

# Licht-Sensorik

[Bild-Texte](#)

[Tabelle 1](#)

[Tabelle 2](#)

[Tabelle 3](#)

[Tabelle 4](#)

[Tabelle 5](#)

[Tabelle 6](#)

[Stückliste](#)

[Literaturverweise](#)

[Datenblätter](#)

**Integrierte Tageslicht-Sensoren**

**Vorauswahl 1facher Single-Supply-OPs mit JFET-Eingangsstufe**

**Äquivalente LED-Spannung am Punkt B nach MessSchaltung Bild 1  
bei mittlerem Abend/Morgen-Dämmerlicht und in mondloser Nacht**

**Schaltverhalten verschiedener Opamps**

**Lichttechnische Größen**

**Leuchtdichten**

Klaus-Jürgen Thiesler  
Hasselbreite 12  
D.31860 Emmerthal-Welsede  
kjt@gmx.de

Samstag, 29. November 2003

Ein lichtempfindlicher Aufnehmer, der auf das Spektrum anspricht, auf das unser Auge empfindlich reagiert, wird zumeist mit einfachen FotoWiderständen oder mit speziellen und daher teuren FotoSensoren realisiert. Nur wenig bekannt ist, dass normale LEDs als optische Aufnehmer ähnlich wie unser Auge auf natürliches wie auch auf künstliches Licht reagieren.

## AUFNEHMER

Photodetektoren für das sichtbare Licht basieren zumeist auf einem lichtempfindlichen Widerstand (LDR). LDRs sind hinlänglich bekannt und seit Jahrzehnten mehr oder weniger aktuell. Ihr Empfindlichkeits-Spektrum ist ähnlich dem unseres Auges. Ihre Vor-/Nachteile sind im SMD-Zeitalter: große Bauformen, große Toleranzen, große Temperaturabhängigkeiten, hohe Detektorströme, teuer und sehr langsam. LDRs reagieren träge auf Lichtänderung mit einer WiderstandsÄnderung im Sekundenbereich – ähnlich langsam wie unser Auge.

Schnelle Fotodioden mit einer Sensibilität entsprechend dem menschlichen Auge sind selten; die weitaus meisten sind empfindlich im Infrarot-Bereich bis zu 1.100 nm. Die spezielle Si-Fotodiode BPW21<sup>1</sup> nimmt den sichtbaren Bereich von 425...675 nm auf, hat ein rundes TO 5-Metallgehäuse mit einer aktiven Fläche von 7,5 mm<sup>2</sup>, als Referenzelement ist sie entsprechend teuer, ansonsten präzise, exzellent linear und um Potenzen ( $t_{on/off} = 6 \mu s$ ) schneller als ein LDR ( $t_{off} \approx 3 s$ ). Sie wird gern für Sonnenlicht-Referenzmessungen in Photovoltaik-Anlagen verwendet. Allerdings steht sie bei einigen

---

<sup>1</sup> Der Fototransistor BPW21 gilt als abgekündigtes Bauelement. Ersatz wird durch BPW21R von Vishay Semiconductors angeboten. Immerhin ist er noch recht gut erhältlich. Preislich liegt er allerdings mit dem Präzisions-Opamp AD820 von Analog Devices auf ähnlich hoher Stufe.

Herstellern auf der Liste der abgekündigten Bauteile.

Andere Lichtsensoren sind moderne „intelligente Optosensoren“ mit LaborEigenschaften wie der TCS 230 von *TAOS*, der HSDL 9000 von *Agilent Technologies* oder der TSL 230 von *Texas Instruments*. Andere Bauelemente funktionieren als Licht-Frequenz-Wandler. Der HSMF-C118 von *Agilent Technologies* ist eine Tricolor-RGB-LED im SMD-Gehäuse.

**Tabelle 1** gibt eine Übersicht tageslicht-geeigneter Lichtsensoren.

Verschiedene Chip-Hersteller haben in der Vergangenheit versucht, einige Nachteile zu beheben und die Sensoren als Umformer mit Parametern für das sichtbare Spektrum zu trimmen. Und mit schnellerem Reaktionsvermögen als die passiven LDRs.

Für Laboranwendung gibt es den hochpräzisen und deshalb teuren Truecolor-Dreifeld-RGB-Farbsensor-ICs MCS3xx mit Normwertspektral-Empfindlichkeit und Farbfilterung, dem weitere ICs mit SensorArrays ähnlich CCS-Aufnehmern folgen werden.

Der monolithische OPT301 von Burr-Brown hat bei Gelb eine relative Empfindlichkeit von 80% und eine maximale im nahen Infrarot-Bereich. Ihn gibt es nur im hermetischen TO99-Metallgehäuse. Seine symmetrische Spannungsversorgung ist heutzutage oft schon ein Handicap. Für die Verwendung als Tageslichtsensor benötigt er jedoch ein Infrarot-Filter.

## DAYLIGHT

Das Tageslicht enthält einen hohen Anteil an langwelliger InfraRot-Strahlung. Wir empfinden das Sonnenlicht als warm, wobei das aufgehende „kühler“ ist als das abendlich untergehende. Das Mondlicht nachts enthält dagegen einen hohen Anteil an kurzwelliger UltraViolett-Strahlung, wir empfinden das Nachtlcht als kalt. Unser Hirn „sieht“ eben auch mit der Haut. Dementsprechend hat sich unser Auge angepaßt, so daß je nach Lichtstärke eine spezifische Spektralverschiebung zustande kommt, wobei die Farbempfindlichkeit mit abnehmender Lichtstärke geringer wird.

Glühlampenlicht hat einen hohen Anteil an Infrarot-Strahlung und kaum UV-Strahlung. Langwelliges Licht (IR-/Wärmestrahlung) kann das Auge nicht wahrnehmen, dafür sind unsere Hautzellen besser eingerichtet. Fast alle Siliziumdetektoren haben hier jedoch ihre maximale Empfindlichkeit. Daher sind sie ungeeignet zur Detektion von Tageslicht und von Kunstlicht.

Einen interessanten Ausweg bieten

## NORMALE LEDs.

Jedem Elektroniker bekannt: Eine Standard-LED gleich welcher Farbe sendet Licht aus, das im Spektrum des für uns sichtbaren Bereiches liegt – dafür ist sie ja schließlich entwickelt worden. Der Wirkungsgrad ist dabei sehr gering, die meiste Leistung setzt der Chip in Wärme um, wenngleich die Wärmeentwicklung bei Display-LEDs wegen der geringen Leistung kaum nennenswert ist.

Gegenüber allen anderen künstlichen BeleuchtungsQuellen strahlen LEDs fast-monochromatisches Licht mit sehr hoher Farbsättigung ab. Im CIE-Diagramm **Bild 6** liegen die LED-Farbfelder alle nahe am äußeren Rand der hufeisenförmigen äußeren Farblinie, die die maximale Farbsättigung anzeigt, während zum WeissPunkt in der unteren Mitte die Farbsättigung gegen Null geht.

## ERKLÄRUNGSBEDÜRFTIGES CIE-MODELL

Dieses Modell ist allerdings nicht perfekt, denn mit ihm lassen sich Farben wie Braun oder Gold nicht erklären. Es ist somit ungeeignet, unser subjektives Farbempfinden zu definieren und zu präzisieren. Solche Farben außerhalb RGB/CMYK/LAB (**Bild 7**) und anderen Modellen entstehen erst in unserem Gehirn, weil ja alle farbempfindlichen Zäpfchen und Stäbchen auf unserer Netzhaut sich im gesamten sehbaren Spektrum stark überlappen, somit immer alle Zäpfchen und Stäbchen an einem Bild beteiligt sind und die chemischen Impulse per Nervenstrang zum Gehirn geleitet werden, mittels Übersprechen zwischen den einzelnen Nervenzellen schon vorgemischt werden, im Hirn dann erst zu einem Farbbild generiert werden. Dazu senden alle Rezeptoren lediglich Impulse aus ohne irgendeine Farbinformation, in Kombination und in Relation zueinander. Die Farbe Braun entsteht also erst im Gehirn – wie alle anderen Farben (einschließlich Weiss) auch.

