

# Technologische Aspekte der spektralen Anpassung von orts aufgelösten Strahlungsempfängern

Udo Krüger

*Zusammenfassung:* Die  $V(\lambda)$ -Anpassung von orts aufgelösten Strahlungsempfängern (z.B. CCD-Matrizen, CMOS-Sensoren) mit Vollfiltern ist eine wesentliche Voraussetzung für die orts aufgelöste Leuchtdichtemessung. Im Folgenden werden Verfahren erläutert, mit deren Hilfe die spektrale Anpassung von Sensoren berechnet und bewertet werden kann. Dabei stehen Fragen der Fehlerabschätzung für die Einzelgrößen, die entstehenden Messfehler bei konkreten Messungen, die Berechnung des  $f_1'$ -Kennwertes, der für die Beurteilung der  $V(\lambda)$ -Anpassung verwendet wird, sowie eine möglichst einfache Fertigung im Vordergrund.

*Schlagworte:* CCD, CMOS,  $V(\lambda)$ -Anpassung, spektrale Anpassung, Optimierung

## I. EINLEITUNG

Ausgehend von der Erfassung der relativen spektralen Empfindlichkeit von Strahlungsempfängern, hier am Beispiel der CCD-Matrix Sony ICX039DLA [13] dargestellt, werden im Folgenden Möglichkeiten der spektralen Anpassung erläutert. Die Anpassung hat das Ziel, eine bestimmte spektrale Empfindlichkeit (Zielfunktion) für die orts aufgelösten Bilddaten zu erreichen. Der Hauptanwendungsfall liegt bei der Anpassung auf die relative spektrale Hellempfindlichkeit des menschlichen Auges  $V(\lambda)$ <sup>1</sup> für den Einsatz in der orts aufgelösten Leuchtdichtemessung. Es sind aber auch andere Zielfunktionen denkbar. Hierzu zählen unter anderem:

- $V'(\lambda)$  relative spektrale Hellempfindlichkeit des menschlichen Auges – skotopischer Bereich (Adaptationsleuchtdichte  $< 0,01 \text{ cd/m}^2$ ), [DIN5031 Teil 2]
- Anpassungen an Normspektralwerte  $\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$  des energiegelichen Spektrums [DIN5033 Teil 2]
- Anpassung an verschiedene biologische Wirkungskurven
- Korrektur der RGB-Filter auf einer 1-Chip-Farb-CCD-Matrix zur Verbesserung der Matrizierung

Die  $V(\lambda)$ -Anpassung wird in den folgenden Ausführungen o.B.d.A. als Beispiel herangezogen. Es werden wichtige Schritte für die Berechnung, Optimierung und die Erfassung der notwendigen Messwerte beschrieben. Die Fehler der einzelnen Größen werden mit dem Ziel abgeschätzt, die Genauigkeit und Reproduzierbarkeit der Anpassung, d.h. bestimmter Gütefunktionen (z.B.  $f_1'$ -Kennwert) oder Messfehler, unter bestimmten Mess- und Anwendungsbedingungen zu bestimmen.

## II. SPEKTRALE ANPASSUNG

### A. Möglichkeiten der spektralen Anpassung

Die Anpassung eines Empfängers mit der relativen spektralen Empfindlichkeit  $s(\lambda)$  an eine Zielfunktion  $s_{Ziel}(\lambda)$  kann auf vielfältige Art und Weise erfolgen [5]. Es sind folgende Verfahren üblich:

TechnoTeam Bildverarbeitung GmbH, Ehrenbergstraße 11, D-98693 Ilmenau, udo.krueger@technoteam.de

<sup>1</sup>photopischer Bereich (Adaptationsleuchtdichte  $> 30 \text{ cd/m}^2$ ) und 2°-Gesichtsfeld [DIN5031 Teil 3], kurz  $V(\lambda)$ -Anpassung genannt.

- **Vollfilterung** durch Kombination eines oder mehrerer Filtergläser über die gesamte Empfängerfläche
- **Partialfilterung** durch Kombination verschiedener Filtergläser, die nur vor bestimmten Teilen des Empfängers angeordnet werden [2]
- **Spektralverfahren** durch Aufspaltung des Spektrums mit Hilfe eines Monochromators und folgender geometrischer Erfassung durch einen linearen orts auflösenden Empfänger in der Ebene des entstehenden Spektrums. Die gewünschte spektrale Bewertung wird durch Korrekturfaktoren in der Auswertesoftware eingestellt.
- **Kombination der Signale verschieden empfindlicher Empfänger** zu einem Messwert. Die Einzelwerte können dabei optisch, zeitlich, örtlich oder in einer kombinierten Version getrennt erfasst werden [12].

### B. Anpassung durch Vollfilter

Steht die Erfassung der Bilddaten mit einer Aufnahme und einem orts auflösendem Empfänger (CCD/CMOS-Matrix) im Vordergrund so ist für die orts aufgelöste Messung nur die Vollfilterung geeignet. Weiterhin kann die Anpassung durch Kombination örtlich eng benachbarter verschieden empfindlicher Empfänger realisiert werden, wie dies z.B. bei 1-Chip-Farb-CCD-Matrizen der Fall ist [12].

Zur Realisierung der Vollfilterung stehen verschiedene Möglichkeiten zur Verfügung:

- Filter aus farbigen Gläsern
- Küvetten mit entsprechend berechneten Lösungen
- Folien (Gelatinefilter)
- Interferenzfilter

Im Folgenden sollen nur Filter aus farbigen Gläsern betrachtet werden, da die Technologie zu deren Bearbeitung beherrschbar ist.

Versuche, ausreichend genaue Interferenzfilter zu realisieren, sind bisher seitens der Hersteller an den großen Toleranzen bei der Realisierung der vorgegebenen Transmissionskurven der Filter gescheitert.

Küvetten sind in der Handhabung für die Integration in eine Kamera nicht geeignet. Gelatinefilter sind auch mit entsprechender Lackierung nicht ausreichend haltbar.

