

Materialidentifikation mittels optisch realisierter Kreuzkorrelation der Reflektanzspektren

Miro Sauerland, Robin Gruna, Jürgen Beyerer

Karlsruher Institut für Technologie, Fakultät für Informatik, Institut für Anthropomatik,

Lehrstuhl für Interaktive Echtzeitsysteme, 76187 Karlsruhe, E-Mail:

miro.sauerland@kit.edu, robin.gruna@kit.edu, Fraunhofer-Institut für Optronik,

Systemtechnik und Bildauswertung, 76131 Karlsruhe, E-Mail:

juergen.beyerer@iosb.fraunhofer.de

Kurzfassung

Dieser Artikel stellt ein neuartiges, zum Patent angemeldetes Messverfahren [1] vor, welches die Ähnlichkeit zweier Spektren in Form eines normierten Kreuzkorrelationskoeffizienten (nKK) bemisst. Die Besonderheit liegt in der optische Realisierung des Verfahrens. Auf Grundlage des nKK wird eine Messgleichung entwickelt, die dann zur Herleitung des Signal-zu-Rausch Verhältnisses genutzt wird. Als Experiment wird die Aufgabenstellung behandelt, metamere Farben anhand ihrer Spektren zu unterscheiden. Gewonnene Messergebnisse werden abschließend mit einem vorhergesagten Ergebnis verglichen.

1 Einleitung

Ein wichtiger Aspekt des maschinellen Sehens ist die Aufgabe Objekte zu identifizieren. Neben Farbe und Textur [2] [3] können auch winkelabhängige Reflektanzeigenschaften [4] für eine Materialklassifikation genutzt werden. Das Reflektanzspektrum einer Oberfläche, auch als „Fingerabdruck“ bezeichnet [5], ist dabei ein sehr diskriminatives Merkmal. Zur Gewinnung dieser Information ist jedoch ein bildgebendes Spektrometer notwendig, welches einige Nachteile mit sich bringt:

- Komplexer optischer Aufbau und damit teuer

- Keine flächenhafte Erfassung einer Szene
- Frameraten von wenigen 100 Zeilen pro Sekunde

Für konkrete Anwendungen der Materialidentifikation kann auf eine dichte Abtastung des Spektrums verzichtet werden [6], da nicht alle Wellenlängen gleichermaßen informationstragend sind. Die Wahl geeigneter Stützwellenlängen, z.B. durch wenige schmalbandige Interferenzfilter, ist jedoch nicht eindeutig und muss für jede Aufgabenstellung neu beantwortet werden.

Einen weiteren Ansatz zur Auswertung des Spektrum stellt die Anwendung sogenannter *Multivariater Optischer Elemente, MOE* [7] oder das sogenannte *Molecular Factor Computing, MFC* [8] dar. Hierbei werden breite Filterfunktionen realisiert; bei MOEs in Form von Interferenzfiltern, im Falle von MFC als flüssige Lösungen. Eine Filterkurve wird dabei als Vektor aufgefasst, der mit dem Spektrum komponentenweise multipliziert wird. In Kombination mit einem breitbandigen Sensor kann der Messwert als das Skalarprodukt aus Filtervektor und Reflektanzspektrum [9] interpretiert werden. Für eine konkrete Aufgabenstellung werden dann Filterkurven realisiert, die z.B. den Eigenvektoren einer Hauptkomponentenanalyse entsprechen [10]. Nachteilig bei diesem Vorgehen ist der hohe technische Aufwand zum Design geeigneter Filterkurven. Einen Überblick über diese Ansätze ist in [11] zu finden.

Der in diesem Artikel vorgestellte Ansatz für die Materialerkennung folgt im wesentlichen dem Grundgedanken einer speziell designten Filterfunktion. Der Hauptvorteil des vorgestellten Aufbaus liegt in der einfachen Adaptierbarkeit an eine Aufgabenstellung, da das Reflektanzspektrum des Materials selbst als Filterfunktion eingesetzt wird.

2 Messprinzip

Die Problemstellung, die gelöst wird, ist ein unbekanntes Material anhand seines Spektrums zu identifizieren. Die Identifikation einer Probe erfolgt durch einen Vergleich mit bekannten Referenzspektren. Somit wird die Aufgabenstellung dahingehend eingeschränkt, dass das unbekannte Material sicher einem der Referenzmaterialien entspricht. Als Messung wird dazu die Ähnlichkeit

des Spektrums s_u des unbekanntes Materials kombinatorisch mit allen Referenzspektren s_r bestimmt. Als Ähnlichkeitsmaß wird der normierte Kreuzkorrelationskoeffizient ϕ_{ur} genutzt, welcher die Ähnlichkeit in Form einer Zahl ($0 \leq \phi_{ur} \leq 1$) bemisst, wobei 1 der maximalen Ähnlichkeit entspricht, bzw. dem normierten Autokorrelationskoeffizienten (nAK). Der nKK ist definiert als:

$$\phi_{ur} := \frac{\int s_u(\lambda) s_r(\lambda) d\lambda}{\sqrt{\int s_u^2(\lambda) d\lambda} \sqrt{\int s_r^2(\lambda) d\lambda}}. \quad (1)$$

Die Normierung stellt sicher, dass das Ergebnis ϕ_{ur} invariant gegenüber skalierten Spektren ist. Somit ist das vorgestellte Verfahren unabhängig gegenüber Helligkeitsschwankungen bei zu untersuchenden Proben.