Mit einem Flächen-Display aus einzeln angesteuerten RGB-LEDs lässt sich ein sogenanntes Vollfarbbild entwerfen. Aber auch hier fehlen die „Schmuckfarben“. Die Farbsättigung eines LED-Displays hingegen erreicht weder ein Kunstdruck, noch ein reflektierendes LC-Display, noch ein Röhrenmonitor, oder gar Glühlampen mit gefärbten Gläsern. Der Filmprojektor im Kino erzeugt sein Licht mit einem Lichtbogen! Dieses Hintergrundwissen verdeutlicht, wie gut und schlecht sich LEDs als Farbaufnehmer eignen, setzt man das menschliche Auge als Referenz dagegen. Daher verwundert es kaum, dass erst heute aufgrund des aktuellen Entwicklungsstandes für hohe Ansprüche immerhin Farbsensoren auf LED-Basis entwickelt werden. Immerhin steckt die LED-Entwicklung erst in den Kinderschuhen! Und lässt die großen Entwicklungsmöglichkeiten erahnen.

Die Farblehre wird immer noch sehr stiefmütterlich behandelt – mit teilweise verhärteten Fronten in GlaubensAngelegenheiten abgespielt, und mehr in-Frage-gestellt als respektiert und Neues kreiert. Schließlich sind alle bekannten Farb-Modelle mangelhaft. An der fehlerhaften Information dieser Modelle trägt auch unsere zweidimensional beschränkte Medienlandschaft bei, denen die dritte und die vierte Dimensionierung (räumlich und zeitlich) fehlen. Daher verfälschen alle Papier- und Monitor-Modelle mehr und weniger die Möglichkeit der Erklärung auf wissenschaftlicher statt auf menschlicher Basis.

„Das, was wir sehen, ist nur ein Konstrukt unseres Verstandes.“

## REVERSION

Drehen wir den Spieß einfach um! Anstatt eine LED leuchten zu lassen, halten wir sie ins Licht und schließen ein empfindliches Voltmeter an die nackte gelbe oder grüne LED. So lässt sich eine Spannung ablesen, die sich mit der Lichtstärke ändert, die auf die LED einfällt. Das macht erst einmal deutlich, daß sich eine ganz normale LED eben auch als Lichtsensor verwenden läßt.

Der Spannungsmesser zeigt dabei jedoch Werte an, die sich leider nicht weiter verwenden lassen, denn die Umsetzung von Licht-nach-Spannung geschieht mit einem äußerst kleinen Strom im fA-Bereich. Betrachten wir die Geometrie einer LED, so wird dieser extrem kleine Strom verständlich bei seiner winzig kleinen lichtempfindlichen Fläche über den geringen Wirkungsgrad. Die abgegriffene Spannung variiert stark in Relation zum Innenwiderstand des parallelgeschalteten Meßwertaufnehmers. Es lassen sich mit normalen Instrumenten keine aussagefähigen verwertbaren Spannungs- und Stromwerte ermitteln. Die Sensorik ist von der angeschlossenen Schaltung abhängig, der Innenwiderstand eines Digital-Multimeters ist ja mit typischen  $10\text{ M}\Omega$  vergleichsweise niedrig im Verhältnis zum extrem hohen Innenwiderstand einer LED im SensorModus.

In der Schaltung nach [Bild 1](#) ist die LED als Sensor an den nicht-invertierenden Eingang eines Opamps angeschlossen. Dieser Opamp ist als Transimpedanz-Verstärker beschaltet und dient zum Ausmessen der LED-Sensorspannung bei entsprechenden Stärken des einfallenden Lichtes. Die Opamp-Eingänge schließen direkt an die Gates der Eingangs-JFETs an, die EingangsWiderstände in der Größenordnung von mehreren TeraOhm ( $n \times 10^{12}\ \Omega$ ) aufweisen. Mit dieser Messschaltung sind die LED-Sensor-Spannungen in [Tabelle 3](#) ermittelt.

[Bild 2](#) zeigt die Umsetzung dann in einen elektronischen Schalter, der die angeschlossene Last  $R_L$  in der Abenddämmerung EINSchaltet und in der Morgendämmerung wieder AUSSchaltet. Das Netzwerk aus  $R_1...3$  wirkt als Schwellwertgeber bei  $U_{REF} = 2,25\text{ V}$  am Punkt [A](#) auf dessen nichtinvertierendem Eingang mit einer gemessenen Hysterese von etwa 250 mV. Dieser Schwellwert ist nicht kritisch. Er gilt für zwei seriell geschaltete gelbe LowCurrent-LEDs. Das gilt für den Präzisions-Opamp AD820. Diese Licht-Hysterese wird nicht von allen JFET-Opamps angenommen: [Tabelle 4](#) macht die Unterschiede deutlich.

Mit zwei in verschiedene Richtungen weisenden LED-Sensoren wird während der Dämmerung dieser Schaltpunkt relativ schnell durchfahren, es genügen für diese PräzisionsSchaltung WiderstandsToleranzen von  $\pm 10\%$ . Die doppelten LEDs machen den TagesLichtschalter unempfindlich gegenüber Kunstlicht, das nur auf eine LED einfällt, wie Straßenlampen oder Autoscheinwerfer. Dazu trägt auch die Nachlaufschaltung aus LED 3, R 4 und 5 und C 4 bei.

Die LED-Sensoren sind direkt an den nichtinvertierenden Eingang geschaltet; das

funktioniert jedoch nur bei Opamps mit einfacher JFET- oder CMOS-Eingangsstufe. [Tabelle 2](#) gibt eine Übersicht geeigneter Operationsverstärker, die sich als Transimpedanzverstärker mit Schaltfunktion beschalten lassen. Dort habe ich vermerkt, welche Typen von Opamps ich getestet habe und die sich für den LichtSchalter nach [Bild 2](#) eignen.

### OPAMP-WAHL

Theoretisch ist ein TLC271 mit einfachem P-Kanal-MOSFET am Eingang geeignet, denn sein Eingangs-Biasstrom ist ebenso gering wie die des AD820, doch praktisch neigt er zum Oszillieren um den Schaltpunkt herum. Das Oszillieren läßt sich beim TLC271, OPA132, AD8035, AD8510 wie auch beim TLE2081 nicht vermeiden. Am AD8065, AD820 und am AD8610 wird mit dem Netzwerk aus R 2, R 3 und C 2 eine Hysterese erzeugt, die ja nötig ist, um in der schleichenden Dämmerung flatterfrei zu schalten. Bei diesen letztgenannten Opamp-Typen kann auf die Nachlaufschaltung verzichtet werden. Der TL081 registriert das IntegrationsGlieder nicht zusätzlich als SchwellwertGeber sondern nur als Rückkoppler für den Verstärkungswert. In der Schaltung nach [Bild 2](#) ist dann ein SchmittTrigger-SchwellwertSchalter zwischen dem Ausgang von IC 1 und der LED 3 zu setzen. Immerhin oszilliert der TL081 nicht wild.

Der hochpräzise OPA655 ist ultimativ überqualifiziert für den Zweck als Tageslicht-Sensor. Das schlägt sich auf seinen Preis nieder. Mit ihm läßt sich ein schneller Detektor für Lichtbögen aufbauen. Allerdings ist er für eine bipolare Spannungsversorgung mit  $\pm 5V$  ausgelegt.

