

# Analog beschleunigt

## Schnelle perzeptive Signalvorverarbeitung für Farbfotodioden mit analoger Schaltungstechnik

Für die Farbmarkenerkennung in Druckmaschinen mit Farbfotodioden sind Abstraten im dreistelligen kHz-Bereich erforderlich. Eine perzeptive Farbsignalverarbeitung ist hierbei mit bezahlbaren Mikrocontrollern in Echtzeit nicht realisierbar. Eine Signalvorverarbeitung für Farbfotodioden mit analoger Schaltungstechnik ermöglicht insgesamt eine höhere Abtastfrequenz des Sensor-Systems.

Von Ansgar Wego, Volker Ahrendt und Gundolf Geske

Die Farberkennung spielt bei der Steuerung von Produktionsabläufen (z.B. über Farbmarken) und der Sicherung der Farbqualität von Produkten eine wichtige Rolle. Dabei lassen sich grundsätzlich die Aufgaben Farbvergleich und Farbmessung ableiten. Bei der Farbmessung übernehmen Farbmessgeräte die Aufgabe, Farbmaßzahlen mit hoher absoluter Genauigkeit bereitzustellen. Auf diese Weise können Farbeigen-

schaften für Produkte in Form von verbindlichen Maßzahlen herstellerunabhängig festgelegt werden. Dagegen stehen beim Farbvergleich nicht die absoluten Farbmaßzahlen mit entsprechender Genauigkeit im Vordergrund. Vielmehr geht es um die Bewertung eines Farbunterschiedes zu hinterlegten Vergleichsmustern. Diese Aufgabe wird typischerweise von optischen Sensor-Systemen mit integrierter Farbvergleichsauswertung übernommen. Dabei kommt es bei den Sensor-Systemen auf eine hohe Verarbeitungsgeschwindigkeit an. Besonders deutlich wird dies am Beispiel der Detektion von Farbmarken in schnellen Druckmaschinen. Bei sehr kleinen Farbmarken (unterer mm-Bereich) werden bei geforderter Überabtastrung durchaus Abstraten im 100-kHz-Bereich notwendig. Da zur sicheren Farbunterschiedsbewertung eine perzeptive (d.h. eine dem menschlichen Farbempfinden gerecht werdende) Farbsignalverarbeitung erforderlich ist [1], müssen bei bisherigen Sensor-Systemen Einschränkungen hinsichtlich der erreichbaren Abtastgeschwindigkeiten hingenommen werden. Hauptursache hierfür ist die begrenzte Rechenleistung der in diesen Systemen aus Kostengründen eingesetzten typischen Mikrocontroller. Werden

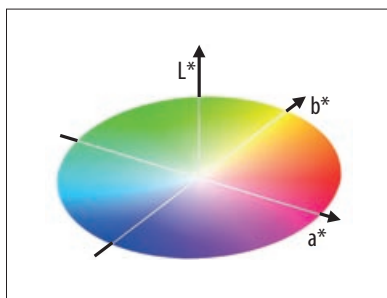


Bild 1. Perzeptiver Farbraum nach DIN 6174 mit den Koordinaten L\*, a\* und b\*.

Die notwendigen Signalverarbeitungsschritte allerdings in analoger Schaltungstechnik vorab realisiert, dann reduziert sich die Aufgabe des Mikrocontrollers im Wesentlichen auf den Farbvergleich, so dass insgesamt eine deutlich höhere Abtastrate erreicht werden kann.

### Grundlagen

Die technische Erfassung von Farbeigenschaften ist grundsätzlich mit zwei verschiedenen Verfahren möglich. Eine Beschreibung der Verfahren findet sich in der DIN 5033. Das vorwiegend zur Ermittlung von Farbmaßzahlen verwendete Spektralverfahren kommt typisch in allen Systemen zur Farbmessung zum Einsatz. Es beruht auf einer Zerlegung des Lichtes (Farbreizfunktion) in spektrale Intensitätswerte (Spektrum). Diese Intensitätswerte werden mit den so genannten Normspektralwertfunktionen gewichtet. Die Integration aller Anteile über den sichtbaren Spektralbereich (380 bis 780 nm) ergibt die Farbwerte für X (Rot), Y (Grün) und Z (Blau) entsprechend folgender Gleichungen:

