

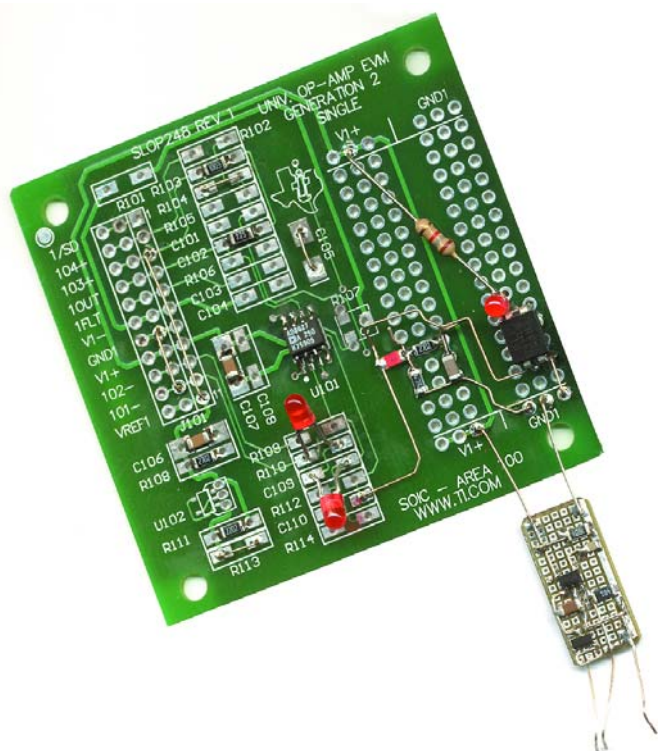
Lichtsensoren

Met LED's daglicht meten

Klaus-Jürgen Thiesler

kjt@gmx.de

Een lichtgevoelige opnemer met dezelfde eigenschappen als het menselijke oog wordt meestal gerealiseerd met fotoweerstanden of met speciale en daardoor dure fotosensoren. Slechts weinigen weten dat normale LED's als optische opnemer geschakeld in bepaalde opzichten op ons eigen oog lijken.



Fotodetectoren voor het zichtbare licht zijn meestal gebaseerd op de genoegzaam bekende lichtgevoelige weerstanden (LDR). Het gevoeligheidsspectrum lijkt op dat van het menselijke oog. De voor- en nadelen in het SMD-tijdperk zijn de grote afmetingen, grote toleranties, grote afhankelijkheid van temperatuur, grote detector-stroom en dan

deze zit in een ronde metalen TO5-behuizing met een actief oppervlak van 7,5 mm². Omdat ze als referentie-element wordt toegepast, is ze weliswaar duur, maar ze bezit ook een uitstekende lineariteit en is beduidend sneller ($t_{on/off} = 6 \mu s$) dan een LDR ($t_{off} \approx 3 s$). Deze fotodiode

ook nog eens duur en zeer traag. LDR's reageren net zo traag op verandering van helderheid als onze ogen, met een weerstandsverandering in de grootte-orde van seconden.

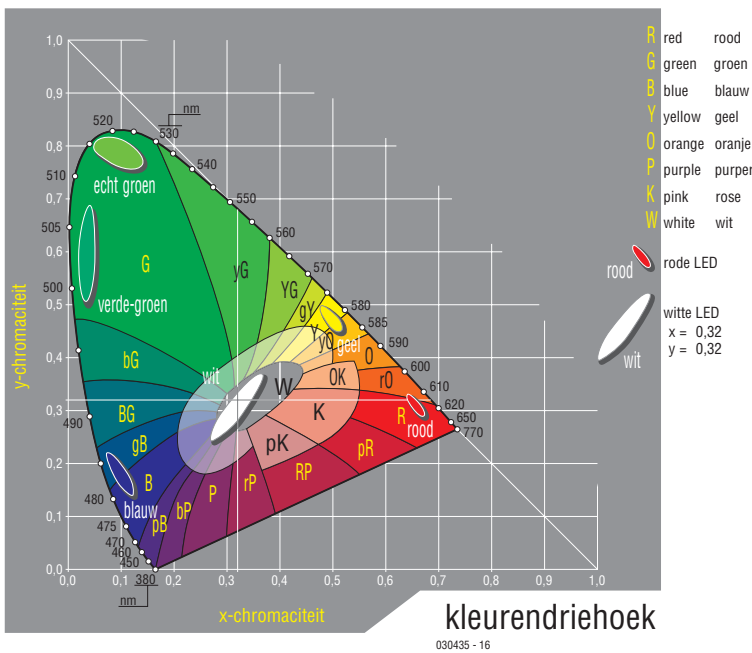
Snelle fotodiodes die in dezelfde mate lichtgevoelig zijn als het menselijke oog zijn zeldzaam. De meeste zijn gevoelig in het infrarode bereik tot 1100 nm. De speciale silicium fotodiode BPW21 werkt in het zichtbare bereik van 425...675 nm,