Andere Opamp-Typen mit bipolaren EingangsTransistoren oder mit komplementären MOSFETs sind ungeeignet, weil deren Eingangswiderstände zu niedrig oder deren Eingangsfehlerströme (Offset) viel zu hoch sind. Solche Fehlerströme resultieren in den stets unterschiedlichen Gateströmen der komplementären Transistoren der Eingangsstufe. In [Tabelle 4](#) sind die spezifischen Schwingneigungen beim Überschreiten der Schwellenspannung  $U_{REF}$  am Punkt [A](#) empirisch ermittelt und dargestellt.

Mit einer anderen WiderstandsDimensionierung von  $R_{1a} + b$  läßt sich der Schaltpunkt auf andere Lichtstärken oder LEDs verschieben, dazu ist am besten das Zeitglied LED 3, R 4, R 5 zu überbrücken. Dieses Zeitglied ist eine Nachlaufschaltung mit einer AUSverzögerung von etwa 3 Sekunden. Das erscheint kurz in Relation zur zeitlichen Zeitspanne der Dämmerung in unseren Breitengraden, ist jedoch praxiserprobt. Man halte sich vor Augen, dass unser Auge einen Dynamikbereich beim Farbschauen in der Lichtstärke von etwa 100 dB (von etwa 0,1...20.000 Lux) erfasst!

Während der Dämmerung nimmt die Biasspannung der LED stark zu beziehungsweise ab. Die Schaltpunkt-Hysterese wird recht schnell überfahren. Bei extrem langsamer Dämmerung wie unterm sommerlichen Polarlicht sind die modernen OperationsVerstärker wie der AD8610 zu verwenden, die praktisch stabil schalten und eine kleine Licht-Hysterese besitzen. Hierbei kann eventuell auf das Zeitglied der Nachlaufverzögerung verzichtet werden.

Die Daten in [Tabelle 4](#) sind mit der Lichtschaltung auf der Experimentierplatine SLOP248 von TexasInstruments aufgebaut, ermittelt und getestet ([Bild 3](#)).

### SPEKTRALES & MENSCHLICHES

Die [Bilder 8 und 9](#) geben einen Überblick über die unterschiedlichen Licht-Empfindlichkeiten zwischen menschlichem Sehen am Tag und in der Nacht und zwischen verschiedenen elektronischen Bauelementen.

Unser Auge verschiebt seine Farbempfindungen bei unterschiedlichen Beleuchtungsstärken. Das ist verständlich, schließlich sehen wir das bläuliche Mondlicht mit seinem Spektrum nahe dem UV-Bereich -, und das gelbliche Sonnenlicht mit seiner Verschiebung zum IR-Bereich. Ähnlich wie sich die Netzhaut an verschiedene Helligkeiten adaptiert, gewöhnt sich bei längerer Betrachtung die Netzhaut auch an Farben. Ein weißes Blatt Papier empfinden wir selbst unter Glühlampenlicht als „weiß“, weil unser Gedächtnis die Information: „das Blatt ist weiß“ mitliefert, obwohl das Blatt das gelblich-rötliche Licht reflektiert.

Unser Auge kann sich auf eine gewaltige Helligkeitsdynamik einstellen zwischen Nacht-

Sehen und Tag-Sehen. Die Spanne ist mit  $0,000.01 \dots 1.000.000 \text{ cd/m}^2$  groß (was einer Dynamik von 220 dB entspricht!). Kein künstliches Element erreicht diese Dynamik. Mit der Zunahme der Lichtstärke verbessert sich das Sehen in Farbe und Kontrast, und nimmt wieder ab bei sehr hellem Licht. In einem Großteil dieses Umfangs der Lichtstärke ist unser Auge allerdings vornehmlich im SchwarzWeiss-Spektrum empfindlich. Im Farbbereich hat unser Auge nur eine Dynamik von 100 dB.

Das menschliche Farbempfinden ist individuell. Es gibt weder ein einheitlich empfundenes Grün, noch ein allgemeines neutrales Grau oder ein vollkommenes Weiß. Jede Monitor-Kalibrierung beruht auf dem subjektiven Farbempfindungen des jeweiligen Benutzers. Normieren dagegen lassen sich durchaus die Strahler in Bezug zueinander, wie das „Grau“ eines bedeckten Mittagshimmels, das „Weisse“ einer Glühlampe oder das „Saharagelb“ einer Automobil-Karosserie, weil sie technisch meßbar, einstellbar und wiederholbar sind.

Die Netzhaut (Retina) ist in der hinteren Halbkugel des Augapfels ein Netz von zäpfchen- und stäbchenförmigen Sinneszellen (Rezeptoren), die das einfallende Licht in elektro-chemische Substanzen (neuronale Energie) umwandeln. Deren Anordnung und Mengenverteilung ist unterschiedlich über die ganze hintere Augen-Halbkugel verteilt. Unterschiedlich in Relation zur NetzhautOberfläche und auch unterschiedlich zwischen den Menschen.

Für das Nachtsehen sind etwa 120 Millionen Stäbchen wirksam, fürs Tagsehen etwa 6 Millionen Zäpfchen. Ähnlich wie die schmale Bandbreite und die unterschiedliche Intensität der Ausstrahlung verschiedenfarbiger LEDs sind die Sinneszellen für Helligkeiten, Kontrast und Farben komplex differenzierend empfänglich, allerdings mit jeweils größeren Bandbreiten. Die 3 Typen tageslichtempfindlicher Zäpfchen reagieren sich stark überlappend auf kurz-, mittel- und langwelliges Licht (K/M/L-Zäpfchen), was [Bild 8](#) gut zeigt – im Gegensatz zur fast monochromatischen Farbabstrahlung der LEDs. Da kurzwellige Sinneszellen weniger stark auf Reize reagieren, sehen Farben im Blau-Bereich dunkler aus als im Grün-Rot-Bereich. Durch die starken Überlappungen der spektralen Empfindlichkeiten der K-M-L-Zäpfchen ist der „normalsichtige“ Mensch besonders sensitiv im farbigen Tagsehen (photopisches Sehen) auf 555 nm (grün). Darauf ist der lichtempfindliche Widerstand BPW 21 abgestimmt. Darauf ist auch unser Lichtsignalsystem bei Bahn und Schifffahrt abgestimmt. Dagegen nehmen moderne Straßenampelsysteme neuerdings Rücksicht auf Menschen mit „unnormalem“ Farbempfinden und strahlen grünes Signallicht mit hohem Blauanteil ab.

Unsere Augenlinsen absorbieren ultraviolettes Licht. Beim sogenannten „Grauen Star“ kann die natürliche hornhäutige Linse durch eine künstliche Kunststoff-Linse operativ ersetzt werden; diese Menschen sehen dann UV-Licht dank der K-Zäpfchen bis in den Bereich von unter 300 nm. Insekten sind auf UV-Licht besonders empfindlich. „Normalsichtige“ Menschen haben im Nachtsehen (skotopisches Sehen) ihr spektrales EmpfindlichkeitsMaximum bei 507nm.