### C. $V(\lambda)$ -Anpassung

Bei der spektralen Anpassung einer Kamera für den Einsatz als Leuchtdichtemessgerät spielt die  $V(\lambda)$ -Anpassung eine zentrale Rolle. Als Kriterium für die spektrale Anpassung ist der

Kennwert  $f'_1$  von Bedeutung.

$$f'_1 = \frac{\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} |s_{rel}^*(\lambda) - V(\lambda)| d\lambda}{\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} V(\lambda) d\lambda} \cdot 100\% \quad (1)$$

$f'_1$ : Kennwert für die spektrale Anpassung an die  $V(\lambda)$ -Funktion [DIN5032 Teil 6]

$s_{rel}^*(\lambda)$ : normierte relative spektrale Empfindlichkeit [DIN5032 Teil 6]

Der  $f'_1$ -Kennwert ist als Gütefunktion zur Einteilung von Leuchtdichtemessgeräten und damit für eine grobe Abschätzung der zu erwartenden Messfehler durch unvollständige Anpassung an die  $V(\lambda)$ -Funktion entwickelt worden [4][6]. Die Motivation für einen derartigen Kennwert bestand darin, eine Größe zu finden, die den zu erwartenden Messfehler für verschiedene häufig verwendete Lichtarten recht gut beschreibt und dennoch unabhängig von einer konkreten Lichtart ist. Für verschiedene Lichtarten und zahlreiche unterschiedlich angepasste Photoelemente wurden die Messfehler und einige mögliche Fehlerfunktionen/Kennwerte verglichen [4]. Dabei stellte sich für den  $f'_1$ -Kennwert die beste Korrelation heraus. Für gut angepasste Photoelemente wurde jedoch festgestellt, dass die Verwendung des Kennwertes als Fehler tendenziell zu zu großen Fehlern führt.

Für die Berechnungen müssen die Integrale<sup>2</sup> aus Gleichung 1 über Summen mit  $N$  hinreichend kleinen Intervallen der Größe  $\Delta\lambda$  approximiert werden. Aus den Gesetzen der Fehlerrechnung erhält man für den wahrscheinlichen Fehler  $\sigma_{f'_1}$  von  $f'_1$  folgenden Ausdruck<sup>3</sup>:

$$\sigma_{f'_1} = \frac{100\% \cdot \Delta\lambda}{\sum_{i=0}^{NDIN-1} V(\lambda_i) \Delta\lambda_{DIN}} \cdot \sqrt{\left[ \sigma_{s_{rel}^*}^2 \right]} \quad (2)$$

Unter Umständen ist es hier besser  $\left[ \sigma_{s_{rel}^*} \right]$  als Abschätzung für den maximalen Fehler zu verwenden, da  $\sqrt{\left[ \sigma_{s_{rel}^*}^2 \right]}$  durch die Betragsbildung tendenziell zu klein wird.

Die wahrscheinlichen Fehler des  $f'_1$ -Kennwertes, die sich aus den Messunsicherheiten der Einzelgrößen ergeben (Gleichung 2), werden nicht in Prozent vom Messwert sondern als absolute Fehler angegeben. Um Verwechslungen mit prozentualen Fehlern zu vermeiden, wird die Bezeichnung "wahrscheinliche Variation" gewählt.

Die Abschätzung des wahrscheinlichen Fehlers des  $f'_1$ -Kennwertes erfolgt mit dem Ziel, die Güte der Angabe des Kennwertes abschätzen zu können. In den weiteren Ausführungen wird gezeigt, dass die Messfehler bei der Bestimmung der einzelnen Größen unterschiedliche Einflüsse auf den  $f'_1$ -Kennwert haben. Diese Einflüsse sind abzuschätzen und bei der

<sup>2</sup>In der Norm wird  $\lambda_{\min} = 0$  und  $\lambda_{\max} = \infty$  gefordert. Im Folgenden wird von einer Beschränkung auf den Bereich  $\lambda_{\min} = 380nm$  bis  $\lambda_{\max} = 780nm$  ausgegangen mit der Maßgabe, dass die außerhalb liegenden Wellenlängen ausreichend bedämpft werden.

<sup>3</sup>Verwendung der Gaußschen Summenschreibweise  $[x] = \sum_i x_i$ .

Messung der Größen bzw. bei der Produktionsplanung zu berücksichtigen.

Für die relative spektrale Empfindlichkeit  $s(\lambda)$  des Gesamtsystems kann folgende Gleichung angegeben werden:

$$s(\lambda) = s_{Sensor}(\lambda) \cdot \tau_F(\lambda) \cdot \tau_{Obj}(\lambda) \quad (3)$$

$s_{Sensor}(\lambda)$ : relative spektrale Empfindlichkeit des Sensors

$\tau_F(\lambda)$ : spektrale Transmission des  $V(\lambda)$ -Filters

$\tau_{Obj}(\lambda)$ : spektrale Transmission des Objektivs

Für den relativen Fehler  $\tilde{\sigma}_s^2(\lambda)$  von  $s(\lambda)$  lässt sich dann schreiben:

$$\tilde{\sigma}_s^2 = \tilde{\sigma}_{s_{Sensor}}^2 + \tilde{\sigma}_{\tau_F}^2 + \tilde{\sigma}_{\tau_{Obj}}^2 \quad (4)$$

Die Größen  $s_{Sensor}(\lambda)$ ,  $\tau_F(\lambda)$  und  $\tau_{Obj}(\lambda)$  werden durch Referenzmessungen der Art  $z = m_Z/m_N$  ( $z$ ...Zielgröße,  $m_Z$ ...Messung mit Objekt und  $m_N$ ...Messung ohne Objekt) ermittelt.

Sollen die Fehler eines berechneten  $V(\lambda)$ -Filters vor der Fertigung analysiert werden, sind komplexe Analysen notwendig. Unter der Annahme relativer Fehler von 1% für die Basiswerte erhält man die folgenden Daten für die Fehlersensibilität bei der Berechnung des  $f'_1$ -Kennwertes (Datenbasis Beispielfilter TT05, ICX039DLA):

Sensor (CCD-Matrix)	0.16%
Objektivdaten	0.34%
Filterdaten	0.10%

Die Tabelle ist so zu verstehen, dass sich 1% Messunsicherheit der Daten des Sensors (CCD-Matrix) mit 0.16% Unsicherheit auf den  $f'_1$ -Kennwert auswirken, wenn alle anderen Fehler unberücksichtigt bleiben<sup>4</sup>. Mit der Annahme unabhängiger Fehler ergibt sich für den obigen Fall eine wahrscheinliche Gesamtunsicherheit von 0.4% für den  $f'_1$ -Kennwert. Der systematische Fehler bei der Vermessung des Sensors, der besonders durch die Referenzdiode, Offsetprobleme und Streulicht in die Berechnung eingeht, wurde nicht berücksichtigt.

### III. BERECHNUNG VON VOLLFILTERN

Aus dem Energieerhaltungssatz folgt<sup>5</sup>:

$$\rho(\lambda) + \tau(\lambda) + \alpha(\lambda) = 1 \quad (5)$$

$\rho(\lambda)$ : spektraler Reflexionsgrad

$\tau(\lambda)$ : spektraler Transmissionsgrad

$\alpha(\lambda)$ : spektraler Absorptionsgrad

Zur Variation des spektralen Transmissionsgrades kann man den spektralen Absorptionsgrad "gestalten" (Filter aus farbigen Gläsern) oder den spektralen Reflexionsgrad manipulieren (Metallinterferenzfilter). Im Weiteren wird nur auf die Realisierung durch Glasfilter eingegangen, wobei das Ziel darin besteht, aus verschiedenen kommerziell erhältlichen Gläsern [8][9] ein Filter zu fertigen, das die gewünschte spektrale Anpassung realisiert. Dazu sollen mehrere Gläser in verschiedenen dicken Schichten zu einem Filter zusammengekittet werden.

