.

Gaußprozesse werden nur mit den ersten beiden Momenten beschrieben, wobei die höheren Momente (≥ 3) gleich Null sind.

Eine Häufigkeitsverteilung von Nutzsignalen sind in der Regel gleichverteilt. Ihr drittes Moment ist dann von Null verschieden, während das dritte Moment des Rauschens, ausgegangen vom Gaußprozess, Null ist. Mit der Berechnung des dritten Momentes, wird das Rauschen in idealer Weise eliminiert und das Signal kann besser detektiert werden. Dieser Sachverhalt wird von Giannakis [19] nach einer Matched-Filterung verwendet, um eine bessere Detektierbarkeit von Signalen zu erreichen.

Die Berechnung des dritten Momentes ist sehr rechenintensiv. Deswegen wird für das dritte zentrale Moment die dritte Kumulante $k_y^{(3)}$ verwendet. Die Kumulanten [6, 19, 21, 25, A.3] sind definiert als die Koeffizienten der Taylorischen Reihe und stimmen bis zur dritten Ordnung mit den Momenten überein. Kumulanten höherer Ordnung (>3) hängen nur von Momenten gleicher oder niedriger Ordnung ab. Die dritte Kumulante wird wie folgt berechnet, mit $y(i+k)$ das Ausgangssignal des Matched-Filters:

$$k_y^{(3)}(k) = \sum_{i=0}^{N-1} y^3(i+k) \quad (5.11)$$

Insbesondere ist die dritte Kumulante für eine gaußverteilte Wahrscheinlichkeitsdichte Null. Aufgrund dieser Eigenschaft dienen Kumulanten häufig als Grundlage für einen statistischen Test von stochastischen Werten auf eine Gaußverteilung [20]

Mit einem Signalgemisch $y(i+k) = y_x(i+k) + y_n(i+k)$ am Ausgang des Matched-Filters, bestehend aus dem gefilterten Signal $y_x(i+k)$, dem Rauschen $y_n(i+k)$ und $l=i+k$, berechnet sich die dritten Kumulante mit Gleichung 5.12.

$$k_y^3(k) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} y^3(l) = \frac{1}{N} \cdot \left[\sum_{i=0}^{N-1} y_x^3(l) + \sum_{i=0}^{N-1} y_n^3(l) + 3 \cdot \sum_{i=0}^{N-1} y_x^2(l) \cdot y_n(l) + 3 \cdot \sum_{i=0}^{N-1} y_x(l) \cdot y_n^2(l) \right] \quad (5.12)$$

Der erste Term auf der rechten Seite der Gleichung 5.12 entspricht der Energie der Autokorrelation dritter Ordnung des gefilterten Signals $y_x(l)$. Der zweite Term verschwindet bei gaußförmigem Rauschen. Der dritte Term verschwindet, wenn der Mittelwert des Rauschsignals $y_n(i+k)$ den Wert Null aufweist. Die Gleichung 5.13 vereinfacht sich zu:

$$k_y^3(k) = \frac{1}{N} \cdot \left[\sum_{i=0}^{N-1} y_x^3(i+k) + 3 \cdot \sum_{i=0}^{N-1} y_x(i+k) \cdot y_n^2(i+k) \right] \quad (5.13)$$

Der zweite Term der Gleichung 5.13 kann verschwinden, wenn das Signal keinen Mittelwert beinhaltet.

Die folgende Abbildung 5.4 zeigt die Wahrscheinlichkeitsdichte des nahezu gaußverteilten Rauschens am Ausgang des Partikelzählers LPC 3751.

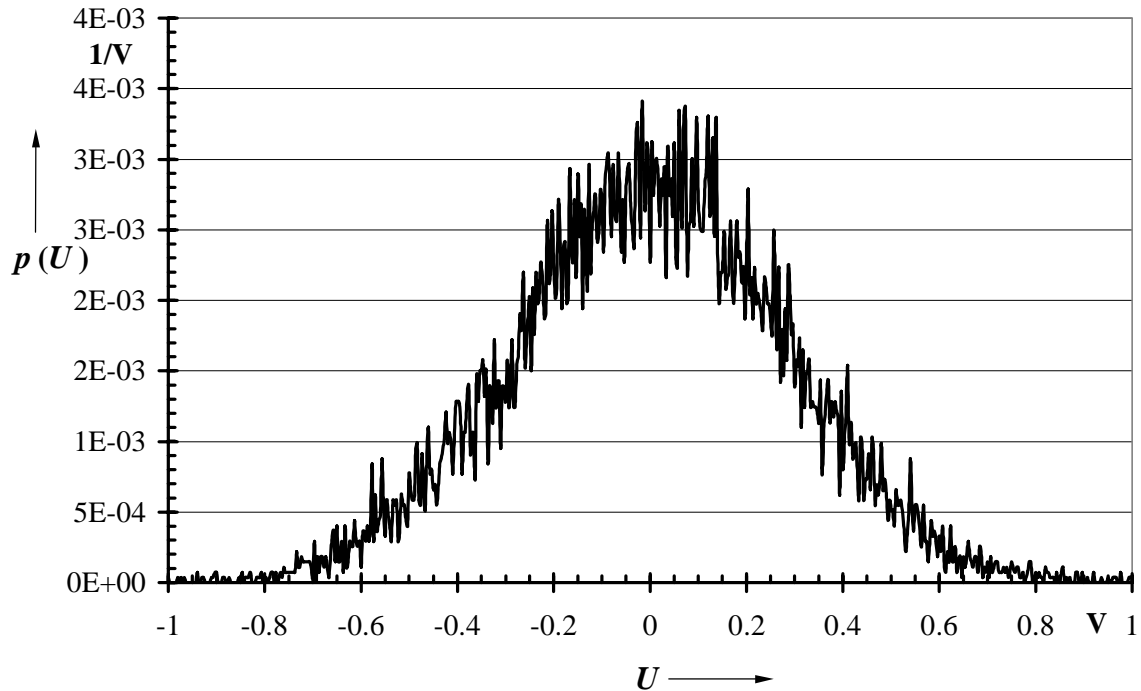


Abbildung 5.4 Wahrscheinlichkeitsdichte $p(U)$ der Rauschspannung am Ausgang des Partikelzählers (LPC 3751)

Das dritte Moment des Rauschens ist aufgrund der gaußverteilten Wahrscheinlichkeitsdichte nahezu Null.

Häufig wird in der Systemtheorie davon ausgegangen, daß das Rauschen gaußverteilt ist. Die folgende Abbildung 5.5 zeigt zwei Wahrscheinlichkeitsdichten zwei unterschiedlicher Partikelzählern. Zur Ermittlung der Dichten wurde das durch die Partikelzähler strömende Aerosol mehrfach gefiltert um zu gewährleisten, dass sich keine Partikel im Meßvolumen befinden und keine Partikelsignale im gemessenen Signalgemisch.

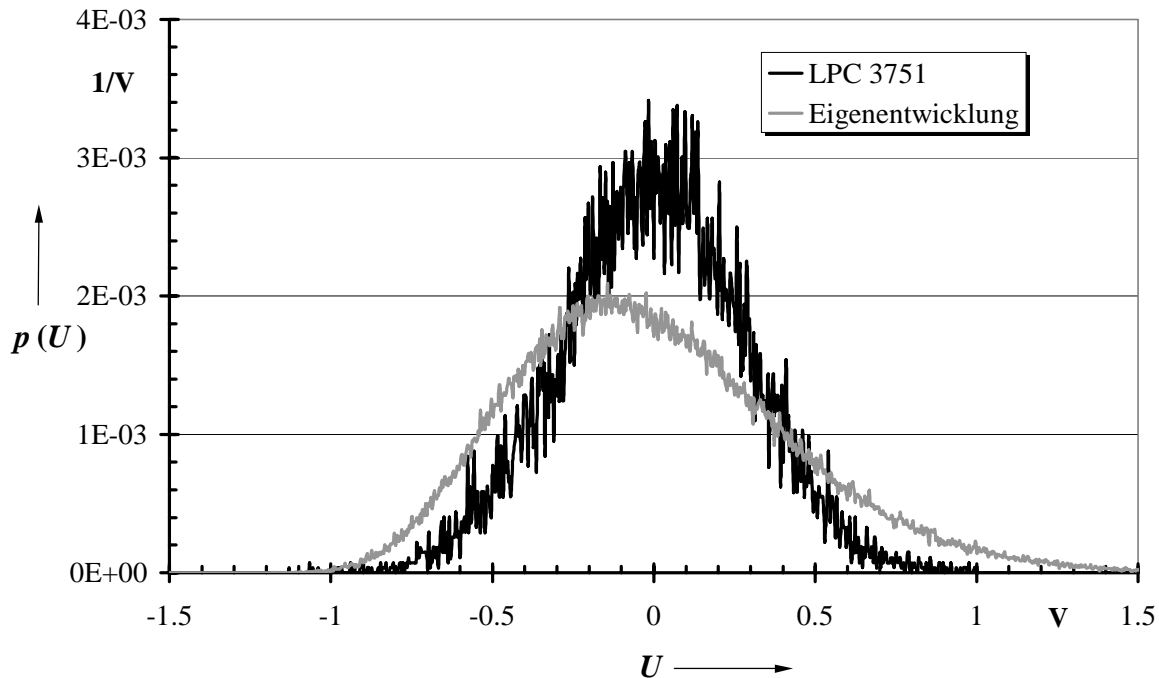


Abbildung 5.5 Wahrscheinlichkeitsdichten $p(U)$ der Ausgangsrauschsignale zweier Partikelzähler (LPC 3751 und Eigenentwicklung)

