

Messungen ultraschwacher Photonenflüsse

Dipl.-Ing. Karin Bieske, Ilmenau
TU Ilmenau, Fachgebiet: Lichttechnik, 98693 Ilmenau, Unterer Berggraben 10
Tel. 03677/ 202935, Karin.Bieske@Maschinenbau.TU-Ilmenau.DE

1. Einleitung

Bislang standen im Blickpunkt der Entwicklung der Meßtechnik Meßobjekte, die im photopischen Bereich strahlen ($> 10 \text{ lx}$).

Im vorliegenden Beitrag soll ein Sensor zur Messung ultraschwacher Photonenströme vorgestellt werden.

Sensoren zur Messung ultraschwacher Photonenstrahlung können zur Untersuchung von Oberflächenstrahlung biologischer und nichtbiologischer Materialien verwendet werden. Die von der Materie emittierte Strahlung und die Art und Weise, wie implizierte Strahlung absorbiert und reemittiert wird, erlaubt Aussagen über Stoffeigenschaften, Stoffzustände, Wechselwirkungsprozesse und darüber, wie Veränderungen erfolgen. Die zu erwartende Bestrahlungsstärke ist oftmals geringer als $100 \text{ Photonen/s}\cdot\text{cm}^2$ und die Strahlungsleistung liegt im Bereich von 10^{-19} W . Die Nachweisgrenze üblicher Strahlungsempfänger liegt bei Bestrahlungsstärken zwischen 10^{-8} und $10^{-16} \text{ W/cm}^2/1/$.

Die Entwicklung neuer Sensoren ermöglicht die Messung ultraschwacher Photonenstrahlung und damit die Untersuchung von Strahlungsphänomenen in diesem Bereich. Damit eröffnen sich für die optische Diagnostik in vielen Bereichen der Physik, Technik, Biologie und Medizin neuartige Untersuchungsmethoden.

Im Fachgebiet Lichttechnik der TU Ilmenau wurde ein neues Meßsystem zur Bestimmung von geringen Photonenströmen aufgebaut, erprobt und optimiert. Neben der geräte-technischen Realisierung bildete die Schaffung der Meßbedingungen einen wesentlichen Arbeitsschwerpunkt. Besonders problematisch sind Störstrahlungen, die sich dem eigentlichen Meßsignal überlagern. Für das Meßsystem wurde ein spezielles Dunkellabor eingerichtet, das sich durch minimale Strahlungsimmission auszeichnet und auch die Messung größerer Objekte ermöglicht.

2. Das Meßsystem

Im Meßsystem kommt ein Sekundärelektronenvervielfacher (SEV/ Photomultiplier) zur Anwendung. Er besitzt ein hochempfindliches Kathodenmaterial bei dem selbst einzelne Photonen über den äußeren photoelektrischen Effekt Elektronen herausschlagen können. Die nachgeschaltete Dynodenbaugruppe kann Verstärkungsfaktoren von einigen 10^6 realisieren und vervielfacht die ultraschwachen Elektronenimpulse in sicher nachweisbare Meßsignale. Der Zusammenhang zwischen der einfallenden Photonenstrahlung und dem am Ausgang des SEV's generierten Meßsignals ist linear. Für die Aufbereitung der Meßsignale findet das Photonen Counting als Meßverfahren Anwendung. Gegenüber dem Analog- verfahren 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.

Eine besondere Problematik stellte die Einrichtung eines nahezu streulichtfreien Meßlabors dar, da ohne dessen hohe Güte Messungen ultraschwacher Photonenstrahlung nicht möglich sind. In Abbildung 1 ist der prinzipielle Aufbau des Meßsystems schematisch dargestellt. Wesentliche Baugruppen und deren Funktion sind in Tabelle 1 zusammengefaßt.

