

Wahrnehmungsgerechte Farbverarbeitung mit Farbsensoren

Prof. Dr.-Ing. Ansgar Wego, Hochschule Wismar, Fachbereich Elektrotechnik und Informatik,
Dr.-Ing. Gundolf Geske, ASTECH Angewandte Sensortechnik GmbH Rostock

Farben und Oberflächen von Objekten müssen in verschiedenen technischen Bereichen sicher identifiziert werden. Hierfür stehen dem Anwender heute eine Fülle an spezialisierten Optosensoren – die Farbsensoren – zur Verfügung. Allerdings werden bei vielen dieser Geräte grundlegende Bedingungen für eine wahrnehmungsgerechte und damit korrekte Farberkennung missachtet. In diesem Beitrag werden die theoretischen und technischen Grundlagen einer korrekten Farberkennung näher betrachtet.

1 Einleitung

In vielen Anwendungsbereichen (wie beispielsweise der Qualitätssicherung oder der Prozesssteuerung) muss man sich auf die Erkennungsergebnisse von Farbsensoren¹ verlassen können. Da es sich bei Farberkennung um die technische Umsetzung einer Sinnesempfindung handelt, müssen bei der Signalverarbeitung besondere Bedingungen beachtet werden. Eine nicht der Wahrnehmung entsprechende Farbverarbeitung führt häufig zu falschen Farberkennungen und erhöht somit unnötig die Kosten in Qualitätssicherung bzw. Produktion. Eine Voraussetzung für die korrekte und zuverlässige Erkennung von Farben ist insbesondere die Anwendung der höheren Farbmatrik. Weiterhin muss die Stabilität der zugrundeliegenden optosensorischen Messeinrichtung langfristig gewährleistet werden.

Einsatzbereiche für Farbsensoren sind überwiegend im industriellen Umfeld zu sehen. Farbsensoren zeichnen sich neben einer hohen Erkennungsgeschwindigkeit dementsprechend durch eine kompakte und robuste Bauweise aus (typische Abmessungen etwa 50 x 50 x 20 mm³, eloxiertes Aluminiumgehäuse). Häufig befinden sich die Geräte in direkter Produktionsnähe in entsprechenden Maschinen. Dadurch ergeben sich hohe Anforderungen an die Zuverlässigkeit, weil mit stark wechselnden Temperatur- und Umgebungslichteinflüssen zu rechnen ist. Eine Wartung oder häufige Nachjustierung der Geräte ist auf Grund der Einbausituation kaum möglich und wird in den meisten Fällen auch nicht akzeptiert. Daher müssen Farbsensoren über lange Zeit ohne Eingriff farbstabile Erkennungen

gewährleisten. Einige Anwendungen, bei denen eine korrekte Farberkennung für die Qualität der Anwendung Voraussetzung ist, werden nachfolgend beispielhaft erläutert.

Prozessüberwachung

Viele Stoffe verändern durch Einwirkung ihre Farbe. Die Art der Einwirkung kann chemischer (z. B. Farbumschläge bei Reaktionen), thermischer (z. B. bei Zersetzungsprozessen), mechanischer (z. B. durch Druckbeaufschlagung) oder strahlungsphysikalischer (z. B. durch UV-Licht) Natur sein. Die farbliche Veränderung ist häufig ein Indiz für eine qualitative Veränderung des Stoffes. Um die Qualität im Prozess zu sichern oder um auf das Ereignis der Farbänderung zu reagieren werden daher Farbüberwachungen der entsprechenden Stoffe durchgeführt.

Farbqualitätssicherung

Bei der äußeren Gestaltung von Produkten spielt die Farbwahrnehmung für Hersteller eine wesentliche Rolle. Dies hängt mit der ausgeprägten psychologischen Wirkung von Farben beim Menschen zusammen. Bekannt ist, dass Farben Assoziationen, Erinnerungen und Gefühle hervorrufen. Dieser Zusammenhang wird von den Produzenten gezielt ausgenutzt, um den jeweiligen Erzeugnissen eine bestimmte Qualität zuzuordnen oder um ihre eindeutige Wiedererkennung sicher zu stellen (z. B. Coca-Cola, Milka, u. a.). Das Interesse der Hersteller an einer gleichbleibenden farblichen Erscheinung ihrer Produkte ist daher sehr hoch. Im gesamten Herstellungsprozess werden zur Sicherstellung der Farberscheinung Qualitätskontrollen durchgeführt. Der Umfang der Maßnahmen reicht von Wareneingangskontrollen über Inline-Überwachungen bis hin zu aufwendigen stichprobenartigen Laboruntersuchungen.

¹ Als Farbsensoren werden oft auch die reinen Fotodioden mit vorgeschalteten Farbfiltern bezeichnet. Hier soll unter Farbsensor ein komplettes Gerät inklusive Optik und Auswertung verstanden werden.

Farbmarkenerkennung

Da jeder sichtbare Körper eine Farbwahrnehmung hervorruft, kann seine Farbe als Merkmal zur Erkennung des Gegenstandes herangezogen werden. Diese Tatsache wird vielfach zur Prozesssteuerung ausgenutzt. Durch Aufbringung einer farblichen Markierung (Farbmarke) auf den Gegenstand kann eine eindeutige Erkennung der markierten Stelle zu einem späteren Zeitpunkt im Prozess erfolgen. Auf diese Weise wird beispielsweise eine Ausschleusung von „Schlecht“-Teilen realisiert. Eine weitere Anwendung von Farbmarken besteht in der exakten Positionierung im Verarbeitungsprozess. Häufig ist das Aufbringen einer Farbmarke gar nicht erforderlich, da der Gegenstand selbst eindeutige farbliche Bereiche für die Wiedererkennung besitzt.

2 Farbmetrische Grundlagen

2.1 Der Farbbegriff

Farbe ist eine menschliche Sinnesempfindung. Sie ist keine physikalische Eigenschaft. Jeder sichtbare Körper erzeugt aufgrund seiner Reflexionseigenschaften einen Farbreiz (Farbreizfunktion) und in der Folge eine Farbwahrnehmung beim Beobachter. Sichtbar ist nur der Bereich elektromagnetischer Wellen zwischen 380 nm und 780 nm. Sonstige optische Wahrnehmungen wie Struktur (Licht-Schatten-Wirkungen), Glanz, Rauigkeit sind vom Begriff der Farbe abzugrenzen. Auch psychologische Effekte und Phänomene, die sich auf den Sehsinn beziehen (etwa Umstimmung oder Adaption), sind nicht der Farbwahrnehmung zuzuordnen [1], [2].

2.2 Farbmetrik

Um Farben technisch zu erfassen bedarf es einer Messeinrichtung. Da es sich bei Farbe aber um eine Sinnesempfindung und nicht um eine physikalische Größe handelt, muss hierfür ein besonderes Maßsystem eingeführt werden, welches die Farbmetrik begründet und grundsätzlich in Normen definiert wird. Ziel der Farbmetrik ist die eindeutige Bestimmung von Farben durch Farbmaßzahlen [1]. Die Basis der Farbmetrik bilden die sogenannten Normspektralwertfunktionen (Bild 1). Sie definieren die drei spektralen Wirkfunktionen des farbmetrischen Normalbeobachters, mit denen die Farbreizfunktio-

on bewertet werden muss. Die Normspektralwertfunktionen wurden für zwei Gesichtsfeldgrößen (2° und 10°) normiert [3]. Zur eindeutigen Bestimmung der Farbmaßzahlen sind weitere definierte Messbedingungen notwendig, die ebenfalls in Normen festgelegt sind [4], [5], [6].