Die Wahrscheinlichkeitsverteilung des kommerziellen Partikelzählers LPC 3751 [B.2] entspricht einer Gaußverteilung, und das dritte Moment bzw. die Kumulante ist nahezu Null. Die Wahrscheinlichkeitsdichte eines anderen Partikelzählers (Eigenentwicklung [B1]) mit einem Photomultiplier als Detektor entspricht einer asymmetrischen Gaußverteilung. Spannungswerte größer Null treten häufiger auf als Spannungswerte kleiner Null. Das häufigere Auftreten höherer Spannungswerte wird durch die kurzen Störimpulse vom Photomultiplier verursacht.

Das dritte Moment bzw. die Kumulante des Rauschens des Photomultipliers ist somit größer als Null. Der Abstand des dritten Momentes vom Signal zum Rauschen ist geringer und somit auch der SNR-Gewinn.

Die Wahrscheinlichkeitsdichte $p(U)$ des Eingangsrauschsignals kann sich jedoch im Vergleich zur Wahrscheinlichkeitsdichte des Ausgangsrauschsignals durch eine Filterung verändern [36, 46, 64]. Die folgende Abbildung 5.6 zeigt, daß ein nicht gaußförmiger Prozeß (Rauschen der Eigenentwicklung), dessen drittes Moment ungleich Null ist, nach einer Matched Filterung in eine nahezu gaußförmige Wahrscheinlichkeitsdichte

übergegangen ist. Somit kann mit einer Matched Filterung und einer anschließenden Berechnung des dritten Momentes ein hoher SNR-Gewinn erzielt werden.

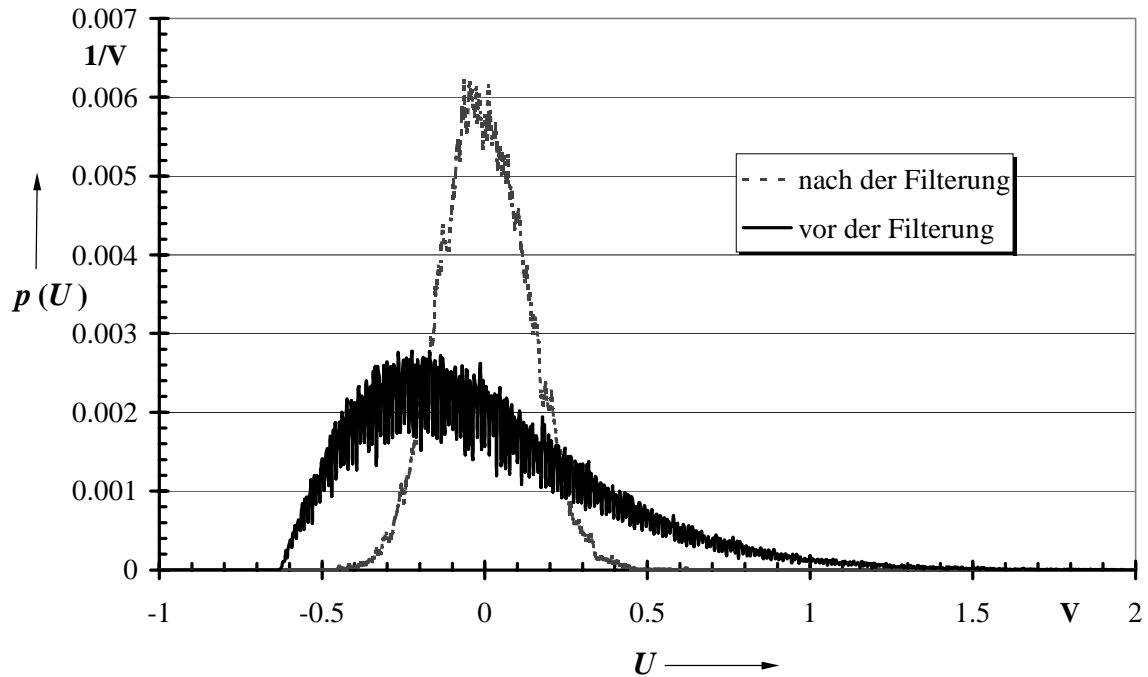


Abbildung 5.6 *Wahrscheinlichkeitsdichte $p(U)$ des Effektivwertes des Ausgangsrauschens des Partikelzählers am Eingang und am Ausgang des Matched-Filters*

Zur Berechnung des dritten Momentes wird nur die begrenzte Anzahl von Werten verwendet, die durch die Matched Filterung entstanden sind. Daraus ergibt sich ein Schätzwert des Momentes, der sich bei jeder Berechnung mit neuen Werten der Meßkette ändert. Es entstehen Fluktuationen mit einer Wahrscheinlichkeitsdichte (Abbildung 5.7).

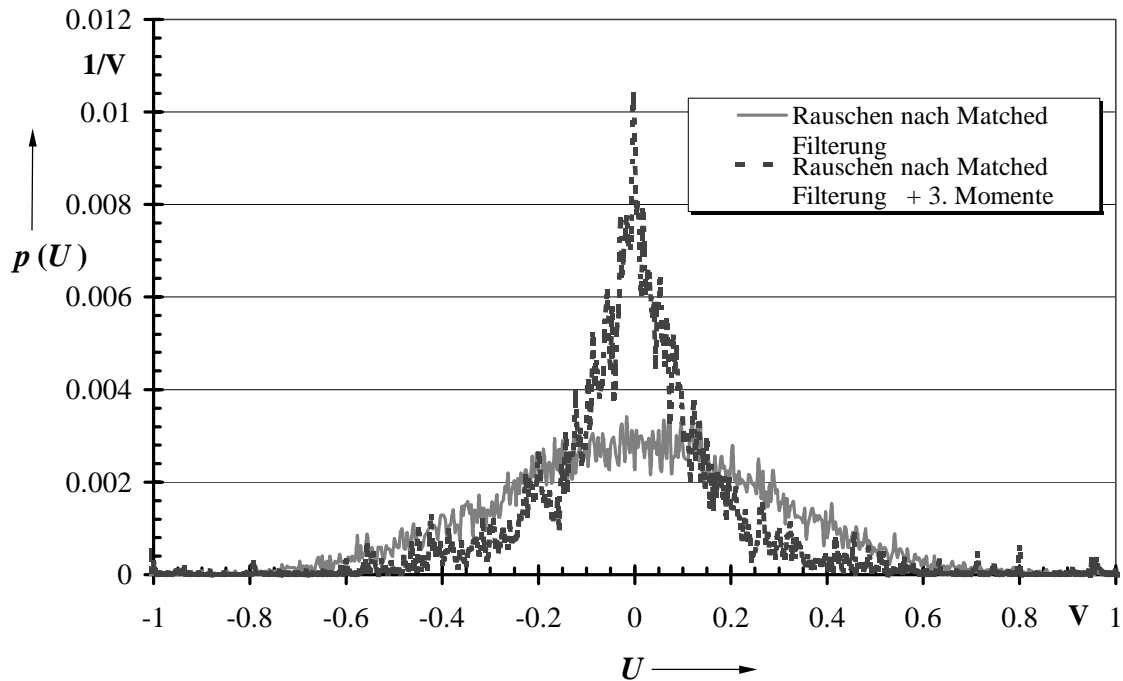


Abbildung 5.7 Wahrscheinlichkeitsdichte $p(U)$ des Rauschsignals vor und nach Berechnung des dritten Momentes

Die Wahrscheinlichkeitsdichte des Rauschens am Ausgang des Matched Filters $y_n(i)$ wird durch die Berechnung der dritten Momente schmaler. Die Standardabweichung s der Verteilung und der Effektivwert U_a des Ausgangsrauschens verkleinern sich nach Berechnung der dritten Momente und somit erhöht sich der Signal-Rauschabstand SNR am Ausgang des 3. Momenten Filters.

