

Modellierung der spektralen Empfindlichkeit der Aufnahmekanäle für Bildverarbeitungsaufgaben

J. Ikes

Zentrum für Bild- und Signalverarbeitung e.V. Ilmenau,
Ehrenbergstraße 11, D-98693 Ilmenau, Germany
Tel: +49-3677-668-484
E-Mail: jens.ikes@zbs-ilmenau.de

R. Nestler

Technische Universität Ilmenau
Fakultät für Informatik und Automatisierung,
Fachgebiet: Graphische Datenverarbeitung
PF 100565, 98694 Ilmenau
E-Mail: rico.nestler@prakinf.tu-ilmenau.de

1 Kurzfassung

In den meisten Fällen wird bei Applikationen, die auf der Verarbeitung von Farbbildern basieren, die Bildaufnahme über (RGB)-Kameras realisiert und anschließend eine Segmentierung des resultierenden Farbraumes vorgenommen. Reicht die Primärinformation in den (RGB)-Kanälen jedoch von vornherein nicht aus, um die sich anschließende Verarbeitung befriedigend durchführen zu können, ist eine Optimierung der spektralen Empfindlichkeit des Aufnahmekanals sinnvoll.

In diesem Beitrag wird ein Verfahren zur Diskussion gestellt, mit dessen Hilfe man auf der Grundlage der bekannten spektralen Eigenschaften von zu bewertenden Farbklassen problemangepaßte Aufnahmekanäle modellieren kann. Das Ziel ist der Entwurf eines Aufnahmesystems, welches mit einer reduzierten Zahl von Aufnahmekanälen die für die weitere Verarbeitung benötigte Farbinformation möglichst gut abbildet. Die Eignung wurde an einem Aufnahmesystem für die Beurteilung von Holzoberflächen untersucht.

2 Bildaufnahme

Bei der Bildaufnahme wird die spektrale Reizfunktion $\varphi(\lambda)$ mit der spektralen Empfindlichkeit des jeweiligen Sensorkanals $k_i(\lambda)$ gewichtet.

Die spektrale Reizfunktion setzt sich aus der spektralen Remission $\beta(\lambda)$ und dem spektralen Strahlungsfluß der Beleuchtung $S(\lambda)$ zusammen. Wird zusätzlich ein wellenlängenabhängiges Filter mit der Transmissionsfunktion $\tau(\lambda)$ eingebracht, so stellt sich das integrale Ausgangssignal des Sensors wie folgt dar:

$$K_i = \nu \int_{l_{\min}}^{l_{\max}} dl k_i(l) S(l) b(l) t_i(l) = \int_{l_{\min}}^{l_{\max}} dl k_i(l) b(l) \quad (2.1)$$

mit $k_i(l) := \nu k_i(l) S(l) t_i(l)$

Der spektrale Strahlungsfluß der Lichtquelle, das Transmissionsverhalten des Filters und die Sensorempfindlichkeit werden hier zur Systemempfindlichkeit $\kappa_i(\lambda)$ zusammengefaßt.

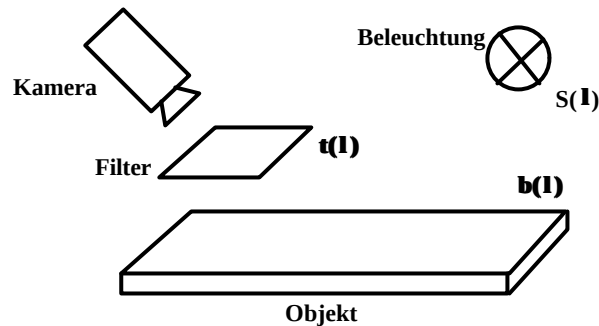


Abbildung 1

Die folgenden Vorschläge zur Gestaltung der Systemempfindlichkeit bezüglich der bekannten spektralen Eigenschaften eines Inspektionsobjektes $\beta(\lambda)$ beziehen sich immer auf diese theoretische Größe $\kappa_i(\lambda)$. Die Realisierung der Systemempfindlichkeit kann durch Variation der Beleuchtung, des Farbfilters bzw. durch das Abstimmen beider Komponenten des Aufnahmekanals erfolgen, wobei die spektrale Charakteristik des realen CCD-Bildsensors einbezogen werden muß. Die Bestimmung der benötigten Transmissionsfilter erfolgt mit der Beziehung (2.1).