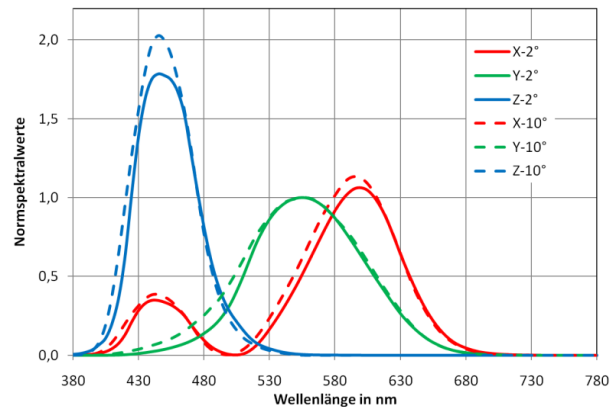


Bild 1: Normspektralwertfunktionen für 2° und 10° Beobachter

2.3 Farbenräume

Farben können mit Farbmaßzahlen in unterschiedlichen Farbenräumen gekennzeichnet werden. Die Basis bildet das Normvalenzsystem mit den Normfarbwerten X (Rot), Y (Grün) und Z (Blau). Aus den Normfarbwerten entsteht durch Bildung der Normfarbwertanteile x (Rotanteil) und y (Grünanteil) die bekannte Normfarbtafel (Bild 2) [7].

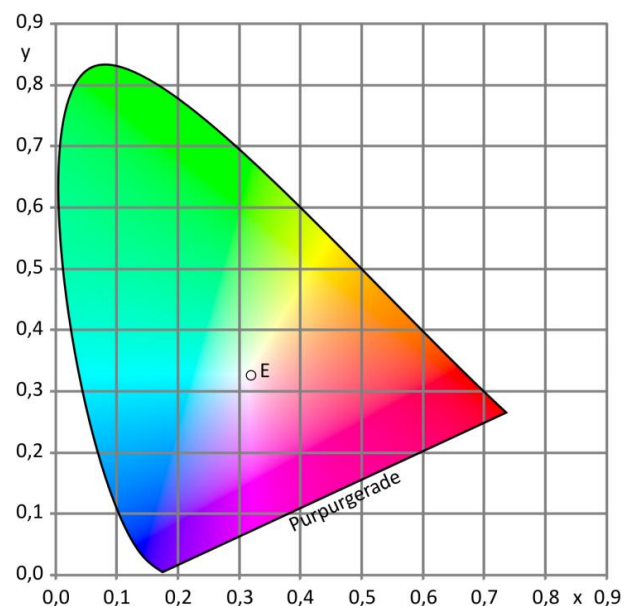


Bild 2: Normfarbtafel

Ein wesentlicher Nachteil des Normvalenz-Farbenraums ist, dass die geometrischen Farbabstände sehr stark von den empfundenen Farbab-

ständen abweichen. Mit dieser Problematik befasst sich die sogenannte höhere Farbmatrik. Es wurden verschiedene Farbenräume definiert, die eine möglichst gute Übereinstimmung zwischen geometrischem und empfundenem Farbabstand bieten (sogenannte gleichförmige bzw. gleichabständige Farbenräume). Der am häufigsten verwendete angenähert gleichabständige Farbenraum ist der CIELAB-Farbenraum mit den Farbmaßzahlen L^* , a^* und b^* [7], [8] (Bild 3).

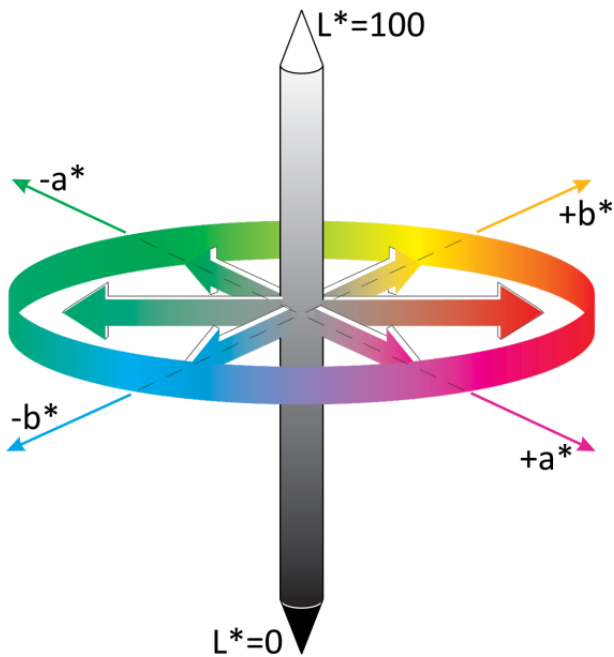


Bild 3: CIELAB Farbenraum

2.4 Farbmessverfahren

Zur messtechnischen Bestimmung der Farbmaßzahlen von Farben existieren heute zwei normierte Verfahren. Ein früher verwendetes drittes Verfahren (Gleichheitsverfahren [9]) hat für die Messtechnik heute keine Bedeutung mehr und wurde entsprechend aus der aktuellen DIN 5033 entfernt. Daneben existieren weitere nicht normierte Verfahren, die aber auf das Normvalenzsystem bezogen werden müssen.

2.4.1 Dreibereichsverfahren

In [10] wird das normierte Dreibereichsverfahren beschrieben. Licht trifft auf einen Empfänger, dessen spektrale Empfindlichkeit den Normspektralwertfunktionen entspricht. Mit Hilfe von Photoempfängern (Photodioden) wird die „Helligkeit“ des einfallenden Lichtes photometrisch erfasst. Die so ermittelten Werte L entsprechen der Farbvalenz. Zur

Erkennung von Körperfarben ist eine Beleuchtungsquelle notwendig. Zu Messzwecken müssen Lichtquellen mit genormten Strahlungsfunktionen verwendet werden (z. B. Lichtart D 65). Die praktisch erreichbare Messgenauigkeit ist geringer als beim Spektralverfahren und hängt entscheidend von der spektralen Empfindlichkeitskurve der verwendeten Farbfilter und Lichtquelle ab. Der technische Aufwand ist niedrig. Es kann aber eine sehr hohe Verarbeitungsgeschwindigkeit erreicht werden. Das Dreibereichsverfahren wird heute weniger zur Bestimmung von Farbmaßzahlen verwendet. Am häufigsten kommt es in Sensoren zur Farberkennung zum Einsatz (siehe weiter unten).

2.4.2 Spektralverfahren

Die Messung von Farbmaßzahlen nach dem normierten Spektralverfahren ist in [11] festgelegt. Jeder Farbreiz setzt sich als Summe über seine (monochromatischen) Spektralanteile zusammen. Zur Ermittlung der Farbmaßzahlen wird über den sichtbaren Wellenlängenbereich das Spektrum (d. h. die zugehörigen Intensitäten) der zu untersuchenden Licht- oder Körperfarbe ausgemessen. Bei Körperfarben muss auch das Spektrum der beleuchtenden Lichtart einbezogen werden. Anschließend erfolgt eine Bewertung des gemessenen Spektrums mit den Normspektralwertfunktionen. Das Spektralverfahren erreicht eine höhere absolute Messgenauigkeit als das Dreibereichsverfahren. Es können zudem Farbmaßzahlen von Körperfarben weitgehend unabhängig von der real verwendeten Lichtquelle bestimmt werden. Das Verfahren ist verglichen mit dem Dreibereichsverfahren apparativ aufwändiger und kostenintensiver. Es erreicht nur eine geringe Verarbeitungsgeschwindigkeit. Geräte, die dieses Verfahren verwenden, heißen Spektralphotometer. Das Spektralverfahren mit angeschlossener Rechentechnik ist das heute leistungsfähigste und am häufigsten eingesetzte Verfahren zur Ermittlung von Farbmaßzahlen.