$$X = k \int_{380}^{780} \phi_{\lambda} \cdot \bar{x}(\lambda) d\lambda$$

$$Y = k \int_{380}^{780} \phi_{\lambda} \cdot \bar{y}(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

$$Z = k \int_{380}^{780} \phi_{\lambda} \cdot \bar{z}(\lambda) d\lambda$$

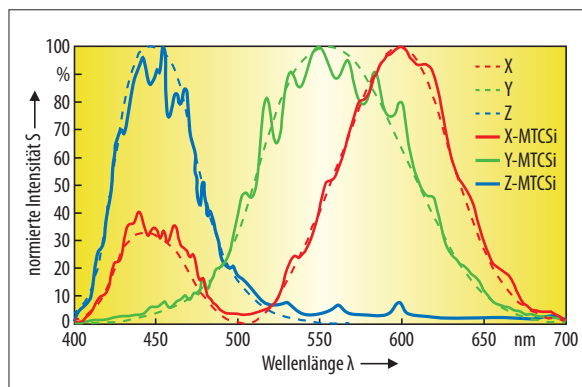


Bild 2. Normspektralwertkurven und reale Filterkurven einer MTCSI-Dreibereichsfotodiode. (Quelle: Mazet)

Das Spektralverfahren erreicht eine hohe absolute Messgenauigkeit – ist aber langsam, aufwendig und teuer. Es kommt für schnelle Sensor-Systeme meist nicht in Frage. Demgegenüber ist das Dreibereichsverfahren gut für Farbvergleiche nutzbar. Bei die-

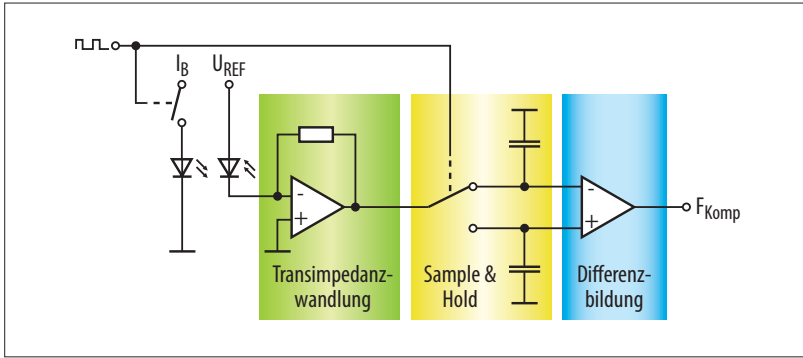


Bild 3. Kompensation von Temperatur- und Fremdlichtabhängigkeit für einen Empfangskanal.

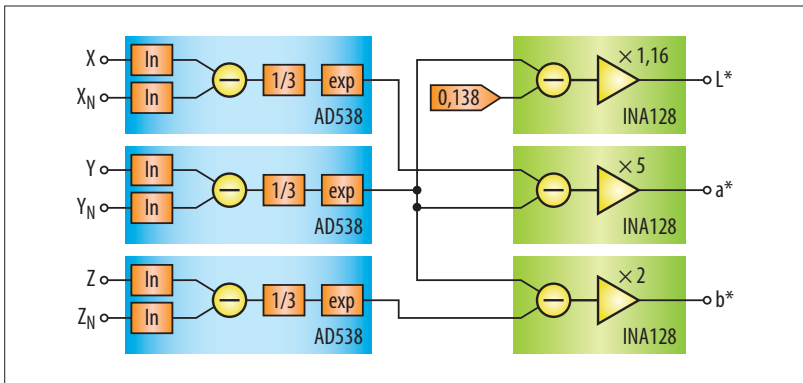


Bild 4. Funktionsblockbild zur Umsetzung der perceptiven Farbraumtransformation.

sem Verfahren wird das Licht direkt mit drei Farbfiltern bewertet, deren Filterkurven in ihrer spektralen Charakteristik den Normspektralfunktionen entsprechen. Die Farbwerte für X, Y und Z stehen dann sofort zur Weiterverarbeitung zur Verfügung. Das Dreibereichsverfahren erreicht zwar keine hohe absolute Messgenauigkeit, es lässt sich aber einfach umsetzen und ist preiswert. Vor allem aber ist es schnell, weshalb es typischerweise für Farbsensor-Systeme genutzt wird.