2.1 Messaufbau

Anstatt das Spektrum des unbekanntes Materials mittels Spektrometer zu vermessen und die Berechnung mittels Mikroprozessor durchzuführen, wird im Folgenden ein Aufbau vorgestellt (Abbildung 1), welcher die Kreuzkorrelation optisch realisiert. Aus Gleichung (1) werden die für eine optische Realisierung wesentlichen mathematischen Operatoren ersichtlich: der Integration über λ und die Multiplikation der Spektren. Die Integration leistet ein breitbandiger CCD-Sensor. Um die beiden Spektren zu multiplizieren, werden die Proben optisch scharf aufeinander abgebildet. Hierbei wird ausgenutzt, dass dem Licht multiplikativ das Reflektanzspektrum des Materials aufgeprägt wird, wenn es an dessen Oberfläche reflektiert wird.

2.2 Messvorgang

Zur einfacheren Argumentation im Sinne von Licht als Photonentransport werden kontinuierliche, von λ abhängige Variablen diskretisiert. Dazu wird der betrachtete Wellenlängenbereich in Intervalle $[\lambda_i - \frac{\Delta}{2}, \lambda_i + \frac{\Delta}{2})$ aufgeteilt (vgl. Abbildung 2). Das diskrete Reflektanzspektrum ergibt sich somit zu $s(\lambda_i) := \int_{\lambda_i - \frac{\Delta}{2}}^{\lambda_i + \frac{\Delta}{2}} s(\lambda) d\lambda$. Des Weiteren wird das Kameramodell

$$g = \sum_i n(\lambda_i) q(\lambda_i) \quad (2)$$

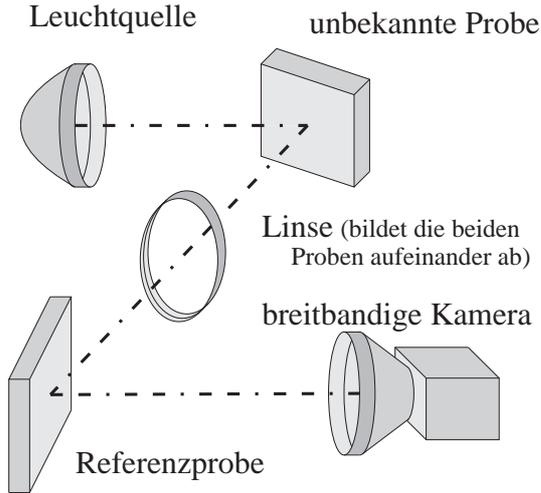


Bild 1: Prinzip einer Messanordnung.

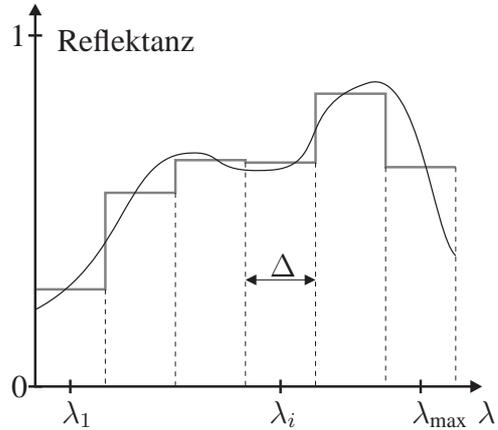


Bild 2: Diskretisierung der Spektren.

eingeführt, welches den Grauwert g auf die Anzahl Photonen $n(\lambda_i)$ zurückführt, welche gemäß der Sensorempfindlichkeit $q(\lambda_i)$ auch ein Elektron-Loch-Paar erzeugen. Rauschterme sind nicht Gegenstand dieser Betrachtung.

