Messung ultraschwacher Photonenströme

Karin Bieske, Joachim Fisch, Dietrich Gall

1. Einführung

Typische Meß- und Untersuchungsaufgaben im Bereich der Lichttechnik beinhalten die visuelle Wahrnehmung des Menschen und die Bewertung von Beleuchtungssituationen. Der Wellenlängenbereich zwischen 380 nm und 780 nm und Beleuchtungsstärken von minimal 10^{-3} lx stellen dafür Grenzbereiche dar.

Es gibt Strahlungsphänomene – aktiv oder induziert – die sich der Wahrnehmung mit dem bloßen Auge entziehen, bei denen es sich jedoch aufgrund der spektralen Strahlungscharakteristik um Licht handelt. Diese ultraschwachen Lichtphänomene liegen etwa zehn Zehnerpotenzen unterhalb der Wahrnehmungsgrenze des menschlichen Auges.

Erste Beiträge, die von ultraschwachen Strahlungsphänomenen berichten, wurden bereits Mitte des 20. Jahrhunderts veröffentlicht/1/. Aufgrund fehlender technischer Möglichkeiten konnten solch kleine Photonenströme erst in den letzten Jahren untersucht werden/2/. Die ultraschwache spezifische Photonenausstrahlung ist ein allgemeines Phänomen lebender Organismen. An lebenden Geweben, Zellen und Molekülen läßt diese sich nachweisen. Die spezifische Photonenausstrahlung reicht im Spektralbereich von 200 nm bis 800 nm von einigen wenigen bis zu einigen hundert Photonen/s $\cdot$ cm^2. Es ist bekannt, daß diese Strahlung mit verschiedenen biologischen Vorgängen korreliert, so beispielsweise mit der DNS-Vervielfachung, der Zellteilung, der Photosynthese, Photorepair-Prozessen, Reaktionen auf äußere Umwelteinflüsse, Erkrankungen und dem Sterben eines Organismus. Die emittierte Strahlung reagiert sehr sensibel auf innere Vorgänge und äußere Einflüsse. So erlaubt die Messung dieser Strahlung möglicherweise Aussagen zum Zustand des Organismus und in den Bereichen der Diagnostik und Therapie von Erkrankungen – z.B. Erkrankungen des Immunsystems und Krebserkrankungen – die Forschung über die Medikamentenwirksamkeit. Desweiteren ist die Kontrolle der Lebensmittelqualität, die Indikation von Verunreinigungen und die Untersuchung von Umwelteinflüssen möglich /3/. Für den Bereich der Lichttechnik ergibt sich daraus möglicherweise die Chance, objektive Parameter für die Beurteilung der Güte von Beleuchtungssystemen hinsichtlich der physiologischen Lichtwirkung auf den Menschen neben der visuellen Wahrnehmung und der Akzeptanz zu gewinnen.

Dipl.-Ing. Karin Bieske
Dr.-Ing. Joachim Fisch
Prof. Dr.-Ing. Dietrich Gall
Technische Universität Ilmenau
Fakultät für Maschinenbau
Fachgebiet Lichttechnik
Postfach 10 05 65
D-98684 Ilmenau

Darüber hinaus sind Biolumineszenzerscheinungen (Glühwürmchen/ Leuchtbakterien) nachweisbar, die vom Luciferin – Luciferase – System stammen und deutlich größere Meßsignale verursachen /4/.

Auch im Bereich der nichtorganischen Werkstoffe ist es denkbar, daß aus dem Lichtspeicherverhalten auf die Struktur und Stoffeigenschaften geschlossen werden kann. Die von der Materie emittierte Photonenströme und die Art und Weise, wie implizierte Strahlung absorbiert und reemittiert wird, erlaubt Aussagen über Stoffeigenschaften, Stoffzustände, Wechselwirkungsprozesse und darüber, wie Veränderungen erfolgen. Auf diese Weise ist es möglich, Prozesse (z.B. Materialalterung) zu beobachten. Über die Messung von Chemolumineszenzerscheinungen ist ebenfalls die Existenz von Stoffen nachweisbar (z.B. Ozon, Stickoxide u.a.) /5/, /6/.