2.4.3 Mehrbereichsverfahren

Über die beiden normierten Verfahren hinaus werden auch Methoden verwendet, die eine Zwischenstellung einnehmen. Dies sind sogenannte Mehrbereichsverfahren (auch Multispektralverfahren genannt), die auf der Erfassung fotometrischer Werte

aus mehr als drei Spektralbereichen (z. B. sieben Spektralbereiche [12]) basieren. Sie können im engeren Sinne allerdings nicht zu dem oben definierten Spektralverfahren gerechnet werden, da die Voraussetzungen zur Anwendung der Rechenvorschrift (siehe [11]) nur unzureichend gegeben sind. Die spektralen Empfindlichkeitsfunktionen der verwendeten Filter, welche die erfassten spektralen Bereiche bei diesem Verfahren definieren, zeigen eine deutliche Überlappung und besitzen keine Rechteckform[13].

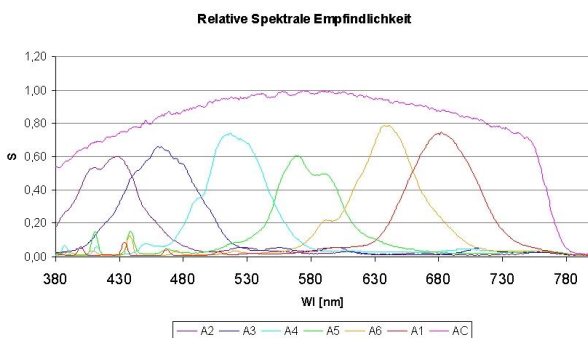


Bild 4: Spektrale Empfindlichkeit des Multispektralfotodetektors MMCS6 nach [13]

Dennoch eignen sich auch diese Verfahren zur Bestimmung von Farbmaßzahlen, wenn eine hinreichend genaue Kalibration auf das Normvalenzsystem gelingt.

2.4.4 Farbdetektion

Wie oben erläutert wurde, ist es mit Hilfe der Farbmessverfahren möglich, einer Farbe eindeutige Maßzahlen zuzuordnen. In vielen technischen Anwendungen (siehe oben) ist die Kenntnis der eigentlichen Farbmaßzahlen einer Farbe aber nicht erforderlich bzw. von untergeordnetem Interesse. Für diese Fälle reicht die bloße Feststellung aus, ob zwei Farben gleich (bzw. innerhalb einer festgelegten Toleranz gleich) sind oder nicht. Die Aufgabe des Farbvergleichs übernehmen typischerweise Farbsensoren. In Abgrenzung zum Begriff Farbmessung soll bei Farbsensoren daher im Folgenden von Farbdetektion (oder Farberkennung) gesprochen werden.

Zur eindeutigen Farbdetektion sind aber auch bei Farbsensoren grundsätzlich die gleichen Bedingungen wie zur Farbmessung zu erfüllen. Auch hier bildet das Normvalenzsystem die Basis. Allerdings

kann auf die Ausgabe bzw. Darstellung der Farbmaßzahlen verzichtet werden. Die Erfassung der Farbmaßzahlen dient bei Farbsensoren dem Farbvergleich. Dazu sind Farbabstandsberechnungen im Sinne der höheren Farbmometrik durchzuführen. Die absolute Genauigkeit der Farbmaßzahlen, die bei Farbmessgeräten für deren Qualität maßgebend ist, spielt bei der Farberkennung innerhalb desselben Sensors allerdings keine zentrale Rolle. Hierin liegt der Grund dafür, warum bei Farbsensoren die Anwendung des Dreibereichsverfahrens meist ausreichend ist, und warum nicht normierte Lichtarten als Beleuchtungsquellen Verwendung finden. Die Geräte profitieren somit von der hohen Verarbeitungsgeschwindigkeit und den geringen Kosten für die technische Umsetzung des Verfahrens.

3 Aufbau von Farbsensoren nach dem Dreibereichsverfahren

Farbsensoren müssen in der Lage sein, Farbmaßzahlen einer Farbe zu erfassen und mit Vergleichswerten zu vergleichen. Das Ergebnis des Farbvergleichs gibt eine Aussage darüber, ob (Ergebnis: Ja/Nein) und wenn ja mit welcher (Ergebnis: Farbnummer) der in einer Farhentabelle hinterlegten Vergleichsfarbe die aktuell gemessene Farbe übereinstimmt. Ein weiterer Auswertemodus besteht darin, dass aufgrund des Farbvergleichs die ähnlichste Farbe aus der Farhentabelle (d. h. die Farbe mit dem geringsten Farbabstand zum Messwert) als Farbnummer ausgewertet wird. Darüber hinaus geben farbmometrisch korrekt arbeitende Geräte ein Maß für die empfundene Farbabweichung (Farbabstand) aus.

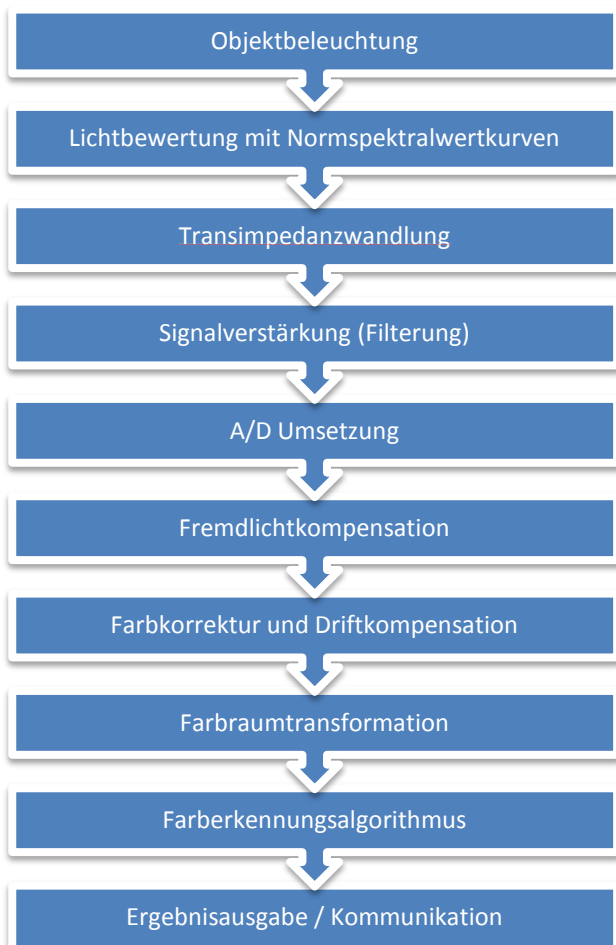
Beim konstruktiven Aufbau von Farbsensoren spielen für die Erkennungsqualität insbesondere die optischen Signalwege eine wichtige Rolle. Hier werden von den Herstellern verschiedene Ansätze verfolgt. Neben den typischen Sensoren mit fest eingebauten Linsensystemen haben sich vor allem lichtleiterbasierte Systeme bewährt. Dies hängt mit der großen Flexibilität der Lichtleiter im Zusammenspiel mit Vorsatzoptiken zusammen. Mit Lichtleitern sind auch entfernte Messstellen auf engem Raum erreichbar. Über Vorsatzoptiken kann

eine große Bandbreite an Messabständen und Messfleckgrößen abgedeckt werden. Bild 5 zeigt exemplarisch einen Farbsensor mit Lichtleiteranschluss in kompakter Bauweise.



