

7 Zusammenfassung

Optische Partikelzähler werden u.a. zur Überwachung von Gasen auf vorhandene Kontamination durch Partikel, die eine potentielle Gefährdung von Produkten darstellen, eingesetzt. Die Zählung und Klassierung von Partikeln sind durch Störungen beeinträchtigt. Die Störgrößen bestehen aus dem Rauschen und einem Gleichanteil. Das Rauschen verschlechtert die Qualitätsmerkmale des Partikelzählers. Die Qualitätsmerkmale werden durch Klassiergenauigkeit, Auflösungsvermögen, Zählrate, untere und obere Nachweisgrenze und der Fehlzählrate beschrieben. Der Gleichanteil der Störungen begrenzt den nutzbaren Meßbereich des Partikelzählers.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit sind Methoden untersucht worden, die den Signal-Rauschabstand im optischen Partikelzähler erhöhen und die Störeinflüsse auf die Messung von Partikeln vermindern. Hierzu sind zwei prinzipielle Möglichkeiten verwendet worden: die Unterdrückung von dominanten Störungen an den Quellen und die Reduzierung der Störungen mit einem nachgeschalteten Filter.

Um die dominanten Störungen gezielt reduzieren zu können, ist das Signalgemisch des optischen Partikelzählers charakterisiert worden.

Die Meßkette des Partikelzählers ist in seinen Komponenten, Lichtquelle, Meßkammer, Photodetektor und Verstärker zerlegt und auf die einzelnen Störquellen hin untersucht worden. Die Störquellen entstehen aus dem elektronischen Rauschen und dem Hintergrundlicht in der Meßkammer, bestehend aus dem Strahlleistungsanteil, der durch Lichtstreuung an Molekülen entsteht, und einem Strahlleistungsanteil, der durch Lichtreflektionen an den Oberflächen der Meßkammer hervorgerufen wird.

Bei der Überwachung von Prozeßgasen, deren thermodynamischer Zustand stark von den Normalbedingungen abweicht, kann die Molekülstreuung einen großen Anteil zum Gesamtrauschen beitragen.

Hierzu ist eine Methode entwickelt worden, um die Quellen des Hintergrundlichtes getrennt voneinander zu bestimmen. Zur Berechnung der Molekülstreuung im optischen Partikelzähler, ist die Rayleigh-Gleichung erstmalig so erweitert worden, daß sie auch für Moleküle, deren thermodynamischer Zustand von den Normalbedingungen abweicht, angewendet werden kann.

Als Beispiel sind verschiedene Konfigurationsmöglichkeiten der Komponenten des Partikelzählers charakterisiert worden. Hierzu sind zum ersten Mal die Molekülstreuung in Abhängigkeit vom thermodynamischen Zustand des Aerosols experimentell gemessen worden.

Die Charakterisierung der Störquellen hat gezeigt, daß das Rauschen des Photodetektors dominiert. Bei Photodioden dominiert das thermische Rauschen, das durch Kühlung reduziert werden kann. Eine Kühlung von 22°C auf -20°C verringert den Effektivwert $i_{n,Ph}$ des Rauschstromes am Ausgang des Detektors um 7,4 % und den Effektivwert U_a des Gesamtrauschsignals des Partikelzählers um 6,8 %. Eine nachträgliche Simulation des Partikelzählers zeigte, daß der Meßbereich nur geringfügig durch die Kühlung erweitert wird. Die untere Nachweisgrenze bzgl. der Partikelgröße verringerte sich nur um 0,5 % und die Fehlzählrate um 7 %. Eine deutliche Verbesserung der Klassiergenauigkeit, des Auflösungsvermögens und der Zählrate konnte nicht erzielt werden.

Bei den untersuchten Photomultipliern mit einer relativ hohen Empfindlichkeit gegenüber der Photodiode, kann das Rauschen durch eine Kühlung nicht wesentlich reduziert werden. Im Photomultiplier dominiert das Schrotrauschen und wird hauptsächlich durch den Gleichanteil des Hintergrundlichtes verursacht. Das Rauschen konnte unter Verwendung von starken lichtabsorbierenden Strahlfallen um 80,58 % reduziert und der nutzbare Meßbereich um 15 % erhöht werden. Die nachfolgende Simulation hat gezeigt, daß der Meßbereich erheblich erweitert werden konnte. Die Klassiergenauigkeit und das Auflösungsvermögen haben sich verbessert. Die untere Nachweisgrenze verringerte sich um maximal 57 % und die Fehlzählrate um 98,2 %.