wordt vaak voor zonlicht-referentiemetingen gebruikt in fotovoltaïsche opstellingen. De fototransistor BPW21 is 'obsoleet', hij wordt dus niet meer geproduceerd en ondersteund. Toch is hij nog goed verkrijgbaar. Een vervanger is de BPW21R van Vishay Semiconductors. Wat de prijs betreft ligt hij samen met de precisie-opamp AD820 van Analog Devices op hetzelfde hoge niveau.

Andere lichtsensoren zijn moderne intelligente optosensoren met laboratorium-eigenschappen, zoals de TCS230 van TAOS, de HSDL9000 van Agilent Technologies of de TSL230 van Texas Instruments. Verder zijn er nog bouwelementen die functioneren als licht-naar-frequentie-omzetter. De HSMF-C118 van Agilent Technologies is een tricolor-RGB-LED in SMD-behuizing. Tabel 1 geeft een overzicht van daglicht-sensoren.

Verschillende chipfabrikanten hebben in het verleden geprobeerd enige nadelen op te heffen en sensoren als omvormer met geschikte parameters voor het zichtbare spectrum in te stellen. En dat met een sneller reactievermogen dan de passieve LDR.

Voor laboratoriumtoepassingen is er de zeer nauwkeurige en dus dure truecolor drievoudige RGB kleuren-



Figuur 1. Het kleurenspectrum volgens de CIE-norm en de sterk begrensde LED-spectra.

sensor MCS3xx met een genormeerde spectrale gevoeligheid en kleurenfiltering. Er volgen nog meer IC's met sensor-arrays, zoals in CCS-elementen.

De monolithische OPT301 van Burr-Brown geeft bij geel een relatieve gevoeligheid van 80% en heeft zijn maximum in het nabije infraroodbereik. Deze is alleen verkrijgbaar in een metalen, hermetisch gesloten TO99-behuizing. De benodigde symmetrische voedingsspanning is tegenwoordig vaak al een nadeel. Voor de toepassing als daglichtsensor is een infrarood filter nodig.

Daglicht

Daglicht bestaat voor een groot deel uit langgolvlige infrarood straling. Wij ervaren zonlicht als warm, bij zonsondergang. Maanlicht 's nachts daarentegen bestaat voor een groot deel uit kortgolvlige ultraviolet straling. Daarom ervaren wij het nachtelijke licht als koud. Ons gezichtsvermogen is zo aangepast dat afhankelijk van de lichtsterkte het spectrum wordt verschoven, waarbij de kleurgevoeligheid afneemt als er minder licht is. Het licht van een gloeilamp bevat relatief veel infrarood, de hoeveel-

heid ultraviolet is te verwaarlozen. Langgolvlig licht (IR/warmtestraling) kan het oog niet waarnemen, onze huid is daar beter voor uitgerust. Omdat echter bijna alle silicium detectoren hier nou juist hun grootste gevoeligheid hebben, zijn ze ongeschikt voor de detectie van daglicht en kunstlicht.

Een standaard LED van een willekeurige kleur straalt zichtbaar licht uit – daar is hij uiteindelijk ook voor ontwikkeld. Het rendement is erg laag. Het grootste deel van het vermogen wordt omgezet in warmte,

hoewel deze warmteontwikkeling gezien het lage vermogen nauwelijks merkbaar is.