Bei der „Datenübertragung“ von den Sinneszellen zum Hirn findet gleichfalls ein Übersprechen zu benachbarten Zellverbänden sowohl auf der Netzhaut als auch auf den Sehnerven ebenso wie zwischen den Hirnzellen statt. Ein virtuelles Bild entsteht erst in der Umsetzung dieser Nervenimpulse beim Eintreffen und Verarbeiten im Gehirn relativ zu bereits gespeicherten Informationen. Das Auge selbst ist dabei nur der Messwertaufnehmer, die Sinneszellen selbst sind farbenblind und formenblind, sie wandeln Lichtenergie nur in chemisch-elektrische Reize um, beinhalten also weder Farb- noch Bildinformationen – genauso wie im Grafikprozessor und auf den 3 RGB-Leitungen vom Rechner zum Monitor nur Spannungswerte ohne Farb- und Bildinformationen transferieren. Das Auge löst gewissermaßen das fotorealistische Bild quasi-digital auf, das durch Linse und Pupille auf die einzelnen Rezeptoren einfällt. Durch das Übersprechen auf benachbarte Rezeptoren, Sehnerven und Hirnzellen sehen wir wieder ein pixelfreies fotorealistentes Bild ohne jegliche Rasterungen, Moire-Effekte und Farbverlaufsgrenzen, die ja monitor- und drucktechnisch bedingt sind, da solchen bekanntlich ein Hirn fehlt. So entsteht also ein Farbreiz im Gehirn erst aus der InformationsKombination aller Rezeptoren und Sehnerven.

*Isaac Newton: „Farbe ist nicht im Licht, nicht im Auge, sondern im Hirn“.*

Diese komplexen chemisch-elektrische Umwandlungen und Übertragungen machen

daher eine Normierung unmöglich. Zumal noch die Quantisierung körpereigener Stoffe das Farbempfinden verändern können, etwa bei mangelnden Vitaminen oder bei Ausschüttung körpereigener Stoffe bis hin zum sogenannten BlackOut, bei dem das Gehirn immer stärker weiß-sieht, die Farben zunehmend verblassen (black out) und die Grautönungen heller werden.

Der reine Farbaspekt in unserem Hirn ist eher uninteressant!. Das wird deutlich, wenn wir eine Lichtquelle auf die Größe der Entfernung orten sollen, was nicht gelingt. Wir wissen, wie weit etwa ein Stern am Nachthimmel entfernt sein könnte, wir schätzen allenfalls die Entfernung bis zu einer Lampe anhand ihrer Umgebung. Daher benötigt das Gehirn – in Relation zu seinen gespeicherten Erfahrungen – die Struktur und die Oberflächenbeschaffenheit eines Gegenstandes neben seiner Farbabstrahlung, um mit dieser vollen „Farbinformation“ ein Bild zu generieren. Insgesamt wertet das Hirn dabei auch andere Impulse aus, die vom Fühlen, Schmecken, Riechen und Hören kommen. Und vom zweiten Auge.

Ungefähr 8...10% aller europäischen Männer und 0,5...1% der Frauen haben eine erblich bedingte Unterempfindlichkeit bei Rot- und/oder Grün-Farben. Normal ist ein Verhältnis der drei tagsichtigen K/M/L-Zäpfchen von 10% Blau-, 48% Grün- und 42% Rot-Empfindlichkeiten. Bei einer Farb-Sehschwäche sind die 3 Zäpfentypen anders verteilt, beispielsweise mit 30% Blau zu 30% Grün zu 40% Rot (Grünschwäche) vertreten, wobei erhebliche Unterschiede auftreten: Manch einer kann noch gut Grün von Rot trennen, andere erkennen keinen Unterschied zwischen Rot oder Grün, wieder andere haben nur im zentralen Scharfsehbereich des Auges solch eine Farbschwäche. Die Zäpfchenverteilung variiert bei jedem Menschen auch über die gesamte Fläche der Netzhaut: Die Rot-Grün-Erkennung nimmt permanent ab, je weiter weg sie vom zentralen Scharfsehbereich entfernt sind (äußerer Rand des halbkugeligen Augenhintergrundes).

Die gänzliche Farbblindheit kommt nur sehr selten vor mit 0,003% der Bevölkerung. Auch eine Sehschwäche in den Gelb-Blau-Farben gibt es (0,004%). Diese Erbschwächen verändern sich übrigens im Laufe des Lebens nicht; auch kann eine Farbsehschwäche im Laufe des Lebens nicht erst entstehen, sie werden ja vererbt.

Die RotGrün-Normalität bezieht sich auf Mitteleuropa; das hat seinen Grund in der Urzeit von Sammlern und Jägern, als es überlebenswichtig war, rote Beeren unter grünen Blättern zu sammeln oder einer Blutspur im Wald zu verfolgen. Diese unsere Normalität ist genaugenommen eine Überempfindlichkeit am RotGrün-Kontrastsehen, die in anderen Landschaftsformen wie Wüsten- oder Polargebieten nicht erforderlich ist. Diese vermeintliche Sehschwäche bezieht sich daher relativ zur Mehrheit eines Farbsehvermögens in einer bestimmten Landschaft.

Für Elektroniker, die sich mit optischen Aspekten eines Gerätes befassen – wie Webseiten-Designer und Geräte-Designer –, ist es durchaus wichtig, sich mit diesen Phänomenen zu befassen, da die farbschwächeren Männer (und Frauen) einen erheblichen Anteil in unserer Bevölkerung ausmachen. Was ist also weiß? Was ist blau? Was ist ein neutrales Grau? Das hat Auswirkungen auf Simultankontrast (scheinbare Farbstichigkeit einer Fläche vor einem Hintergrund), Farbstereoskopie (rot erscheint „vorne“, blau „hinten“), Nicht-Lesbarkeit von rotem Text auf grünem Hintergrund, und anderen Farbtonverschiebungen. Letztendlich ist unser Leben, unsere Stimmung ja farbabhängig.

Die Technik in unseren elektronischen Medien ist der Biologie unseres Auges ähnlich. Nur die Umsetzung in unseren Nerven und Hirn zu einem Foto gelingt bislang mit technischen Mitteln nicht.

## **FAZIT**

Der direkte Anschluß von Standard-LEDs als LichtSensoren an Opamps mit JFET-Eingängen oder einfacher MOSFET-Eingangsstufe (TLC271) will wohlgedacht sein. Dabei offenbaren sich die unterschiedlichen Chip-Topologien in unterschiedlichem Schwingverhalten beim Schalten.

Bei alten ICs läßt sich die Schwingfrequenz im SchaltPunkt mit C 2 und R 3 lediglich integrierend bestimmen. Die moderneren Opamps hingegen führen das RC-Glied am nicht-invertierenden Eingang zum klareren Schaltverhalten mit zusätzlicher HystereseFunktion über die Lichtstärke. Das hängt von ihren integrierten

KompensationsSystemen ab, die man von außen nicht sieht.

Für den einfachen LichtSensor nach Bild 2 mit der NachlaufFunktion von 3 Sekunden sind alle gelisteten Opamps geeignet. Deren Abweichungen untereinander sind wesentlich geringer als die der externen passiven Bauteile. Insgesamt ergibt sich ein präziserer und kostengünstigerer SMD–Aufbau mit weniger Bauteilen auf kleinerer Fläche als mit diskretem JFETransistor BF245, Standard–Opamp und TrimmPoti.

\* \* \*



### Bild 1

Um die Sensorspannungen über den lichtempfindlichen LEDs ermitteln zu können, ist diese Messschaltung notwendig. Sie stellt einen Opamp als TransimpedanzVerstärker dar. Im Gegensatz zu einem Voltmeter hat ein OTA eine EingangsImpedanz von mehreren TeraOhm ( $n \times 10^{12} \Omega$ ), das ist erforderlich, damit die LED-Biasströme nicht im Rauschen der Offsetströme untergehen. Es sind dafür nur OperationsVerstärker mit JFET oder einfachem MOSFET am Eingang geeignet. Ungeeignet sind alle anderen mit komplementärer CMOS-Eingangsstufe oder mit bipolaren EingangsTransistoren.

Die empirisch ermittelten SensorWerte bei verschiedenen BeleuchtungsStärken zeigt Tabelle 3.