5.1.4 Vergleich der Filter bzgl. ihres SNR-Gewinns

Die vorgestellten Signalverarbeitungsmethoden sind in der Lage, das Rauschen zu minimieren und den Signal-Rauschabstand zu vergrößern. Mit einer Simulation der Signalverarbeitungsmethoden ist es möglich, die Form des Ausgangssignals und den maximalen SNR-Gewinn zu bestimmen. Die Signalverarbeitungsmethoden werden in Filteralgorithmen überführt und auf einen Computer implementiert. Die Simulation der

Signalverarbeitungsmethoden erfolgt mit gemessenem realen Rauschen optischer Partikelzähler und mit aus Messungen ermittelten Signalen.

Die ermittelten Partikelsignale sind für die Berechnung der Filterantwort des Matched Filters notwendig. Je genauer das ermittelte Signal dem Original entspricht, um so größer wird der SNR-Gewinn sein (Kapitel 5.1.2). Das Partikelsignal kann im Partikelzähler selbst gemessen werden, wenn dieser ein Aerosol analysiert. Das so gemessene Partikelsignal ist jedoch immer verrauscht.

Eine weitere Möglichkeit zur Bestimmung der Signale besteht durch eine Faltung des Partikelstreulichtsignals mit der gemessenen Übergangsfunktion des Photodetektors und des Verstärkers. Um die Form des Partikelstreulichtsignals ohne den Einfluß des dynamischen Verhaltens des Detektors zu messen, wird die Verteilung der Bestrahlungsstärke im Meßvolumen des Partikelzählers mit dem Laser Beam Diagnostic System gemessen. Die Verteilung der Bestrahlungsstärke entspricht dem Streulichtsignalverlauf des Partikels (Kapitel 4.1). Mit der Partikelgeschwindigkeit und der Höhe des Meßvolumens kann mit Gleichung 4.1 die zeitliche Länge des Partikelsignals berechnet werden. Die Partikelgeschwindigkeit berechnet sich aus dem Verhältnis des gemessenen Volumenstromes und der Querschnittsfläche des Aerosoleinlasses. Die so ermittelte Signalform entspricht dann dem realen, unverrauschten Partikelsignal.

Die zu filternden Signalgemische entstehen aus der Addition des gemessenen Rauschens und des ermittelten Partikelsignal.

In der nachfolgenden Abbildung 5.8 ist ein gefiltertes Signalgemisch mit einem Tiefpaß und einem Matched Filter dargestellt. Das Signalgemisch ist aus der Addition des gemessenen Rauschens und des ermittelten Partikelsignals des Partikelzählers LPC 3751 erzeugt worden.

Der Tiefpaß besitzt eine Grenzfrequenz f_g von 50 kHz, die um den Faktor 6 größer ist als die Bandbreite des Signals und die der Bandbreite vieler kommerzieller optischer Partikelzählern entspricht.

In der Abbildung 5.8 ist deutlich zu erkennen, daß das Rauschen durch die Filterung stark reduziert worden ist und die kurzen, hohen Störimpulse ganz eliminiert worden sind. Die ursprüngliche Signalamplitude von 3V ist durch das Rauschen um 33,33 % auf 4 V

verfälscht worden. Die Matched Filterung reduzierte nicht nur das Rauschen, sondern gewann auch die ursprüngliche Amplitude zurück. Der Signalverlauf ist jedoch durch die Matched Filterung verbreitert und um die Signallänge verschoben worden.

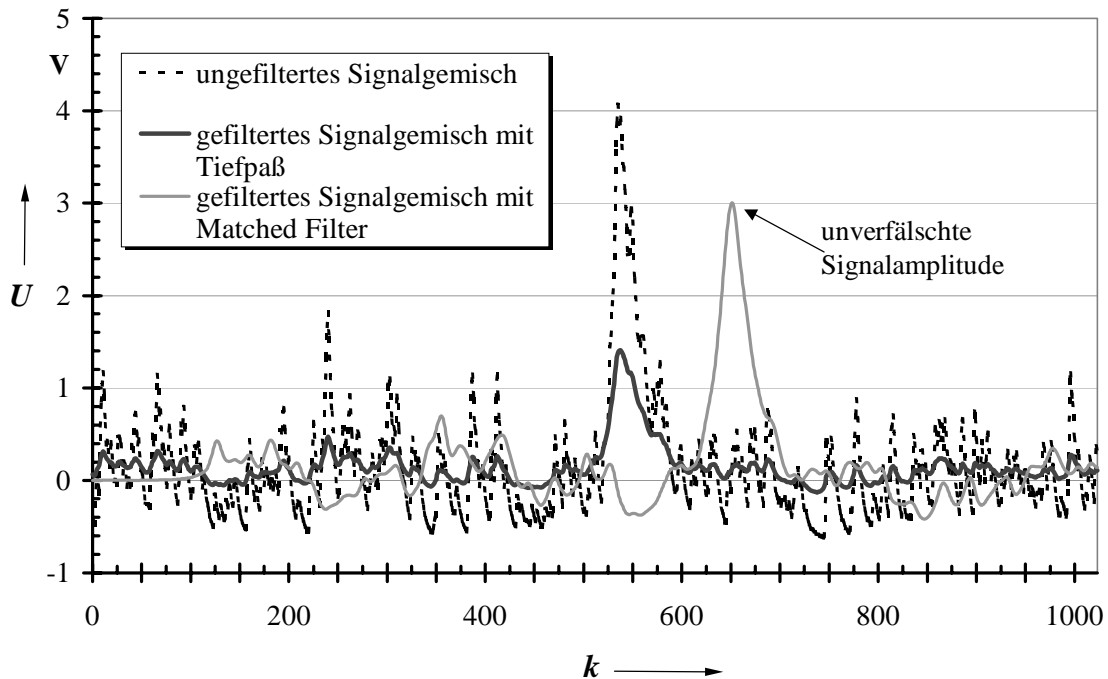


Abbildung 5.8 Vergleich eines ungefilterten, tiefpaßgefilterten und mit einem Matched Filter gefilterten Signalgemisches

In den nachfolgenden Abbildungen 5.9 bis 5.12 werden die gefilterten und ungefilterten Signalgemische vom Matched Filter und vom Matched Filter mit Berechnung der dritten Momente miteinander verglichen. Die Ergebnisse der Filterungen sind für unterschiedliche Signal-Rauschabstände der zu filternden Signalgemische variiert worden. Für eine übersichtlichere Darstellung ist der gefilterte Signalverlauf vom Matched Filter mit Berechnung der dritten Momente um zwei Signallängen ($N=256$) nach vorne verschoben worden.

In den Abbildungen 5.9 bis 5.12 ist zu erkennen, daß das Matched Filter mit Berechnung der dritten Momente, das Rauschen „vollständig“ eliminiert bzw. das Rauschen nicht mehr visuell erkennbar ist. Nur das Nutzsignal ist noch vorhanden und besitzt die Form eines Rechteckes. Dieses Filter ist sogar in der Lage, ein Partikelsignal, das sehr viel kleiner als das Rauschen ist, aus dem Signalgemisch zu filtern (Abbildung 5.12).

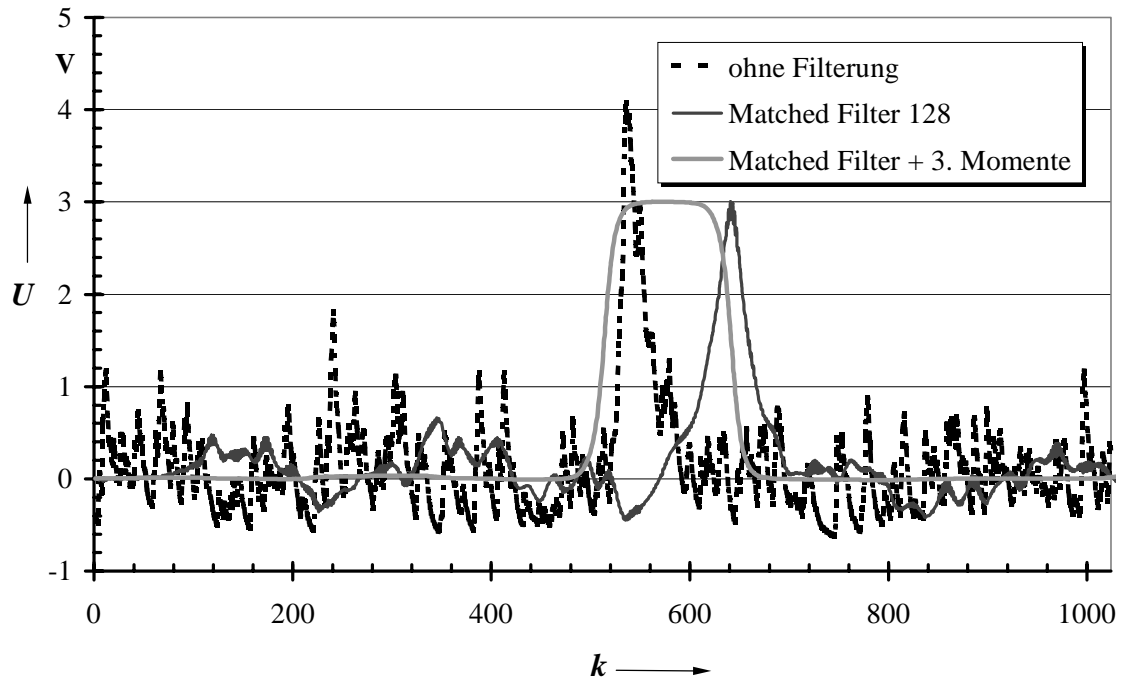


Abbildung 5.9 Vergleich von Signalgemischen ohne Filterung, nach einer Matched Filterung und einer Matched Filterung mit Berechnung der dritten Momente für eine Filterordnung von 128