Vergeleken met alle andere kunstlichtbronnen stralen LED's bijna monochromatisch licht uit met een grote kleurverzadiging. In het CIE-diagram in **figuur 1** liggen de LED-kleurgebieden allemaal dicht bij de buitenrand van de hoefijzervormige lijn met maximale kleurverzadiging. In het witpunt daarentegen is de kleurverzadiging praktisch nihil.

Het CIE-model

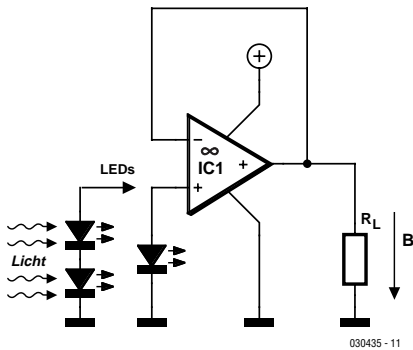
Het CIE-model (van de Commission Internationale de l'Eclairage) is niet perfect, want kleuren zoals bruin en goud kunnen er niet mee verklaard worden. Het is daardoor niet geschikt om ons subjectieve kleur gevoel te definiëren en te concretiseren. Kleuren buiten RGB/CMYK/LAB en andere modellen ontstaan pas in onze hersenen. Alle kleurgevoelige kegeltjes en staafjes op ons netvlies overlappen elkaar behoorlijk in het zichtbare spectrum en leveren dus allemaal hun bijdrage aan het beeld dat we zien. De informatie wordt via een chemische puls door een zenuwstreng naar de hersenen gevoerd. Onderweg worden die pulsen door overspraak tussen de individuele zenuwcellen al voorgemengd en dan in ons brein samengevoegd tot een beeld. De receptoren sturen alleen maar pulsen, dus zonder enige kleurinformatie. De kleuren ontstaan door de combinatie en de relatie tussen de pulsen pas in de hersenen.

Met een flatpanel-display waarvan de RGB-LED's allemaal apart worden bestuurd, kan een zogenaamd full-color beeld worden getoond. Maar ook hier ontbreken de 'decoratieve kleuren'. De kleurverzadiging van een LED-display daarentegen kan noch door een kunstdruk, een reflecterend LED-display, een

Tabel 1. Geïntegreerde daglichtsensoren.

Type	Topologie	Gevoeligheid		Fabrikant	Behuizing
		Bereik in nm	Maximum in nm		
BPW 21	PN-fotodiode	420...675	565	Vishay	TO 5 - 2 Pin
OPT 101	fotodiode met OTA	280...1.200	850	Burr-Brown	SO 8 + DIP 8 + SIP 5
OPT 301	fotodiode met OTA	200...1.150	750	Burr-Brown	TO 99 - 8 Pin
TSL 25x	fotodiode met OTA	300...1.100	780	Texas Instruments	plastic - 3 Pin
MCS3xx	3x RGB-PN-fotodiodes*	400...510 490...610 590...750	-	Jencolour	TO 5 + SO 8

* truecolor-drievelde-RGB-kleurensensor-IC's met diëlektrisch interferentiefilter en genormaliseerde spectrum-gevoeligheid met/zonder IR-filter.



Figuur 2. De ingangen van de CMOS-opamp zijn zo hoogohmig dat de fotospanning van de sensor-LED nauwelijks wordt belast.

beeldbuis of zelfs gekleurde gloeilampen geëvenaard worden. De filmprojector in de bioscoop gebruikt een lichtboog als lichtbron! Dit toont maar weer aan hoe goed en slecht LED's zich als kleursensor lenen, vergeleken met het menselijke oog. Vandaar dat het niet verwonderlijk is dat nu pas krachtige kleursensoren op basis van LED's ontwikkeld worden. Toch zit de ontwikkeling van LED's vooralsnog in de kinderschoenen en weten we niet wat voor ontwikkelingen op dit gebied nog gaan komen.