### Bild 2

Erprobte Schaltung mit meinem Lieblings-IC AD820. Er ist der Vater moderner Opamps, intern frequenzkompensiert, recht schnell und präzise mit sehr guten AC/DC-Eigenschaften – dadurch auch ziemlich teuer. Das Zeitglied aus LED 3, R 4, R 5 und C 4 am Gate des MOSFETs dient zum definiert verzögerten AUSSchalten der Last – hier mit einer Nachlaufzeit von  $t_{AUS} \approx 3$  s. Es kann auch weggelassen werden bei anderen Opamps wie dem AD8610, denn bei diesem sorgt eine 250 mV-Hysterese – mit der Funktion von R 3 erreicht – für eindeutiges Schalten ( $>$  Tabelle 4).

LED 3 ist eine Standard-LED und fungiert als Diode; sie ist deshalb lichtdicht mit Schrumpfschlauch oder dunklem Lack überzogen, so besitzt sie einen wesentlich niedrigeren und temperaturunabhängigeren Leckstrom als jede normale Diode: C 4 wird somit nur über R 4 und R 5 entladen.

Am **Punkt A** liegt die Referenzspannung  $U_{TH}$  von 2,25 V an. Sie entspricht der Spannung über zwei gelben (oder roten) LEDs detektiert auf der Schwelle der Lichtstärke, bei der man sein Licht an Auto und Fahrrad einschaltet. Dieser Spannungsschwellenwert wird während der Abend- und Morgendämmerung ziemlich schnell durchfahren, so daß für R1a/b Toleranzwerte von  $\pm 10\%$  genügen. Für LEDs mit anderen Farben und Sensoren mit nur einer oder mehreren LEDs siehe **Tabelle 3**

### Bild 3

zeigt eine ExperimentierPlatine (EVM) von TexasInstruments, auf der ich die verschiedenen JFET-Opamps in der Schaltung des TageslichtSensors getestet habe: hier den AD8627AR. C 2 und R 3 sind huckepack auf die Landefläche von C 102 verlötet, was manuell mit gleich großen SMD-Gehäusen gut gelingt. Aus Bild 4 ist die Bauteil-Bestückung in dieses Platinen-Layout umgesetzt. Neben dem Testen verschiedener Opamps gilt diese ExperimentierBoard auch verschiedenfarbiger LEDs, hier mit den beiden abgewinkelten roten LEDs bestückt, die sich zur Detektion von Glühlampen eignen, jedoch weniger zur Detektion von Tageslicht.

Eine kleine Besonderheit ist der ungepolte 3,3  $\mu$ F-Kondensator am Gate des Schalt-MOSFETs: Es ist ein MLCC – ein MultiLayer-Ceramic Capacitor im 1210-SMD-Gehäuse. Wer sich für HighValue Multilayer Keramik Kondensatoren bis 100  $\mu$ F interessiert, wendet sich bei kleinen Stückzahlen an den Autor via E-Mail [kjt@gmx.de](mailto:kjt@gmx.de).

Die angeschlossene Präzisions-Spannungsquelle liefert mit +5,00 V hier ein aufgesetztes ExperimentierPlatinchen mit dem LDO-Regler REG101NA-5 von TexasInstruments (SOT 23-5 Pin). Damit konnte ich auf eine zusätzliche Referenzquelle am Knotenpunkt **A** verzichten. Gewissermaßen kombiniert die REG10x-Familie die Eigenschaften eines Reglers mit hohem Ausgangsstrom (100...1.000 mA) und einer rauscharmen Referenz mit präziser Ausgangsspannung ( $\pm 1,5\%$  - 50ppm/K). Zudem benötigt sie keine Ausgangskondensatoren.

### Bild 4

Um die Schaltung in Bild 2 auf die ExperimentierPlatine umzusetzen, habe ich zur besseren Übersichtlichkeit und zur FehlerReduzierung diese BleistiftSkizze angefertigt. Am Gate des SchaltTransistors läßt sich die Nachlaufschaltung aus LED 3, C 4, R 4 und R 5 überbrücken, um den gerade getesteten Opamp hinsichtlich seines HystereseVerhaltens auszuprobieren. Die lichtdicht im Schrumpfschlauch verpackte LED 3 dient als Diode mit extrem geringem SperrStrom. Der AD8033 besitzt als einziger einen SHDN –Pin, mit dem sich die Ausgangsstufe hochohmig gegen die VersorgungsSpannungspotenziale schalten und der Stromverbrauch reduzieren läßt.

### Bild 5

Die in Tabelle 4 grafisch dargestellten Schwingungen auf der abfallenden Flanke während der kurzen UmschaltPhase dokumentieren diese beiden OszilloskopBilder im SingleShot-Modus stellvertretend mit AD8033 gegen TLE2081.

### Bild 6

Farbspektrum versus Farbsättigung für LEDs. Praktisch ist eine LED mit jeder Farbe im LAB-Farbfeld herstellbar. Eine Sonderstellung nehmen 3-Farb-RGB-LEDs ein, die auf einer Chip-Struktur 4 $\times$  LEDs in 1 $\times$  rot, 1 $\times$  grün und 2 $\times$  blau besitzen, mit denen alle Farben aus dem CIE-Farbdiaagramm anzeigbar sind, aber auch die spezielle Farbe Braun.

Die TLCM5100 ist eine weiße LED in InGaN/YAG-Topologie auf SiC-Struktur (Silicium-Karbid); dies macht die LED 1kV-ESD-überspannungsfest.

(SiC-Dioden lassen sich als fast ideale Schalter einsetzen, denn sie weisen beim Abschalten nur noch sehr geringe Rückströme auf im Gegensatz zu allen anderen Dioden-Topologien. Deutlich ist bei dieser „weißen“ LED die Farbspitze im bläulichen Bereich



wahrnehmbar, ihr Lichtspektrum ähnelt der von Tageslicht-Leuchtstofflampen mit 5.500°C-Farbtemperatur. Ihre Lichtstärke mit 4 cd (!) über einen Kegel von  $\pm 5^\circ$  ist so hoch, daß man ohne Schmerzen nicht mehr in den Leuchtkegel schauen kann. Weiße LEDs verschieben ihr Farbspektrum mit höherem Biasstrom zum IR-Bereich hin.)

### Bild 7

Das um die 3. und 4. Dimension beraubte CIE-Diagramm mit der Gegenüberstellung von verschiedenen Medien. Das hufeisenförmige LAB-Feld verdeutlicht ersatzweise mehr schlecht als recht die Erfassungsweite unserer Augen, genügt hier jedoch in der Gegenüberstellung vom DruckMedium mit seinen BasisDruckfarben CMYK (Cyan-Magenta-Yellow-Schwarz) zu den Röhren-Monitoren (RGB: Rot-Grün-Blau) und LCD-Monitoren. Diese Polygone innerhalb des LAB-Feldes veranschaulichen die wesentlich verminderte Darstellbarkeit in der Sättigungen von Farben mit technischen Medien. Zusätzlich sind Röhren-Monitore (RGB) nicht in der Lage, Schwarz darzustellen. Und LCDs können reines Weiß nicht anzeigen.

Anmerkung: Die Bezeichnung RGB bezieht sich hier auf die 3farbige PunktMatrix von Farb-RöhrenMonitoren (CRT). Der Farbumfang von RGB-LED-GroßMonitoren ist in Bild 6 dargestellt.

### Bild 8

Farbempfindung von „normalsichtigen“ Menschen. Das Norm-Empfinden eines Vollfarb-Bildes wird mit 30% Rot, 60% Grün und 10% Blau für zentraleuropäische Menschen angenommen, was natürlich die Menschen mit anderen Farbempfindungen unberücksichtigt läßt.