Das Gesamtrauschen des optischen Partikelzählers kann durch ein zusätzliches Filter, das dem Verstärker nachgeschaltet ist, weiter reduziert werden.

Es sind unterschiedliche digitale Signalverarbeitungsmethoden zur Filterung des Signalgemisches auf ihren Filtergewinn hin untersucht worden.

Die herkömmliche Filtermethode in optischen Partikelzählern ist ein Tiefpaß, der mit digitalen Filtern, dem Matched Filter für weißes Rauschen, Matched Filter angepaßt an das Rauschen und Matched Filter mit anschließender Berechnung der dritten Momente, verglichen worden ist.

Die Untersuchungen haben gezeigt, daß die digitalen Signalverarbeitungsmethoden einen viel größeren Signal-Rauschabstand erzielen als ein Tiefpaß. Für einen hohen Filtergewinn ist die Übertragungsfunktion der digitalen Filter auf den Signalverlauf und das Leistungsdichtespektrum des Rauschens abzustimmen. Bei einer Veränderung des Signals oder des Rauschens, verringert sich der Filtergewinn. Mit Verkleinerung der Signallänge um den Faktor 8, aufgrund eines höheren Volumenstromes, nimmt der Filtergewinn um 13,9 dB ab. Bei Veränderung des Signals oder des Rauschens muß die Übertragungsfunktion des Filters vor der Messung neu berechnet werden, um so den höchst möglichen Filtergewinn zu erzielen.

Das Matched Filter mit Berechnung der dritten Momente erzielte den höchsten Filtergewinn von 80 dB, das einer Reduzierung des Rauschens um den Faktor 10^3 bzw. um 99,99 % entspricht. Der Signal-Rauschabstand kann mit Erhöhung der Filterordnung der digitalen Methoden weiter zunehmen. Bei Verdoppelung der Filterordnung des signalangepaßten Filters erhöht sich der Filtergewinn um 3 dB.

Die vorgestellten Signalverarbeitungsmethoden sind für einen kommerziellen optischen Partikelzähler und einer Eigenentwicklung, auf die Verbesserung der Qualitätsmerkmale hin, mit Prüfaerosolen untersucht worden. Die Prüfaerosole bestehen aus einem Datensatz, der aus einem simulierten Signalgemisch mit definierten Eigenschaften erzeugt worden ist. So konnten erstmals die Signalverarbeitungsmethoden bzgl. der erzielten Verbesserung der Qualitätsmerkmale (untere Nachweisgrenze bzgl. der Partikelgröße, Zählwirkungsgrad, Klassiergenauigkeit, Auflösungsvermögen und Fehlzählrate) optischer Partikelzähler exakt miteinander verglichen werden.

Es hat sich gezeigt, daß Filteralgorithmen, die einen großen Signal-Rauschabstand erzielen, die Qualitätsmerkmale des Partikelzählers deutlich verbessern. Bei gleichbleibender Fehlzählrate erhöhte sich die Klassiergenauigkeit und das Auflösungsvermögen. Die untere Nachweisgrenze bzgl. der Partikelgröße konnte mit den Matched Filtern und dem Matched Filter mit Berechnung der dritten Momente stark herabgesetzt werden. Signale, die sehr viel kleiner sind als das Rauschen ($\text{SNR}=-5$ dB), konnten mit dem Filter, das die dritten Momente verwendet, herausgefiltert und noch sicher gezählt werden.

Den größten Filtergewinn und auch die deutlich größte Verbesserung der Qualitätsmerkmale des optischen Partikelzählers wurde vom Matched Filter mit Berechnung der dritten Momente erreicht. Bei gleichbleibendem Schwellwert wurde die Fehlzählrate $F_{Z,V}$ von $3,6 \text{ m}^{-3}$ auf $8,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^{-3}$ reduziert. Im Partikelgrößenbereich unterhalb von 500 nm nimmt das Partikelstreulicht der Eigenentwicklung mit D_p^6 ab. In diesem Bereich nimmt die untere Nachweisgrenze, trotz hohem Filtergewinn der digitalen Signalverarbeitung, nicht stark ab. Die untere Nachweisgrenze ist von 263 nm auf 169 nm um den Faktor 1,6 gesenkt worden.