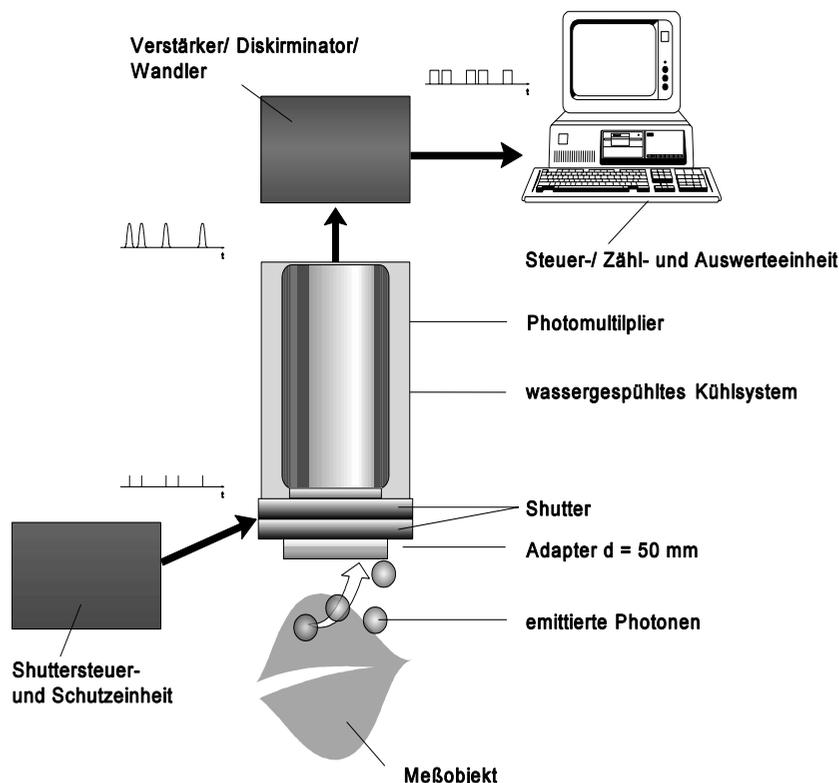


Abb. 1: Schematischer Aufbau des Meßsystems

Baugruppen	Funktionen
SEV	Signalerfassung und Verstärkung
Kühlkammer und Rückkühlsystem	Arbeitspunkteinstellung des SEV's und Minimierung des Eigenrauschens, Kühlung mit Hilfe eines Peltier-Elements und Wärmeableitung
Shuttersystem	Schutz des SEV's vor zu hohen Bestrahlungsstärken
Shuttersteuer- und Schutzzeinheit	Steuerung der Shutter und des Referenzlichtes sowie zum Schutz bei Fremdlichteinfall
Verstärker/ Diskriminator/ Wandler	Signalaufbereitung zur Verarbeitung durch die Auswerteeinheit
Zähler und Auswerteeinheit	Bestimmung der Zählraten und Datenmanagement

Tab. 1: Baugruppen und Funktionen des Meßsystems

3. Systemeigenschaften

- **Linearität**

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

- **Empfindlichkeit und Dunkelrauschen**

Die Nachweisgrenze des Meßsystems liegt bei 6 cps über dem Dunkelrauschen.

Das Dunkelrauschen konnte durch Optimierungsmaßnahmen auf 18 cps minimiert werden.

Der eingesetzte Empfängertyp EMI 9235B hat eine spektrale Empfindlichkeit im Wellenlängenbereich von 200 bis 650 nm mit einem Maximum bei 430 nm. Alle Zählraten, die größer 24 cps sind, können sicher mit dem Meßsystem nachgewiesen werden. Die örtliche Auflösung ist auf die Empfängerfläche von 15,9 cm² begrenzt.

- **Stabilität**

Die Messungen ließen sich gut reproduzieren. Das Signal-Rausch-Verhältnis blieb im Untersuchungszeitraum stabil. Änderungen während Langzeitmessungen betragen weniger als 2%.

- **Störbeeinflussung**

Die Strahlungsimmission im Meßlabor konnte auf Werte unter 2 cps minimiert werden.

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 /2/.

Bei Provokationsmessungen zeigte sich, daß das Meßsystem nicht hochfrequenzfest ist und von Schaltimpulsen beeinflusst wird.

Klimatische Änderungen können die Meßergebnisse beeinflussen. Ebenso können Veränderungen der Gaszusammensetzung einen Einfluß haben. Für Ozon konnte im Experiment dieser Zusammenhang gezeigt werden /3/.

Aufgrund des großen Temperaturgradienten zwischen SEV-Gehäuse und Meßumgebung (~ 50 K) kann die Betaung der Empfängeroberfläche die Meßsignale verfälschen.