3 Auswertung der spektralen Eigenschaften der Oberflächen

Die Nutzung der Farbinformation in Inspektionsprozessen erfolgt mit der Zielstellung, eine schnelle Segmentierung der Bildinformation (Pixelklassifikation) entweder direkt auf Defektniveau¹ oder einem vorgelagerten Niveau vorzunehmen.

3.1 Modellierung der Oberfläche

Für die weiteren Untersuchungen wird ein Modell benötigt, welches das Remissionsverhalten von Oberflächen hinreichend genau widerspiegelt. Es wird hierzu angenommen, daß die makroskopische Farbwirkung der Oberfläche durch mikroskopisch kleine, zufällig verteilte Farbpigmente gebildet wird. Die Umgebung, in der die Farbpigmente eingebettet sind, soll ideal durchsichtig sein und den gleichen Brechungsindex wie Luft besitzen. Bei diesem an [1] angelehnten dichromatischen Modell² dielektrischer, undurchsichtiger Oberflächen wird weiterhin angenommen, daß der beobachtete Reflexionsmechanismus nur Einfluß auf die photometrische und nicht auf die geometrische Verteilung der auftreffenden Lichterregung besitzt.

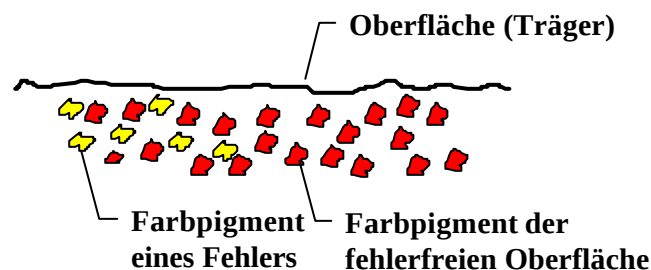


Abbildung 2

¹ wenn das Ziel eine Segmentierung in Defektklassen mit unterschiedlichem spektralen Remissionsverhalten ist

² Bei dem im Originaltext beschriebenen Modell handelt es sich um die Wechselwirkung zweier Reflexionsmechanismen - hier um die Wechselwirkung einer statistischen Verteilung unterschiedlicher Farbpigmente.

Jeder Fehlertyp soll durch charakteristische Farbpigmente beschrieben werden können. Einfallendes Licht wird von den Farbpigmenten remittiert, wobei bestimmte spektrale Anteile des Lichtes von den Farbpigmenten absorbiert werden. Eine Reflexion zwischen den Farbpigmente, d.h. Wechselwirkungen höherer Ordnung, soll ausgeschlossen werden.

Für die spektralen Eigenschaften des Körpers sind nur die Farbpigmente relevant, die nicht durch andere Farbpigmente verdeckt werden. Die Strahlung, die von einem Punkt der Oberfläche remittiert wird, ergibt sich somit aus der gewichteten Summe der spektralen Komponenten der Farbpigmente. Die Wichtung erfolgt entsprechend dem Oberflächenanteil, den die betreffende Farbpigmentart auf der vom Bildsensor erfaßten Fläche abdeckt. Dieser Anteil, den eine bestimmte Fehlerart an der Fläche des Objektpunktes einnimmt, kann als Auftretenswahrscheinlichkeit p des Farbpigmentes gedeutet werden.

$$b(I) = \sum_{i=1}^N p_i B_i(I) + p_{N+1} H(I) \quad \text{mit} \quad \sum_{i=1}^{N+1} p_i = 1 \quad (3.2)$$

Das Remissionsverhalten der Oberflächenbesonderheiten wird hierbei mit $B(I)$, das der fehlerfreien Oberfläche mit $H(I)$ bezeichnet.

3.2 Verwendung eines angepaßten Spektralfilters

Sind die spektralen Eigenschaften der Besonderheiten $B(\lambda)$ und der fehlerfreien Oberfläche $H(\lambda)$ bekannt, so kann man durch gezieltes Modellieren der Systemempfindlichkeiten $\kappa(\lambda)$ eine bestmögliche Trennung der Oberflächenfehler gegenüber der Gutoberfläche erzielen.