Die Untersuchung ultraschwacher Photonenströme bietet damit in vielen Bereichen Ansätze für neue Verfahren in Medizin und Technik. Die rasante Weiterentwicklung von Strahlungsempfängern und Meßverfahren, mit denen kleinste Photonenströme nachweisbar sind, eröffnen einen ganz neuen Zweig im Bereich der Lichttechnik.

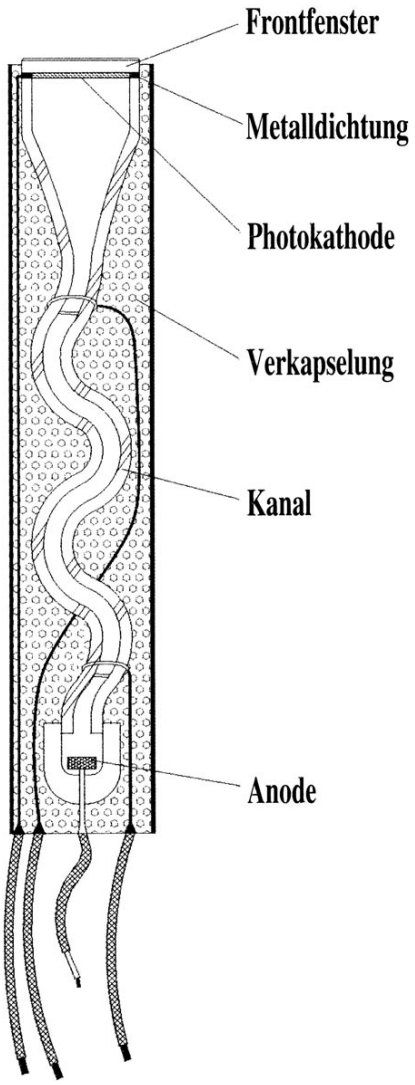

Abb. 1: Schematische Darstellung des Channel-Photomultipliers CPM /7/

2. Anforderung an die Meßtechnik

Die Messung ultraschwacher Photonenströme erfordert strahlungssensitive Empfänger, setzt hohe Verstärkungsfaktoren voraus und stellt hohe Anforderungen hinsichtlich Stabilität, Linearität, Eigenrauschen und Störunempfindlichkeit. Aufgrund der großen Empfindlichkeit beeinflußt Störstrahlung der Meßumgebung durch Überlagerung das Meßsignal wesentlich. Der Streulichtanteil der Meßumgebung und die Strahlungsspeichereigenschaften der Meßprobe selbst können sich dem Meßsignal problematisch überlagern. Die Güte des Meßergebnisses wird sowohl von den Systemparametern des Meßgerätes als auch von der Streulichtfreiheit und Stabilität der Meßumgebung bestimmt.

3. Sensoren zur Messung ultraschwacher Photonenströme

Neben Photomultipliern finden heute auch Microchannel Plates (MCP), Multianode Photomultiplier Tubes, Channeltrons, CCD-Matrizen und Channel-Photomultiplier Anwendung. Die Abbildung 1 zeigt schematisch einen Channel-Photomultiplier, einen neuartigen ultra-sensitiven und rauscharmen Photodetektor /7/.

Bestimmende Systemparameter der Empfängersysteme sind:
– Quantenausbeute
– Verstärkungsfaktor
– Signal-Rausch-Verhältnis
– Stabilität und
– Auflösungsvermögen

Die Quantenausbeute und die spektrale Quanteneffizienz wird durch die Materialeigenschaften des Eintrittfensters und der photosensiblen Schicht (Kathodenmaterial) bestimmt.

Für die Gleichmäßigkeit der Empfängerfläche ist der Herstellungsprozeß entscheidend. Der Verstärkungsfaktor bestimmt die Empfindlichkeit des Meßsensors und nimmt Einfluß auf das Signal-Rausch-Verhältnis. Er ist abhängig vom jeweiligen angewendeten photoelektrischen Prinzip und der Vervielfachungstechnik, die im Sensor zum Einsatz kommt. Durch die Wahl der Betriebsspannung wird der Verstärkungsfaktor entscheidend beeinflußt.