Durch die absolute Dunkelheit im Meßlabor sind Wechselwirkungen auf das Untersuchungsobjekt (z.B. Mensch) denkbar und erschweren die Untersuchung.

- **Andere Einflußfaktoren**

Die Zählrate ist eine Funktion des Abstandes der zu untersuchenden Probe von der Empfängerkathode. Für eine punktförmige Strahlungsquelle (Referenzstrahler vom Institut für Biophysik in Neuss) wurde eine Abstandsfunktion aufgenommen /4/. Sie genügt der Funktionsgleichung $N \sim 1/r^2$ ¹.

¹

r .. Abstand der Probe zum Meßkopf; N .. Zählrate

Während erster Messungen zeigte sich, daß Materialien (z.B. Bekleidung), die in den Dunkelraum gebracht werden und sich in unmittelbarer Nähe zum Meßkopf befinden, einen Einfluß auf die Meßergebnisse nehmen können. Diese Strahlung überlagert sich dabei als Streustrahlung dem Meßsignal /5/.

4. Orientierende Messungen

Ziel erster durchgeführter Messungen war es, die Eignung des Meßsystems nachzuweisen und mögliche Einsatzfelder zu eruieren. Die nachfolgend dargestellten Meßergebnisse sind noch nicht ausreichend, um abschließend umfassende Schlußfolgerungen zu ziehen. Die Messungen können aber zeigen, daß es lohnend ist, die Forschung auf diesem Gebiet fortzuführen. Eine Vielzahl von Einsatzmöglichkeiten ist denkbar.

Die ultraschwache Photonenstrahlung ist ein allgemeines Phänomen lebender Organismen, deren Gewebe, Zellen und Moleküle. Die Photonenstrahldichte reicht von einigen wenigen bis zu einigen Hundert Photonen/ s·cm² im Spektralbereich von 200 nm bis 800 nm. Es ist bekannt, daß diese Strahlung mit verschiedenen biologischen Vorgängen korreliert, so beispielsweise mit der DNS-Vervielfachung, der Zellteilung, der Photosynthese, Photorepair-Prozessen, Reaktion 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 Aussagen zum Zustand des Organismus und in den Bereichen der Diagnostik und Therapie von Erkrankungen - z.B. Erkrankungen des Immunsystems und Krebs - die Forschung über die Medikamentenwirksamkeit. Desweiteren ist die Untersuchung und Kontrolle der Lebensmittelqualität, die Indikation von Verunreinigungen und die Untersuchung von Umwelteinflüssen möglich /6/. Darüber hinaus sind Biolumineszenzerscheinungen nachweisbar, die vom Luciferin - Luciferase - System stammen und deutlich größere Meßsignale verursachen.

Auch im Bereich der nichtorganischen Werkstoffe ist es denkbar, daß aus dem Lichtspeicherverhalten auf die Struktur und Stoffeigenschaften geschlossen werden kann. Auf diese Weise ist es möglich, Prozesse (z.B. die Materialalterung) zu beobachten. Über die Messung von Chemolumineszenzerscheinungen ist ebenfalls die Existenz von Stoffen nachweisbar (z.B. Ozon, Stickoxide u.a.).

Bei Untersuchungen der ultraschwachen Photonenstrahlung werden zum einen die Eigenemission sowie das Lichtspeicherverhalten einer Probe bestimmt.

Die Eigenemission (Spontanemission) ist die Strahlung, die ohne äußere Anregung und nach Abklingen aller Lichtspeichervorgänge bei entsprechender Dunkeladaptation an der Oberfläche des Meßobjektes bestimmt werden kann. Sie ist zeitlich nahezu statisch.

Für die Untersuchung des Lichtspeicherverhaltens wird die Probe definiert angeregt (z.B. durch Licht) und das Abklingverhalten der reemittierten Strahlung aufgenommen. Dies stellt einen hochdynamischen Prozeß dar und klingt bis auf die Werte der Eigenemission ab. Aus dem Verlauf dieser Abklingkurve kann auf das optische Speichervermögen, das in engem Zusammenhang mit den Stoffeigenschaften steht, geschlossen werden. Je nach Anregung und Eigenschaften der Meßprobe liegen die Anfangswerte um einige Zehnerpotenzen über den Zählraten der Eigenemission /7/.