Warum die städtischen Großdisplays so hell strahlen, liegt daran, daß aus Kostengründen statt der teuren 525 nm-grünen LEDs solche mit  $\lambda = 565$  nm (gelblich-grün) verwendet werden, dadurch fällt die dunkelgrüne LAB-FarbFläche aus dem eigentlich darstellbaren LED-GroßDisplay-Bereich heraus. Mit ihnen sind dann nur noch die Farben anzeigbar, die innerhalb der gedachten Verbindungslinien liegen (FarbDreieck). Das „normalsichtige“ menschliche Auge hat seine maximale Empfindlichkeit um die 555 nm.

### Bild 9

Die CIE-Diagramme sind in mehrerer Hinsicht nur hilfsweise und nur technisch zu verstehen:

- Als erstes zeigt dieses Bild die einzelnen Farbbenennungen in unifarbenen Farbfeldern anstelle von farberlaufenden Bereichen. Beides läßt sich ohnehin weder über einen Monitor noch über einen Druck referenzieren, da der LAB-Umfang weit mehr Farben darstellt als mit einem unserer üblichen Medien möglich ist (Ausnahme: Lichtbogenlampe in KinoProjektoren) – siehe Bild 7! Die Generierung der Farben in diesen stufigen Farbfeldern erfolgt nach der **RotGrünBlau**-Modellierung aufgrund von MonitorFarbzuweisungen (CRT-RGB), das ja nur einen begrenzten Farbumfang darstellt und je nach Kalibrierungen des Monitors oder der Qualität des Papiers gravierend untereinander abweicht.
- In dieser zweidimensionalen Darstellung sind die schwierig zu generierende Farben Braun, Gold, Silbern nicht enthalten – auch durch Mischen nicht, da unser Auge eine Oberfläche mit seiner Farbe untrennbar verknüpft. In der Drucktechnik werden sie als Schmuckfarben in einem separaten Druckdurchlauf zu den übrigen Farben einem Bild hinzugefügt. Ein RGB-CRT-Monitor oder ein RGB-LED-Display kann ungeachtet aller Diagramme und Farbmodelle auch Brauntöne anzeigen.
- Mit diesem Bild läßt sich nur die **Farbsättigung** zeigen. Diesem auch allgemein veröffentlichten CIE-Farbdigramm in x- und y-Chromatisierung mangelt es an der 3. Dimension (z-Chromatisierung), die die **Helligkeit** repräsentiert. Auf der z-Achse spitzt sich das Farbmodell kegelähnlich zu, was bedeutet, dass unser Farbempfinden mit abnehmender Helligkeit nachläßt.

Hier jedoch genügt dieses Bild vollauf, um den Farbumfang verschiedener Medien deutlich zu machen. Die kleinen benannten Flächen weisen auf die beinahe monochromatische Farbabstrahlung von üblichen LEDs hin. Ihre Nähe zur äußeren Randlinie verdeutlicht ihre hohe Farbsättigung. Ihre Helligkeit wird bekanntermaßen über den Biasstrom gesteuert – hierin nicht darstellbar. Fabrikmäßig sind allerdings alle Farben auf dieser randnah gedachten Linie herstellbar – zur Verdeutlichung wenn man die einzelnen LED-Felder mit einer gekrümmten Linie verbindet – , was beispielsweise Automobil-Hersteller ausnutzen, um ihre Marke farbspezifisch zu repräsentieren. Der Distributor *Reichelt* bietet neuerdings LEDs in den Farben violett ( $\lambda = 420$  nm), rosa ( $\lambda = 440$  nm) und türkis ( $\lambda = 490$  nm) an.

Verbindet man die verschieden farbigen LED-Flächen miteinander, so umschließt dieses Polygon eine große Fläche, was eine hohe Farbsättigung bedeutet, die Vollfarb-LED-Displays anzuzeigen vermögen. Im Gegensatz dazu haben LCD- und CRT/Röhren-Monitore ein gravierend eingeschränktes Vermögen zur Farbdarstellung, was die beiden kleinen Dreiecke verdeutlichen; sie sind noch nicht einmal in der Lage, Weiss (LCD) oder Schwarz (CRT) in voller Sättigung anzuzeigen. Das liegt daran, dass ein LC-Display einen geringen Teil des Farbspektrums schluckt, und eine CRT-Röhre immer mit einem noch so geringen Kathodenstrahl die Bildschirmfläche zum Leuchten anregt.

Die Gegenüberstellung verschiedener LEDs und optischen ICs zeigt, daß die meisten ICs mehr auf den InfraRot-Bereich getrimmt sind. Mit ihnen läßt sich ohne InfraRot-Filter kein Tageslicht-Sensor aufbauen. Die vier Standard-LEDs in rot, grün, gelb und blau haben zwar ihr maximales Spektrum ähnlich unseren Tageslicht-Rezeptoren, jedoch ihre schmale, kaum überlappende Bandbreite unterscheidet sie deutlich von den sich spektral stark überlappenden K-, L- und M-Zäpfchen unserer Augen. Mit RGYB-LEDs lassen sich Tageslicht und Kunstlicht gut detektieren.

**Tabelle 1**

Integrierte Tageslicht-Sensoren							
N°	Bezeichnung	Topologie	Sensibilität		Hersteller	Gehäuse	Bemerkung
			Bereich	Maximum			
			<i>nm</i>	<i>nm</i>			
1	BPW 21 <sup>1</sup>	PN- Photodiode	420...675	565	Vishay	TO 5 - 2 Pin	
2	OPT 101	Photodiode mit OTA	280...1.200	850	Burr- Brown	SO 8 + DIP 8 + SIP 5	
3	OPT 301	Photodiode mit OTA	200...1.150	750	Burr- Brown	TO 99 - 8 Pin	abgekündigt
4	TSL 25x	Photodiode mit OTA	300...1.100	780	Texas Instr.	Plastik - 3 Pin	
5	MCS3xx	3x RGB- PN- Photodioden <sup>2</sup>	400...510 490...610 590...750	—	Jencolour	TO 5 + SO 8	sehr teuer

<sup>1</sup> siehe Fußnote Seite 1!

<sup>2</sup> Truecolor-Dreifeld-RGB-Farbsensor-ICs mit dielektrischen Interferenzfiltern und Normwertspektral-Empfindlichkeit mit/ohne IR-Blocker.

Tabelle 2

Vorauswahl 1facher Single-Supply-OPs mit JFET-Eingangsstufe										
N°	Typ	GBP	Offset	Eingangs-Bias	$U_{CC}$	$I_{CC}$	$U_{IN}$ max.	Hersteller	Gehäuse	get
		MHz	$\mu V$	$\mu A$	V	mA	V			
1	AD 8033	80	1.000	1,5	+5...24	3,3	0...+ $U_{CC}$ -3	Analog Dev.	SO 8 + SOT 23	
2	AD 8065	145	400	2	+5...24	6,4	0...+ $U_{CC}$ -3	Analog Dev.	SOT 23	
3	AD 820	1,8	100	2	+3...36	0,65	-0,2...+ $U_{CC}$ -1	Analog Dev.	SO 8 + DIP 8	
4	AD 8610	25	85	2	+5...26	3,5	0...+ $U_{CC}$ -3	Analog Dev.	SO 8 + MSOP 8	
5	AD 8627	5	500	0,5	+5...26	0,75	0...+ $U_{CC}$ -1	Analog Dev.	SO 8 + SC70	
6	OPA 132 <sup>6</sup>	8	250	5	+5...36	4	RR-I <sup>5</sup>	Burr-Brown	SO 8 + DIP 8	
7	TLE 2071	10	500	6	+4,5...36	1,7	0...+ $U_{CC}$	Texas Instr.	SO 8 + DIP 8	
8	TLE 2081	10	1.100	6	+4,5...36	1,7	0...+ $U_{CC}$	Texas Instr.	SO 8 + DIP 8	
9	TL 081 C	3	3.000	5	+4,5...16	1,4	0...+ $U_{CC}$	Texas Instr.	SO 8 + DIP 8	
10	TLC 271 C <sup>3</sup>	0,09	1.100	0,1	+3...16	1	-0,2...+ $U_{CC}$ -1	Texas Instr.	SO 8 + DIP 8	
i	OPA 655 <sup>1</sup>	240	1.000	-5	$\pm 4,75...5,25$	25	$\pm 2,75$	Burr-Brown	SO 8 + DIP 8	n
ii	INA 121 <sup>1 4</sup>	—	200	4	$\pm 2,25...18$	0,45	- $U_{CC}+2...+U_{CC}-1$	Burr-Brown	SO 8 + DIP 8	n
iii										
iiii										

<sup>1</sup> Bipolare Spannungsversorgung notwendig.