Interne Rauschprozesse im Sensorelement sowie Rauschanteile nachgeschalteter Baugruppen bestimmen das Gesamtrauschen. Eine Kühlung des Sensorelements kann eine Rauschminderung bewirken.

Einfluß auf die Stabilität können Temperaturschwankungen, Störeinkopplungen und Überlagerungen mit Störstrahlung haben /5/.

Das örtliche Auflösungsvermögen wird durch die Größe der Empfängerfläche festgelegt und verhält sich umgekehrt proportional zur Empfindlichkeit. Die zeitliche Auflösung wird zum einen durch die Meßzeit festgelegt und minimal durch die Impulsbreite bestimmt. Geeignete Meßmethoden (z.B. Photon Counting) und Verstärkungsverfahren sowie die Wahl von Discriminatorschwellen führen zur Verbesserung des Signal-Rausch-Verhältnisses und ermöglichen auf diese Weise die Messung kleinster Signale. Stand der Technik sind Meßsysteme, die es erlauben Photonenbestrahlungsstärken von weniger als 100 Photonen/s cm^2 zu messen und damit Photonenströme in Größenordnungen von 10^{-18} W nachzuweisen.

Im Fachgebiet Lichttechnik wurde ein Meßsystem in einem speziellen Dunkellabor aufgebaut, das Untersuchungen in diesem Bereich erlaubt.

4. Technische Parameter und Aufbau des Meßsystems

Für die Aufbereitung der Meßsignale findet das Photon Counting als Meßverfahren Anwendung. Gegenüber dem Analogverfahren ist bei diesem Verfahren die Meßimpulsamplitude ohne Bedeutung. Die eigentliche Meßgröße ist die Anzahl der Impulse je Zeiteinheit. Unabhängig von möglichen Schwankungen der Betriebsspannung und der Verstärkung sind auf diese Weise hohe Meßgenauigkeiten erreichbar. Als Erweiterung des Meßmoduls wurde eine Schutz- und Steuereinrichtung entwickelt. In Abbildung 2 ist der prinzipielle Aufbau des Meßsystems schematisch dargestellt.

Parameter	
Sensor	Sekundärelektronenvervielfacher (SEV/ Photomultiplier) Typ EMI 9235 QA
Detektorfläche	45 mm
Meßprinzip	äußerer photoelektrischen Effekt
Kathodenmaterial	Bialkali CsSb
Fenstermaterial	Quarz
Spektralbereich	200nm < λ < 650 nm, max. 420 nm
Quanteneffizienz	durchschnittlich 20%, max. 33%
Dynodenanzahl	13
Verstärkungsfaktor	$25*10^6$
Typ. Kühltemperatur	-30 °C
Dunkelzählrate	20 cps
Nachweisgrenze	6 cps
Betriebsspannung	1000 V