Zum Identifizieren eines unbekanntes Materials muss die Ähnlichkeit und damit der nKK in Kombination mit jedem relevanten Referenzmaterial bestimmt werden. In Gleichung (1) wurde der Einfluss der spektralen Ausprägung der Beleuchtung $n(\lambda_i)$, bzw. der Sensorempfindlichkeit $q(\lambda_i)$ nicht betrachtet. $n(\lambda_i)$ beschreibt die Anzahl Photonen die im Intervall $[\lambda_i - \frac{\Delta}{2}, \lambda_i + \frac{\Delta}{2})$ emittiert werden. Die Berücksichtigung dieses Einflusses führt zu der folgenden Messgleichung (3), welche aus dem nKK (1) unter Berücksichtigung des Kameramodells (2) hervorgeht:

$$m_{ur} := \frac{\sum_i n(\lambda_i) s_u(\lambda_i) s_r(\lambda_i) q(\lambda_i)}{\sqrt{\sum_i n(\lambda_i) s_r^2(\lambda_i) q(\lambda_i)}}. \quad (3)$$

Der Zähler beschreibt das Messsignal, welches in quantisierter Form vom Kamerasensor ausgelesen wird. Neben dem Verhältnis von reflektierter Leistung zu eingebrachter Leistung, kann das Reflektionsspektrum $s(\lambda_i)$ auch als die Wahrscheinlichkeit angesehen werden, dass ein auftreffendes Photon auch reflektiert wird. Somit kann das Produkt $s_u(\lambda_i) s_r(\lambda_i) q(\lambda_i)$ als die Wahrscheinlichkeit interpretiert werden, dass ein emittiertes Photon auch ein Elektron-Loch-Paar erzeugt. Die beiden Wurzeln in (1) stellen Normierungskonstanten dar, die den $\phi_{ur} \in [0, 1]$ normieren. Gemäß der Aufgabenstellung ist eines der

Spektren unbekannt und somit fehlt dessen Normierungskonstante in der Messgleichung (3). Die fehlende Normierung skaliert das Ergebnis auf unbekannte Weise. Bleibt jedoch die Aufnahmekonstellation der unbekanntes Probe unverändert, so werden alle Messungen in gleicher Weise skaliert und die Vergleichbarkeit bleibt erhalten. Eine Messung setzt sich somit aus einem Grauwert der Kamera und einer softwareseitigen Normierung auf das verwendete Referenzmaterial zusammen. Wie der Kalibrierungsprozess aussieht, in dem die Normierungskonstanten bestimmt werden, ist in Abschnitt 4.2 erläutert.

Eine maximale Messung identifiziert dann ein unbekanntes Spektrum als das der entsprechenden Referenzprobe. Hierbei wird ausgenutzt, dass der nAK als Grenzfall des nKK immer maximal wird. Dass die Messgleichung (3) den Gesetzmäßigkeiten des nKK folgt, wird sofort ersichtlich, wenn anstatt $s_j(\lambda)$ das Spektrum $s'_j(\lambda) = \sqrt{n(\lambda)}\sqrt{q(\lambda)}s_j(\lambda)$ in Gleichung (1) eingesetzt wird. Diese Betrachtung zeigt auch, welchen Einfluss der spektrale Verlauf der Beleuchtung bzw. der Sensorempfindlichkeit auf das Ergebnis des nKK hat.

3 Signal-Rausch-Verhältnis

Werden die Spektren der verschiedenen zu unterscheidenden Materialien immer ähnlicher, wird das Verfahren ab einem gewissen Punkt versagen. Eine quantitative Aussage darüber soll das im Folgendem entwickelte Signal-Rausch-Verhältnis (SNR)¹ liefern.

Das SNR wird für ein zwei Klassenproblem s_A, s_B motiviert, für den Fall dass s_A als unbekanntes Spektrum vorliegt. Zur Identifikation dieser Probe sind somit zwei Messungen notwendig:

$$m_{AA} = \frac{\sum_i n(\lambda_i) s_A(\lambda_i) s_A(\lambda_i) q(\lambda_i)}{\sqrt{\sum_i n(\lambda_i) [s_A(\lambda_i)]^2 q(\lambda_i)}}, \quad m_{AB} = \frac{\sum_i n(\lambda_i) s_A(\lambda_i) s_B(\lambda_i) q(\lambda_i)}{\sqrt{\sum_i n(\lambda_i) [s_B(\lambda_i)]^2 q(\lambda_i)}}.$$

Eine Messung wird dabei durch vier Rauschquellen gestört: Das Photonenrauschen der Lichtquelle, die zufällige Auswahl von Photonen z.B. bei der Reflektion, das Rauschen der Kameraelektronik und die Quantisierung. Die

¹SNR steht für Signal-to-Noise Ratio.

kameraspezifischen Rauscheinflüsse werden aus Platzgründen hier nicht behandelt; für ein tieferes Verständnis sei auf [12] verwiesen.