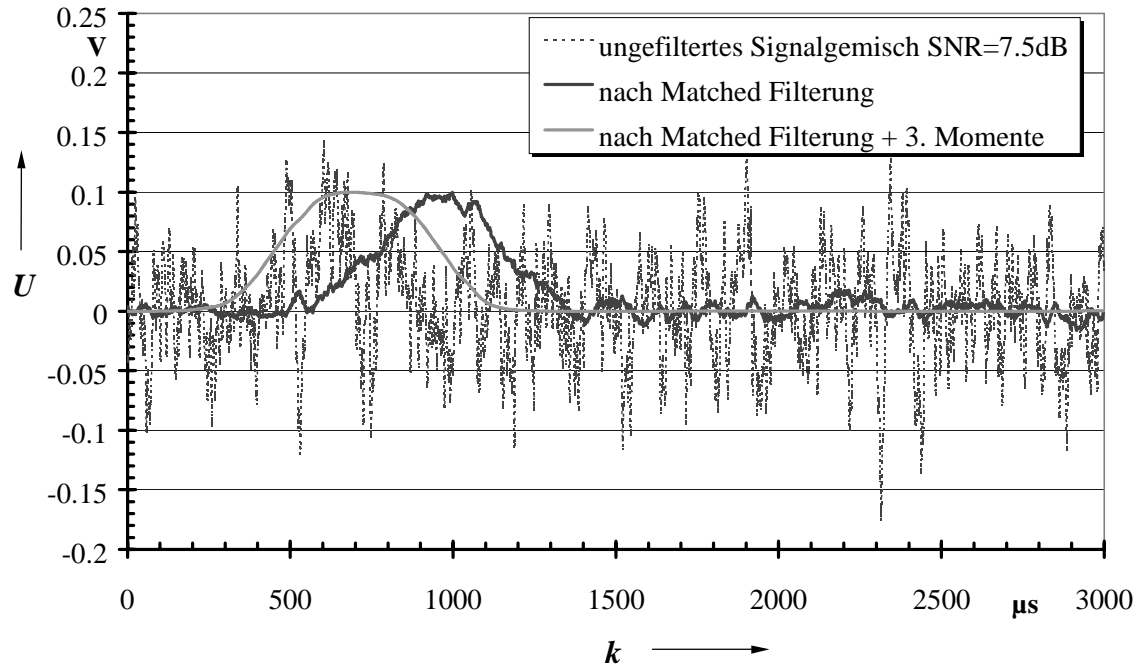


Abbildung 5.10 Gefiltertes Signalgemisch (SNR=7,5 dB vor Filterung) mit einem Matched Filter und einer Matched Filterung inklusive Berechnung der dritten Momente für eine Filterordnung von 512

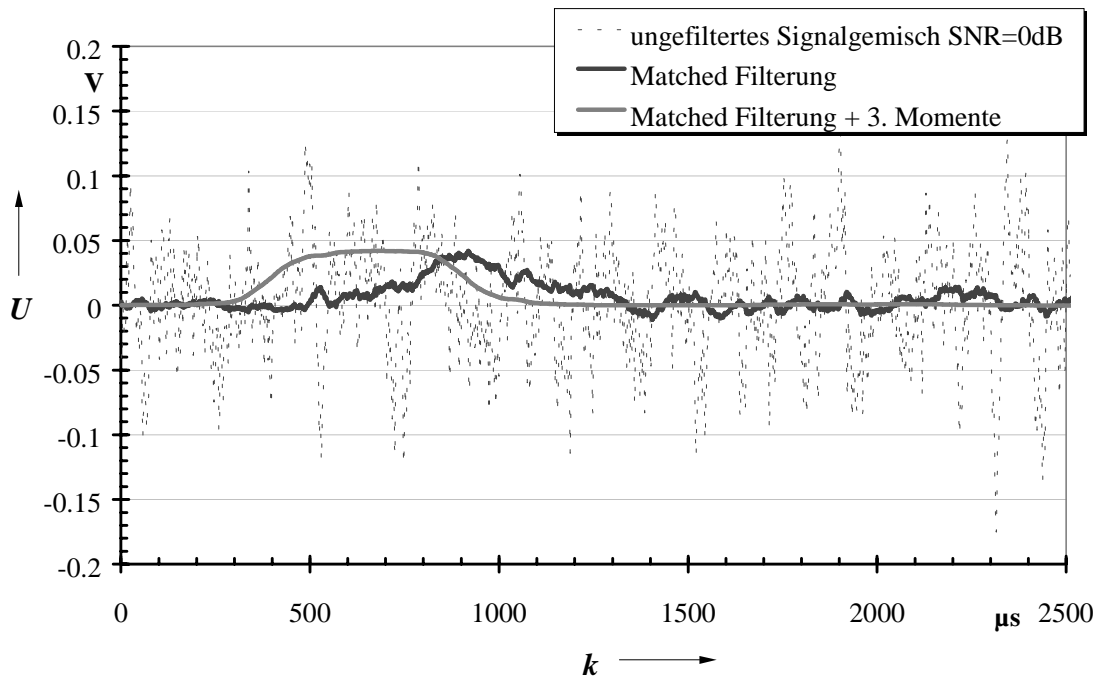


Abbildung 5.11 Gefiltertes Signalgemisch ($\text{SNR}=0 \text{ dB}$ vor Filterung) mit einem Matched Filter und einer Matched Filterung inklusive Berechnung der dritten Momente für eine Filterordnung von 512

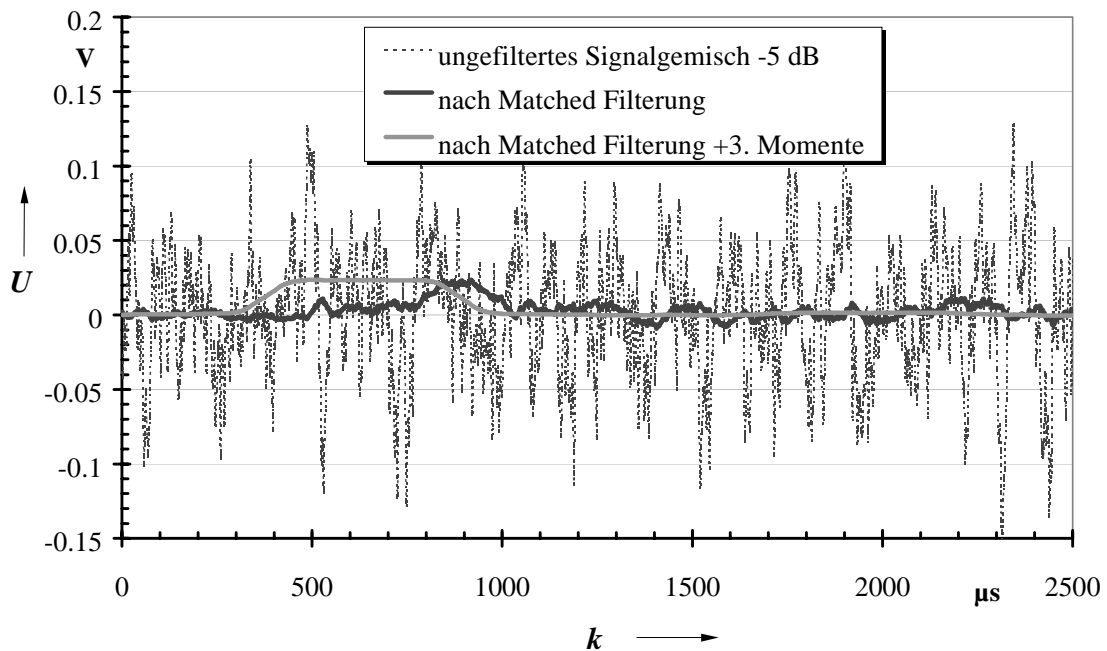


Abbildung 5.12 Gefiltertes Signalgemisch ($\text{SNR}=-5 \text{ dB}$ vor Filterung) mit einem Matched Filter und einer Matched Filterung inklusive Berechnung der dritten Momente für eine Filterordnung von 512

Der SNR-Gewinn g des Matched Filters ist abhängig von der Energie des Signals (Gleichung 5.1). Eine kleinere Signalamplitude kann durch ein längeres Signal aufgewogen werden. Da das Matched Filter dem Signal angepaßt ist, erhöht sich somit die Filterordnung F_O .