• Untersuchungen organischer Materialien

Den nachfolgenden Ergebnissen liegen Untersuchungen an unterschiedlichen Meßorten im Bereich der Hände und Unterarme von 30 Probanden zugrunde. Die in Abbildung 2 dargestellte Meßkurve verdeutlicht einen typischen Signalverlauf für die Eigenemission.

Messung unterschiedlicher Hautareale Eigenemission des Menschen P06/1

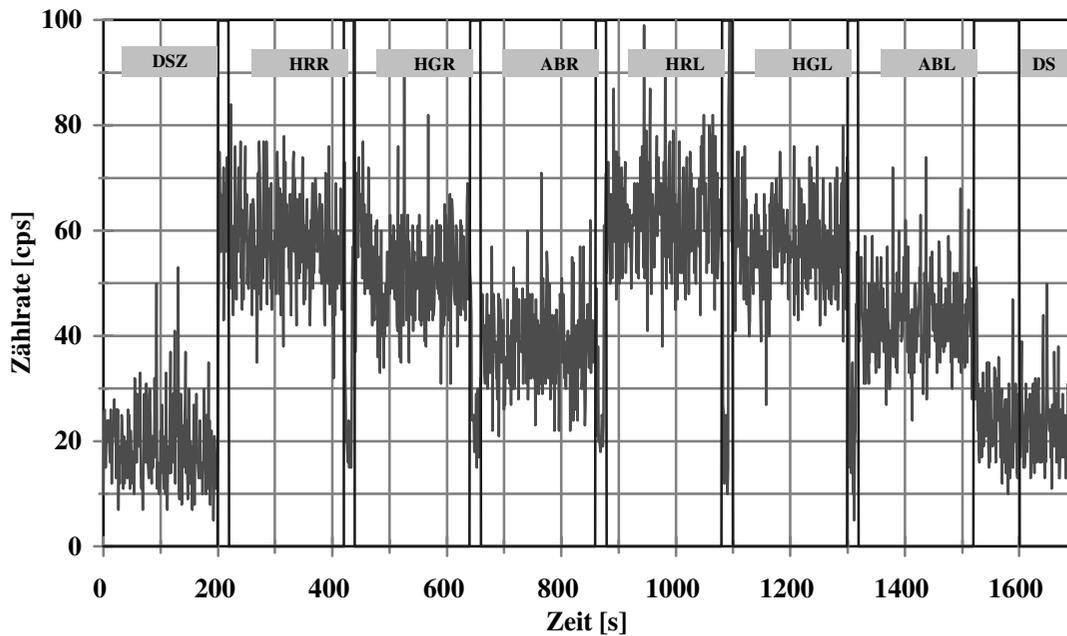


Abb. 2: Signalverlauf der Messung der Eigenemission an unterschiedlichen Meßorten der Hände und Unterarme eines Probanden²

Die Meßergebnisse wiesen inter- und intraindividuelle Schwankungsbereiche für die gemessenen Zählraten der Eigenemission für alle Meßorte. Es zeigte sich eine Ortsabhängigkeit und es deutete sich ein saisonaler Zusammenhang an. Darüber hinaus kommen auch andere Einflußfaktoren wie die Hautpigmentierung, das Alter, das Geschlecht u.a. in Betracht. Problematisch bei diesen Messungen sind Verunreinigungen der Hautoberflächen, die nur schwer abschätzbar sind.

Bei der Untersuchung gleicher, jedoch unterschiedlich behandelter Haarproben zeigten sich deutliche Unterschiede. In Abbildung 3 ist das Abklingverhalten für eine gebleichte und ungebleichte Haarprobe im Vergleich dargestellt. Weitere Messungen an Haaren weisen darauf hin, daß die stoffspezifischen Eigenschaften, wie der Reflexionsgrad die Messung mit beeinflussen.

• *Untersuchung anorganischer Substanzen*

Mit Hilfe des Meßsystems können ebenfalls Chemolumineszenzerscheinungen in Gasen nachgewiesen werden. Damit kann es zum Stoffnachweis genutzt werden. Ergebnisse der Messung von künstlichem und natürlichem Ozon sind in Abbildung 4 dargestellt.