Wird eine thermische, breitbandige Beleuchtung eingesetzt, so schwankt die Anzahl emittierter Photonen pro Zeitintervall gemäß einer Poisson-Statistik $P(\bar{n})$. Diese Aussage ist sowohl gültig wenn alle Photonen interessieren, als auch sowie wenn nur die Anzahl Photonen $n(\lambda_i)$ im i -ten Intervall betrachtet werden. Zur Modellierung wird die Anzahl Photonen als Zufallsvariable $n(\lambda_i) \sim P(\bar{n}(\lambda_i))$ eingeführt. Gemäß der Poisson-Verteilung ist der Erwartungswert $E\{n(\lambda_i)\} = \bar{n}(\lambda_i)$ gegeben durch die mittlere Anzahl Photonen, bzw. die $\text{Var}\{n(\lambda_i)\} = \bar{n}(\lambda_i)$. Handelt es sich um die mittlere Anzahl Photonen während der Messung, wird diese mit $\bar{n}_0(\lambda_i)$ bezeichnet, sowie mit $\bar{n}_k(\lambda_i)$, wenn die Kalibrierung mit einer anderen Anzahl Photonen durchgeführt wurde.

Der zweite Rauscheinfluss, der hier betrachtet werden soll, beschreibt einen zufälligen Auswahlprozess. Ein emittiertes Photon erzeugt mit der mittleren Wahrscheinlichkeit² $s_{u,i}s_{r,i}q_i$ ein messsignalwirksames Elektron-Loch-Paar. Diese zufällige und stochastisch unabhängige Auswahl kann durch einen Bernoulli-Prozess modelliert werden [12]. Durchläuft ein Poisson-verteilter Photonenstrom solch einen Bernoulli-Prozess, so bleibt die Verteilung erhalten. Photonen, die auch ein Elektron-Loch-Paar erzeugen, sind folglich $n_i \sim P(\bar{n}_{0,i}s_{u,i}s_{r,i}q_i)$ verteilt.

Das Signal-zu-Rausch-Verhältnis wird wie folgt eingeführt:

$$\text{SNR} := \frac{[E\{m_{AA} - m_{AB}\}]^2}{\text{Var}\{m_{AA} - m_{AB}\}} = \frac{[E\{m_{AA}\} - E\{m_{AB}\}]^2}{\text{Var}\{m_{AA}\} + \text{Var}\{m_{AB}\}}. \quad (4)$$

Hierbei wurde ausgenutzt, dass die Messungen als stochastisch unabhängig angesehen werden können, z.B. indem sie zu unterschiedlichen Zeitpunkten erfolgen. Im Folgenden werden Signal und Rauschen getrennt voneinander betrachtet. Signal:

²Auf die Abhängigkeiten der Variablen von (λ) wird im Folgendem zur besseren Übersichtlichkeit verzichtet. Folgende Schreibweisen sind äquivalent $s_u(\lambda_i) = s_{u,i}$.

$$\begin{aligned}
[\mathbf{E}\{m_{AA} - m_{AB}\}]^2 &= \left[\frac{\sum_i \mathbf{E}\{n_{1,i}\} s_{A,i} s_{A,i} q_i}{\sqrt{\sum_i \bar{n}_{k,i} [s_{A,i}]^2 q_i}} - \frac{\sum_i \mathbf{E}\{n_{2,i}\} s_{A,i} s_{B,i} q_i}{\sqrt{\sum_i \bar{n}_{k,i} [s_{B,i}]^2 q_i}} \right]^2 \quad (5) \\
&= \left[\left(\frac{\sum_i \bar{n}_{0,i} s_{A,i} s_{A,i} q_i}{\sqrt{\sum_i \bar{n}_{k,i} \left(\frac{\bar{n}_{0,i}}{\bar{n}_{0,i}}\right) [s_{A,i}]^2 q_i}} - \frac{\sum_i \bar{n}_{0,i} s_{A,i} s_{B,i} q_i}{\sqrt{\sum_i \bar{n}_{k,i} \left(\frac{\bar{n}_{0,i}}{\bar{n}_{0,i}}\right) [s_{B,i}]^2 q_i}} \right) \frac{\sqrt{\sum_i \bar{n}_{0,i} [s_{A,i}]^2 q_i}}{\sqrt{\sum_i \bar{n}_{0,i} [s_{A,i}]^2 q_i}} \right]^2
\end{aligned}$$