Die Signallänge kann sich beim Partikelzähler mit einem neu eingestellten Volumenstrom ändern. Die Übergangsfunktion des Filters ist dann dem Signal nicht mehr angepaßt, und der SNR-Gewinn bzw. Filtergewinn g nimmt ab.

Die Abbildung 5.13 zeigt den Filtergewinn g für ein Matched Filter für weißes Rauschen in Abhängigkeit von der Filterordnung F_O und für unterschiedliche Signallängen. Die Signallänge entspricht in der Abbildung 5.13 der Anzahl von diskreten Meßwerten.

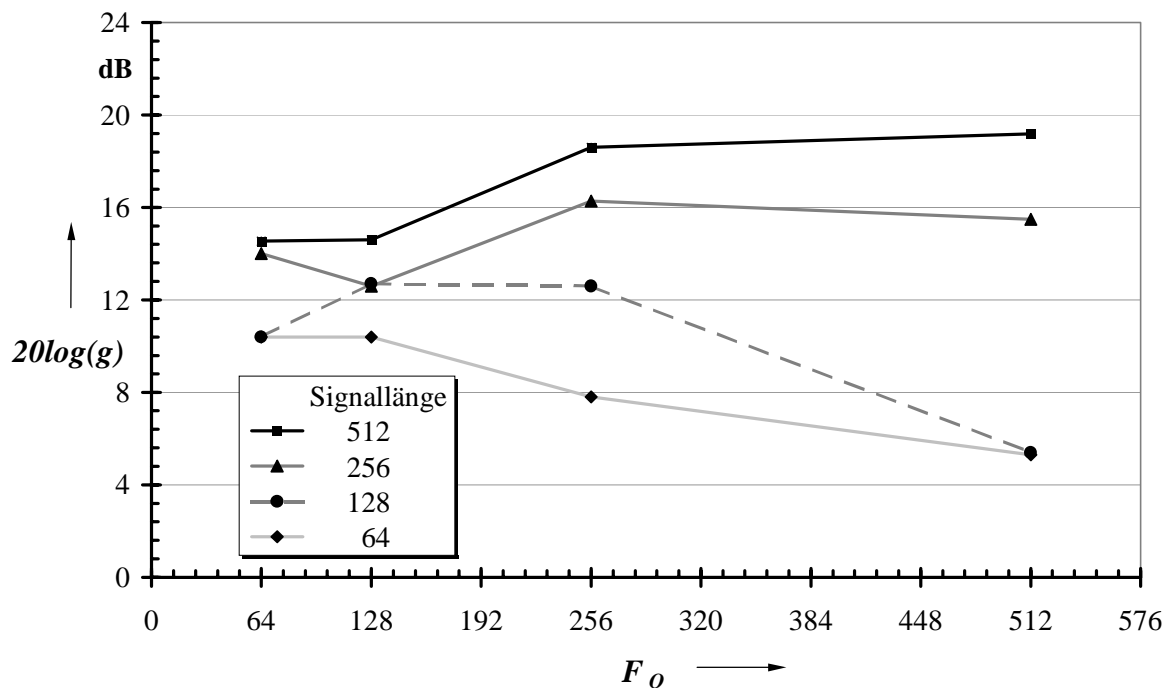


Abbildung 5.13 Filtergewinn g eines Matched Filters für weißes Rauschen in Abhängigkeit von der Filterordnung F_O und der Signallänge N

Der maximale Filtergewinn wird erreicht, wenn die Filterordnung der Anzahl der diskreten Werte des Signals bzw. der Signallänge entspricht und dem Signal genau angepaßt ist. Wenn die Filterordnung von der Anzahl der diskreten Werte des Signals abweicht, nimmt

der Filtergewinn ab. Mit Verkleinerung der Signallänge um den Faktor 8, hat sich der Filtergewinn um 13,9 dB reduziert (Abbildung 5.13).

Die Filterordnung sollte immer der Signallänge angepaßt sein, um so den höchsten Filtergewinn zu erzielen. Vor jeder Messung des Partikelzählers ist die Impulsantwort $h(k)$ des Digital-Matched Filters neu zu berechnen, wenn ein neuer Volumenstrom eingestellt worden ist.

Das Rauschen eines optischen Partikelzählers kann sich mit dem thermodynamischen Zustand des Aerosols ändern (Kapitel 4.2.2.2) und entspricht in der Regel nicht dem weißen Rauschen.

Das Matched Filter für weißes Rauschen erzielt für den Partikelzähler mit farbigem Rauschen nicht den maximalen Filtergewinn. Die Abbildung 5.14 stellt den Filtergewinn eines Matched Filters für weißes Rauschen in Abhängigkeit von der Filterordnung für unterschiedliche Rauscharten dar. Das Filter ist für künstliches weißes Rauschen, für Rauschen der Eigenentwicklung mit unterschiedlichen thermodynamischen Eigenschaften des Aerosols und für Eigenrauschen des kommerziellen Partikelzählers LPC 3751 untersucht worden. Die Impulsantwort $h(t)$ des Filters ist für jede Filterordnung an das Signal angepaßt.

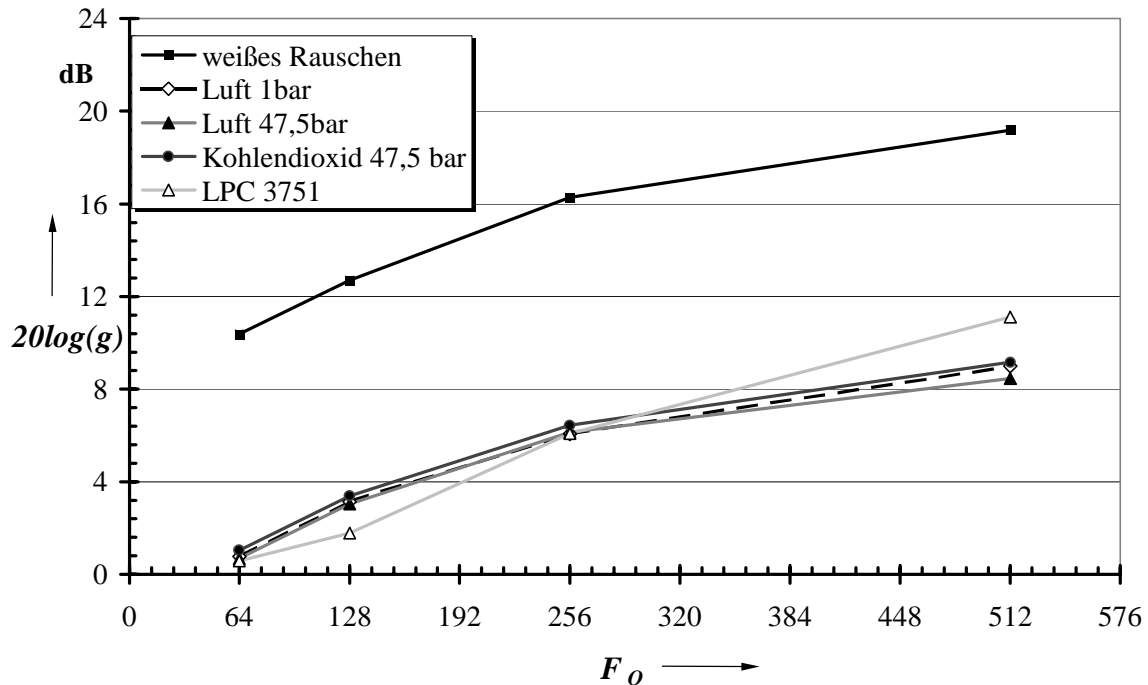


Abbildung 5.14 Filtergewinn g eines Matched Filters für weißes Rauschen in Abhängigkeit von der Filterordnung F_o für verschiedene Rauscharten

Der Filtergewinn nimmt mit der Filterordnung zu. Bei einer Verdoppelung der Filterordnung, die dem Signal angepaßt ist, erhöht sich der Filtergewinn um 3 dB (Abbildung 5.14 bzw. Gleichung 5.1, $3 \text{ dB} \hat{=} \text{Faktor } 2$).

Der Filtergewinn ist bei weißem Rauschen am höchsten und bei diesem Beispiel um ca. 9,6 dB größer als der Filtergewinn für farbiges Rauschen, das dem realen Rauschen entspricht.

Für eine Erhöhung des Filtergewinns bei farbigem Rauschen muß das Filter dem Leistungsdichtespektrum des Rauschens angepaßt werden (Gleichung 5.5).

Die Abbildung 5.15 zeigt den Filtergewinn des Matched Filters für farbiges Rauschen in Abhängigkeit von der Filterordnung für verschiedene Rauscharten. Das Filter ist dem jeweiligen Rauschen und dem Signal angepaßt.