²

DSZ	Dunkelsignal des Meßsystems bei vollständig geschlossenem SEV
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 SEV ohne Probe

Abklingkurve von Haarproben Anregung 20'' mit Halogenstrahler (S1)

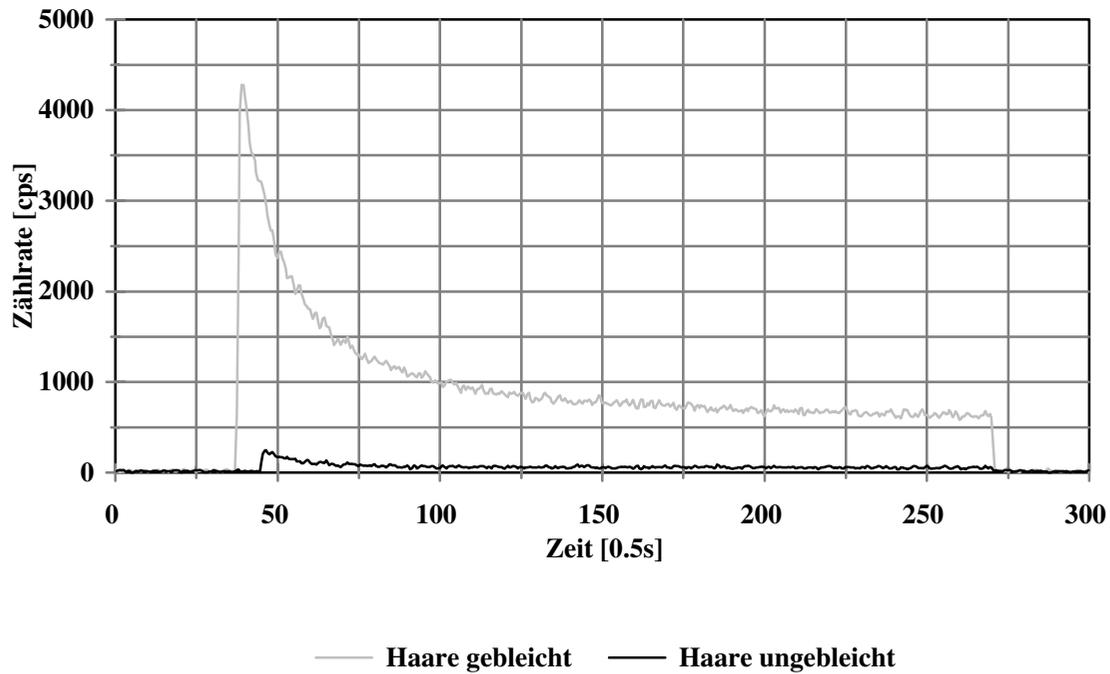


Abb. 3: Abklingkurven zweier gleicher, jedoch unterschiedlich behandelter Haarproben