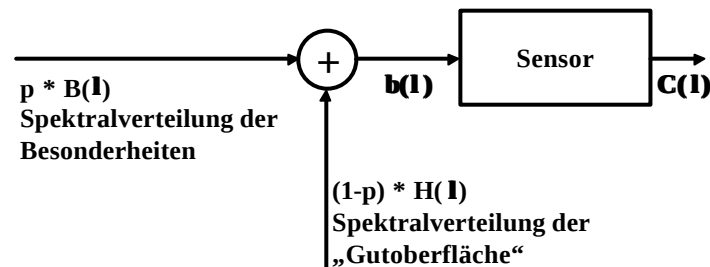


Abbildung 3

Zur Vereinfachung wird angenommen, daß nur ein einziger Fehlertyp vorkommen soll bzw. daß mehrere Fehlertypen durch eine Spektralverteilung repräsentiert werden können. Die Trennung kann durch eine optimal gestaltete Systemempfindlichkeit erfolgen. Die Spektraldichte eines Pixels hat dann die Form:

$$b(I) = pB(I) + (1-p)H(I) \quad (3.3)$$

Für ein konkretes Pixel ist die Auftretenswahrscheinlichkeit p der Farbpigmente nicht vorhersagbar und stellt somit als stochastische Größe eine Realisierung eines örtlichen Zufallsprozesses dar. Das Spektrum der Gutoberfläche $(1-p)H(I)$ wird als Störgröße aufgefaßt (siehe Abbildung 3).

Die Systemempfindlichkeit $\kappa(\lambda)$ soll so abgestimmt sein, daß der Anteil des Fehler- oder Besonderheitensignals p den Sensorausgang bestimmt und möglichst wenig durch das Spektrum der Umgebung verfälscht wird.

Es wird also das Ziel angestrebt, daß der Sensor ein Ausgangssignal proportional zur Fehlerpixelwahrscheinlichkeit p erzeugt. Als Optimierungskriterium soll der mittlere quadratische Fehler über alle Realisierungen angesetzt werden.

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_n \left(k(p_n B + (1-p_n)H) - V p_n \right)^2 = \min \quad \text{Verstärkungsfaktor: } V \quad (3.4)$$

Die gesuchte Systemempfindlichkeit k ist durch Lösen der Extremwertaufgabe bestimmbar. Man erhält für jede Wellenlänge eine Systemempfindlichkeit, so daß sich insgesamt die Systemempfindlichkeit als Funktion über der Wellenlänge ergibt:

$$k(l) = V(l) \frac{\overline{p^2 B(l)} + \overline{p(1-p)H(l)}}{\overline{p^2 B^2(l)} + 2\overline{p(1-p)B(l)H(l)} + \overline{(1-p)^2 H^2(l)}} \quad (3.5)$$

$$=: V(l)G(l) \quad \text{mit } \bar{x} = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_n x_n$$

Der sich ergebende wellenlängenabhängige Verstärkungsfaktor $V(\lambda)$ ist ein zusätzlicher Freiheitsgrad. Mit Hilfe des Verstärkungsfaktors können Wellenlängenbereiche, in denen eine gute Trennung zwischen Gut- und Fehlerklasse möglich ist, gegenüber für die Entscheidung ungünstigeren Bereichen hervorgehoben werden. Der Verstärkungsfaktor ist so zu bestimmen, daß der Signal-Rausch-Abstand maximiert wird. Hierbei wird als Signal die Dynamik des Filterausgangs, d.h. die Differenz zwischen Fehlerspektrum und Gutspektrum, angenommen. Die Störung bzw. das Rauschen wird durch die Streuung des Gut- und des Fehlerspektrums, mit s_H^2 bzw. s_B^2 bezeichnet, repräsentiert. Der Sensor erzeugt das Ausgangssignal, indem er die Teilsignale über den gesamten Wellenbereich integriert. Der gesuchte wellenlängenabhängige Verstärkungsfaktor ist als Filterfunktion interpretierbar, mit deren Hilfe der Signal-Rausch-Abstand einer durch farbiges Rauschen gestörten Eingangsgröße maximiert werden soll. Somit liegt hier (in leicht abgewandelter Form) das Problem des optimalen Suchfilters für farbiges Rauschen vor [2]. Unter der Voraussetzung der Normalverteilung des Rauschens und bei starker Abhängigkeit der Rauschprozesse beider Spektren erhält man unter Einbeziehung des Ergebnisses des optimalen Suchfilters:

$$k(l) = K \frac{B(l) - H(l)}{s_B^2(l) + s_H^2(l)} G(l) \quad (3.6)$$

Die Konstante K ist ein Verstärkungsfaktor, mit dem die Systemempfindlichkeit normiert werden könnte. Hierauf wird jedoch an dieser Stelle verzichtet, da die Normierung keinen Einfluß auf das Funktionsprinzip hat.