<sup>2</sup> SHDN: ShutdownModus Pin 8, Schaltfunktion um Ausgangsstufe hochohmig abzuschalten und Versorgungsstrom  $I_{CC}$  abzusinken.

<sup>3</sup> TLC271 mit einfacher P-Kanal-MOSFET-Eingangsstufe. Er schaltet im LowBias-Modus im Bereich der Spannungsschwelle  $U_{TH}$  ohne Oszillatieren. C 2 ist wirkungslos und wird nicht bestückt.

<sup>4</sup> Instrumenten-Verstärker.

<sup>5</sup> RR-IO = Rail-to-Rail Input/Output ( $U_{IN+/-} \Rightarrow -U_{CC}-0,3V...+U_{CC}+0,3V$ ).

<sup>6</sup> Familie von 1fach bis 4fach-Opamps mit GBW = 1...8 MHz: OPAx130, OPAx131, OPAx132.

<sup>7</sup> SHDN: ShutdownModus Enable-Eingang Pin 8 kombiniert mit thermischem Überlastungsschutz bei 160°C.

**Tabelle 3**

Äquivalente LED-Spannung am Punkt <b>B</b> nach MessSchaltung Bild 1 bei mittlerem Abend/Morgen-Dämmerlicht und in mondloser Nacht					
LED-Senso	Typ	U <sub>BIAS</sub> [V]		U <sub>BIAS</sub> [V]	
		@ 1x solo		@ 2x in Reihe	
		Dämmerung	Dunkel	Dämmerung	Dunkel
Gelb	TLLY4400 <sup>1</sup>	1,1	0,8	2,2	1,0
Rot	TLLR4400 <sup>1</sup>	1,0	– <sup>4</sup>	2,0	– <sup>4</sup>
Grün	TLLG4400 <sup>1</sup>	1,2	0,8	2,4	1,4
Blau <sup>3</sup>	LF-59EBGBC <sup>2</sup>	1,5	– <sup>5</sup>	2,4	– <sup>5</sup>

<sup>1</sup> 3 mm LowCurrent-LEDs

<sup>2</sup> 5 mm RGB-LED von Kingbright

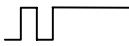

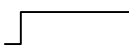

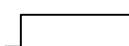

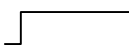

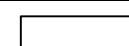







<sup>3</sup> nur jeweils 1x blau angeschlossen

<sup>4</sup> Rote LED detektiert die nahe Wärmestrahlung, daher Nachtlichtmessung nicht möglich!

<sup>5</sup> Geeignet zur Detektion von Glühlampen.

nicht gemessen.

Tabelle 4

Schaltverhalten verschiedener Opamps bei $U_{LEDs} = U_{REF}$						
Lichtwechsel:	hell $\Rightarrow$ dunkel	dunkel $\Rightarrow$ hell	PulsF PulsW€		Hysteres	
Last:	AUS $\Rightarrow$ EIN	EIN $\Rightarrow$ AUS				
Opamp	PWM-Hy	PWM-Hy	min/	ms	ms	Schaltpu
AD 8033	 klein	 klein	ED:	~ 50:50		klein
AD 8065	 –	 –	–	–		mittel
AD 820	 –	 –	–	–		sehr klein
AD 8510	 –	 groß	min.: max.:	~ 4, ~ 5,	~ 45 ~ 55	mittel
AD 8610	 –	 –	–	–		klein
AD 8627	 –	 –	$f_{PWM}$ :	~ 8,0...15,0		keine
OPA 132	 groß	 groß	min.: max.:	~ 4, ~ 12,	~ 50 ~ 140	groß
TLE 2081	 sehr groß	 sehr groß	nicht messb.	nicht messbar		keine

Mit der PWM-Hysterese meine ich die zeitliche Größe der Lichtstärke-Änderung während des Schaltens in der Dämmerung, um aus dem Oszillieren herauszukommen. Die Schaltpunkt-Hysterese bezeichnet die zeitliche Verzögerung einer Ausgangssignaländerung auf die Änderung des Lichtsensor-Signales. Die verschiedenen Chip-Topologien generieren ein differenzierendes Verhalten während des Schaltens in der Dämmerung, wenn also die Spannung über beide Sensor-Leuchtdioden die Schaltschwelle bei  $U_{REF}$  überschreitet. Während der Vater moderner JFET-Opamps – der AD820 – vorbildlich ohne Schwingneigung seine Ausgangsspannung wechselt, legen ältere Entwicklungen wie der TLE2081 oder gar der TL081 ein ausgeprägtes PWM-Oszillieren mit linearem Abklingen (Vordach in der abfallenden Pulsflanke) auf das Ausgangssignal. Dieser Jitter ist nicht ruhig sondern oszilliert unkontrolliert. Verursacht wird dieser Störimpuls durch starke Rückkopplungen durch chipinterne Strukturen auf den höchstempfindlichen Eingang älterer JFET-Opamps. Bedenke: Der OTA verstärkt den LED-Biasstrom mit  $n \times 10^{12}$ !

Die Besonderheit in der Schaltung mit dem AD820 liegt darin, dass er den Schaltpunkt präzise mit geringster Hysterese-Funktionen belegt; das kann allerdings dazu führen, dass ihn geringste Rückkopplungen zwischen den Sensor-LEDs und einer angeschlossenen Lampenlast zum Oszillieren anregt, wenn das RC-Netzwerk (LED 3, R 4, R 5 und C 4) überbrückt wird.

Die PWM-Hysterese ist beim AD8033 klein: Er oszilliert nur kurz, wenn die Lichtstärke gering geändert wird; eventuell ist der Wert von C 3 noch zu erhöhen, um die Schwingneigung zu eliminieren.

Bei der Schaltung mit dem TLE2081 muß die Lichtstärke in der Dämmerung stark verändert werden, um aus der OszillationsPhase herauszukommen. Dadurch, daß er keine Schalthysterese auf das Ausgangssignal legt, läßt sich dieses hysteresefreie Oszillieren beispielsweise mit einer Frequenzmessung zum genaueren Detektieren der Dämmerung mit  $f = 5...20$  Hz nutzen.

Für den Tageslicht-Schalter nach **Bild 2** mit definiertem Nachlaufverhalten sind diese Eigenarten unerheblich, da das RC-Netzwerk (LED 3, R 4, R 5 und C 4) solche teilweise undifferenzierten Schwingneigungen am Gate des MOSFETs unterdrückt. C 2 wirkt als Integrierer mit definiertem Zeitverhalten, er unterdrückt willkürliches Oszillieren hervorgerufen durch die parasitären Eigenarten an den Opamp-Eingängen.