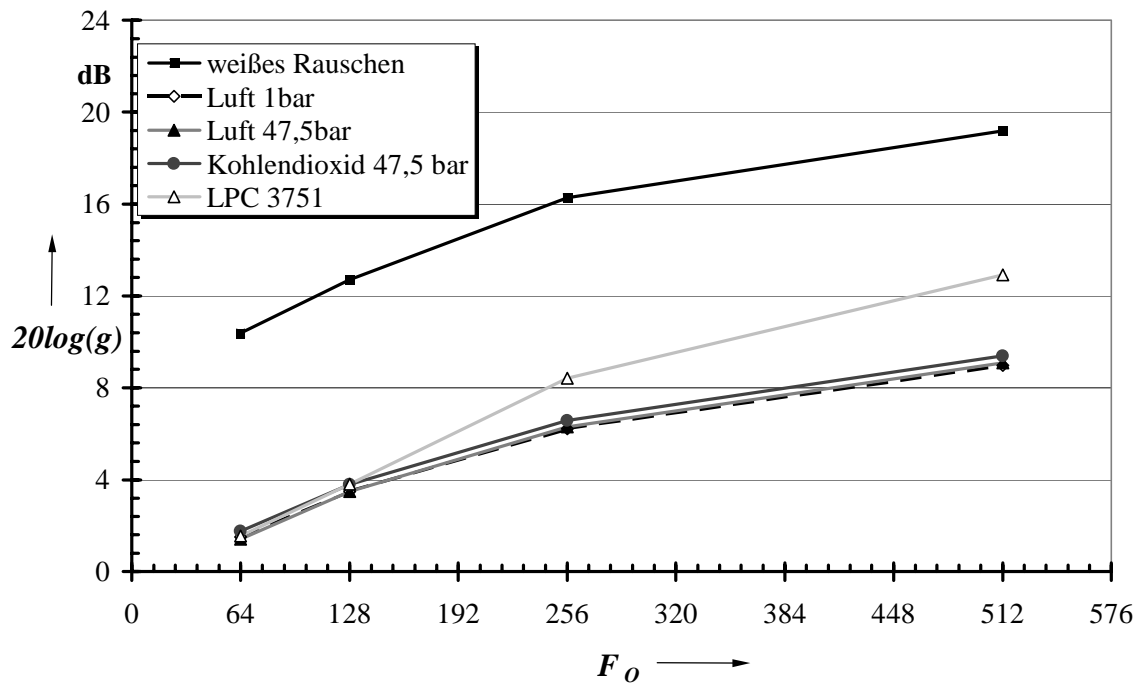


Abbildung 5.15 Filtergewinn eines Matched Filters für farbiges Rauschen (für jedes Rauschen optimiert) in Abhängigkeit vom Rauschen und von der Filterordnung F_o

Der Filtergewinn hat sich im Gegensatz zum Matched Filter für weißes Rauschen maximal um 1,8 dB erhöht, liegt jedoch immer noch deutlich unter dem Filtergewinn bei weißem Rauschen.

Für ein Matched Filter kann nur dann der größtmögliche Filtergewinn erzielt werden, wenn die Übertragungsfunktion des Filters dem Signal und dem Rauschen angepaßt ist.

Der Filtergewinn nach einer Matched Filterung kann mit Berechnung der dritten Momente weiter erhöht werden (Kapitel 5.1.3). Die folgende Abbildung 5.16 zeigt den Filtergewinn eines Matched Filters mit nachträglicher Berechnung der dritten Momente in Abhängigkeit von der Filterlänge für unterschiedliche Rauscharten.

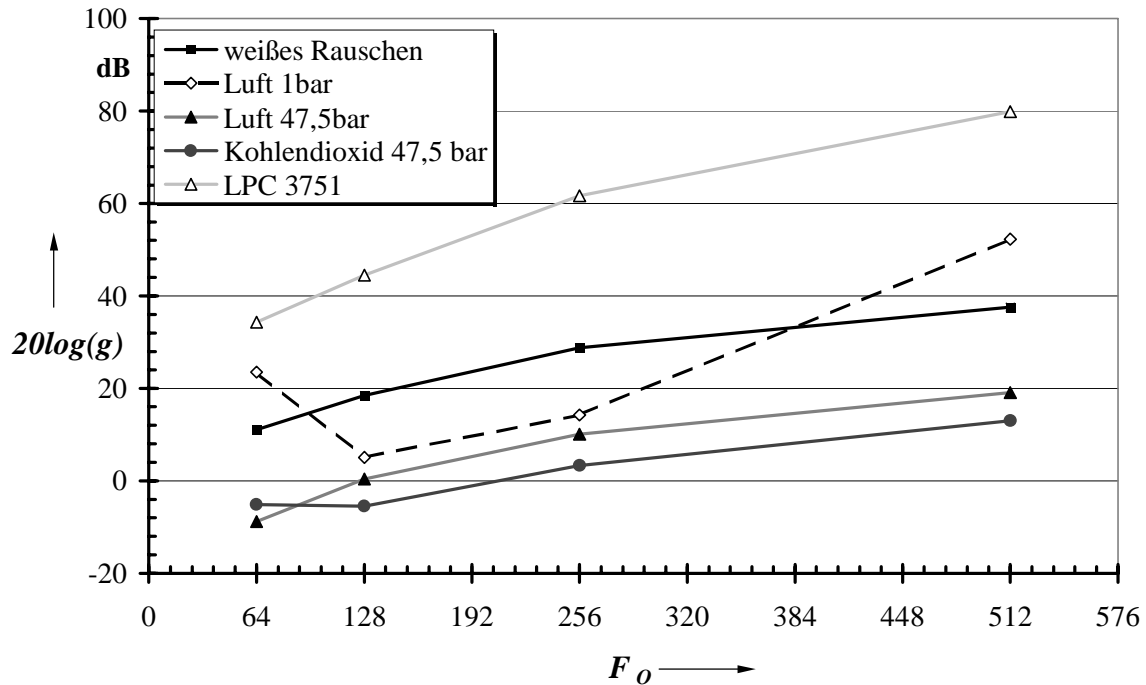


Abbildung 5.16 Filtergewinn g eines Matched Filters für farbiges Rauschen (für jedes Rauschen optimiert) mit Berechnung der dritten Momente in Abhängigkeit vom Rauschen und von der Filterordnung F_o

Der Filtergewinn nimmt wie bei einer einfachen Matched Filterung mit der Filterordnung zu. Im Gegensatz zum Filtergewinn des Matched Filters hat sich mit Berechnung der dritten Momente ein sehr viel größerer Filtergewinn ergeben. Die negativen Filtergewinne entstehen dadurch, daß nach der Matched Filterung die Wahrscheinlichkeitsdichte des Signalgemisches von der Gaußverteilung stark abweicht und somit das dritte Moment ungleich Null ist. Der größte Filtergewinn wird mit dem Rauschen vom Partikelzähler LPC 3751 erzielt, weil schon vor der Matched Filterung das Rauschen nahezu einer Gaußverteilung entsprach.

In der Abbildung 5.17 werden die einzelnen beschriebenen Signalverarbeitungsmethoden bzgl. ihres Filtergewinnes in Abhängigkeit von der Filterordnung miteinander verglichen.

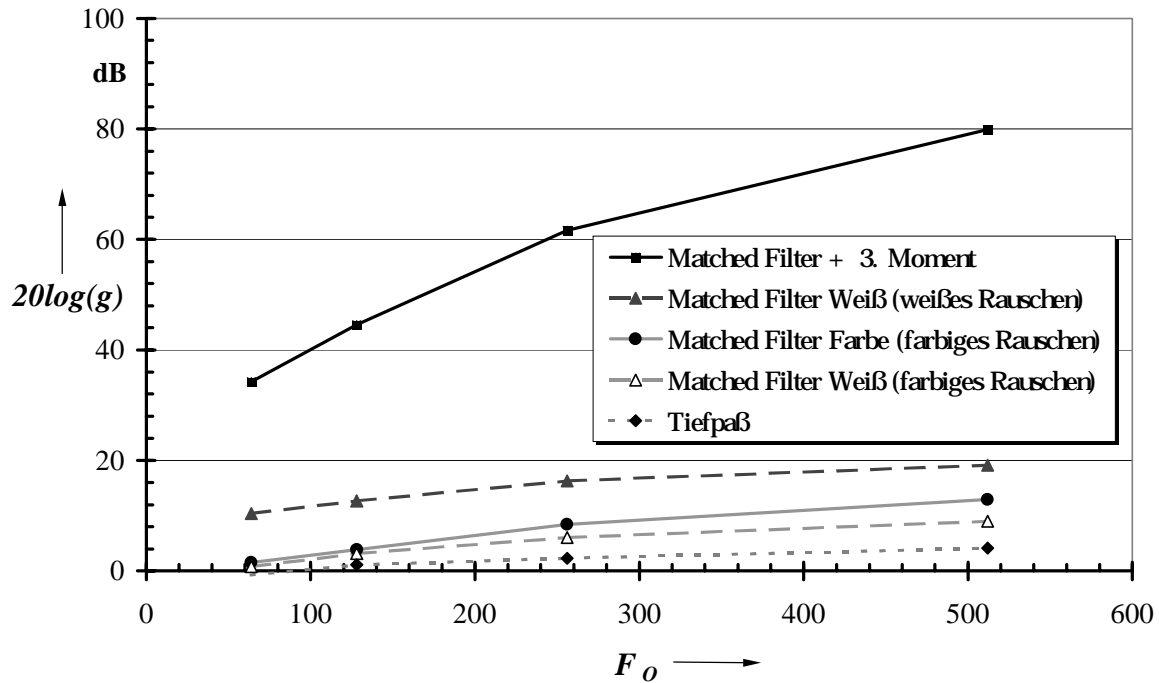


Abbildung 5.17 Filtergewinn g der Signalverarbeitungsmethoden in Abhängigkeit von der Filterordnung

Der Filtergewinn des Matched Filters, dem Rauschen angepaßt oder nicht, ist immer größer als der Filtergewinn des Tiefpasses. Mit Berechnung der dritten Momente hat sich der Filtergewinn deutlich gegenüber den anderen Methoden vergrößert.