Zur Konstruktion der optimalen Systemempfindlichkeit werden laut (3.5) bzw. (3.6) die spektralen Charakteristiken der „Gut“-bereiche und der „Fehler“-bereiche sowie deren wellenlängenbezogene statistische Momente und die statistischen Momente der Auftrittswahrscheinlichkeiten für die Fehlerfarbpigmente benötigt.

Die spektrale Statistik ist durch Messen bestimmbar und wird als verfügbar angenommen. Die Auftrittswahrscheinlichkeit für die einzelnen Fehlerfarbpigmente kann nicht direkt bestimmt werden. Um Aussagen über die Auftrittswahrscheinlichkeiten zu treffen, wird davon ausgegangen, daß in Fehlergebieten nur die Farbpigmente der Fehler und in gesunden Gebieten nur die Gutfarbpigmente vorkommen. Unter dieser groben Näherung können die statistischen Momente der Auftrittswahrscheinlichkeit für die Fehlerfarbpigmente über die Flächenanteile der Gut- und Schlechtereiche bestimmt werden.

$$\overline{p^2} \approx \frac{A_B^2}{A_{ges}^2} \quad \overline{p} \approx \frac{A_B}{A_{ges}} \quad (3.7)$$

3.2.1 Erzeugung eines Filtersystems mit orthogonalen Filterfunktionen

Für die erzeugten optimalen Filterfunktionen der einzelnen Fehler typisch ist, daß diese Ähnlichkeiten im Funktionsverlauf besitzen. Durch Ausnutzung der Korrelation ist besteht die Möglichkeit, alle Filterfunktionen durch geeignete, wenige Repräsentanten zu generieren. Die Grundidee ist, alle Systemempfindlichkeiten $\kappa_i(\lambda)$ durch eine Funktionsreihe $g_i(l)$ zu beschreiben, die rasch konvergiert. Die Glieder der Funktionsreihe müssen dekorreliert, das heißt zueinander orthogonal sein. Dadurch wird erreicht, daß sich die Reihe möglichst schnell an die gegebenen Filterfunktionen annähert. Die gewünschten Filterfunktionen $\kappa_i(\lambda)$ werden durch die Funktionsreihe wie folgt dargestellt:

$$k_i(l) = \sum_j c_{ij} \cdot g_j(l) \quad i, j = 1, 2, \dots, n \quad (3.8)$$

Die Entwicklung der Basis für die Funktionsreihe wird nach dem SCHMIDT'schen Orthogonalisierungsverfahren [3] durchgeführt. Hierbei entsteht als Zwischengröße zunächst die orthogonale Hilfsbasis $\tilde{g}$.

$$\text{Definition: } (f, F) := \int_a^b f(x) F(x) dx \quad (3.9)$$

$$\tilde{g}_1(l) = \frac{k_1(l)}{\sqrt{(k_1, k_1)}}$$

$$\tilde{g}_m(l) = \frac{c_m(l)}{\sqrt{(c_m, c_m)}} \quad ; \quad c_m(l) = k_m(l) - \sum_{j=1}^{m-1} (k_m, \tilde{g}_j) \tilde{g}_j(l) \quad m = 2, 3, \dots, n$$

Das Hilffssystem wird einer Drehung unterzogen, so daß die Funktionsbasis g entsteht, in der die Fourierkoeffizienten³ im Mittel am schnellsten abnehmen. Dazu werden die Streuungen der Fourierkoeffizienten, die zur Erzeugung der Filterfunktionen κ_i benötigt werden, bezüglich der neuen Basis minimiert. Die Lösung dieses Problems führt auf eine Eigenwertaufgabe. Die Drehmatrix D_{ij} erhält man aus den Eigenvektoren der Koeffizientenstreu matrix S_{ij} .