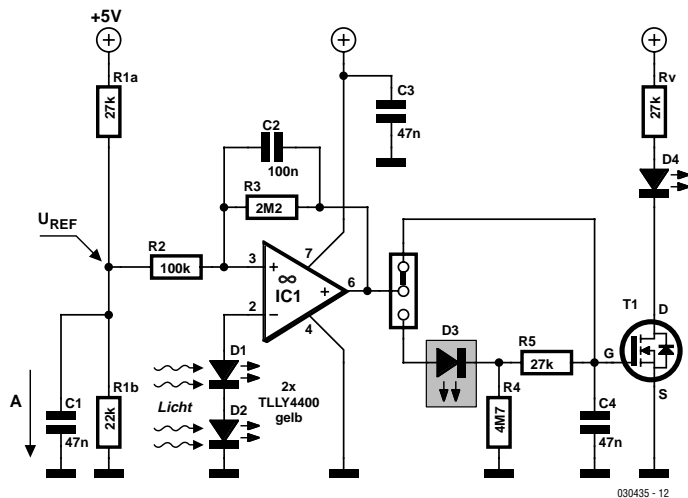
Omgekeerd

Laten wij het spel eens omdraaien! In plaats van een LED licht te laten geven zetten we de LED voor een lichtbron en sluiten een gevoelige voltmeter rechtstreeks aan op de gele of groene LED. Op die manier kunnen we een spanning aflezen die afhankelijk is van het licht dat op de LED valt. Met de gemeten waarde kunnen we niet veel, omdat de lichtgevoelige oppervlakte en het zeer lage rendement geen belasting groter dan een paar femto ampères toelaten. Ook de inwendige weerstand van een DVM is duide-

lijk lager dan de bronweerstand van een LED in sensor-mode. In de schakeling van **figuur 2** is de LED als sensor aangesloten op de niet-inverterende ingang van een opamp. Deze opamp is geschakeld als impedantie-aanpasser en vormt praktisch geen belasting voor de LED-sensorspanning, dankzij een JFET- of CMOS-ingang met een ingangsweerstand in de grootteorde van meerdere tera-ohms ($10^{12} \Omega$). Met deze meetschakeling zijn de spanningen van de LED-sensoren in **tabel 2** verkregen.

Het begrip impedantie-aanpasser is eigenlijk niet op zijn plaats, het gaat hier om een transimpedantieversteker, een vierpool die een stroomversterking, een spanningsversterking en een impedantie-omzetting kent. In het geval van figuur 2 is de transimpedantieversteker gewoon als impedantie-omzetter geschakeld. Maar

laten we daar niet verder op ingaan. In **figuur 3** is een elektronische schakeling te zien die de aangesloten belasting R_L inschakelt als de avond invalt en tijdens de ochtendschemering weer uitschakelt. Het netwerk bestaande uit $R1...R3$ zorgt voor een referentiespanning $U_{REF} = 2,25 \text{ V}$ aan de niet-inverterende ingang, met een hysteresis van ongeveer 250 mV. Deze drempelwaarde is niet kritisch en is geschikt voor twee in serie geschakelde gele low-current LED's. Met twee LED-sensoren die elk in een andere richting kijken, wordt dit schakelpunt tijdens de schemering relatief snel doorlopen. Voor deze nauwkeurige schakeling kunnen gewone 10%-weerstanden gebruikt worden. De dubbele LED's zorgen er voor dat de schakeling ongevoelig is voor kunstlicht van straatlantaarns of autolampen, dat maar op één LED terecht komt. Ook



Figuur 3. De daglichtschakelaar functioneert met bijna alle JFET/CMOS-opamps.

Tabel 2. Equivalente LED-spanning bij gemiddeld avond/ochtend-schemerlicht en in maanloze nacht (uitgang in figuur 1).