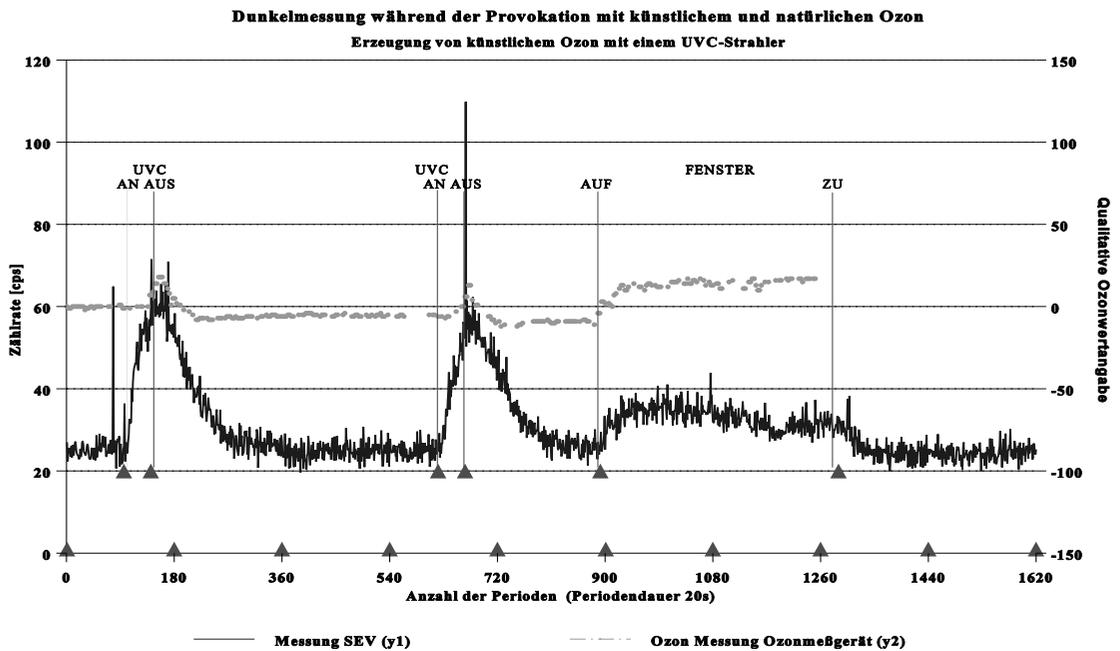


Abb. 4: Einfluß von Ozon auf das Dunkelsignal

5. Andere hochempfindliche Meßsensoren

Gegenwärtig werden auf dem internationalen Markt Sekundärelektronenverstärker sehr unterschiedlicher Bauformen, Kathodengrößen und -materialien angeboten. So ist es möglich, die Empfindlichkeit und die spektrale Selektivität entsprechend der zu untersuchenden Proben vielseitig anzupassen.

Mit Hilfe neuentwickelter Maschentyp-, Metallkanal-SEV's und Microchannel Plates ist es möglich, auch die örtliche Verteilung innerhalb eines Untersuchungsareals zu bestimmen.

6. Zusammenfassung

An den Beispielen der orientierenden Messungen konnte gezeigt werden, daß das Meßsystem eine hohe Empfindlichkeit besitzt und daß die Untersuchung organischer und anorganischer Materialien möglich ist. Aufgrund ihrer zerstörungsfreien Anwendung kann die Messung von Photonenstrahlung andere diagnostische Verfahren sehr gut ergänzen.

Einen besonderen Problemkreis stellt die spektrale Untersuchung der gemessenen ultraschwachen Photonenstrahlung dar. Übliche Filter- und Interferenzverfahren sind aufgrund der geringen Photonenströme nicht anwendbar.

Um eine Vergleichbarkeit der Meßsysteme zu erzielen ist es notwendig Strahlungsnormale für geringste Photonenflüsse zu entwickeln.

Hier muß nach neuen Lösungen gesucht werden.

Danksagung

Dem TMWFK danken wir für die Förderung des Forschungsvorhabens "Anwendung von bildauflösenden Sensoren zur Licht- und Strahlungsmessung".

Literatur- bzw. Quellenhinweise

- [1] Kiefer, J. [1977]: Ultraviolette Strahlung, Berlin: Walter de Gruyter Verlag, S 216-217
- [2] Gall, D. et al. [1998]: Measurement of low-level emission under lab conditions, in: Chang, J.; Fisch, J.; Popp, A.-P.: Biophotons, Dordrecht, Bosten, London: Kluwer Academic Publishers, S. 159-181
- [3] Fisch, J.; Bieske, K.; Truckenbrodt, H.; Hutschenreuther, L. [1998]: Anwendung von bildauflösenden Sensoren zur Licht- und Strahlungsmessung, Abschlußbericht TMWFK B 501-96054
- [4] Günther, S. [1998]: Aufbau, Systemuntersuchung und Optimierung von innovativen Meßsystemen zur Bestimmung von Photonenströmen kleinster Intensitäten, Diplomarbeit, TU Ilmenau
- [5] Bieske, K. [1998]: Anwendung der Messung ultraschwacher Photonenstrahlung, Bericht zum HSP III-Stipendium, TU Ilmenau
- [6] Popp, F. et al. [1992]: Recent Advances in Biophoton Research and its Applications, Singapore, New Jersey, London, Hong Kong: World Scientific Publihing Co. Pte. Ltd., S. V-VI
- [7] Popp, F. [1991]: Europäisches Patent, Patentblatt 91/23, EP 0 430 150 A2