<sup>4</sup>Die unterschiedlichen Werte für die einzelnen Komponenten ergeben sich durch die konkrete Datenlage in den spektralen Verläufen.

<sup>5</sup>Ohne Berücksichtigung von Effekten wie Fluoreszenz u.ä..

## A. Dickenumrechnung

Für die Berechnung der Transmission bei einer Solldicke  $d$  werden die Daten von vermessenen Probeplättchen der ausgewählten Gläser verwendet. Die Probeplättchen müssen angefertigt werden, um die Daten der Schmelze genau zu ermitteln und Probleme bei der Filterfertigung aus den Rohplatten (Glasgüte (Blasen), ausreichende Härte,...) rechtzeitig zu erkennen. Verschiedene Schmelzen einer Glassorte variieren auf Grund veränderter Rohstoffe bzw. Herstellungsbedingungen [8][7].

Die Transmissionsdaten der Probeplättchen  $\tau_0(i, j, \lambda)$ , wobei  $i$  die Glasart und  $j$  die Nummer des Probeplättchens repräsentiert, müssen von der Dicke der Probeplättchen  $d_0(i, j)$  auf die benötigte Dicke umgerechnet werden (Lambertsches Gesetz, 1760).

$$\tau_i(\lambda) = \tau_{i0}(\lambda)^{d/d_0} \quad (6)$$

Der wahrscheinliche Fehler dieser Umrechnung kann nach der Substitution  $\alpha = d/d_0$  folgendermaßen berechnet werden:

$$\tilde{\sigma}_{\tau_i}^2 = \alpha^2 \cdot \left( \tilde{\sigma}_{\tau_0(i, j_i)}^2 + (\ln \tau_0(i, j_i))^2 \cdot \left( \tilde{\sigma}_{d_i}^2 + \tilde{\sigma}_{d_0(i, j_i)}^2 \right) \right) \quad (7)$$

$j_i$ : ausgewählte Nummer des Probeplättchens (für die Approximation der Transmission bei der Solldicke)

$\tilde{\sigma}_{\tau_0(i, j_i)}$ : relativer Fehler bei der Vermessung der Transmission der Probeplättchen

$\tilde{\sigma}_{d_i}$ : zu erwartender relativer Dickenfehler bei der Fertigung der Filter

$\tilde{\sigma}_{d_0(i, j_i)}$ : relativer Dickenfehler bei der Vermessung der Probeplättchen

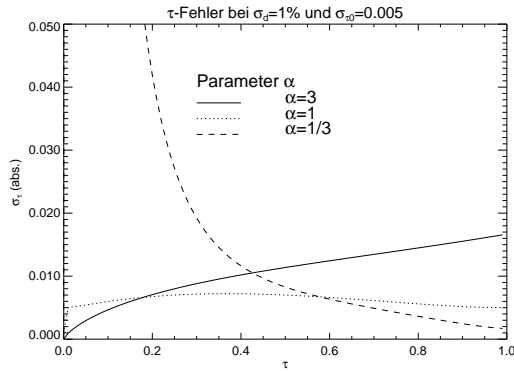


Abb. 1. Absoluter Fehler  $\sigma_{\tau}$  bei der Extrapolation der Transmission  $\tau$  in Abhängigkeit von  $\tau$  mit dem Parameter  $\alpha$ .

In Abbildung 1 wird der absolute Fehler  $\sigma_{\tau}$  in Abhängigkeit von  $\tau$  mit dem Parameter  $\alpha$  dargestellt. Für ein gegebenes  $\tau$  auf der x-Achse wird mit Hilfe des Parameters  $\alpha$  das notwendige  $\tau_0$  berechnet und dann der Fehler abgeschätzt. Die Grafik zeigt deutlich, dass man von  $\alpha = 1$  nicht sehr weit abweichen darf, um einen gleichmäßig kleinen Fehler  $\sigma_{\tau}$  zu erreichen. Entsprechend engmaschig müssen Probeplättchen unterschiedlicher Dicke angefertigt werden. Werden die Probeplättchen in verschiedenen Dicken  $d_0(i, j)$  angefertigt, so ergeben sich zwei Probleme:

1. Auswahl der Dicken, für die die Probeplättchen hergestellt werden sollen

2. Berechnung der Transmission bei Dicke  $d$  aus den Daten der Probeplättchen bei Dicke  $d_0(i, j)$  mit möglichst kleinem Fehler

Um diese Fragen zu beantworten, muss der Einfluss der Fehler bei der Extrapolation über den gesamten Wellenlängenbereich berücksichtigt werden. Hier treten in der Regel fast alle Transmissionsgrade auf, was eine einfache Bestimmung der notwendigen  $\alpha$ -Werte für die Probeplättchen erheblich erschwert.

Daher muss über die bisher eingeführten Gleichungen direkt der Schluss zur Streuung des  $f_1'$ -Kennwertes geführt werden.

Analysiert man die Gleichungen 2, 3 und 4 kann man erkennen, dass für  $\sigma_{f_1'}^2$  die Summe der absoluten Fehler  $[\sigma_{s_{rel}}^2]$  (über den gesamten Wellenlängenbereich) eine entscheidende Rolle spielt. Für die hier auszuführenden Betrachtungen wird etwas vereinfachend geschlussfolgert, dass  $\sigma_{f_1'}^2$  im Wesentlichen von  $[\sigma_s^2]$  abhängt.