Tab. 1: Technische Parameter des Meßsystems

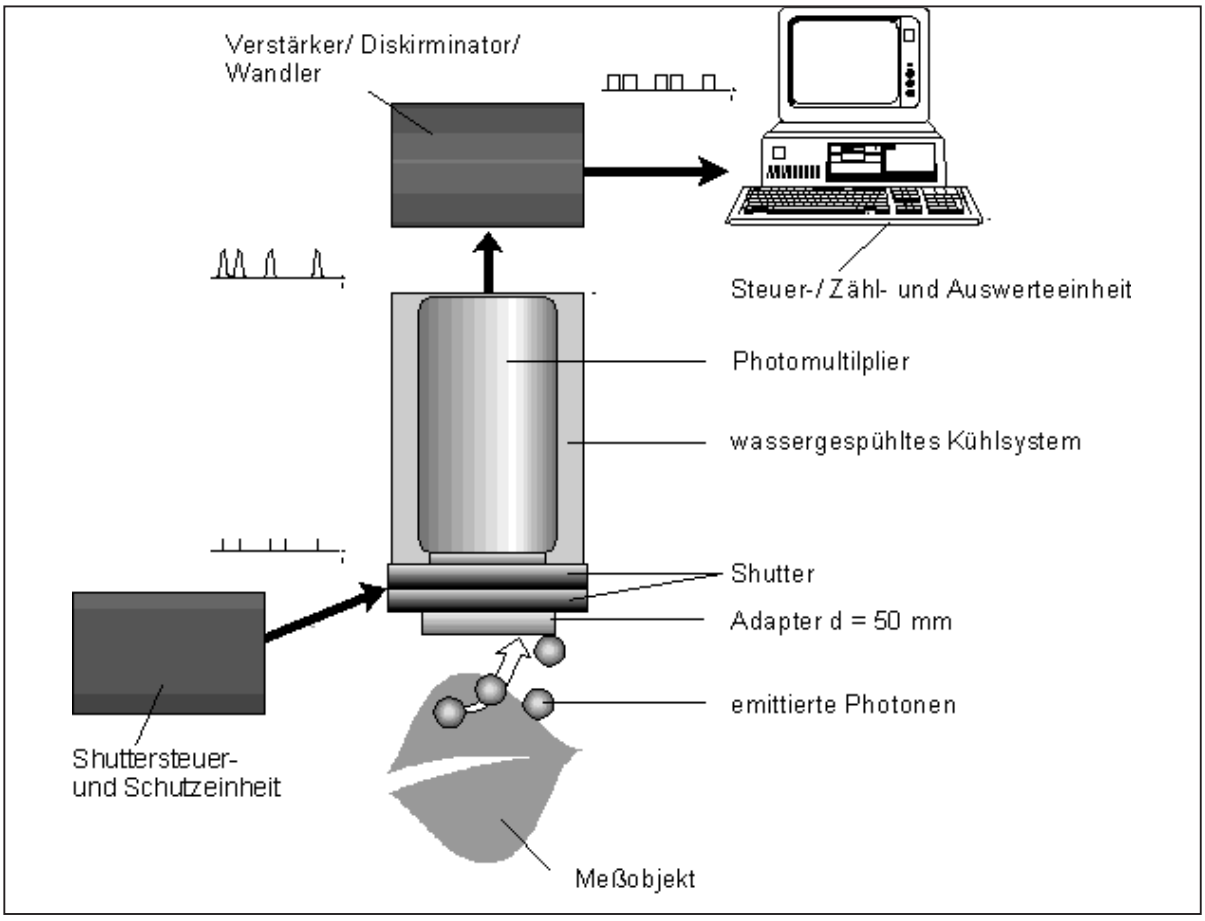

Abb. 2: Schematischer Aufbau des Meßsystems

Der Photomultiplier ist der Meßsensor und dient der Signalerfassung, Wandlung und Verstärkung. Über die Wahl der Betriebsspannung wird die Empfindlichkeit bestimmt und das Signal-Rausch-Verhältnis optimiert. Verstärker/Diskriminator und Wandler dienen der Signalaufbereitung für die weitere Verarbeitung im Auswertemodul. Die Steuer-/ Zähl- und Auswerteeinheit übernimmt die Ablaufsteuerung für die Messung und ermittelt die Zählraten. Mit Hilfe der Kühlkammer und des Rückkühlsystems wird der Arbeitspunkt des Photomultipliers stabilisiert und die Empfindlichkeit erhöht, da das Eigenrauschen deutlich minimiert werden kann. Das Shuttersystem dient dem Schutz des Photomultipliers vor zu hohen Bestrahlungsstärken. Es wird über eine Steuereinheit betrieben, in die eine Fremdlichtüberwachung integriert ist.

5. Systemeigenschaften

– Linearität

Mit Hilfe eines entwickelten Referenzstrahlers konnte nachgewiesen werden, daß das Meßsystem linear arbeitet und die Zählraten tatsächlich von Photonen stammen /8/.

– Empfindlichkeit

Zählraten, die größer als 24 cps sind, können sicher mit dem Meßsystem nachgewiesen werden /5/.