Bild 5: Kompakter Farbsensor mit Lichtleiteranbindung (Quelle: Fa. ASTECH GmbH, Rostock)

Bezüglich der Signalverarbeitung werden zur Umsetzung eines korrekt und stabil arbeitenden Farbdetektionsverfahrens bei modernen Farbsensoren mit Dreibereichsverfahren folgende Verarbeitungsschritte durchlaufen, von denen einige Schritte mit zentraler Bedeutung im Folgenden erläutert werden sollen.



3.1 Objektbeleuchtung

Die Eigenschaften der verwendeten Lichtquelle zur Objektbeleuchtung haben maßgeblichen Einfluss auf die Erkennungsergebnisse. Aus messtechnischer Sicht wäre die Verwendung einer normierten Lichtart ideal (z. B. Lichtart D 65 [4]). Weiterhin sollte die Lichtquelle keine Temperaturabhängigkeit sowie keine alterungsbedingten Veränderungen zeigen. Für den Einsatz in Farbsensoren werden außerdem eine kompakte Bauform, eine hohe Lebensdauer, eine hohe Lichtausbeute (gemessen in Lumen/Watt) und ein geringer Preis gefordert. Um das Fremdlicht aus der Messumgebung vom eigentlichen Messlicht zu trennen werden üblicherweise Modulationsverfahren verwendet. Zu diesem Zweck muss die Intensität der Lichtquelle im oberen Kilohertzbereich veränderbar sein.

Bislang sind am Markt keine Lichtquellen bekannt, die alle genannten Eigenschaften gleichermaßen erfüllen. In der Praxis müssen daher Kompromisse eingegangen werden. Am wichtigsten für Farbsensoren sind die Forderungen nach hoher Lebensdauer, hoher Lichtausbeute, kompakter Bauweise und Modulierbarkeit. Diese Eigenschaften lassen sich derzeit am besten mit Hochleistungs-Weißlicht-LEDs erreichen. Diese Lichtquellen erzielen bei sehr geringen Abmessungen im Millimeterbereich Lichtausbeuten von mehr als 100 lm/W (vgl. z. B. [14]). Eine Modulation des Lichtes ist mit LEDs sehr einfach möglich. LEDs erreichen mit mehr als 50.000 Betriebsstunden von allen Lichtquellen die höchste Lebensdauer. Weißlicht-LEDs bestehen aus einer im blauen Spektralbereich emittierenden LED, die mit einer im gelben Spektralbereich fluoreszierenden Lichtkonversionsschicht überzogen sind. Die Lichtmischung erscheint als weißes Licht. Weißlicht-LEDs weisen allerdings auch einige Nachteile auf. Zum einen fehlen besonders im Bereich 380 - 420 nm Spektralanteile, die für eine Detektion der Farbe von entscheidender Bedeutung sein können. Zum anderen streuen die spektralen Energieverteilungen herstellungsbedingt. Dies kann zu deutlichen Abweichungen der Farbmaßzahlen verschiedener Farbsensoren führen. Bild 6 zeigt die Abweichungen drei vermessener Spektren von typischen Weißlicht-LEDs.

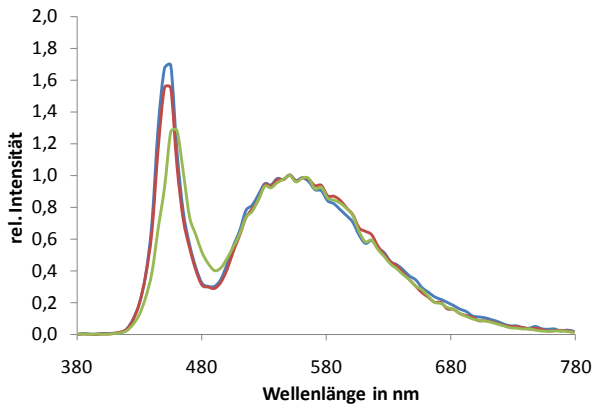


Bild 6: Spektrale Abweichungen typischer Weißlicht-LEDs

LEDs unterliegen einer Temperaturdrift. Die Lichtausbeute nimmt mit steigender Temperatur ab (siehe Bild 7 [14]).

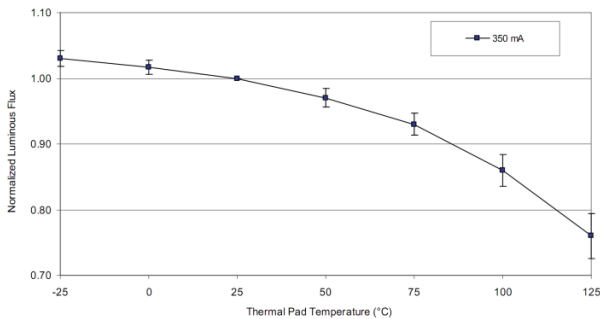


Bild 7: Temperaturdrift einer Weißlicht-LED [14]

Weiterhin zeigen LEDs einen alterungsbedingten Intensitätsverlust (Alterungsdrift siehe Bild 8 [15]).

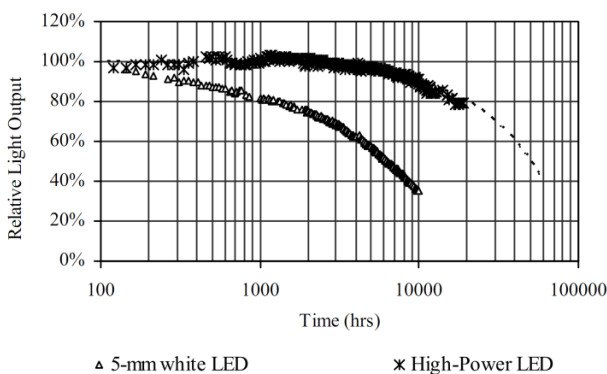


Bild 8: Alterungsdrift von Weißlicht-LEDs [15]

Ein messtechnischer Nachteil ist dadurch gegeben, dass es sich um keine Normlichtart handelt. Daher sind die resultierenden Farbmaßzahlen nicht ohne weiteres mit absoluten Normfarbmaßzahlen vergleichbar.

3.2 Dreibereichsfotodetektor

Eine Voraussetzung für die Anwendung des Dreibereichsverfahrens ist die Bewertung des vom Messob-

jekt reflektierten Lichtes mit den Normspektralwertfunktionen. Dabei ist immer die spektrale Charakteristik der Kombination aus fotosensitivem Empfängerelement und vorgeschaltetem Lichtfilter zu berücksichtigen. Heute werden überwiegend halbleiterbasierte Fotoempfänger mit vorgeschalteten Farbfiltern eingesetzt. Technisch erweist sich die normgerechte Nachbildung der Filterkurven als schwierige Aufgabe. Die Qualität der Farbdetektion hängt aber entscheidend von der Einhaltung der Normspektralwertkurvenform ab. Bereits in den 1950er Jahren wurde die Methode der Partialfilterung zur Konstruktion von Filtern für die Anpassung an Normspektralwertkurven auf Basis von Selenhalbleitern beschrieben [16]. Die Partialfilterung erreicht zwar gute Anpassungsergebnisse (Bild 9), die notwendigen Filterpakete sind allerdings aufwendig.