Betrachtet man die Messung an einem einzelnen Filterglas (Nummer  $k$ ), so kann man die Gleichungen 3 und 4 folgendermaßen umschreiben.

$$\sigma_{f_1'}^2 \sim \left[ \sum_{k=0}^{N_F-1} \left( \underbrace{\sigma_k^2 \cdot s_{Sensor}(\lambda) \cdot \tau_{Obj}(\lambda) \cdot \prod_{i=0, i \neq k}^{N_F-1} \tau_i(\lambda)}_{\bar{s}_k(\lambda) = s_{Ziel}(\lambda) / \tau_k(\lambda)} \right) \right] \quad (8)$$

$$\sigma_{f_1'}^2 \sim \sum_{k=0}^{N_F-1} [\sigma_k^2 \cdot \bar{s}_k(\lambda)] \quad (9)$$

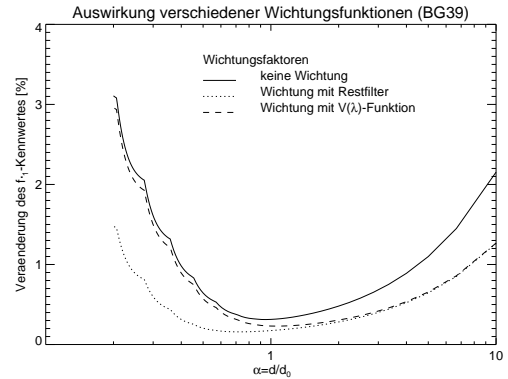


Abb. 2. Auswirkungen auf den  $f_1'$ -Wert durch Transmissionsumrechnungen (Filterglas BG39)

Der absolute Fehler einer Transmissionsmessung des Filters  $k$  bei einer Wellenlänge  $\lambda$  geht gewichtet mit der Restfilterfunktion (inklusive Matrixempfindlichkeit und Transmission des Objektivs) in den Fehler der  $f_1'$ -Bestimmung ein. Es ist in Abbildung 2 deutlich zu erkennen, dass mit Einbeziehung der Wichtung durch das Restfilter im Bereich  $\alpha \in (1/3, 3)$  sehr gut gearbeitet werden kann. Die Fehler unterscheiden sich in diesem Bereich nicht wesentlich, sodass für die Auswahl der Filterberechnung das Probeplättchen verwendet werden kann, für das  $\alpha$  möglichst nahe bei 1 liegt (im Sinne der Abbildungen). Als Abstandsmaß<sup>6</sup> wird daher

$$d_{\alpha} = |\ln \alpha| \quad (10)$$

<sup>6</sup>Dieses Abstandsmaß ist nicht im Sinne einer Metrik zu verstehen.

verwendet, sodass für das auszuwählende  $\alpha_{i,j}$  bei vorliegender Dicke  $d(i)$  gilt:

$$\alpha_{i,j} = \min_j \left| \ln \frac{d(i)}{d_0(i,j)} \right|$$

Für die anderen Gläser des Beispielfilters TT Typ 5 erhält man ähnliche Abhängigkeiten.

### B. Einfluss von Inzidenzwinkeln

Im Unterschied zu Einzelsensoren spielt bei der Anpassung der Matrizen der Winkel, in dem das Licht auf das Anpassungsfilter trifft, eine nicht unwesentliche Rolle. Der Winkel ist dabei sowohl von der Position des Bildpunktes auf der Matrix als auch vom verwendeten Objektiv (Brennweite und Bauart) abhängig.

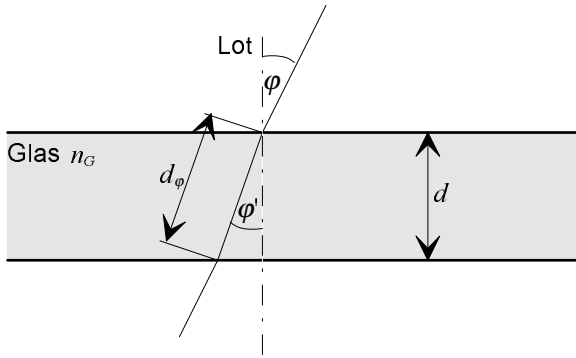


Abb. 3. Verhältnisse bei der Brechung eines Lichtstrahls an einer Glasplatte (ohne Reflexionsanteile)

Mit Hilfe des Brechungsgesetzes und Gleichung 6 erhält man folgende Beziehungen (Abbildung 3):

$$d_\varphi = \frac{d}{\cos \varphi'} = \frac{n_G \cdot d}{\sqrt{n_G^2 - \sin^2 \varphi}} \quad (11)$$

$$\text{mit } \sin \varphi' = \frac{\sin \varphi}{n_G}$$

$$\tau_\varphi = \tau_0 / \sqrt{n_G^2 - \sin^2 \varphi} \quad (12)$$

Man kann erkennen, dass die Änderung der spektralen Transmission bei einer Winkeländerung, die durch Gleichung 12 beschrieben wird, nicht von der Filterdicke abhängig ist. Die Änderung der effektiven Dicke eines Filterglases in Abhängigkeit des Inzidenzwinkels kann mit Hilfe der Abbildung 4 abgeschätzt werden. Bei schrägem Lichteinfall kommt noch hinzu, dass die Reflexionsverluste geringfügig vom Einfallswinkel  $\varphi$  abhängig sind.

Ein berechnetes "optimales" Filter ( $\tau_{opt}$ ) lässt sich auf einen gewünschten Winkel umrechnen. Wird der Winkel, für den das "optimale" Filter realisiert werden soll, mit  $\varphi_0$  bezeichnet, so ergeben sich folgende Beziehungen:

$$\tau_{\varphi_0} = \tau_{opt} \sqrt{n_G^2 - \sin^2 \varphi_0} / n_G \quad (13)$$

$$\tau_\varphi = \tau_{\varphi_0} \frac{n_G / \sqrt{n_G^2 - \sin^2 \varphi}}{n_G / \sqrt{n_G^2 - \sin^2 \varphi_0}}$$

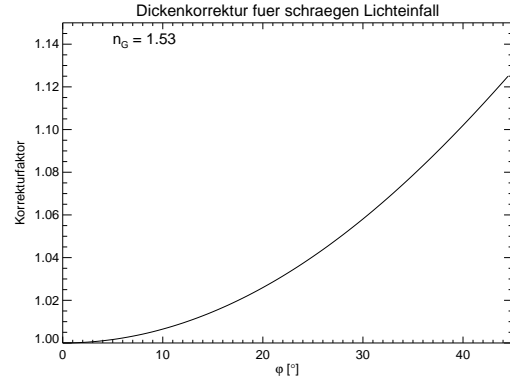


Abb. 4. Faktor für die Dickenkorrektur bei verschiedenen Winkeln  $\varphi$ . (dargestellt wurde der Exponent der Gleichung 12)

Wurde bei der Optimierung ein ausreichend gutes lokales Minimum gefunden, wird der resultierende  $f'_1$ -Wert, der sich unter Berücksichtigung der Gleichung 13 für verschiedene Winkel  $\varphi$  ergibt, bei  $\varphi_0$  ein Minimum aufweisen und für kleinere und größere Winkel ansteigen.  $\varphi_0$  ist so zu wählen, dass für den erwarteten Winkelbereich insgesamt ein kleiner  $f'_1$ -Wert entsteht. Über entsprechende Nebenbedingungen bei der Optimierung der Filterdicken kann der Anstieg von  $f'_1$  bei Winkelveränderung stark beeinflusst werden.