Mit den Farbwerten für X, Y, und Z wird ein Farbenraum aufgespannt, in dem jede sichtbare Farbe eindeutig durch ihre Koordinaten bestimmt ist. Versucht man jedoch, in diesem Farbenraum gleiche Farbunterschiedsempfindungen durch geometrische Farbabstände auszudrücken, so erhält man nicht (wie eigentlich erwartet) Orte auf einer Kugelschale. Wegen dieser ungleichen Abstände ist eine perceptiv Farbunterschiedsbewertung mit dem XYZ-Farbenraum nicht möglich [2]. Abhilfe schafft eine Koordinatentransformation in einen weitgehend perceptiven Farbenraum. Nach DIN 6174 wird zu diesem Zweck eine Transformation nach folgender Vorschrift vorgeschlagen:

$$\begin{aligned}
 L^* &= 116 \sqrt[3]{\frac{Y}{X_N}} - 16 \\
 a^* &= 500 \left( \sqrt[3]{\frac{X}{X_N}} - \sqrt[3]{\frac{Y}{Y_N}} \right) \\
 b^* &= 200 \left( \sqrt[3]{\frac{Y}{Y_N}} - \sqrt[3]{\frac{Z}{Z_N}} \right)
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

**Bild 1** zeigt den mit den Koordinaten  $L^*$ ,  $a^*$  und  $b^*$  aufgespannten, angenähert gleichabständigen Farbenraum. Der  $L^*a^*b^*$ -Farbenraum ist nach der Gegenfarbtheorie aufgebaut. Die  $L^*$ -Koordinate beschreibt hierbei die Helligkeit, die  $a^*$ -Koordinate den Rot/Grün-Anteil und die  $b^*$ -Koordinate den Blau/Gelb-Anteil einer Farbe.

### Signalverarbeitung für Farbfotodioden

Die photometrische Erfassung der Farbanteile beim Dreibereichsverfahren erfolgt heute mit Silizium-Fotodioden. Es gibt einige Hersteller, die Fotodioden mit integrierten Farbfiltern für den Rot-, Grün- und Blaubeereich ausstatten (z.B. Avago, Hamamatsu, Mazet, Taos). Speziell die Drei-

bereichsfotodioden von Mazet (Typ MTCSi) sind für das Verfahren geeignet, da die integrierten Filterkurven (auf Basis dielektrischer Interferenzfilter) weitestgehend den geforderten Normspektralwertfunktionen entsprechen (Bild 2).

### Temperatur- und Fremdlicht-kompensation

Bei Fotodioden besteht ein linearer Zusammenhang zwischen einfallender Strahlungsleistung und generiertem Fotostrom über mehr als acht Zehnerpotenzen [3]. Zur weiteren Signalverarbeitung werden die Fotostrome der drei Farbkanäle in äquivalente Spannungen überführt. Dazu werden Transimpedanzwandler eingesetzt. Zum Fotostrom kommt noch ein temperaturabhängiger Anteil (Sperrsättigungsstrom) entsprechend folgender Gleichung hinzu:

$$I = I_s \left( e^{\frac{eU}{kT}} - 1 \right) - I_{ph} \quad (3)$$

Farbsensor-Systeme verwenden zur Objektbeleuchtung eigene Lichtquel-

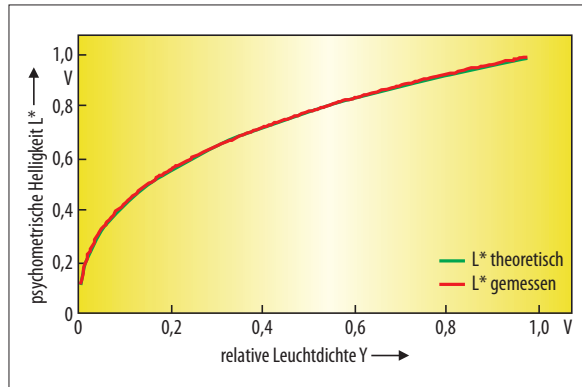


Bild 7. Gemessene und berechnete Werte für die Helligkeit L\*.

len. Das Empfangssignal im Sensor enthält aber auch immer einen Fremdlichtanteil, der vom Umgebungslicht herrührt [4]. Die Temperatur- und Fremdlichtabhängigkeit der Fotostrome erfordert eine entsprechende Kompensation. Da es sich um vergleichsweise langsam veränderliche Einflüsse handelt, eignet sich eine Differenzmethode zur gemeinsamen Kompensation. Eine effektive Umsetzung der Differenzmethode besteht in der Zerkhackung (choppen) der Sensor-Lichtquelle (Bild 3). Hierzu muss die Lichtquelle mit einer ausreichend hohen Chopper-Frequenz periodisch ein- und

ausgeschaltet werden. Synchron zum Chopper-Takt werden die Signalspannungen der Hell- und Dunkelphase kanalweise mit Sample&Hold-Schaltungen erfasst. Ein nachfolgender Differenzverstärker bildet die Differenz zwischen den Hell- und den Dunkel-

werten. Auf diese Weise fallen die langsam veränderlichen Signalanteile und die Gleichanteile heraus.