Die folgende Abbildung 5.18 stellt die Ergebnisse des Vergleichs der einzelnen Filteralgorithmen bzgl. ihrer Filtergewinne in Abhängigkeit vom Rauschen für die Filterordnung 512 übersichtlich dar.

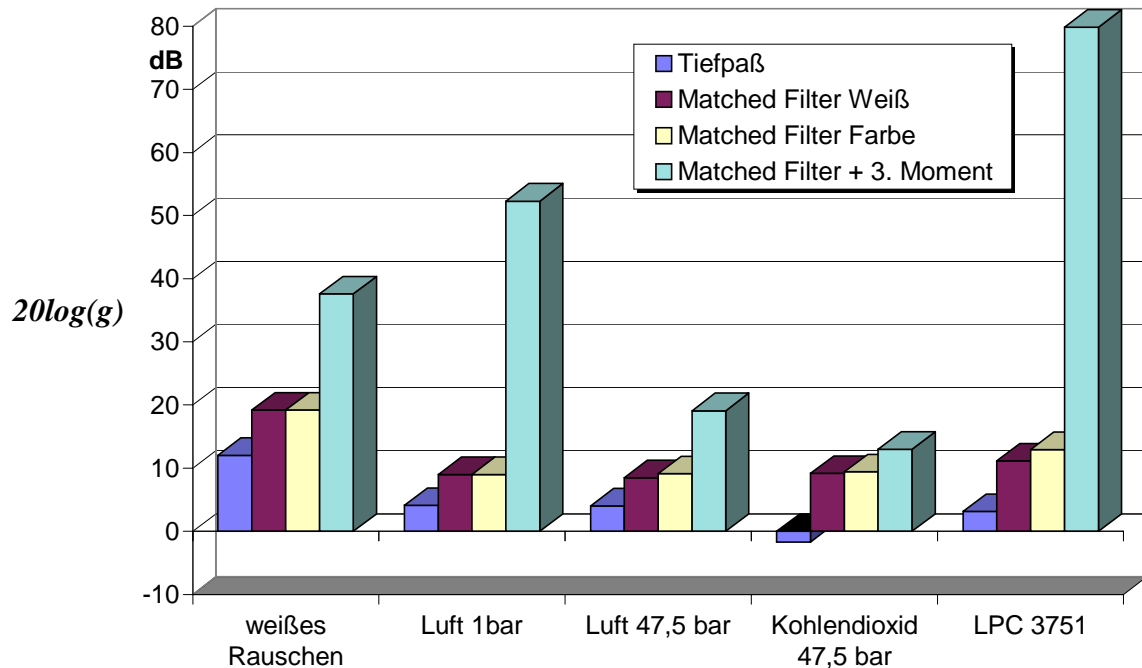


Abbildung 5.18 Filtergewinn g der Signalverarbeitungsmethoden in Abhängigkeit vom Rauschen

Das Tiefpaßfilter erzielt einen Gewinn der deutlich unter dem der Matched Filter liegt. Der Filtergewinn des Matched Filters, das dem Rauschen angepaßt ist, ist nur um einen kleinen Betrag größer als der Filtergewinn des Matched Filters für weißes Rauschen. Durch zusätzliche Berechnung der dritten Momente ist der größte Filtergewinn von 80 dB bei Filterung des Eigenrauschens vom LPC 3751 erzielt worden. Dies entspricht eine Verringerung des Rauschens um den Faktor 10^3 bzw. um 99,99 %.

Der Filtergewinn des Matched Filters mit Berechnung der dritten Momente nimmt mit Zunahme der Molekülstreuung ab. Mit Erhöhung der Molekülstreuung nimmt das Schrotrauschen des Photomultipliers zu. Das Schrotrauschen des Photomultipliers entspricht einer gleichverteilten Wahrscheinlichkeitsdichte, die dem Grundrauschen überlagert ist. Je größer das Schrotrauschen wird, um so asymmetrischer wird die Wahrscheinlichkeitsdichte, und das dritte Moment erhöht sich. Der Abstand vom dritten Moment des Signals zum Rauschen wird geringer und somit auch der Filtergewinn.

Die digitalen Signalverarbeitungsmethoden sind in der Lage einen viel größeren Signal-Rauschabstand als ein Tiefpaß zu erzielen. Um einen hohen Filtergewinn mit digitalen Methoden zu erreichen, ist die Übertragungsfunktion des Filters auf den Signalverlauf und dem Leistungsdichtespektrum des Rauschens abzustimmen. Das Signal und/oder das Rauschen können sich aufgrund anderer Betriebszustände des Partikelzählers verändern (Kapitel 4). Hierzu ist es notwendig, daß vor einer Messung die Signalform und das Leistungsdichtespektrum des Rauschens ermittelt werden, um dann eine neue optimale Übertragungsfunktion zu berechnen.

Der Filtergewinn kann mit einem längeren Signal und einer dementsprechend abgestimmten höheren Filterordnung weiter gesteigert werden.

5.2 Erkennung und Klassierung von Partikelsignalen

Mit der Erhöhung des Signal-Rauschabstandes (Kapitel 5.1) verringerten sich die stochastischen Störgrößen bzw. der Effektivwert des Ausgangsrauschen U_a . Die Signalverarbeitung muß nun aus dem Signalgemisch die Partikelsignale erkennen und die Signalamplitude schätzen, um sie dann einer Partikelgröße zuzuordnen.

In der Regel besteht die Signalverarbeitung in kommerziellen optischen Partikelzählern aus einer einfachen Schwellwertentscheidung. Das detektierte Signal wird nach der Verstärkung einem Komparator zugeführt. Übersteigt das Signal einen definierten Schwellwert, wird das Signal gezählt und klassiert. Der Schwellwert legt die kleinste Amplitude eines nachweisbaren Partikels und damit auch die untere Nachweisgrenze bzgl. der Partikelgröße des Partikelzählers fest.

Einzelne Störimpulse des Eigenrauschens des Partikelzählers (Kapitel 4) können den Schwellwert übersteigen und als Partikel gezählt werden. Mit einer Anhebung des Schwellwertes können die Fehlzählungen reduziert werden, jedoch können aber kleine Partikel nicht mehr gezählt werden. Eine Absenkung des Schwellwertes reduziert die untere Nachweisgrenze und erhöht die Fehlzählrate.

Die Fehlzählungen des optischen Partikelzählers begrenzen die zu messende Partikelanzahlkonzentration (Kapitel 3.4). Die Partikelzähler können Räume bestimmter Reinheitsklassen mit einer vorgeschriebenen höchsten Anzahlkonzentration nicht überwachen. Die Fehlzählrate sollte deswegen nur einen kleinen Bruchteil der Zählrate betragen.