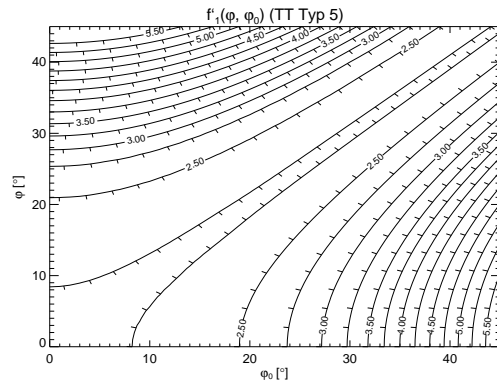


Abb. 5. Auswirkungen der Winkelveränderung auf den  $f'_1$ -Kennwert

Die Abbildung 5 zeigt für eine Matrix vom Typ Sony ICX039DLA (mit Tevidon 1.8/16) und der Anpassung über ein dreischichtiges  $V(\lambda)$ -Filter (TT Typ 5) die Auswirkungen einer Winkelveränderung. Vor der Fertigung muss der mittlere zu erwartende Winkel bzw. eine Verteilung des Winkels ermittelt werden, sodass  $\varphi_0$  entsprechend gewählt werden kann. Der Reflexionsfaktor kann für Inzidenzwinkel kleiner als 30 bis 40° im Falle der nicht polarisierten Betrachtung als konstant angesehen werden kann.

Die realen Verhältnisse wurden durch diese einfache Betrachtung nur angenähert wiedergegeben. Eine ausführlichere Betrachtung, die auch die entsprechenden Raumwinkelprojektionen mit einbezieht, ist in [14] Kapitel 7 zu finden. An den hier dargestellten Verhältnissen ändert dies jedoch nichts.

### C. Weitere Einflussgrößen

Für die spektrale Anpassung sind neben der Sensorempfindlichkeit, die auch für Matrizen einer Charge stark variieren kann, noch die Transmissionswerte der Objektive und ggf. eingesetzter Neutralgraufilter zu bestimmen.

#### C.1 Objektive

Die Transmissionsdaten eines Objektivs werden mit zwei antiparallel im Strahlengang angebrachten Objektiven gleichen Types ermittelt. Es wird hier nur die relative spektrale Transmission benötigt, sodass eine Normierung des Maximalwertes auf eins erfolgt. Die Transmissionsdaten der verwendeten Objektive weisen eine erhebliche typabhängige Streuung auf. Bei der Berechnung der Filter sind die Transmissionsverläufe aller zu verwendenden Objektive in die Optimierung mit einzubeziehen.

#### C.2 Neutralgraufilter

Neutralgraufilter werden zur Anpassung des Messbereiches der Kamera an die Anforderungen der Applikation eingesetzt. Diese Anpassung ist bei besonders hohen Leuchtdichten (z.B. Scheinwerfervermessung) und bei der Messung von moduliertem Licht notwendig. Der relative Fehler der Messwerte, der durch den Einfluss von Smear und Blooming bei CCD-Matrizen entsteht, wird mit steigender Bestrahlungsstärke auf der CCD-Matrix immer größer. Dies kann durch Graufilter wirksam verhindert werden. Neutralgraufilter sollten einen konstanten spektralen Transmissionsgrad im Bereich zwischen 380 und 780nm aufweisen, um keine Veränderung der spektralen Anpassung zu verursachen. Diese Forderung wird nur näherungsweise erfüllt. Im praktischen Einsatz müssen die Graufilter spektral vermessen werden, und es müssen die spektralen Korrekturfaktoren berechnet werden, die dem Nutzer eine Korrektur seiner Messwerte ermöglichen.

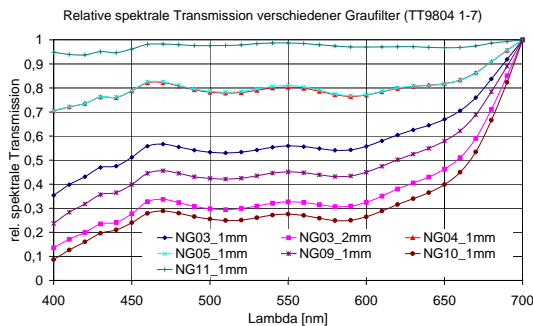


Abb. 6. Relative spektrale Transmission verschiedener Neutralgraufilter der Fa. Schott

Der Abbildung 6 ist zu entnehmen, dass die relative spektrale Transmission bei verschiedenen Neutralgraufiltern teilweise grobe Abweichungen in der Anpassung verursacht. Für ein verwendetes 25mm Objektiv ergibt sich z.B. ohne Neutralgraufilter ein  $f'_1$ -Kennwert von 2.8% und mit dem Filterglas NG10 (1mm,  $\tau = 0.5\%$ ) ein  $f'_1$ -Kennwert von 10.3%. Diese Art der Anpassung des Leuchtdichtebereiches darf nur mit besonders aus-

gewählten Filtern oder einer entsprechend für diese Filter gerechneten bzw. korrigierten Anpassung erfolgen.

#### C.3 Weitere Transmissionsverläufe

Zur Inbetriebnahme und in einigen Einsatzfällen (Korrektur der 1-Chip-CCD-Farbmatrizen) ist die Transmission von Infrarot-Sperrfiltern zu bestimmen und zu berücksichtigen, insbesondere wenn es sich um einfache Filter auf Basis dielektrischer Schichten (Interferenzfilter) handelt. Weiterhin müssen die spektralen Einflüsse der Schutzfolien auf den Matrizen (zum Schutz vor Staub und leichten mechanischen Einwirkungen (Kratzern)) korrigiert werden, da diese erst kurz vor der Auslieferung der kalibrierten Kameras entfernt werden und daher bei der Berechnung der Filter mit berücksichtigt werden müssen.

## IV. OPTIMIERUNG

Ein Vollfilter wird aus  $N_F$ -Schichten der Dicke  $d_i$  verschiedener Gläser, die mit Hilfe einer sehr dünnen Kittschicht zusammengefügt werden, hergestellt. Die Kittschicht hat dabei keinen Einfluss auf die relative spektrale Transmission.

Zuerst besteht die Aufgabe darin, für den benötigten spektralen Transmissionsgrad<sup>7</sup>  $\tau(\lambda)$ , der sich aus der Gleichung 3 mit

$$\tau_F(\lambda) = k \cdot \frac{s_{Ziel}(\lambda)}{s_{Sensor}(\lambda) \cdot \tau_{Obj}(\lambda)} \quad (14)$$

herleiten lässt, eine geeignete Glas- und Dickenkombination zu finden. Das Ziel der spektralen Anpassung ist in diesem Fall die  $V(\lambda)$ -Kurve ( $s_{Ziel}(\lambda) = V(\lambda)$ ).