Dieser Ausdruck kann vereinfacht werden, wenn das Verhältnis $\frac{\bar{n}_{k,i}}{\bar{n}_{0,i}} = f \forall i$ in allen Intervallen i den gleichen Wert annimmt. Ein von i unabhängiger Faktor lässt sich somit aus der Summe ausklammern. \bar{n}_i beschreibt den Verlauf der erwarteten mittleren Photonenzahl über die diskreten Wellenlängenintervalle λ_i . Die Forderung $\frac{\bar{n}_{k,i}}{\bar{n}_{0,i}} = f \forall i$ ist dann erfüllt, wenn sich der Verlauf von $\bar{n}_{k,i}$ und $\bar{n}_{0,i}$ nur in einem skalaren Faktor f unterscheidet. Am einfachsten wird diese Annahme erfüllt, wenn die Beleuchtungsparameter zwischen Kalibrierung und Messbetrieb nicht verändert werden. Mit den beiden Erweiterungen kann der obige Ausdruck dann auf den nKK zurückgeführt werden:

$$[\mathbf{E}\{m_{AA} - m_{AB}\}]^2 = \frac{\bar{n}_{0,i}}{\bar{n}_{k,i}} (1 - \phi_{AB})^2 \sum_i \bar{n}_{0,i} [s_{A,i}]^2 q_i. \quad (6)$$

Mit einem analogen Vorgehen kann das Rauschen in folgender Weise auf den nKK zurückgeführt werden. Rauschen:

$$\text{Var}\{m_{AA} - m_{AB}\} = \sqrt{\frac{\bar{n}_{0,i}}{\bar{n}_{k,i}} (1 + \phi_{AB})} \sqrt{\sum_i \bar{n}_{0,i} [s_{A,i}]^2 q_i}. \quad (7)$$

Die Zwischenergebnisse für Signal und Rauschen führen dann zu folgendem SNR:

$$\text{SNR}(\phi_{AB}) = \sqrt{\frac{\bar{n}_{0,i}}{\bar{n}_{k,i}}} \overbrace{\frac{(1 - \phi_{AB})^2}{1 + \phi_{AB}}}^{(2)} \overbrace{\sqrt{\sum_i \bar{n}_{0,i} [s_{A,i}]^2 q_i}}^{(3)}. \quad (8)$$

Die erste Wurzel aus dem Verhältnis der Menge Photonen während der Kalibrierung zur Messsituation wird in der Praxis zu 1 gewählt. Zum einen muss die Farbtemperatur der Beleuchtung gleichbleiben, zum anderen wird die Kalibrierung selbst mit maximalem SNR durchgeführt und somit mit einer möglichst hohen Anzahl Photonen \bar{n}_k . Der zweite Term beschreibt die Auswirkung von ϕ_{AB} auf das SNR, dargestellt in Abbildung 4. Dem Verlauf kann entnommen werden, dass der zweite Term für immer ähnlichere Spektren ($\phi_{AB} \rightarrow 1$) bis auf Null abfällt. Identische Spektren haben somit einen SNR von 0 und können erwartungsgemäß nicht unterschieden werden. Der dritte Term bestraft unbekannte Spektren (hier s_A), welche viel Licht absorbieren. Eine Verdopplung der Photonenzahl verbessert das SNR um den Faktor $\sqrt{2}$.

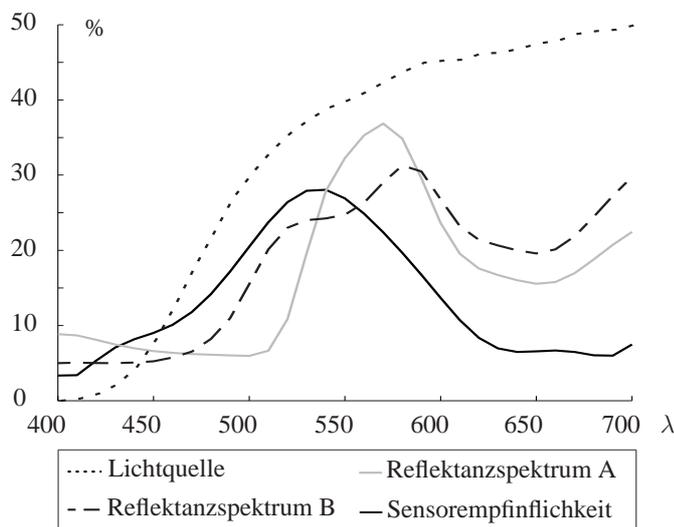


Bild 3: Verschiedene spektrale Verläufe; der Verlauf der Beleuchtung ist rein qualitativ aufgetragen.

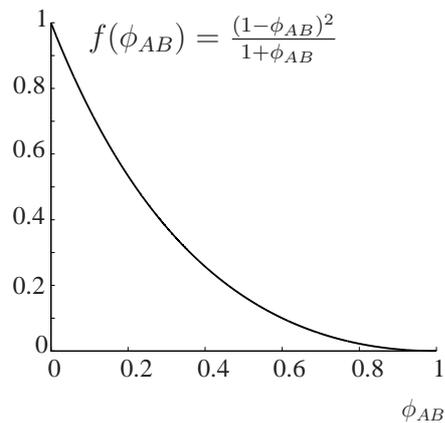


Bild 4: Einfluss des nKK auf das SNR.