LED	Type	U_{BIAS} [V] bij één LED		U_{BIAS} [V] bij twee LED's	
		schemering	donker	schemering	donker
Geel	TLLY4400 (3 mm low-current)	1,1	0,8	2,2	1,0
Rood	TLLR4400 (3 mm low-current)	1,0	- 1	2,0	- 1
Groen	TLLG4400 (3 mm low-current)	1,2	0,8	2,4	1,4
Blauw ³	LF-59EBGBC (5 mm RGB)	1,5	- 2	2,4	- 2

1: de rode LED detecteert de nabije warmtestraling, daarom is een nachlichtmeting niet mogelijk!
 2: niet gemeten.
 3: blauw maar eenmaal aangesloten

Tabel 3. Een aantal geschikte opamps met JFET-ingang.

Type	GBP in MHz	Offset in μV	ingangs-bias in pA	U_{CC} in V	I_{CC} in mA	U_{IN} max. in V	Fabrikant	Behuizing	Getest	Opmerking
AD8033	80	1.000	1,5	+5...24	3,3	$0...+U_{CC-3}$	Analog Devices	SO 8 + SOT 23	ja	Shutdown
AD8065	145	400	2	+5...24	6,4	$0...+U_{CC-3}$	Analog Devices	SOT 23	ja	
AD820	1,8	100	2	+3...36	0,65	$-0,2...+U_{CC-1}$	Analog Devices	SO 8 + DIP 8	ja	
AD8610	25	85	2	+5...26	3,5	$0...+U_{CC-3}$	Analog Devices	SO 8 + MSOP8	ja	
AD8627	5	500	0,5	+5...26	0,75	$0...+U_{CC-1}$	Analog Devices	SO 8 + SC70	ja	
OPA132	8	250	5	+5...36	4	Rail-to-Rail (in- en uitgang)	Burr-Brown	SO 8 + DIP 8	ja	THD = 0,000.08%
TLE2071	10	500	6	+4,5...36	1,7	$0...+U_{CC}$	Texas Instruments	SO 8 + DIP 8	ja	Offset adj.
TLE2081	10	1.100	6	+4,5...36	1,7	$0...+U_{CC}$	Texas Instruments	SO 8 + DIP 8	ja	Offset adj.
TL081C	3	3.000	5	+4,5...16	1,4	$0...+U_{CC}$	Texas Instruments	SO 8 + DIP 8	ja	Offset adj.
TLC271C	0,09	1.100	0,1	+3...16	1	$-0,2...+U_{CC-1}$	Texas Instruments	SO 8 + DIP 8	ja	Offset adj.
OPA655	240	1.000	-5	$\pm 4,75...5,25$	25	$\pm 2,75$	Burr-Brown	SO 8 + DIP 8	nee	
INA121	-	200	4	$\pm 2,25...18$	0,45	$-U_{CC}+2...+U_{CC-1}$	Burr-Brown	SO 8 + DIP 8	nee	Precision-InAmp

het uitgangsfiler met LED D3, R4, R5 en C4 draagt daar toe bij. LED D33 wordt in een stukje krimpkoord lichtdicht opgesloten en heeft daarmee betere spereigenschappen dan een normale diode.

Een opamp kiezen

Theoretisch zou een TLC271 met een gewone P-kanaal-MOSFET aan de ingang moeten voldoen, want de ingangsbias-stroom is net zo klein als bij een AD820. In de praktijk echter heeft hij de neiging om rond het schakelpunt te gaan oscilleren. Dit gedrag is ook bij de opamps TLC271, OPA132, AD8035, AD8510 en TLE2081 te zien. Bij de AD8065, AD820 en AD8610 wordt met het netwerk R2/R3/C2 een hysteresis verkregen die nodig is om ook bij een langzaam invallende schemering zonder oscillaties om te schakelen. Bij de laatst genoemde typen

opamps kan het uitgangsfiler worden weggelaten.

De TL081 gebruikt het integratorketnetwerk niet voor de drempelwaarde, maar alleen als terugkoppeling voor de versterkingsfactor. In de schakeling van **figuur 2** moet dan een Schmitt-trigger tussen de uitgang van IC1 en LED D3 geplaatst worden, die rond de drempelwaarde schakelt. In elk geval oscilleert de TL081 niet zo erg.