Die Gesamttransmission des Filters und dessen Fehler berechnen sich nach den Gleichungen:

$$\tau_F(\lambda) = \prod_{i=0}^{N_F-1} \tau_i(\lambda) \quad (15)$$

$$\tilde{\sigma}_\tau^2(\lambda) = \sum_{i=0}^{N_F-1} \tilde{\sigma}_{\tau_i}^2(\lambda) \quad (16)$$

$\tau_i(\lambda)$ : innerer spektraler Transmissionsgrad der Glassorte  $i$  bei der Solldicke  $d_i$

#### A. Nebenbedingungen

Das Ziel der Filterberechnung ist es, eine geeignete Kombination von Farbgläsern zu finden, die in bestimmten Dicken eingesetzt einen Transmissionsgrad aufweisen, der die Gleichung 14 möglichst gut erfüllt.

Bei der Wahl der Glassorten und -dicken sind bestimmte Randbedingungen zu beachten:

- Die Anzahl der Filterschichten ( $N_F$ ) sollte klein sein (3 – 4). Diese Forderung ergibt sich aus einer möglichst einfachen Filterfertigung und der Minimierungsforderung von Gleichung 16, die sich mit kleinerem  $N_F$  einfacher erfüllen lässt.
- Die Gesamtdicke des Filters [ $d$ ] sollte einen vom Einsatzfall abhängigen Wert nicht überschreiten (1,5 bis 2mm).
- Je nach eingesetzter Fertigungstechnologie sollte eine Einzelschicht nicht dünner als 50 – 100 $\mu$ m sein.

<sup>7</sup>Alle weiteren Rechnungen erfolgen mit dem inneren spektralen Transmissionsgrad.

- Die absolute Transmission  $\tau_a(\lambda)$  sollte ein möglichst großes Maximum aufweisen ( $> 0.3$ ), um die Systemempfindlichkeit nicht unnötig zu reduzieren.

### A.1 Auswahl der Gläser

Aus dem großen Angebot an Farbgläsern (z.B. [8], [9], [1]) wurden folgende Gläser auf Grund der jeweiligen Katalogangaben der Hersteller zur Anfertigung der Probegläser ausgewählt (Bezeichnungen nach Schott-Katalog):

Blaugläser	BG18, BG39
Orangegläser	OG520, OG530, OG550
Braunes Farbtonglas	FG13

Zur Auswahl an geeigneten Gläsern siehe auch [3] und [14]. Mit diesen Gläsern sollte versucht werden, die Filterzielfunktion zu approximieren. Dabei wird mit den Blaugläsern der Kurvenverlauf im langwelligen Bereich modelliert, und mit einer Kombination aus FG13 und einem oder zwei Orangegläsern wird die kurzwellige Anpassung vorgenommen.

In der Literatur [11][10] werden auch Filter mit Bandpasscharakteristik vorgestellt, die als Grundlage für die spektrale Anpassung besser geeignet wären als eine Kombination aus Langpass- (Orangegläser, Braunes Farbtonglas) und Kurzpassfiltern (Blaugläser). Die Filter mit Bandpasscharakteristik sind aber nicht kommerziell bzw. nicht in der entsprechend benötigten Glasgüte erhältlich, sodass die vorgestellte Auswahl an Gläsern nicht erweitert werden kann. Allgemein muss leider ein Trend zu einer immer kleiner werdenden Auswahl an Gläsern festgestellt werden. Dies macht sich insbesondere beim Filterdesign für die spektrale Anpassung an die Normspektralwerte sehr erschwerend bemerkbar.

Die spektralen Transmissionsgrade in den Katalogen der Hersteller sind nur grobe Richtwerte, die nicht für Optimierungen herangezogen werden, da die Schichtdicke der Angaben bei 2 bis 3mm liegt und Transmissionsangaben  $< 10^{-5}$  nicht mehr aufgelöst werden [8]. In diesem Bereich liegt aber die Anwendung der Orangegläser, die in sehr dünnen Schichtdicken sehr gut zur Korrektur des FG13 Verlaufes eingesetzt werden können.

### B. Algorithmus

Mit Hilfe eines Optimierungsalgorithmusses, der die Ausführungen aus IV-A berücksichtigt und die Daten der Kamera-, Objektiv- und Probeplättchenmessungen verarbeitet, wird für drei- bzw. vierschichtige Filter durch Kombination von verschiedenen Gläsern und deren Dicken ein stabiles Minimum für das gewählte Gütekriterium (z.B.  $f'_1$ ) gesucht. Unter stabil ist in diesem Zusammenhang zu verstehen, dass sich eine Änderung des Einfallswinkels bzw. eine Abweichung von der vorgegebenen Schichtdicke bei der Fertigung eines Filters<sup>8</sup> nur begrenzt auf die spektrale Anpassung auswirkt. D.h. das lokale Optimum sollte einen möglichst flachen Fehlerverlauf aufweisen. Weiterhin wird zur Beurteilung des Minimums auf der Basis der Fehlerrechnung eine Abschätzung für den wahrscheinlichen Fehler des  $f'_1$ -Kennwertes ermittelt (Gleichung 2).

<sup>8</sup>Im Abschnitt III-B wurde deutlich, dass diese beiden Forderungen äquivalent sind.

### B.1 Allgemeine Vorgehensweise

Der Raum der realisierbaren Filter kann folgendermaßen beschrieben werden (Beispiel für ein dreischichtiges Filter):

$$\vec{d} = \sum_{i=1}^{N_F} a_i \vec{e}_i \quad \text{mit} \quad a_i \in \{r_{i0}, \dots, r_{iE} - 1\}$$

$$\vec{e}_0 = (\Delta d_0, 0, 0)^T, \vec{e}_1 = (0, \Delta d_1, 0)^T, \vec{e}_2 = (0, 0, \Delta d_2)^T$$

wobei mit den Rasterdaten  $r_{i0}$  und  $r_{iE}$  in Verbindung mit der Auflösung der Rasterung  $\Delta d_i$  die Grenzen der Filterrealisierung eingestellt werden können. Für die Optimierung wird eine Zielauflösung  $\Delta d_i$  vorgegeben und mit einem Vielfachen dieser Zielauflösung werden die Distanzwerte zur Zielfunktion (z.B.  $f'_1$ -Kennwert oder Summe der quadratischen Abweichung von der Zielfunktion) für Stützpunkte im Filterraum berechnet. Die Auflösung wird dann schrittweise bis zur Zielauflösung verkleinert, wobei nur noch Stützstellen in Teilräumen berechnet werden, für die die Distanzwerte bestimmte Schranken unterschritten haben.