– Stabilität

Die Messungen ließen sich gut reproduzieren. Das Signal-Rausch-Verhältnis blieb im Untersuchungszeitraum stabil. Änderungen während Langzeitmessungen betrugen weniger als 2 %. Die Temperaturstrahlung beeinflußt die Zählrate durch Wirkung auf die Empfängerkathode erst bei Temperaturen ab 42 °C deutlich. Für übliche Versuchsbedingungen kann damit eine Temperaturbeeinflussung ausgeschlossen werden/8/.

– Streulichtanteil des Meßraums

Durch Optimierungen konnte die Strahlungsimmission im Meßlabor auf Werte unter 2 cps minimiert werden.

6. Erste Messungen

Im Rahmen mehrerer Meßreihen wurden Probanden an unterschiedlichen Meßorten der Hände und Unterarme untersucht. In Abbildung 3 ist die gemessene Spontanemission an unterschiedlichen Meßorten der Hände und Unterarme eines 31-jährigen Probanden (nach 20 min Dunkeladaptation) dargestellt.

Die Eigenemission stellt ein nahezu statisches Signal dar, dessen Meßwerte sehr nahe an der Nachweisgrenze des Meßsystems liegen. Innerhalb der Probandengruppe streuen die Meßwerte stark. Zur Verstärkung des Meßsignals kann das Meßgebiet angeregt werden. Dies ist z.B. optisch möglich, indem mit einer Lichtquelle über einen definierten Zeitraum und in einer festgelegter Entfernung Strahlung appliziert wird. Im Ergebnis kann ein Abklingverhalten beobachtet werden. In Abbildung 4 ist ein entsprechendes Diagramm dargestellt.

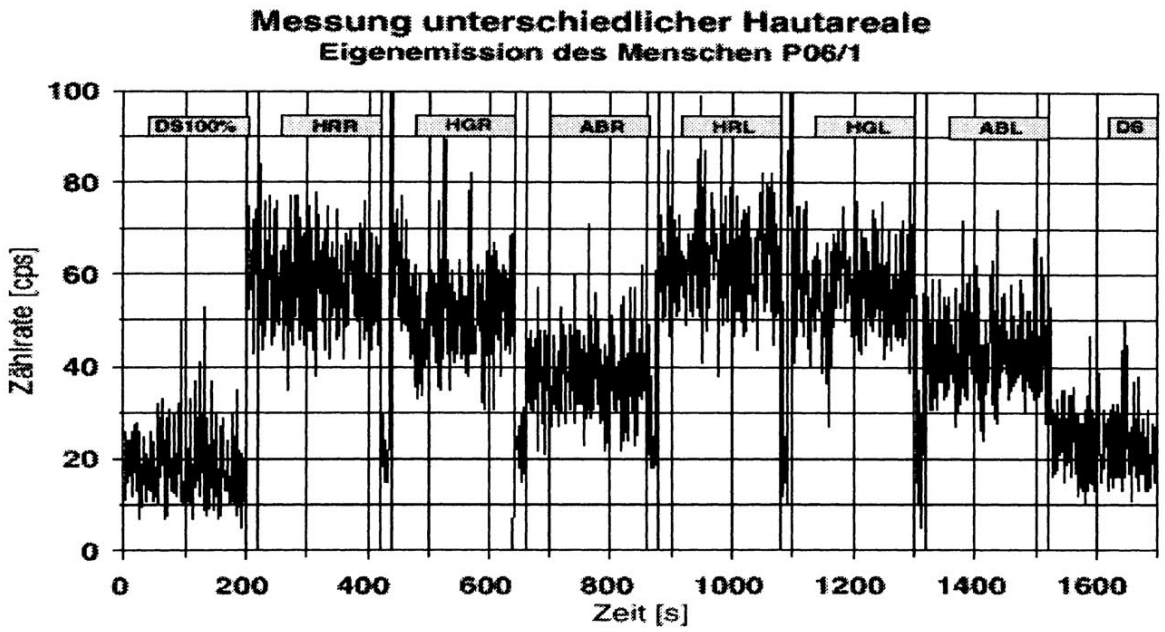

Abb. 3: Messung der Eigenemission an unterschiedlichen Meßorten der Hände und Unterarme eines Probanden