4 Experiment

Ziel des Experiments ist es zu zeigen, dass Proben anhand ihres Reflektanzspektrums identifiziert werden können, indem der nKK in beschriebener Weise gebildet wird. Neben einer Messung wird das Ergebnis auch simuliert und verglichen. Als Aufgabenstellung sollen zwei metamere Farbproben A und B unterschieden werden. D.h. die Farbproben, die Beleuchtung und die Kamera sind so gewählt, dass sich bei direkter Betrachtung ein identischer Grauwert einstellt. Somit ist sichergestellt, dass eine Unterscheidung nur dann möglich

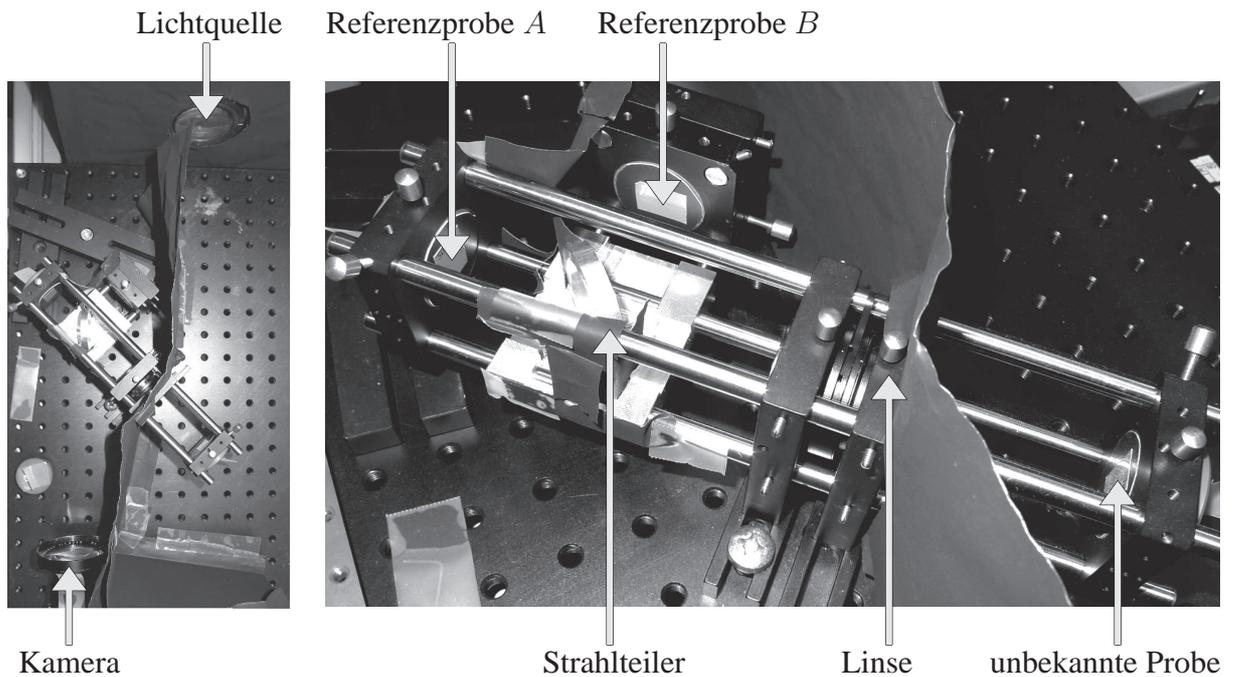


Bild 5: Experimenteller Aufbau mit Strahlteiler und zwei Referenzproben.

ist, wenn die Information der unterschiedlichen Reflektanzspektren ausgenutzt wird.

4.1 Experimenteller Aufbau

Der Aufbau ist in Abbildung 4 dargestellt. Durch die Verwendung eines Strahlteilers³ können beide Referenzmaterialien gleichzeitig betrachtet werden. Damit die Farbproben metamer erscheinen, müssen Beleuchtung und Kamera auf die Farbproben abgestimmt sein. Als Leuchtquelle wird ein Halogenstrahler⁴ eingesetzt der nach Normlicht D50 spezifiziert ist. Im Beleuchtungsstrahlengang ist zusätzlich ein Glasfilter⁵ eingebracht. Die Farbproben sind jeweils einem Streifen eines Farbtemperatur Indikatorstreifens⁶ entnommen, wie sie in der Druckindustrie zur Beleuchtungskontrolle eingesetzt werden. Die Farbkamera⁷ wird als Grauwertkamera genutzt, indem die einzelnen RGB-Kanäle entsprechend der Gewichtungsfaktoren $\{0.16, 0.68, 0.16\}$ gewichtet werden. Die Kennlinien wurden aus Datenblättern zusammengetragen und die Farbproben

³Polka Dot Strahlteiler mit konstantem Teilungsverhältnis für unterschiedliche Wellenlängen; Edmund Optics.