### B.2 Minimumprojektionen

Da die Filterräume sehr schnell sehr groß werden können, werden nur die Minimumprojektionen ermittelt:

$$mp(i, j) = \min_k \left( \text{dist} \left( \tau \left( \vec{d} \left( i\vec{e}_0, j\vec{e}_1, k\vec{e}_2 \right) \right) \right) \right) \quad (17)$$

Der eigentlich  $N_F$ -dimensionale Raum wird auf 2 Dimensionen reduziert. Das erleichtert einerseits die visuelle Beurteilung des Raumes und spart andererseits Speicherressourcen. Aus den Minimumprojektionen können relativ einfach globale und lokale Minima ermittelt werden. Für einen  $N_F$ -dimensionalen Raum erhält man

$$N_{mp} = \mathbf{C}_{N_F}^2 = \begin{pmatrix} N_F \\ 2 \end{pmatrix} \quad (18)$$

Minimumprojektionen. Das globale Minimum kann eindeutig ermittelt werden, da es sich in jeder Projektion durchsetzt. Für die Bestimmung des globalen Minimums sind nur  $\lceil N_F/2 \rceil$  Projektionen notwendig. Bei lokalen Minima kann es zu Überschneidungen kommen, sodass zu deren genauen Bestimmung die Stützstellen eines Unterraumes ggf. neu berechnet werden müssen.

### C. Beispiel einer Filterrealisierung

Für das realisierte dreischichtige Filter TT05 werden die Ergebnisse der Optimierung dargestellt.

Es ergeben sich für das globale Minimum folgende Werte:

Glas	BG39	OG530	FG13
Dicke [mm]	1.173	0.093	1.233

Mit einem  $f'_1$ -Kennwert von 2.3% und einer Stabilität<sup>9</sup> von  $\Delta d f'_1 = 0.8\%$  mit einer wahrscheinlichen Variation von 0.7%.

<sup>9</sup>Die Stabilität gibt die Änderung des Kennwertes bei Dickenvariation aller Gläser um 10µm an.

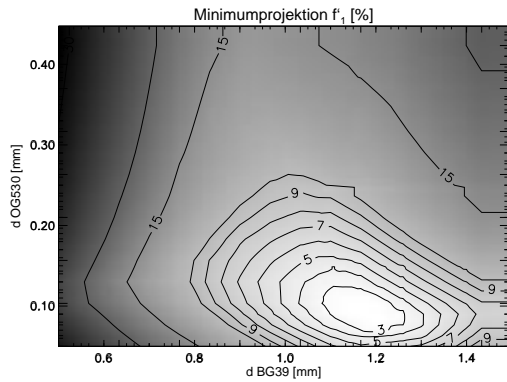


Abb. 7. Minimumprojektionen BG39/OG530

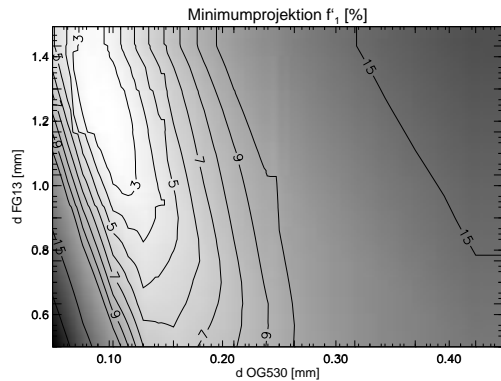


Abb. 8. Minimumprojektionen OG530/FG13

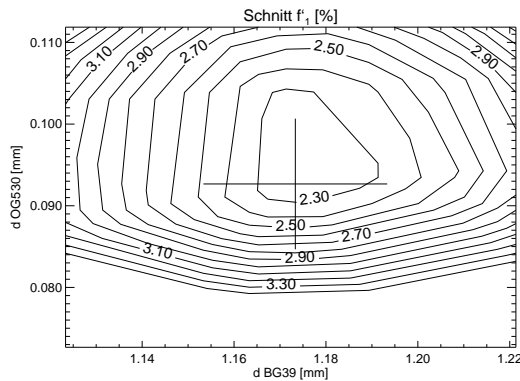


Abb. 9. Schnittdarstellung BG39/OG530

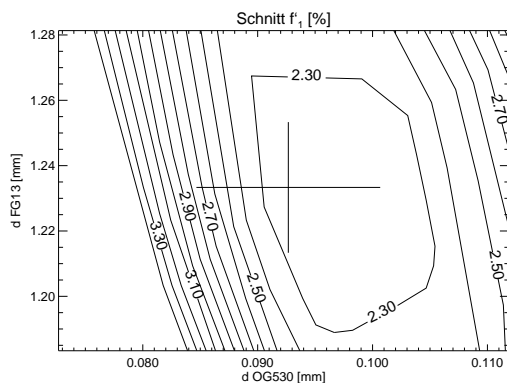


Abb. 10. Schnittdarstellung OG530/FG13

Wie den Schnittdarstellungen<sup>10</sup> zu entnehmen ist, muss die ohnehin in der Fertigung kritische OG530-Schicht möglichst exakt gefertigt werden. Weiterhin ist zu erkennen, dass die Kennwertentwicklung in der Umgebung des berechneten Minimums nicht zu allen Seiten gleichmäßig erfolgt. Für die Fertigung wurden die Vorgabewerte daher leicht in Richtung zur Mitte der umgebenden Höhenlinien des Minimums korrigiert. (Dies ist nicht so einfach, da sich bei der Veränderung der Lage in einem Schnitt auch die Daten der anderen Schnitte verändern.) Mit einer Toleranzvorgabe von  $\pm 0.002 \text{ mm}$  wurden folgende Vorgaben für die Fertigung herausgegeben:

Glas	BG39	OG530	FG13
Dicke [mm]	1.178	0.096	1.250

Von dieser Filterart wurden 9 Filter gefertigt. Die Fertigung hielt die Toleranzbereiche ein, was durch die mechanische und optische Analyse von Restbruchstücken und der Gesamttransmission der Filter überprüft wurde. Der mit den realisierten Filter bestimmte  $f'_1$ -Kennwert liegt mit  $2.6 \pm 0.4\%$  im Bereich der erwarteten Abweichungen<sup>11</sup>.

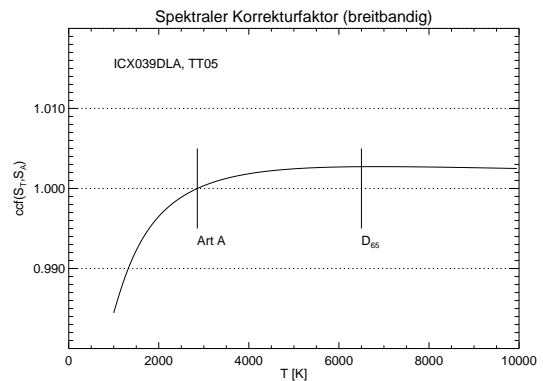


Abb. 11. Spektraler Korrekturfaktor (breitbandig, schwarzer Strahler)

Die Abbildungen 11 und 12 zeigen, dass der spektrale Korrekturfaktor bei breitbandiger Bestrahlung und Variation der äquivalenten Strahlungstemperatur nur geringfügig von 1 abweicht. Die Abweichungen des spektralen Korrekturfaktors für schmalbandige Spektren sind wesentlich größer. Für Leuchtlichtheitsmessungen an LED's oder anderen Messobjekten mit schmalbandiger Ausstrahlung muss daher ein spektraler Korrekturfaktor bestimmt werden.