DSZ	Dunkelsignal des Meßsystems bei vollständig geschlossenem Photomultiplier
HRR/ HRL	Signal des rechten/ linken Handrückens
HGR/ HGL	Signal des rechten/ linken Handgelenks innen
ABR/ ABL	Signal des rechten/ linken Unterarms, innen unterhalb der Armbeuge
DS	Dunkelsignal bei offenem Photomultiplier ohne Probe

Für die Reproduzierbarkeit der Messung ist eine Festlegung des Meßareals und der Distanz des Meßortes zum Meßkopf notwendig. Das Abklingverhalten spiegelt das Lichtspeichervermögen am Untersuchungsort wieder. Mit Hilfe mathematischer Analysen der Abklingkurven lassen sich Eigenschaften und Zusammenhänge untersuchen.
Gegenüber Chemolumineszenzerscheinungen in Gasen ist der Photomultiplier sehr empfindlich. In einem Provokationstest mit natürlichem und künstlichen Ozon konnte dies gezeigt werden (Abbildung 5).

7. Grenzen und Probleme

Typische Signale der Eigenemission von Oberflächen liegen nur wenig über der Nachweisgrenze. Die Zählraten stellen Summensignale für den Spektralbereich des Photomultipliers dar und erlauben damit keine eindeutige Beschreibung des Meßsignals. Eine Zählrate kann durch unterschiedliche spektrale Verteilungen gebildet werden. Wesentliche Informationen sind aus der spektralen Analyse der Photonenströme zu erwarten. Untersuchungen mit üblichen Filterverfahren sind nicht anwendbar. Absorption schwächt die ultraschwachen Signale stark und läßt sie unter die Nachweisgrenze des Meßsystems absinken. Mögliche Eigenemissionen der Filtermaterialien führen zu Überlagerungen mit Störsignalen. Für Interferenzverfahren fehlen bisher theoretische Betrachtungen, die klären, inwieweit sich die physikalischen Gesetzmäßigkeiten für elektromagnetische Wellen auf die Strahlung, die aus einzelnen Photonen besteht, übertragen lassen.