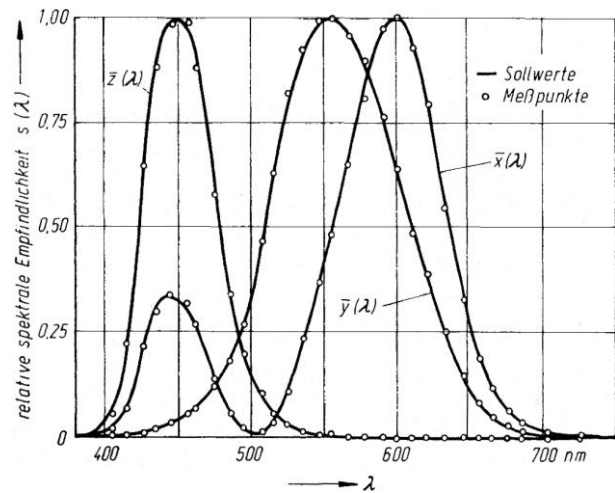


Bild 9: Anpassungsgüte von Partialfiltern [16]

Heute werden überwiegend Siliziumfotodioden als Empfängerelemente eingesetzt. Die jüngste Entwicklung bei den Farbfiltern basiert auf dielektrischen Interferenzfilterschichten, die direkt auf den Siliziumdioden aufgebracht werden [17]. Die erreichbare Anpassungsgüte derartiger Empfängerelemente ist nicht so hoch wie bei den aufwendigeren Partialfilterpaketen. Für Farbsensoren ist sie i. d. R. jedoch ausreichend (Bild 10).

Ein weiteres Problem besteht in der Exemplarstreuung der Interferenzfilter. Auch kleine spektrale Verschiebungen der Filterkurven führen zu deutlichen Abweichungen der resultierenden Farbmaßzahlen.

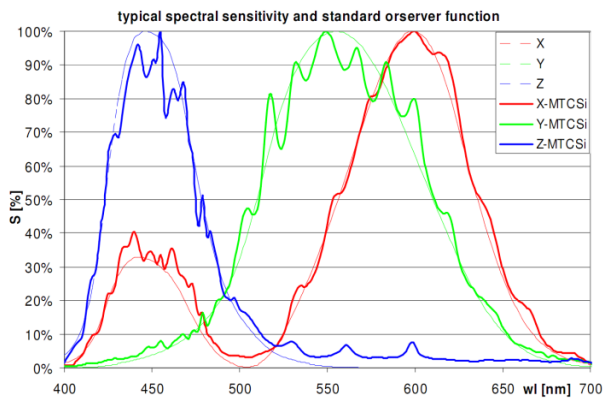


Bild 10: Spektrale Empfindlichkeitskurven eines Dreibereichs-photoelementes mit Interferenzfiltern nach [17]

In [18] wurde die Filterkurvenverschiebung in Abhängigkeit der Schichtdicken der Interferenzfilterpakete untersucht. Bild 11 zeigt die Streuung der Kurven am Beispiel des X-Filters.

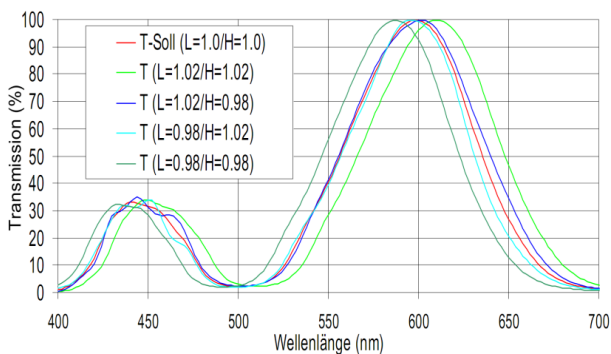


Bild 11: Streuung der Filterkurven in Abhängigkeit der Dicken der Interferenzfilterschichten nach [18]

Prinzipbedingt zeigt der Fotostrom von Siliziumdioden eine exponentielle Temperaturabhängigkeit (vgl. Bild 12 [19]).

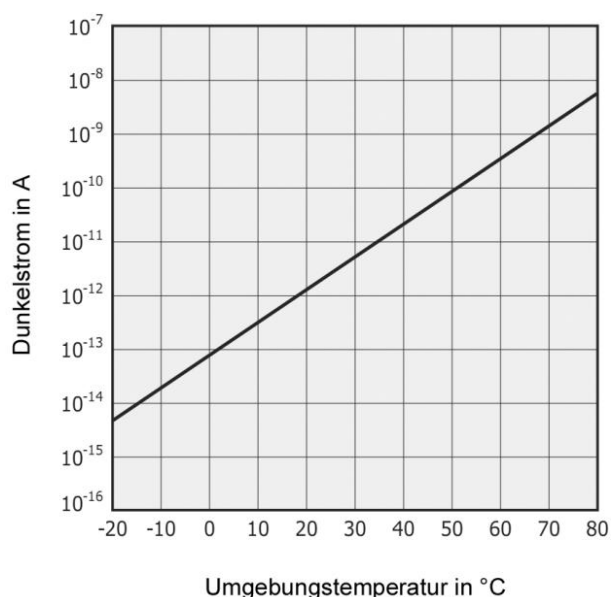


Bild 12: Temperaturabhängigkeit von Fotodioden nach [19]

Bei der Signalverarbeitung ist daher zwingend eine Kompensation der Temperaturdrift vorzusehen.

3.3 Fremdlichtkompensation

In der Messumgebung von Farbsensoren kann in der Praxis Fremdlicht nicht vermieden werden. Beim Messvorgang überlagern sich das Fremdlicht der Umgebung und das Sendelicht des Sensors additiv zum Messlicht. Deswegen ist eine Kompensation des Messsignals bezüglich des Fremdlichtanteils erforderlich. Kunstlicht ist typischerweise mit 100 Hz moduliert (doppelte Netzfrequenz). Um das Fremdlicht vom Messlicht zu separieren gibt es mehrere Möglichkeiten.

Eine sehr effektive Methode besteht in der Differenzmessung. Dazu wird das vom Sensor zur Objektbeleuchtung gesendete Messlicht (Sendelicht) gechoppert. Es werden Messwerte (Empfangslicht) aus der beleuchteten (t_{EIN}) und unbeleuchteten (t_{AUS}) Messphase gewonnen. Durch eine nachfolgende Differenzbildung verschwinden alle Fremdlichtanteile, Dunkelstromanteile und Nullpunktverschiebungen (Bild 13).

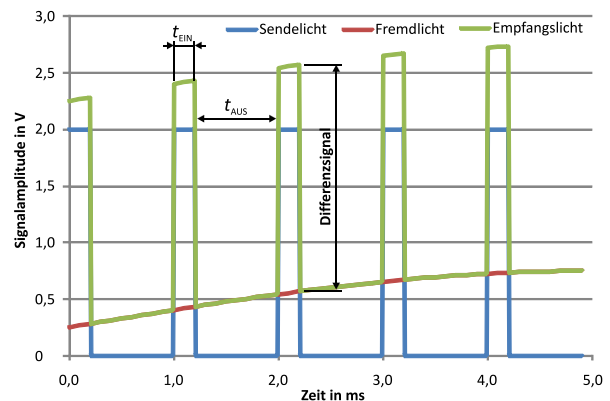


Bild 13: Chopperung des Sendelichtes zur Fremdlichtkompensation

Ein weiterer Vorteil wird durch Verwendung eines geringen Tastverhältnisses ($< 10\%$) bei gleichzeitig hohen LED-Stromimpulsen erzielt. Auf diese Weise entsteht ein großes Differenzsignal, wodurch das Signal-Rauschverhältnis verbessert wird. Weiterhin wird die thermische Belastung der LED reduziert und somit deren Lebensdauer erhöht. Die Chopperfrequenz muss zur Einhaltung des Abtasttheorems mindestens doppelt so hoch sein, wie die zugrundeliegende Schaltfrequenz des Sensors.