Für die Einzelanpassung von Sensoren kann der  $f'_1$ -Kennwert (z.B. durch vierschichtige Filter und Optimierung der Daten auf genau eine Matrix/Objektivkombination) im Vergleich zur Serienfertigung in der Regel um bis zu 1% verringert werden, wobei hier aber beachtet werden muss, dass beim Einsatz der vierschichtigen Filter die wahrscheinlichen Fehler erheblich größer werden und auch die Fertigung u.a. durch sehr dünne Schichten erschwert wird.

<sup>10</sup>Bei einem Schnitt werden die Verhältnisse im Filterraum so dargestellt, dass nur die auf den Achsen aufgetragenen Gläser variiert werden und für die restlichen Gläser der "optimale" Dickenwert beibehalten wird.

<sup>11</sup>Der Gesamtfehler wurde unter der Annahme  $\sigma = 1\%$  für die Fehler der beteiligten Messwerte ermittelt.

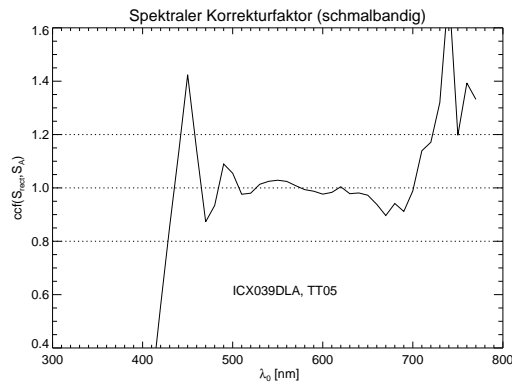


Abb. 12. Spektraler Korrekturfaktor (schmalbandig,  $\text{rect}((\lambda - \lambda_0)/\Delta\lambda)$ ,  $\Delta\lambda = 10\text{nm}$ )

## V. ZUSAMMENFASSUNG

Es wurde das Vorgehen bei der spektralen Anpassung von Matrixsensoren dargestellt, und die erreichbaren Kennwerte wurden inklusive der abgeschätzten und gemessenen Fehler angegeben. Für die Serienfertigung, die trotz Schwankung der Eingangsdaten (Matrixempfindlichkeiten, verschiedene Glasschmelzen) und einer großen Bandbreite an möglichen Einsatzfällen der Messgeräte gleichmäßig gute Kennwerte liefern soll, sind für die dargestellten Berechnungen günstige Mittelwerte zu finden. Es muss insbesondere versucht werden, die Schwankung bestimmter Eingangsgrößen so klein wie möglich zu halten.

Der Autor möchte sich auf diesem Wege bei den Mitarbeitern des Fachgebietes Lichttechnik der Technischen Universität Ilmenau unter Leitung von Prof. Dr.-Ing. habil. D. Gall für die Unterstützung bei den zahlreichen Messungen, die zur Erstellung dieser Arbeit notwendig waren, bedanken. Weiterhin gilt mein besonderer Dank Prof. Dr.-Ing. habil. em. M. Riemann für Unterstützung der Arbeit durch kritische Hinweise und zahlreiche Ideen.

## LITERATUR

- [1] J.A. Dobrowolski, G.E. Marsh, D.G. Charbonneau, J. Eng, and P.D. Josephy. Colored filter glasses: an intercomparison of glasses made by different manufactures. *Applied Optics*, Vol.16 No.6, pp. 1491-1512, 1977.
- [2] A. Dressler. Über eine neuartige Filterkombination zur genauen Angleichung der spektralen Empfindlichkeit von Photozellen an die Augenempfindlichkeitskurve. *Licht 3 (1933)*, S.41-43, (Nach einem Vortrag vor der D.R.G. am 24.1.1933), 1932.
- [3] G. Geutler. Über den Abgleich der relativen spektralen Empfindlichkeit von Vervielfacherphotometern an die  $V(\lambda)$ -Funktion. *Techn.-wiss. Abhandlungen der OSRAM GmbH, Band 8, Springer-Verlag Berlin*, S.130-137, 1963.
- [4] G. Geutler, J. Krochmann, Z. Özver, and W. Röhricht. Über die Kennzeichnung der Güte des Angleiches der relativen spektralen Empfindlichkeit lichtempfindlicher Empfänger an die  $V(\lambda)$ -Funktion. *Optik 43(1975) No. 5*, S.453-469, 1975.
- [5] J. Krochmann. Über den Abgleich der relativen spektralen Empfindlichkeit photoelektrischer Bauelemente an vorgegebene Bewertungsfunktionen. *ATM-Blatt, V432-1*, Okt. 1972, S.181-186, 1972.
- [6] J. Krochmann and K. Reissmann. Über den Spektrangleich von Strahlungsempfängern und von Lichtquellen. *Optik 56(1980) No. 1*, S.83-93, 1980.
- [7] G. Litfin. *Technische Optik in der Praxis*. Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York, 1997.
- [8] N.N. *Katalog Farbgläser*. Schott Glaswerke, 1997.
- [9] N.N. *Katalog JGW*. Jenaer Glaswerke, 1997.

- [10] M.A. Res, J. Bednarik, F. Hengstberger, and C.J. Kok. Filter glasses with band-pass characteristics for the yellow-orange region of the visible spectrum. *Optik 48(1977) No. 4*, S.371-382, 1977.
- [11] M.A. Res, J. Bednarik, F. Hengstberger, and C.J. Kok. Filter mit Bandpasseigenschaften für den grünen Bereich des sichtbaren Spektrums. *Optik 48(1977) No. 1*, S.83-94, 1977.
- [12] F. Schmidt and U. Krüger. Eigenschaften von digitalen 1-Chip-CCD-Kameras bei der Anwendung zur Farbbeurteilung und Farbdarstellung. *Jahrbuch für Optik und Feinmechanik, 47. Jahrgang*, S. 114-140, Verlag Schiele und Schön, Berlin, 2000.
- [13] Sony Electronics, Inc. *Datenblatt ICX039DLA*. <http://www.sel.sony.com>, 1998.
- [14] E. Stefanov.  *$V(\lambda)$ -Anpassung eines bildauflösenden Lichtempfängers*. Diss., Technische Universität Ilmenau, 1995.