Tabelle 5

Lichttechnische Größen					
Ableitung	Größe	Einheit	Formelzeichen		
	Name	Zeichen			
● (BasisEinheit)	Lichtstärke <sup>1</sup>	die Candela	cd	$I_v$	
↳ ●	Lichtstrom <sup>2</sup>	das Lumen	lm	$\Phi_v$	$\Phi_v = I_v \cdot \omega$
↳ ●●	Lichtmenge	Lumen-Seku Lumen-Stun	lm · s lm · h	$Q_v$	
↳ ◆◆	Beleuchtungsstärke	das Lux	lx	$E_v$	$E_v = \frac{\Phi_v}{A}$
↳ ●●●	Belichtung	Lux-Sekunde	lx · s	$H_v$	
↳ ◆	Leuchtdichte <sup>4</sup>		cd / m <sup>2</sup>	$L_v$	$L_v = \frac{I_v}{r^2}$

<sup>1</sup> Die BasisEinheit – die Candela (lateinisch: WachsLicht) – entspricht pragmatisch dem Licht in einer Kerzenflamme. Wissenschaftlich gibt ein sogenannter „schwarzer Strahler“ aus seiner Oberfläche von 1,66 mm<sup>2</sup> die Lichtstärke von 1 cd ab, wenn er  $T = 2.042,5 \text{ K}$  heiß ist (Erstarrungstemperatur von reinem Platin). Die anderen Größen sind aus dem Candela abgeleitet. Die neuere Definition lautet: Candela ist die Lichtstärke, die eine Lichtquelle mit monochromatischer Strahlungsenergie von 555 nm und 1/683 W pro Steradian (Raumwinkel) abstrahlt.

<sup>2</sup> Der Lichtstrom ist die gesamte gerichtete Lichtstrahlung aus einer Lichtquelle in seinem Abstrahlkegel.  $\omega$  ist der Raumwinkel des Lichtkegels. Der volle Raumwinkel ist somit  $360^\circ = 4 \cdot \pi \cdot \omega$ , wobei  $\omega$  der Raumwinkel in Steradian (sr) ist.  $1 \text{ sr} = \frac{1}{4} \pi \cdot A_0$  ( $A_0$  ist die bestrahlte Fläche auf der entsprechenden Kugeloberfläche).

<sup>3</sup> Die Beleuchtungsstärke ist der Lichtstrom, der dann auf eine bestimmte ebene Fläche trifft. Ein Strahler mit der Lichtstärke von 1 Candela beleuchtet eine Objektfläche von 1 m<sup>2</sup> in einem Radius von 1 m mit 1 Lux; der Raumwinkel des Lichtkegels beträgt dabei  $\omega = 65,6^\circ$ . In einem Radius von 2 m ist die beleuchtete Fläche dann 4 m<sup>2</sup> groß, die Stärke der Beleuchtung auf  $\frac{1}{4}$  abgesunken (Entfernungsgesetz).

1 Lux entspricht 1 Lumen pro Quadratmeter. 100.000 Lux entspricht der mittleren definierten Bestrahlungsstärke der Sommersonne in Deutschland mit 1.000 W/m<sup>2</sup>.

<sup>4</sup> Die Leuchtdichte ist die Lichtstärke einer leuchtenden Fläche relativ zur betrachteten Fläche unter einem zumeist schrägen Betrachtungswinkel.

A ist die leuchtende Fläche.  $\epsilon$  ist der Winkel zwischen Sehstrahl vom Auge schräg auf diese Fläche und senkrechtem Lot auf die Fläche durch den Strahler.

**Tabelle 6**

Leuchtdichten		
<i>beleuchtete Fläche</i>	<i>Beleuchtungsstärke</i>	<i>Leuchtdichte</i>
	<i>lx</i>	<i>cd / m<sup>2</sup></i>
Mittagssonne Deutschland nominell im Sommer	100.000	2.000.000
Mittagssonne Deutschland nominell im Winter	10.000	
LeuchtstoffLampe		1.000
40W–Glühlampe 240V~		600
Schwarzer Strahler 2.042,5K		60
Grenze der FarbWahrnehmung	3	
klarer Tageshimmel		0,8
Mondlicht nachts	0,25	0,25



Stückliste		Wert	Gehäuse
C 1	Keramik	47nF	1206
C 2	Keramik	100nF	1206
C 3	Keramik	47nF	1206
C 4	Keramik - MLCC	3,3µF - 25V	1210
IC 1		> siehe Text!	
LED 1	TLLY 4400 gelb Ø3mm	> siehe Text!	THT
LED 2	TLLY 4400 gelb Ø3mm	> siehe Text!	THT
LED 3	rot Standard lichtdicht	> siehe Text!	
Q 1	N-Kanal-MOSFET		
R 1a	Widerstand	27kΩ	1206
R 1b	Widerstand	22kΩ	1206
R 2	Widerstand	100kΩ	1206
R 3	Widerstand	2,2MΩ	1206
R 4	Widerstand	4,7MΩ	1206
R 5	Widerstand	27kΩ	1206

\* THT: Through-Hole-Technology (konventionelle Durchstecktechnik im Leiterplatten-Design)

\* MLCC: MultiLayer-Chip-Capacity (Keramik-Kondensatoren mit bis zu 900 Lagen und hohen Kapazitätswerten bis zur Zeit 100µF)

### **Literatur:**

Elektronik Praxis, September 2003, Seite 28	«Springt ins Auge»	M. Drissen-Demes	Vogel Industrie Medien GmbH
Elektronik Praxis, April 2001, Seite 66	«Strahlender Auftritt»		Vogel Industrie Medien GmbH
Elektronik, 16/2003, Seite 28	«Von kohlrabenschwarz bis gleißend hell»		WEKA-Verlag
Elektronik, 15/2001, Seite 67	«Aus Licht werde Spannung»	C. Oppitz	WEKA-Verlag
Elektor, 7-8/2001, Seite 61	«LED-Photo-Sensor»		ELEKTOR-Verlag
Elektor, 10/2003, Seite 18	«Mehr Licht!»	M. Oßmann	ELEKTOR-Verlag
Das große Werkbuch Elektronik, Band 2		D. Nährmann	Franzis-Verlag
Alles Buch	Studien der Erlanger Buchwissenschaft III	U. Rautenberg & V. Titel	Universität Erlangen-Nürnberg
Grafische Datenverarbeitung	Elemente der Bildwahrnehmung	D. Krömker	Goethe-Universität Frankfurt
Analog Dialogue, Volume 36-2002, Part 2, Seite 8	«Detecting Fast RF Bursts Using LogAmps»	Y. Toh	www.analog.com

<http://www.agc.fhg.de/uniGoethe/lehre/ws0203/Folien/Visualisierung>

<http://www.id.unizh.ch/publications/ps/color.html>

<http://www.lasercomponents.com>

CIE-Farbräume XYZ

RGB-Farbsensor-ICs MCS3xx mit Normwertspektral-Empfindlichkeit und Farbfilterung

Dr. Ralf Dörner

Goethe-Universität Frankfurt

Universität Zürich

### **Datenblätter:**

<http://www.kingbright.com>

LF-59EBGBC

Full Color RGB LED

Kingbright

<http://www.ti.com>

OPT101, 210, 301

Monolithische Fotodiode mit OTA

Burr-Brown

<http://www.hp.com>

HLMP-Axx

Oval Precision Optical Performance LED

HewlettPackard

<http://www.siliconix.com>

TLCW5100

Ultrabright white LED

Vishay Semiconductors

<http://www.osram-os.com>

LATB G66B

6lead-RGB-MultiLED

Osram