⁴SoLux 4700 Kelvin, betrieben bei 14V sodass 5000K Farbtemperatur erreicht wird.

⁵Schott Glasfilter GG10.

⁶UGRA Metameriekarte 5000K.

⁷Stingray F-146C von Allied Vision Technologies GmbH.

mit einem Spektrometer⁸ vermessen. Auf Basis dieser Daten wird ein nKK von $\phi_{AB} = 0.96$ vorhergesagt. Im Vergleich zu einer fiktiven Aufgabenstellung in es gilt Rot und Blau als Proben zu unterschieden, ist die Unterscheidung der vorgestellten metamere Farben deutlich schwieriger. Unter der Annahme die Farben Rot und Blau wären maximal unähnlich ($\phi_{\text{Rot,Blau}} = 0$), muss für dieses Experiment ($\phi_{AB} = 0.96$) mit einem um Faktor 1000 geringeren SNR gerechnet werden. Der Unterschied ergibt sich, wenn $\phi_{\text{Rot,Blau}}$ und ϕ_{AB} in den zweiten Term des SNR eingesetzt werden (Gleichung (8)).

4.2 Durchführung

Der eigentlichen Messung ist ein einmaliger Kalibrierprozess vorgeschaltet. In diesem werden die Kalibrierkonstanten bestimmt, wie sie im Nenner der Messgleichung (3) angegeben sind. Dazu wird die unbekannte Probe identisch zur Referenzprobe gewählt und bis auf eine Wurzel-Operation entspricht der gemessene Grauwert direkt der Normierungskonstante. Dieser Zusammenhang wird ersichtlich wenn die Normierungskonstanten mit dem Kameramodell (2) verglichen werden. Die Konstante wird als Mittelwert aus 100 Messungen gewonnen und somit näherungsweise als rauschfrei betrachtet.

Da das Experiment als unbekannte Probe nur zwei Möglichkeiten A und B zulässt, kann die Auswertung sehr anschaulich durch die Verhältnisbildung $\frac{m_{uB}}{m_{uA}}$ der Einzelmessungen erfolgen, da gilt:

$$\frac{m_{AB}}{m_{AA}} = \frac{\phi_{AB}}{\phi_{AA}} = \phi_{AB} \leq 1, \quad \frac{m_{BB}}{m_{AB}} = \frac{\phi_{BB}}{\phi_{BA}} = \frac{1}{\phi_{BA}} \geq 1. \quad (9)$$

Wären mehr als zwei Referenzmaterialien involviert, müssten zur Auswertung die Absolutwerte z.B. m_{uA}, m_{uB}, m_{uC} auf ein Maximum hin untersucht werden.

Die eigentliche Messreihe besteht aus jeweils 100 Messungen $\frac{m_{AB}}{m_{AA}}$ und $\frac{m_{BB}}{m_{BA}}$ bei unterschiedlichen Belichtungszeiten. Über die Belichtungszeit lässt sich sehr komfortabel die Anzahl Photonen beeinflussen und somit das SNR. Die Messwerte sind als Whisker-Plot in Abbildung 4.2 dargestellt. Die zwei Niveaus, in denen die Messwerte liegen, identifizieren jeweils eine unbekann-

⁸Minolta Spektrophotometer CM-3610d

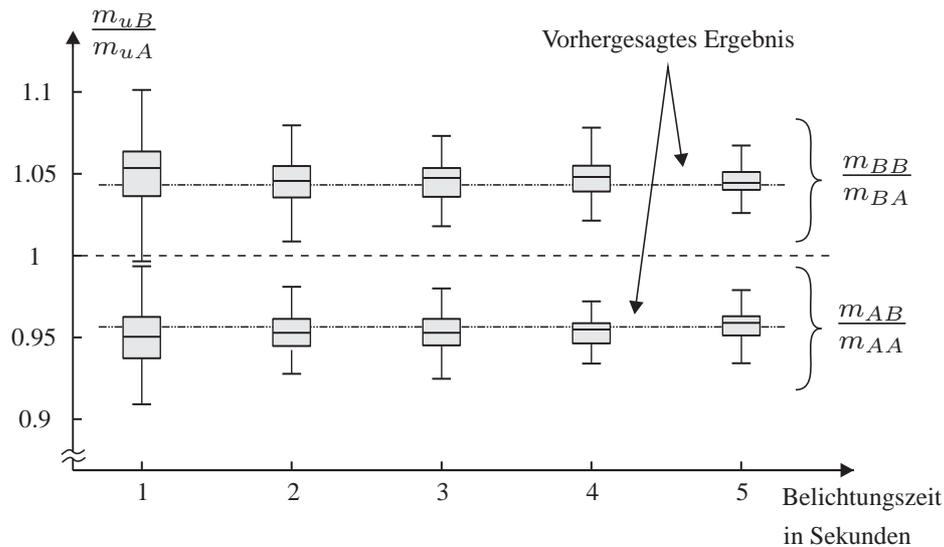


Bild 6: Belichtungsreihe für Probe A und B.