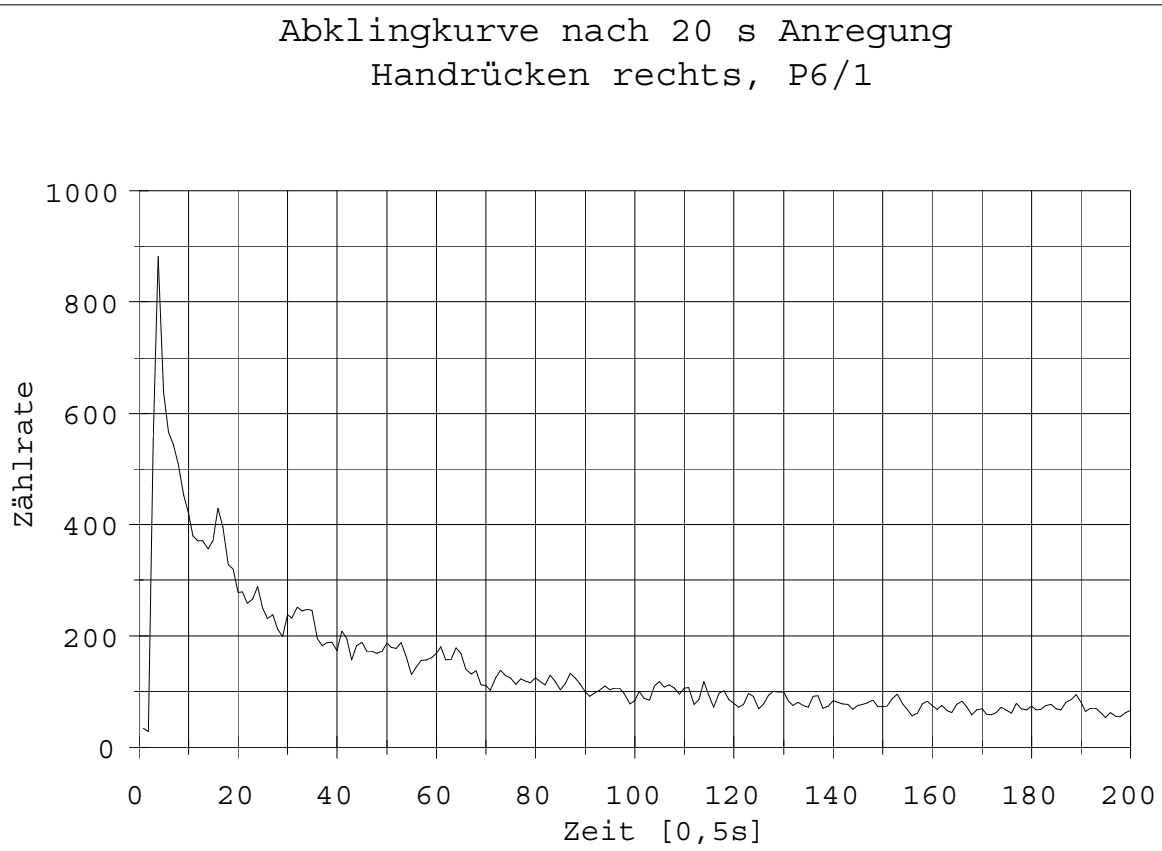

Abb. 4: Abklingverhalten nach definierter Anregung, Signal des rechten Handrückens