### Perzeptive Farbraumtransformation

Für Transformation der XYZ-Werte des Dreibereichs-Fotoempfängers in L\*a\*b\*-Werte sieht die Transformationsvorschrift die Bildung von Kubikwurzeln vor. Eine analoge Schaltung, die direkt die Kubikwurzel eines Signals bildet, ist nicht bekannt. Eine schaltungstechnische Lösung besteht darin, dass von den entsprechenden Wurzelausdrücken der Logarithmus gebildet wird. Auf diese Weise wird der Radikant zum Faktor und der Quotient zur Differenz. Durch eine anschließende Delogarithmierung werden die berechneten Werte wieder in reelle Zahlen überführt. Die Gleichungen können somit wie folgt umgeschrieben werden:

$$L^* = 1,16 \left[ e^{\frac{1}{3}(\ln Y_N)} - 0,138 \right]$$

$$a^* = 5 \left[ e^{\frac{1}{3}(\ln X - \ln X_N)} - e^{\frac{1}{3}(\ln Y - \ln Y_N)} \right] \quad (4)$$

$$b^* = 2 \left[ e^{\frac{1}{3}(\ln Y - \ln Y_N)} - e^{\frac{1}{3}(\ln Z - \ln Z_N)} \right]$$

Diese umgeformten Gleichungen lassen sich schaltungstechnisch gut realisieren. Die Vorfaktoren werden dabei zur besseren Umsetzbarkeit durch 100 dividiert. Bild 4 zeigt die Schaltung in einem Funktionsblockbild. Eine Logarithmierschaltung entsteht durch Einfügen eines Transistors im Rückführzweig eines Operations-

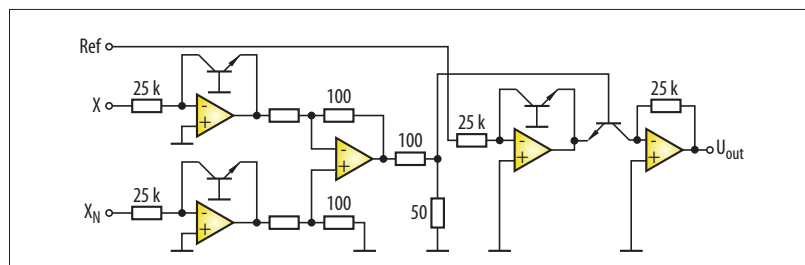


Bild 5. Schaltung zur Bildung der Kubikwurzel.

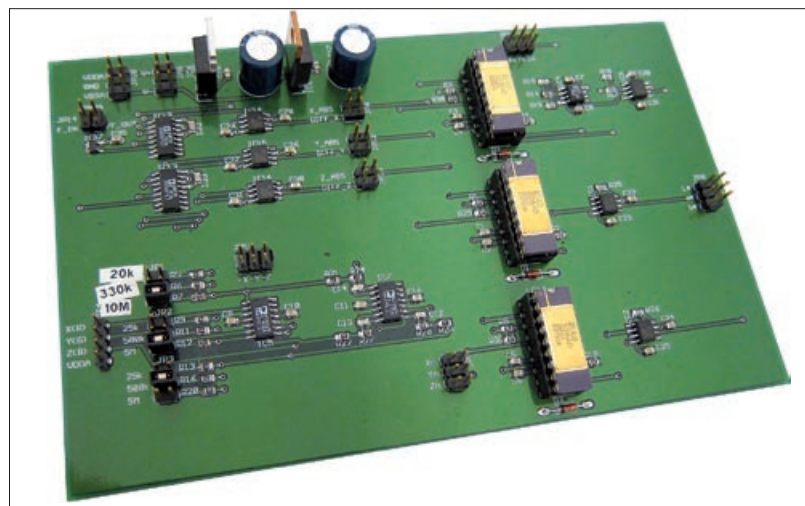


Bild 6. Testplatine zur Prüfung der perzeptiven Transformationsschaltung.

verstärkers. Die Delogarithmierung erfordert einen Transistor am Eingang des Operationsverstärkers. **Bild 5** zeigt die Schaltung zur Bildung des Ausdrucks:

$$\sqrt[3]{X/X_N} \quad (5)$$

Die erforderlichen Subtraktionen werden mit Instrumentenverstärkern realisiert. Mit der Einstellung der Verstärkung erfolgt gleichzeitig die Multiplikation mit dem gewünschten Faktor.