Fehlzählungen können z.B. bei einem gaußverteilten Rauschen $p(U)$ (Gleichung 5.14), das eine nicht endliche Verteilung besitzt, nicht ausgeschlossen werden (Abbildung 5.19).

$$p(U) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{\left(\frac{(U-\bar{U})^2}{2\sigma^2} \right)} \quad (5.14)$$

$\sigma \hat{=}$ Standardabweichung

$\bar{U} \hat{=}$ Mittelwert

Die Fehlzählungen treten mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit P_f auf (Gleichung 5.15).

$$P_f = \int_{U_s}^{\infty} \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{\left(\frac{(U-\bar{U})^2}{2\sigma^2} \right)} \quad (5.15)$$

$U_s \hat{=}$ Schwellwert

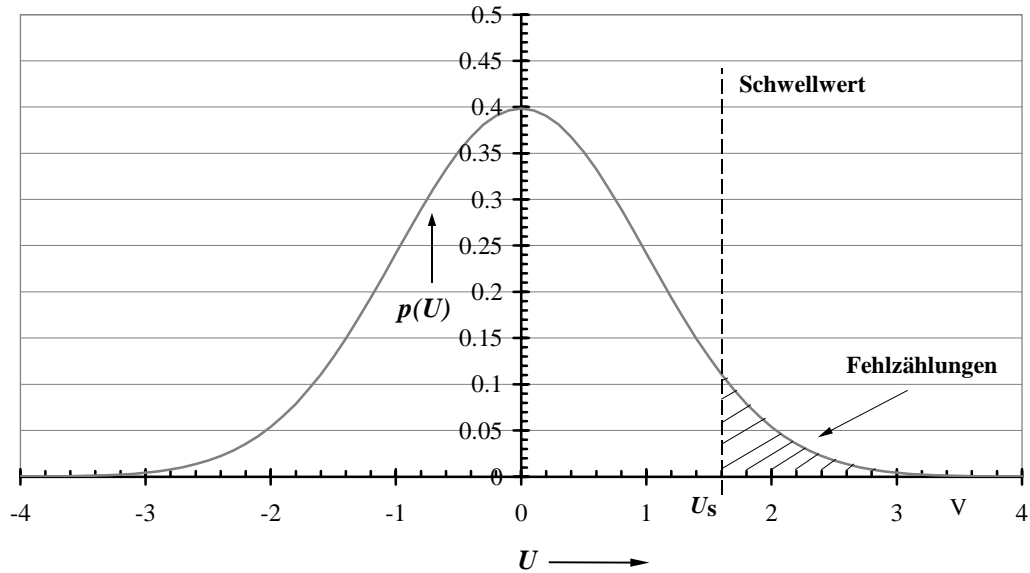


Abbildung 5.19 Fehlzählungen oberhalb des Schwellwertes

Die Fehlerwahrscheinlichkeit nimmt in Abhängigkeit vom Effektivwert der Rauschspannung U_s bzw. vom Schwellwert exponentiell ab (Abbildung 5.20).

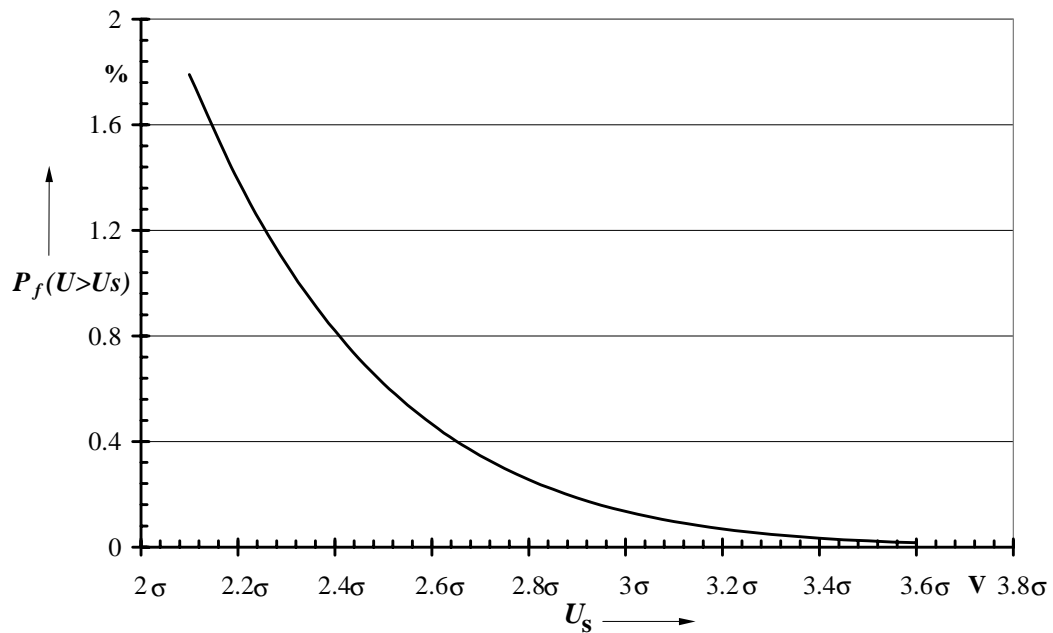


Abbildung 5.20 Fehlerwahrscheinlichkeit P_f in Abhängigkeit des Effektivwertes U_a des Ausgangsrauschens

Der Schwellwert kann mit einer vorgegebenen Fehlzählrate, die aus der Meßaufgabe resultiert, nach Gleichung 5.15 berechnet werden. Aus dem Verhältnis der geforderten Fehlzählrate und der maximal zu messenden Partikelanzahlkonzentration berechnet sich die Fehlerwahrscheinlichkeit [40].

Bei diskreten Spannungswerten läßt sich die Fehlerwahrscheinlichkeit P_f aus dem Verhältnis von Fehlzählrate $F_{Z,t}$ und Abtastrate f_{ab} des A/D-Wandlers berechnen (Gleichung 5.16).

$$P_f = \frac{F_{Z,t}}{f_{ab}} \quad (5.16)$$

Tritt ein Partikel ins Meßvolumen ein, so erzeugt das Partikel eine Signalamplitude U_s und verschiebt damit die Gaußverteilung des Grundrauschens. Die Verteilungsdichte des Partikelsignals ergibt sich somit zu:

$$p(U) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{\left(-\frac{(U - U_s - \bar{U})^2}{2\sigma^2} \right)} \quad (5.17)$$

Die Abbildung 5.21 stellt die Verteilungsdichte des Rauschens und der Signalamplituden von Partikeln dar.

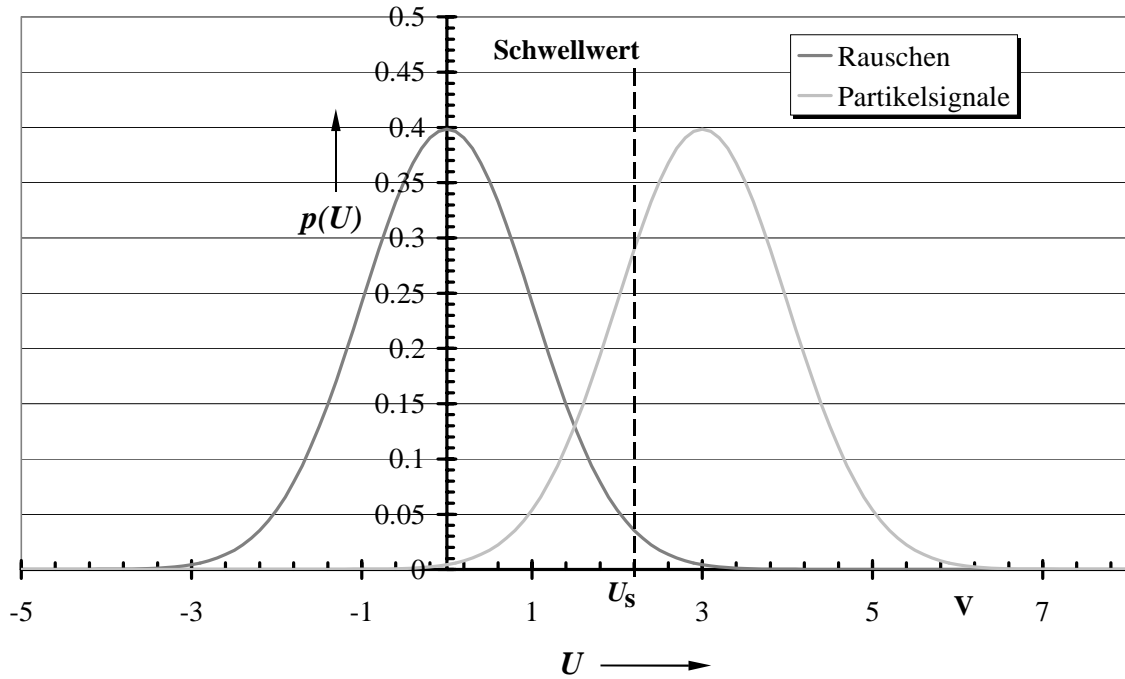


Abbildung 5.21 Verteilungsdichte $p(U)$ des Rauschens und der Signalamplituden von Partikeln

Die Verteilungsdichte der Partikelsignale kann den unteren Bereich des Schwellwertes überlappen und somit wird nur ein Teil der Partikel gezählt. Die Wahrscheinlichkeit P_{f, D_p} , daß ein vorhandenes Partikel nicht gezählt wird, berechnet sich wie folgt:

$$P_{f, D_p} = \int_{-\infty}^{U_s} \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{\left(\frac{(U-\bar{U})^2}{2\sigma^2} \right)} \quad (5.18)$$

Bei einer Fehlerwahrscheinlichkeit von 50 % ist die untere Nachweisgrenze bzgl. der Partikelgröße des Partikelzählers definiert (Kapitel 3.3).