3.4 Driftkompensation

Wie oben ausgeführt, zeigen sowohl die bevorzugt eingesetzte Hochleistungs-Weißlicht-LED als auch der siliziumbasierte Dreibereichsfotoempfänger eine ausgeprägte Temperaturabhängigkeit. Bei der LED kommt eine deutliche alterungsbedingte Drift hinzu. Im Vergleich zu den Einflüssen der LED und der Fotodiode leistet die Drift der im Sensor eingesetzten analogen Signalverarbeitungselektronik zwar nur einen geringen Beitrag zur Gesamtdrift, aber auch dieser Beitrag kann für einen stabilen Betrieb unter praktischen Umgebungsbedingungen nicht vernachlässigt werden. Der Kompensation aller Drifterscheinungen im Farbsensor kommt daher eine zentrale Bedeutung zu.

Eine Methode, die Hersteller von Farbsensoren versuchen anzuwenden, ist die Kompensation der Temperaturdrift auf Basis eines funktionalen Zusammenhangs zwischen Temperatur und Farbmaßzahländerung. Dabei wird der funktionale Zusammenhang durch Messung von Temperatur und Farbmaßzahlen mittels Kalibrierkurve hergestellt. Naturgemäß hat diese Methode entscheidende Schwächen. Zum einen muss ein hoher Aufwand zur Ermittlung des funktionalen Zusammenhangs getätigt werden, da jeder Sensor individuelle Parameter besitzt. Andererseits wirkt diese Methode nicht mehr bei veränderten Zusammenhängen, die z. B. durch alterungsbedingte Drift der Parameter entstehen.

Wesentlich besser ist eine auf kontinuierlicher Referenzmessung basierende Methode zur Driftkompensation bei Farbsensoren geeignet (siehe Bild 14).

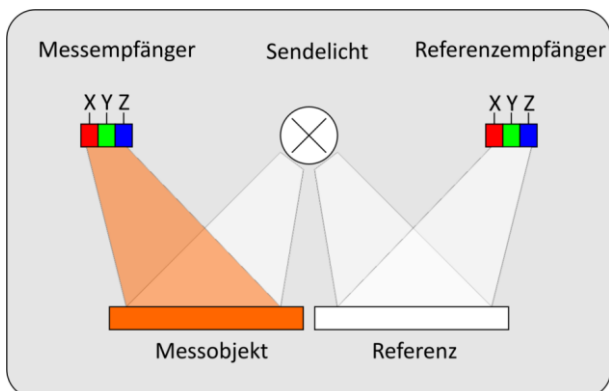


Bild 14: Prinzip der Driftkompensation auf Basis kontinuierlicher Referenzmessungen

Ausgeführt sein kann diese Methode mittels eines zweiten identisch aufgebauten Referenzmesskanals, der die Farbmaßzahlen ständig mit Referenzwerten vergleicht und aus den Änderungen Korrekturfaktoren berechnet. Ob hierbei die Drift durch Temperaturschwankungen oder durch Alterung der Bauteile hervorgerufen wird, ist für diese Methode prinzipbedingt unerheblich. Einzige Voraussetzung für die Güte der Methode ist die Gleichsinnigkeit und Gleichgewichtigkeit der Signaländerungen im Referenz- und Messkanal.

Bild 15 zeigt die Wirkung der Driftkompensation eines Farbsensors, der nach dem Referenzverfahren arbeitet (Typ CR200, Fa. ASTECH GmbH, Rostock). Das Bild zeigt den Verlauf des kompensierten und unkompensierten Signals am Beispiel des X-Kanals (Rot-Kanal) während des Aufwärmvorgangs. Der Aufwärmvorgang ist bei diesem Farbsensor mit einer Temperaturänderung von etwa 20°C verbunden. Zu erkennen ist, dass ohne Kompensation ein Signaleinbruch um knapp 10% während des Aufwärmens des Gerätes stattfindet. Dagegen weicht das driftkompensierte Signal nur geringfügig (ca. 1%) vom Ausgangswert ab.

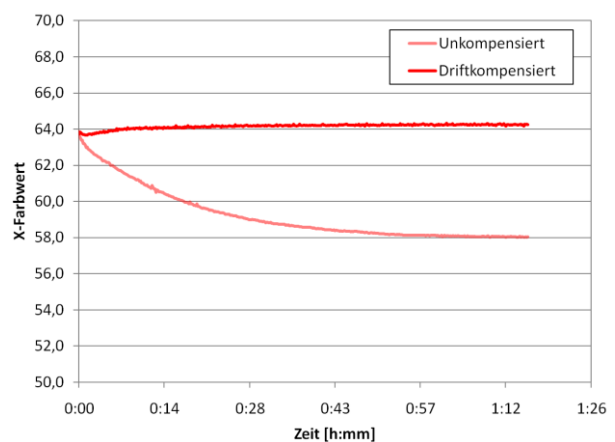


Bild 15: Driftkompensation während des Aufwärmens eines Farbsensors (Typ CR200, Fa. ASTECH GmbH, Rostock)

3.5 Farbkorrektur

In den Ausführungen zur LED-Beleuchtung und zum Dreibereichsfotodetektor wurde darauf hingewiesen, dass die Exemplarstreuungen der Bauteile eine deutliche Streuung der Farbmaßzahlen zur Folge haben. Insbesondere für eine Austauschbarkeit von Farbsensoren desselben Typs ist dieser Umstand ungünstig. Die Einsatzbedingungen in bestimmten Industriebereichen lassen eine Neueinrichtung von

Farbsensoren oft nicht zu. Im Defektfall muss der Austausch der Sensoren hier ohne qualifiziertes Personal und meist sehr schnell erfolgen können. Um den Austausch von Farbsensoren ohne Neuaufnahme der Farbvergleichswerte zu ermöglichen, ist aber eine gute Übereinstimmung zwischen den Geräten erforderlich. Bei einer entsprechenden Geräteübereinstimmung kann dann eine Übertragung des Datensatzes mit den gespeicherten Farbvergleichswerten und Parameter erfolgen. Um eine hinreichende Übereinstimmung von Farbsensoren zu erzielen, ist ein Mehrpunktabgleich im gesamten Farbenraum erforderlich. Da man sich bei Farben in einem dreidimensionalen Raum bewegt, ist die Ermittlung einer einfachen Kalibrierkurve nicht möglich.

Aufgrund der guten Umsetzbarkeit hat sich bei Farbsensoren eine sogenannte targetbezogene Abgleichmethode bewährt. Bei dieser Methode wird eine Koeffizientenmatrix A aus den IST- und SOLL Farbmaßzahlen eines definierten Farbtargets (Satz an Kalibrierfarben wie z. B. ColorChecker®) nach untenstehender Vorschrift berechnet.

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix}}_A \cdot \begin{pmatrix} X_{Ist} \\ Y_{Ist} \\ Z_{Ist} \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$\underline{\underline{A}} = \underline{\underline{XYZ_{Soll}}} \cdot \underline{\underline{XYZ_{Ist}^T}} \cdot (\underline{\underline{XYZ_{Ist}}} \cdot \underline{\underline{XYZ_{Ist}^T}})^{-1} \quad (2)$$

Der Abgleich wird in der Regel vor der Auslieferung an den Kunden beim Hersteller durchgeführt. Dabei müssen alle Elemente des Systems, die den optischen Messpfad bestimmen (wie z. B. Lichtleiter und Vorsatzoptiken), in den Abgleichvorgang mit einbezogen werden. Eine nachträgliche Veränderung des Systems ist nicht mehr zulässig, da sonst die Abgleichbedingungen nicht mehr übereinstimmen. Die Korrekturkoeffizienten werden in der Firmware der Gerätes hinterlegt. Die erreichbare Qualität der Korrektur ist für die meisten praktischen Anwendungen hinreichend, um einen Austausch der Sensoren ohne Neuaufnahme der Farbvergleichswerte zu ermöglichen. Allerdings setzt die Methode beim Anwender voraus, dass die Einbau-

bedingungen (Abstand und Winkel zum Messobjekt) exakt eingehalten werden.