### ■ Umsetzung und Ergebnisse

Mit einem Musteraufbau wurde getestet, ob sich die Schaltung prinzipiell realisieren lässt (**Bild 6**). Dabei erwies es sich als vorteilhaft, dass die aufwendigen Funktionen der Wurzelbil-



**Ansgar Wego**

studierte von 1994 bis 1999 Elektrotechnik an der Universität Rostock. 2001 promovierte er auf dem Gebiet der Elektroniktechnologie. Er wurde 2010 zum Professor für Allgemeine Elektrotechnik an die Hochschule Wismar berufen.

[ansgar.wago@hs-wismar.de](mailto:ansgar.wago@hs-wismar.de)



**Volker Ahrendt**

studierte von 1985 bis 1990 Elektrotechnik an der Universität Rostock. Er ist seit 1992 Geschäftsführer der ASTECH Angewandte Sensortechnik GmbH in Rostock.

[ahrendt@astech.de](mailto:ahrendt@astech.de)

dung durch ein handelsüblich erhältliches IC vom Typ AD538 realisiert werden konnten. Zur Differenzbildung wurden Instrumentenverstärker vom Typ INA128 verwendet. Die Schaltung wurde mit A/D- und D/A-Systemen von National Instruments ausgemessen und charakterisiert. Als Testumgebung wurde LabVIEW (ebenfalls National Instruments) genutzt.

Insgesamt zeigte die Schaltung eine sehr hohe Genauigkeit, die der Forderung nach einer perzeptiven Signaltransformation in ausreichender Weise entsprach. Der Fehler lag im Vergleich zu den theoretisch berechneten Werten bei allen Farbkanälen unterhalb von 1 %. **Bild 7** zeigt exemplarisch die theoretische und die gemessene Kurve für das Helligkeitssignal  $L^*$  (bei  $Y_N = 1 \text{ V}$ ). Die Geschwindigkeit der Schaltung wird durch die verwendeten Komponenten bestimmt. Im Testaufbau legt hauptsächlich die Bandbreite des AD538 (ca. 250 kHz) die Verarbeitungsgeschwindigkeit insgesamt fest.

Allerdings ist der vorgestellte Testaufbau für reale Farbsensor-Systeme wegen des Schaltungsaufwands und des Platzbedarfs nicht zu empfehlen. Um die Vorteile der analogen Signalverarbeitung ausnutzen zu können, wäre eine Integration der gesamten analogen Schaltungskomponenten in ein monolithisch aufgebautes Sensor-IC erforderlich. Nur so könnte das System in ausreichendem Maße miniaturisiert und die Gesamtkosten deutlich reduziert werden.

*jw*

### Literatur

- [1] *Wego, A.; Geske, G.:* Korrekte Erkennung von Farben und Oberflächen mit Farbsensoren. *Photonik 2010*, H. 5, S. 38 – 42.
- [2] *Richter, M.:* Einführung in die Farbmeterik. *de Gruyter 1981*, S. 172 – 189, ISBN 3-11-008209-08.

[3] *Hering, E.; Bressler, K.; Gutekunst, J.:* *Elektronik für Ingenieure und Naturwissenschaftler.* Springer Verlag 2005, S. 272.

[4] *Wego, A.; Geske, G.:* Dem menschlichen Auge nahe. *MSR Magazin 2010*, H. 11, S. 38 – 40.



**Gundolf Geske**

studierte von 1992 bis 1999 Elektrotechnik an der Universität Rostock. 2003 promovierte er auf dem Gebiet der Schaltungstechnik. Er ist seit 2009 Bereichsleiter der Farbsensorik bei der ASTECH Angewandte Sensortechnik GmbH in Rostock.

[geske@astech.de](mailto:geske@astech.de)