$$c_{ij} = (k_i, g_j) \quad (3.10)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{n-1} \sum_k \tilde{c}_{ki} \tilde{c}_{kj} - \tilde{c}_i \tilde{c}_j \quad \tilde{c}_n = \frac{1}{n} \sum_k \tilde{c}_{kn}$$

$$D^{-1} S D = \text{diag}$$

$$g = D \tilde{g}$$

Entsprechend den Wichtungskoeffizienten im System g kann man festlegen, nach wieviel Gliedern die Funktionsreihe abgebrochen werden soll. Als Entscheidungskriterium soll die Änderung des Sensorausgangs beim Hinzunehmen einer Basisfunktion betrachtet werden. Ändert sich der Sensorausgang nur geringfügig, so kann die Reihe beim betreffenden Glied abgebrochen werden. Zur Bewertung des

³ Die Zahlen c_{ij} werden in an Anlehnung an die Fourierreihe als Fourierkoeffizienten bezüglich des Systems g bezeichnet.

Sensorausganges wird der Unterschied der Filterantwort auf eine Anregung mit dem Störsignal $H(I)$ und dem Fehlerspektrum $B(I)$ bewertet.

$$\Delta F_{ij} = \int_{l_{\min}}^{l_{\max}} c_{ij} g_j(I) (B(I) - H(I)) dI \quad (3.11)$$
$$\Delta f_{ij} = \frac{\Delta F_{ij}}{\Delta F_{il}}$$

3.3 Ergebnisse des Verfahrens am Beispiel der Inspektion von Holzoberflächen

Die oben beschriebene Vorgehensweise wurde zur Erzeugung eines Filtersystems für die Erkennung von Holzfehlern angewendet. Für die Untersuchungen standen die Spektren der Holzmerkmale Markröhre, Baumkante, Rindeneinschluß, dunkler Ast, heller Ast, Harzgalle, Bläue, Braunfäule und Rotfäule zur Verfügung.

Für jeden dieser Fehlertypen wurde entsprechend der Formel (3.5) bzw. (3.6) ein Trennfilter berechnet, mit dem der betreffende Fehlertyp „optimal“ vom Gutholz getrennt werden kann. Der Normierungsfaktor K aus Gleichung (3.6) wurde hier so gewählt, daß der Sensorausgang bei Anlegen des Fehlersignale $B(I)$ den gleichen Ausgangswert liefert.

Diese Filterfunktionen wurden in eine orthonormale Funktionsreihe entwickelt, bei der die Streuung der Fourierkoeffizienten minimiert wurden.

Um festlegen zu können, ab welchem Glied die Funktionsreihe abgebrochen werden kann, soll der Beitrag jedes Gliedes zum Filterausgang abgeschätzt werden. Als signifikantes Eingangssignal wird die Differenz zwischen dem Fehlerspektrum und dem Gutspektrum angesehen, da diese Differenz im Endeffekt die Änderung des Sensorausgangs bei Auftreten eines Fehler bestimmt. Eine getrennte Bestimmung der Ausgangssignale für alle Glieder der Funktionsreihe ist möglich, da sie ein orthogonales Funktionensystem bilden.

Das Ergebnis der Betrachtungen für das vorliegende Beispiel ist, daß zwei Basisfilter für eine hinreichend genaue Synthese der meisten Trennfilter ausreichen. Lediglich für einen Fehlertyp ist die Hinzunahme eines dritten Basisfilters erforderlich.

Die Trennung der Fehler untereinander wurde bisher nicht beachtet. Eine Möglichkeit, die Trennbarkeit zwischen den einzelnen Fehlern zu optimieren, ist, jeden Fehler selbst als Störsignal gegenüber einen anderen Fehler anzusehen. Die zusätzlichen Trennfilter werden dann ebenfalls mit in eine Funktionsreihe entwickelt. Dabei ist zu erwarten, daß die Anzahl der benötigten Basisfunktionen zunehmen wird.

3.4 Wahl des Wellenlängenbereiches

Abschließend soll die Frage untersucht werden, ob eine anwendungsbezogene Einschränkung des bewerteten Spektralbereiches zu einer weiteren Reduktion der Kanalanzahl führen kann, ohne die Erkennbarkeit und die Trennbarkeit der Klassen wesentlich zu verschlechtern.