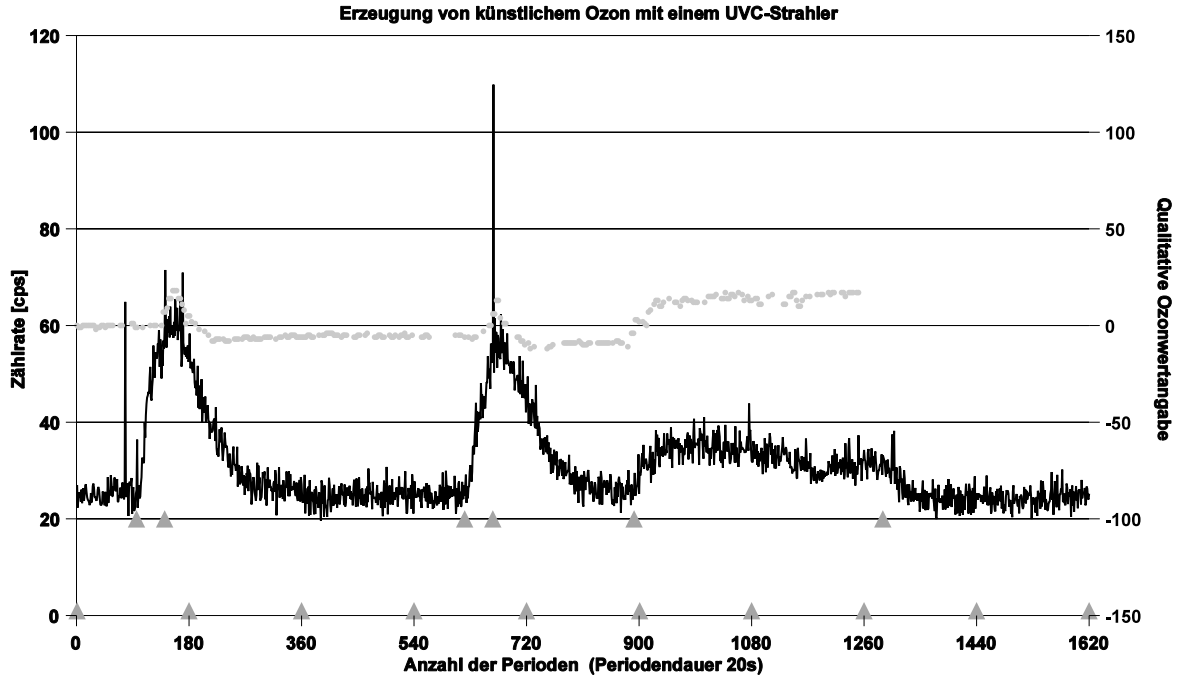

Abb. 5: Einfluß von Ozon auf das Dunkelsignal

Als problematisch erwies sich bei den bisherigen Untersuchungen die mit der Arbeitspunktstabilisierung verbundene notwendige Kühlung (– 30,0 °C), die zur Betauung des Gehäusefensters und des Photomultipliers führt und damit die Empfindlichkeit des Meßsystems beeinträchtigt. Eine Minimierung des Eigenrauschens durch konstruktive oder prinzipielle Weiterentwickungen ließe eine größere Empfindlichkeit des Meßsystems zu.

Ein wesentliches Problem bei der Messung ultraschwacher Photonenströme ist das Fehlen von Strahlungsnormalen, von denen die spezifische Photonenausstrahlung und die spektrale Zusammensetzung der Strahlung bekannt und konstant sind. Eine explizite Kontrolle der Empfindlichkeit des Meßsystems ist auf diese Weise nicht möglich. Sie ist bei der Bewertung und dem Vergleich von Meßergebnissen jedoch wesentlich.

8. Ausblick

Es wird deutlich, daß zukünftig noch eine Reihe von Problemfeldern bei der Messung ultraschwacher Photontnströme bearbeitet werden müssen. Die bisher international durchgeführten Untersuchungen zeigen die hohe Empfindlichkeit solcher Meßsysteme und weisen nach, daß die Untersuchung organischer und anorganischer Materialien möglich ist und für die Zukunft viele neue Verfahren erwarten lassen. Auf die Bedeutung und Chancen der optischen Meßtechnik in den kommenden Jahren wurde deutlich im Konferenzbericht zur Deutschen Agenda „Optische Technologien für das 21. Jahrhundert“ verwiesen. Es ist zu erwarten, daß in den nächsten Jahren im Rahmen von Miniaturisierungen verstärkt auf solche Systemlösungen zurück gegriffen werden wird /8/.

Literatur:

/1/ Gurwitsch, A. G. und Gurwitsch L. D.: Die mitogenetische Strahlung, VEB Gustav Fischer Verlag, Jena 1959
/2/ Ruth, B.: Experimenteller Nachweis ultraschwacher Photonenemission aus biologischen Systemen; Dissertation – Philipps-Universität Marburg/Lahn, Marburg/Lahn 1977
/3/ Popp, F. et al.: Recent Advances in Biophoton Research and its Applications, Singapore, New Jersey, London, Hong Kong: World Scientific Publihing Co. Pte. Ltd., S. V-VI
/4/ Souren, J.; Van Wijk, R.: Luminometry in Cellular Stress Resurarch, in: Chang, J.; Fisch, J.; Popp, A.-P.: Biophotons, Kluwer Academic Publisher: Dordrecht, Boston, London 1992, S. 65-78
/5/ Biekse, K.; Fisch, J.: Anwendung von bildaufgelösten Sensoren zur Licht- und Strahlungsmessung; Abschlußbericht der Technischen Universität Ilmenau, Ilmenau 1999, S. 17 ff.
/6/ Photomultiplier Tubes; Firmenkatalog - HAMAMATSU PHOTONICS K.K., Japan 1998, 19
/7/ Barden, R.: Der CPM Channel-Photomultiplier – Einneuartiger ultra-sensitiver und rauscharmer Photodetektor, in: Photonik 1/2000, S. 32-35
/8/ Gall, D. et al.: Measurement of low-level emission under lab conditions, in: Chang, J.; Fisch, J.; Popp, A.-P.: Biophotons, Kluwer Academic Publishers: Dordrecht, Boston, London 1998, S. 159-181
/9/ Optische Technologien für das 21. Jahrhundert - Deutsche Agenda, Düsseldorf 2000