3.6 Farbraumtransformation

Bereits in der Einleitung wurde auf die Notwendigkeit der Anwendung der höheren Farbmetrik als Bedingung für eine korrekte Farberkennung hingewiesen. Begründet wird dies mit der Forderung nach einem empfindungsgemäß gleichabständigen Farbenraum, wie er weiter oben eingeführt wurde. Mit Hilfe der Transformationsgleichungen (3), (4) und (5) nach [8] lässt sich das Normvalenzsystem in den angenähert gleichabständigen CIELAB-Farbenraum mit den Maßzahlen L^* , a^* und b^* überführen. In diesem Farbenraum gelten für gleiche geometrische Abstände angenähert gleiche Farbunterschiedsempfindungen. Daher ist es möglich, aus den geometrisch berechneten Farbabständen nach Gleichung (6) Rückschlüsse über Ähnlichkeiten von Farben zu ziehen. Dies ist eine der Grundvoraussetzungen für eine korrekte Farberkennung und ermöglicht eine einfache Toleranzfestlegung (z. B. in Form von Kugelradien).

$$L^* = 116 \cdot \sqrt[3]{\frac{Y}{Y_R}} - 16 \quad (3)$$

$$a^* = 500 \cdot \left[\sqrt[3]{\frac{X}{X_R}} - \sqrt[3]{\frac{Y}{Y_R}} \right] \quad (4)$$

$$b^* = 200 \cdot \left[\sqrt[3]{\frac{Y}{Y_R}} - \sqrt[3]{\frac{Z}{Z_R}} \right] \quad (5)$$

$$\Delta E = \sqrt{(L_1^* - L_2^*)^2 + (a_1^* - a_2^*)^2 + (b_1^* - b_2^*)^2} \quad (6)$$

Im CIELAB-Farbenraum wird häufig ein Klassifizierung für die Farbunterschiedsbewertung von Farbabständen vorgenommen. Tabelle 1 zeigt typische Werte. Mithilfe der Farbunterschiedsbewertungen aus Tabelle 1 können für Farbsensoren Toleranzen für den Farbvergleich definiert werden, die sicherstellen, dass eine Ähnlichkeit der verglichenen Farben unter Einhaltung gewünschter Kriterien gewährleistet ist.

Tabelle 1: Typische Farbunterschiedsbewertung von Farbabständen

Farbabstand ΔE	Farbunterschiedsbewertung
0...1	überwiegend nicht wahrnehmbarer Farbunterschied
1...2	geringer Farbunterschied, der meist nur von geschultem Auge wahrgenommen wird
2...3	mittlerer Farbunterschied, der bereits von einem ungeschulten Auge wahrgenommen wird
4...6	deutlich wahrnehmbarer Farbunterschied
> 6	starker wahrgenommener Farbunterschied

3.7 Farberkennungsalgorithmus

Der Farberkennungsalgorithmus hat die Aufgabe aus dem Vergleich der aktuell gemessenen Farbmaßzahlen mit den im Sensor hinterlegten Vergleichsmaßzahlen aus der Farbentabelle eine Entscheidung herbeizuführen. Die Basis des Vergleichs ist immer eine Abstandsberechnung im empfindungsgemäß gleichabständigen Farbenraum laut Gleichung (6). Zu jeder in der Farbentabelle des Sensors gespeicherten Vergleichsfarbe wird der entsprechende Farbabstand ermittelt. Die Farbe der Farbentabelle mit dem geringsten Farbabstand zum aktuellen Messwert ist die ähnlichste Farbe.

3.7.1 Farberkennung ohne Toleranzprüfung

Ein typischer Erkennungsmodus von Farbsensoren wird mit der Ausgabe der Farbnummer der ähnlichsten Farbe ohne Berücksichtigung einer Toleranzvorgabe realisiert.

Angewendet werden kann diese Erkennungsmethode beispielsweise für Farbsortiervorgänge. Bei dieser Gruppe von Anwendungen können nicht alle im Prozess vorkommenden Farben mit entsprechenden Farbmaßzahlen und Toleranzen hinterlegt werden, da sie im Allgemeinen vorher nicht bekannt oder zu vielfältig sind. Daher werden im Farbsensor nur generische Farbmaßzahlen entsprechend der zu erkennenden Farbkategorien (z. B. Rot, Grün, Blau, Gelb) hinterlegt. Die empfindungsgemäße Farbabstandsberechnung sorgt dann für eine korrekte Farbzuzuordnung der unbekannt Messobjekte zu den definierten Farbkategorien.

Eine weitere nützliche Anwendung der Methode besteht in der Erkennung aller Art von Farbüber-

gängen. Soll beispielsweise die geometrische Position einer Schichtgrenze zwischen zwei Stoffen erkannt werden, deren Übergang nicht scharf sondern mit einem gewissen Verlauf behaftet ist, so reicht es aus die Farbmaßzahlen der beiden reinen Stoffe in der Farbentabelle zu hinterlegen. Beim sensorischen Überfahren der Stoffschichten wird exakt in der Mitte der Grenzschicht die Farberkennung den Farbübergang signalisieren. Damit kann deren geometrische Position genau bestimmt werden.

3.7.2 Farberkennung mit Toleranzprüfung

Wird die Berechnung des geringsten Farbabstandes um die Überprüfung des dazugehörigen Toleranzwertes erweitert, so kann mit dem Farbsensor festgestellt werden, ob die gemessenen Farbmaßzahlen genau (im Rahmen der Toleranz) mit den hinterlegten Farbvergleichswerten übereinstimmen. Dieser Modus funktioniert daher im Vergleich zum oben beschriebenen Verfahren auch mit nur einer hinterlegten Vergleichsfarbe sinnvoll. Alle Anwendungen die eine Detektion der genauen Übereinstimmung mit den Farbvergleichswerten erfordern, setzen diesen Erkennungsmodus voraus. Bild 16 zeigt eine Farberkennungsszene mit Toleranzauswertung am Beispiel eines Parametrierprogramms für Farbsensoren (Fa. ASTECH GmbH, Rostock).

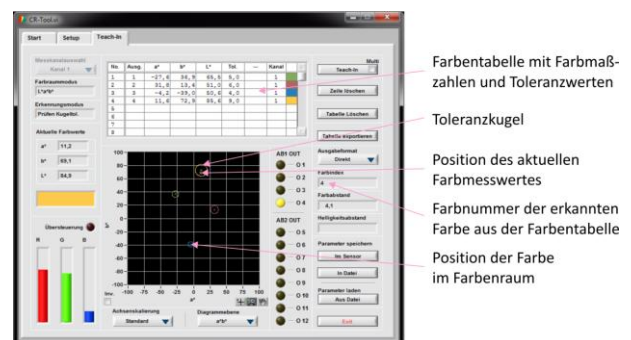


Bild 16: Farberkennung mit Toleranzprüfung (Parametrierprogramm der Fa. ASTECH GmbH, Rostock)

Die Vorgabe von Toleranzwerten erfolgt letztendlich zwar immer empirisch auf der Grundlage von Erfahrungswerten. Dennoch bieten die Farbunterschiedsbewertungen entsprechend Tabelle 1 eine grobe Orientierung für die Parametrierung.