Die benötigte Kanalanzahl ist davon abhängig, welche Fehler erkannt und untereinander getrennt werden sollen. Um ein Maß für die benötigte Kanalzahl zu erhalten, wird die mittlere Kanalzahl K definiert.

$$K = \frac{1}{n + \binom{n}{2}} \left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{c_{ij}}{c_i \cdot c_j} \cdot j + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{c_{ij}^{ff}}{c_i^{ff} \cdot c_j^{ff}} \cdot j \right] \quad (3.12)$$

c_{ij}^{ff} Fourierkoeffizienten bzgl. g zur Bildung der Trennfilter zwischen den i -ten Klassenpaar

c_{ij} Fourierkoeffizienten bzgl. g zur Bildung der Suchfilter für den i -en Oberflächenfehler

c_i Vektor der Fourierkoeffizienten zur Bildung des i -ten Filters

Die Kanalanzahl ist abhängig vom bewerteten Intervall $[\lambda_{\min}, \lambda_{\max}]$, da sich die Filterfunktionen und damit die Fourierkoeffizienten in Abhängigkeit des Bewertungsintervalls ändern.

Die Klassenerkennbarkeit E_i und die Klassentrennbarkeit T_{ij} soll als die Änderung der Amplitude des Sensorausganges definiert werden.

$$E_i = \left| \int_{I_{\min}}^{I_{\max}} dI \cdot k_i \cdot (B_i - H) \right| \quad T_{ij} = \left| \int_{I_{\min}}^{I_{\max}} dI \cdot k_{ij}^{ff} \cdot (B_i - B_j) \right| \quad (3.13)$$

Zur Bewertung der mittleren Erkennbarkeit E und der mittleren Trennbarkeit T aller Fehlerklassen wird das arithmetische Mittel der klassenbezogenen Größen verwendet.

In Abbildung 4 sind die mit dem beschriebenen Verfahren erzeugten Systemempfindlichkeiten für das vorliegende Beispiel der Holzinspektion dargestellt.

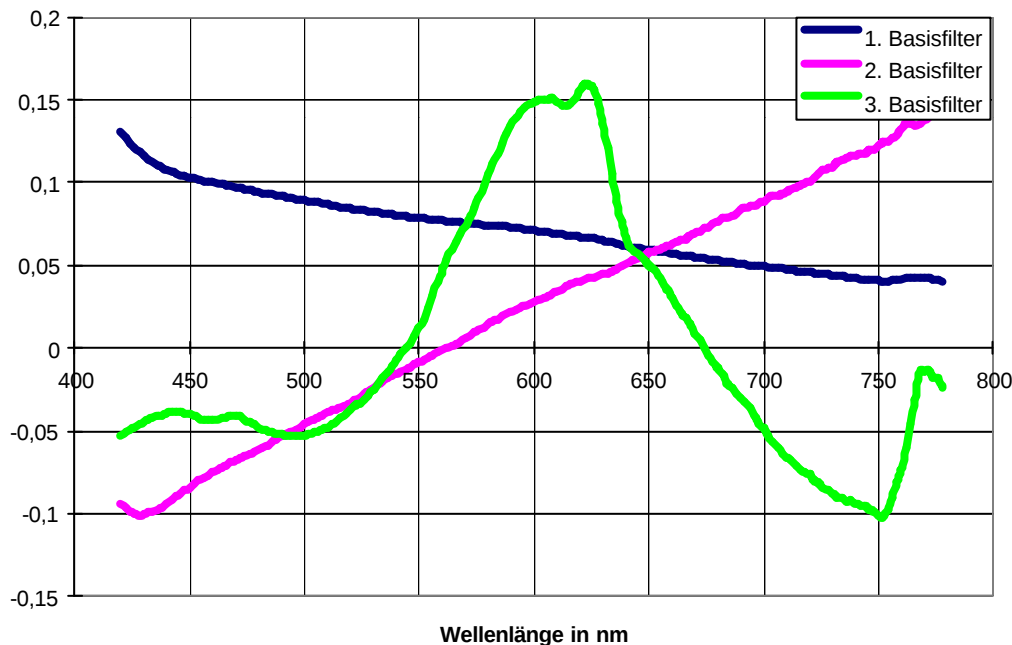


Abbildung 4

Literaturverzeichnis

- [1] Klinker, G. J.; *A Physical Approach to Color Image Understanding*; Wellesley 1993
- [2] Irmer, Kreß; *Angewandte Systemtheorie — kontinuierliche und zeitdiskrete Signale*; Verlag Technik 1989
- [3] Smirnow, V., I.; *Lehrgang der höheren Mathematik*; Dt. Verlag d. Wissens 1989