te Probe. Es ist zu sehen, dass für das beschriebene Experiment eine sichere Unterscheidung erst ab 2 Sekunden Belichtungszeit möglich ist. Qualitativ lässt sich sagen, dass wie erwartet das SNR mit steigender Belichtungszeit zunimmt. Durch eine hellere Beleuchtung kann die Aufnahmezeit verkürzt werden. Der Mittelwert über die Einzelmessungen liegt nahe am vorhergesagten Wert $\phi_{AB} = 0.96$, bzw. $\frac{1}{\phi_{BA}} = \frac{1}{\phi_{AB}} \approx 1.04$.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die bildgebende Spektroskopie macht optische Materialeigenschaften für die Bildverarbeitung zugänglich, die geeignet sind, Materialien zu identifizieren. Für inline-Industrieprozesse sind schnelle Sensoren notwendig, die sich leicht an eine Problemstellung adaptiert lassen. Das vorgestellte Messprinzip erfüllt prinzipiell die Forderung an hohe Geschwindigkeiten, zum anderen lässt es sich leicht an Aufgabenstellungen anpassen. Des Weiteren kann es als ein Ähnlichkeitsmaß zwischen Spektren interpretiert werden, d.h. in Form eines optisch realisierten normierten Kreuzkorrelationskoeffizienten. Besonders attraktiv sind Anwendungen im NIR, da hier zum einen die Spektren von der chemischen Struktur der Materialien abhängen (Schwingungsspektren), zum anderen geeignete Kamerasensoren verfügbar sind.

Literatur

- [1] J. Beyerer, M. Sauerland, and R. Gruna, "Anordnung zur optischen Bestimmung einer Probe und entsprechendes Verfahren." Deutsches Patent- und Markenamt, May 2011. Fraunhofer-Gesellschaft.
- [2] C. Liu, L. Sharan, E. H. Adelson, and R. Rosenholtz, "Exploring features in a bayesian framework for material recognition," in *Computer Vision and Pattern Recognition, IEEE Computer Society Conference on*, pp. 239–246, IEEE Computer Society, (Los Alamitos, CA, USA), 2010.
- [3] M. Varma and A. Zisserman, "A statistical approach to material classification using image patch exemplars," *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on* **31**(11), pp. 2032–2047, 2009.
- [4] O. Wang, P. Gunawardane, S. Scher, and J. Davis, "Material classification using BRDF slices," in *Computer Vision and Pattern Recognition, IEEE Computer Society Conference on*, pp. 2805–2811, IEEE Computer Society, (Los Alamitos, CA, USA), 2009.
- [5] D. L. Pavia, G. M. Lampman, G. S. Kriz, and J. A. Vyvyan, *Introduction to Spectroscopy*, Brooks Cole, 4 ed., Mar. 2008.
- [6] M. Michelsburg, R. Gruna, and F. L. Puente, "Spektrale Bandselektion beim Entwurf automatischer Sortieranlagen," in *Forum Bildverarbeitung*, p. 426, KIT Scientific Publishing, (Regensburg), Dec. 2010.
- [7] M. L. Myrick, O. Soyemi, J. Karunamuni, D. Eastwood, H. Li, L. Zhang, A. E. Greer, and P. Gemperline, "A single-element all-optical approach to chemometric prediction," *Vibrational Spectroscopy* **28**, pp. 73–81, Feb. 2002.
- [8] B. Dai, A. Urbas, C. C. Douglas, and R. A. Lodder, "Molecular factor computing for predictive spectroscopy," *Pharmaceutical Research* **24**, pp. 1441–1449, Mar. 2007.
- [9] S. E. Bialkowski, "Species discrimination and quantitative estimation using incoherent linear optical signal processing of emission signals," *Analytical Chemistry* **58**, pp. 2561–2563, Oct. 1986.
- [10] M. P. Nelson, J. F. Aust, J. A. Dobrowolski, P. G. Verly, and M. L. Myrick, "Multivariate optical computation for predictive spectroscopy," *Analytical Chemistry* **70**, pp. 73–82, Jan. 1998.
- [11] J. Medendorp and R. A. Lodder, "Applications of integrated sensing and processing in spectroscopic imaging and sensing," *Journal of Chemometrics* **19**, pp. 533–542, Oct. 2005.
- [12] B. E. A. Saleh and M. C. Teich, *Grundlagen der Photonik*, Wiley-VCH, Mar. 2008.