3.7.3 Differentielle Farberkennung

Neben den beiden oben erläuterten Erkennungsmethoden gibt es weitere spezielle Möglichkeiten, von denen hier nur das differentielle Verfahren erwähnt werden soll. Beim differentiellen Verfahren werden die Farbsignale zeitlich differenziert. Auf diese Weise werden nur noch Farbänderungen erkannt. Mit der Vorgabe eines Toleranzwertes kann eine Schwelle festgelegt werden, ab der der Sensor einen Farbunterschied detektiert. Sinnvoll ist dieser Erkennungsmodus z. B. bei einer Farbmarkenerkennung, bei der die eigentliche Farbe der Marke keine Rolle spielt und vorher auch nicht bekannt ist. Lediglich der Farbwechsel signalisiert eine Farbmarke.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Farbe ist eine Sinnesempfindung. Technische Farberkennungssysteme, wie sie mit Farbsensoren nach dem Dreibereichsverfahren bekannt sind, müssen daher für ihre bestimmungsgemäße Funktion der Sinnesempfindung des Menschen genügen. Deswegen sind für eine korrekte und stabile Farberkennung eine Vielzahl an Maßnahmen erforderlich, deren technische Umsetzung allerdings nicht von vielen Herstellern beachtet wird. Den Kern bilden dabei drei Maßnahmen.

- Signalverarbeitung auf Basis des Normvalenzsystems
- Umsetzung der höheren Farbmeterik durch Verwendung empfindungsgemäß gleichabständiger Farbenräume
- Wirksame Kompensation aller Umgebungseinflüsse und Drifterscheinungen

Farbsensoren, die diese Verarbeitungsschritte ausparen, sind im praktischen Einsatz nicht für anspruchsvolle Erkennungsaufgaben geeignet. Insbesondere die Farberkennungen ohne Beachtung von gleichabständigen Farbenräumen führen zwangsweise zu Falscherkennungen.

Im Ausblick für die weiteren Entwicklungen sind folgende Problemstellungen zu bearbeiten.

- Schließung der spektralen „Lücken“ der LED-Beleuchtungsquelle für eine verbesserte Farberkennung in diesen Bereichen
- Reduzierung der alterungs- und temperaturbedingten Drift der Bauteile
- Reduzierung der Parameterstreuungen für eine bessere Geräteübereinstimmung

Unabhängig von den zukünftigen Entwicklungen von Farbsensoren auf Basis des Dreibereichsverfahrens sollte perspektivisch der Einsatz spektraler Verfahren für diese Geräteklasse nicht aus dem Auge verloren werden. Wenn bei bestimmten Anwendungen die absolute Genauigkeit der Farbmaße gefordert ist und keine hohen Erkennungsraten benötigt werden, sich aber teure und für den Industrieinsatz ungeeignete Laborspektrofotometer nicht rentieren, kann sich die Entwicklung von Farbsensoren mit Spektralverfahren lohnen. Dazu sind allerdings, zur Erreichung der notwendigen absoluten farbmetrischen Genauigkeit, wesentlich größere Entwicklungsanstrengungen, als bislang in dieser Geräteklasse üblich, zu unternehmen.

5 Autoren:

Prof. Dr.-Ing. Ansgar Wego

Hochschule Wismar
Bereich Elektrotechnik und Informatik
Philipp-Müller-Straße 14
23966 Wismar
<http://www.et.hs-wismar.de>



Dr.-Ing. Gundolf Geske

ASTECH
Angewandte Sensortechnik GmbH
Schonenfahrerstr. 5
18057 Rostock
Fon: +49 (0) 381/44073-17
FAX: +49 (0) 381/44073-20
geske@astech.de



6 Literaturverzeichnis

- [1]. **Richter, Manfred.** *Einführung in die Farbmeterik.* Berlin, New York : de Gruyter, 1981. ISBN 3-11-008209-08.
- [2]. DIN 5033-1. *Farbmessung - Teil 1: Grundbegriffe der Farbmeterik.* Berlin : Beuth-Verlag, 2009.
- [3]. DIN 5033-2. *Farbmessung - Teil 2: Normvalenz-System.* Berlin : Beuth-Verlag, 1992.
- [4]. DIN 5033-7. *Farbmessung - Teil 7: Meßbedingungen für Körperfarben.* Berlin : Beuth-Verlag, 1983.
- [5]. DIN 5033-8. *Farbmessung - Teil 8: Meßbedingungen für Lichtquellen.* Berlin : Beuth-Verlag, 1982.
- [6]. DIN 5033-9. *Farbmessung - Teil 9: Weißstandard zur Kalibrierung in Farbmessung und Photometrie.* Berlin : Beuth-Verlag, 2005.
- [7]. DIN 5033-3. *Farbmessung - Teil 3: Farbmaßzahlen.* Berlin : Beuth-Verlag, 1992.
- [8]. DIN 6174. *Farbmetrische Bestimmung von Farbmaßzahlen und Farbabständen im angenähert gleichförmigen CIELAB-Farbenraum.* Berlin : Beuth-Verlag, 2007.
- [9]. DIN 5033-5. *Farbmessung - Teil 5: Gleichheitsverfahren.* Berlin : Beuth-Verlag, 1981.
- [10]. DIN 5033-6. *Farbmessung - Teil 6: Dreibereichsverfahren.* Berlin : Beuth-Verlag, 1976.
- [11]. DIN 5033-4. *Farbmessung - Teil 4: Spektralverfahren.* Berlin : Beuth-Verlag, 1992.
- [12]. **MAZeT GmbH, Jena.** Mit JENCOLOR spektral Farbe messen. [Online]
<http://www.mazet.de/presse/pressemitteilungen/art08255-spektral/de>.
- [13]. **MAZeT GmbH.** Spektrale Kennlinien des MMCS6. [Online]
http://www.mazet.de/presse/logos_bilder/art08255-kennlinie/image.
- [14]. **Philips Lumileds Lighting Company.** Datenblatt. *Technical Datasheet DS63 - LUXEON® Rebel.* 2009.
- [15]. *Performance characteristics of high-power light-emitting diodes.* **Narendran, Nadarajah, et al.** s.l. : Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 2004. Third International Conference on Solid State Lighting, Proceedings of SPIE 5187. S. 267-275.
- [16]. **Geutler, Georg.** Zur Herstellung und Verwendung lichtelektrischer Farbmeßgeräte nach dem Dresler-Prinzip. *Die Farbe.* 1958, 7, S. 153-162.
- [17]. **Grunert, Fred.** Integrierte Farbsensoren für Anwendungen in Industrie, Medizin & Umwelt. *7th LEIBNIZ CONFERENCE OF ADVANCED SCIENCE - SENSOREN.* Lichtenwalde (Sachsen) : s.n., 16. 10 2008.
- [18]. *True-color fähige Farbsensoren - Probleme und Lösungsmöglichkeiten.* **Franke, Karl-Heinz, et al.** Ilmenau : s.n., 22.–25.09.2003. 48. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium (IWK).
- [19]. **Hamamatsu Corporation.** Photodiode Technical Guide. [Online] [Zitat vom: 08. 09 2010.]
http://sales.hamamatsu.com/assets/applications/SSD/photodiode_technical_information.pdf.
- [20]. **MAZeT GmbH, Jena.** Mit JENCOLOR spektral Farbe messen. [Online] 05. 12 2008. [Zitat vom: 31. 08 2010.] <http://www.mazet.de/presse/pressemitteilungen/art08255-spektral/de>.

[21]. **MAZeT GmbH**. Spektrale Kennlinien des MMCS6. [Online] [Zitat vom: 31. 08 2010.]
http://www.mazet.de/presse/logos_bilder/art08255-kennlinie/image.

[22]. **ASTECH Angewandte Sensortechnik GmbH, Rostock**. Datenblatt 18-3001-00. *Kompaktfarbsensor CR100*. 2010.