De zeer nauwkeurige OPA655 is veel te goed (en overeenkomstig duur) voor een taak als daglicht-sensor. Er is echter wel een snelle detector voor een lichtboog mee te maken. hiervoor is echter een symmetrische voeding nodig van ± 5 V.

Tabel 3 geeft een overzicht van geschikte opamps, die met succes in deze schakeling getest zijn. Andere opamp-types met bipolaire ingangstransistoren of met complementaire MOSFET's zijn niet

geschikt, omdat de ingangsweerstand te laag is of de ingangsstroom (offset) veel te groot. Met een andere dimensionering van R1a/b kan het schakelpunt aangepast worden voor andere lichtsterktes of andere LED's. Dan is het zinvol om het uitgangsfiler (LED D3, R4, R5) te overbruggen. Dit uitgangsfiler zorgt voor een vertraging van ongeveer 3 s. Dat lijkt kort in relatie tot de tijd die het duurt voor de schemering op onze breedtegraad overgaat in de nacht, maar het blijkt in de praktijk goed te voldoen. Houd er rekening mee dat onze ogen bij het zien van kleuren wat betreft de lichtsterkte een dynamisch bereik hebben van ongeveer 100 dB (van ongeveer 0,1...20.000 lux)!

Gedurende de schemering neemt de biasspanning van de LED sterk toe respectievelijk af. Het omklappunt wordt dus redelijk snel gepasseerd. Bij een heel langzaam verlopende schemering moeten moderne opamps zoals de AD8610 gebruikt worden. Die schakelen praktisch stabiel en hebben een kleine lighthysteresis. Dan kan eventueel

het uitgangsfiltreer voor de schakelvertraging worden weggelaten.

De menselijke aspecten van het spectrum

Figuur 4 geeft de verschillende lichtgevoeligheidscurves van het menselijk oog overdag en 's nachts, in relatie tot verschillende elektronische bouw-elementen.

Onze ogen verschuiven de interpretatie van kleur bij verschillende lichtsterktes. Daardoor kunnen we het blauwachtige maanlicht met zijn spectrum in de buurt van ultraviolet zien, maar ook het gelige zonlicht met een spectrum meer naar infrarood.

Net zoals het netvlies zich kan aanpassen aan verschillende lichtsterktes, zo treedt ook bij een langere kijktijd een gewenning op aan kleur. Een wit vel papier ervaren we zelfs onder het licht van een gloeilamp als wit, omdat we er als het ware bij denken 'het papier is wit' ondanks het feit dat het papier geelachtig-rood licht reflecteert.

Het menselijk oog kan zich over een geweldig dynamisch helderheidsbereik instellen tussen nachtzicht en dagzicht. Het bereik loopt van 0,000.01...1.000.000 cd/m² (dit komt overeen met een dynamisch bereik van 220 dB!). Er is geen kunstmatig element dat hieraan kan tippen. Met de toename van de lichtsterkte verbetert het kleurencien en het zien van contrast, maar bij nog verder toenemende lichtsterkte neemt dat weer af. In een groot deel van het bereik van de lichtsterkte is het menselijk oog echter voornamelijk gevoelig in het zwartwit gebied. In kleur heeft ons oog 'slechts' een bereik van 100 dB. De gevoeligheid voor kleuren verschilt van persoon tot persoon. Er bestaat geen universele eenduidige kleur groen, noch grijs of volkomen wit. Elke monitor-instelling hangt helemaal af van de individuele gebruiker. Verschillen zijn wel goed te normeren. Het grijs van de lucht van een bewolkte middag, het wit van een gloeilamp of de sahara-gele kleur van een autocarosserie is technisch meetbaar, instelbaar en kan dus herhaald worden. Het netvlies (de retina) zit in de achterste helft van de oogbol en bestaat uit een netwerk van kegel- en staafvormige zintuigen (receptoren) die het invallende licht omzetten naar een elektrochemische substantie (neuronale energie). De onderlinge verhouding en hoeveelheid is verschillend verdeeld over het hele oppervlak van de achterkant van de oogbol. Verschillend in relatie tot het oppervlak van het netvlies en ook verschillend bij individuele mensen.

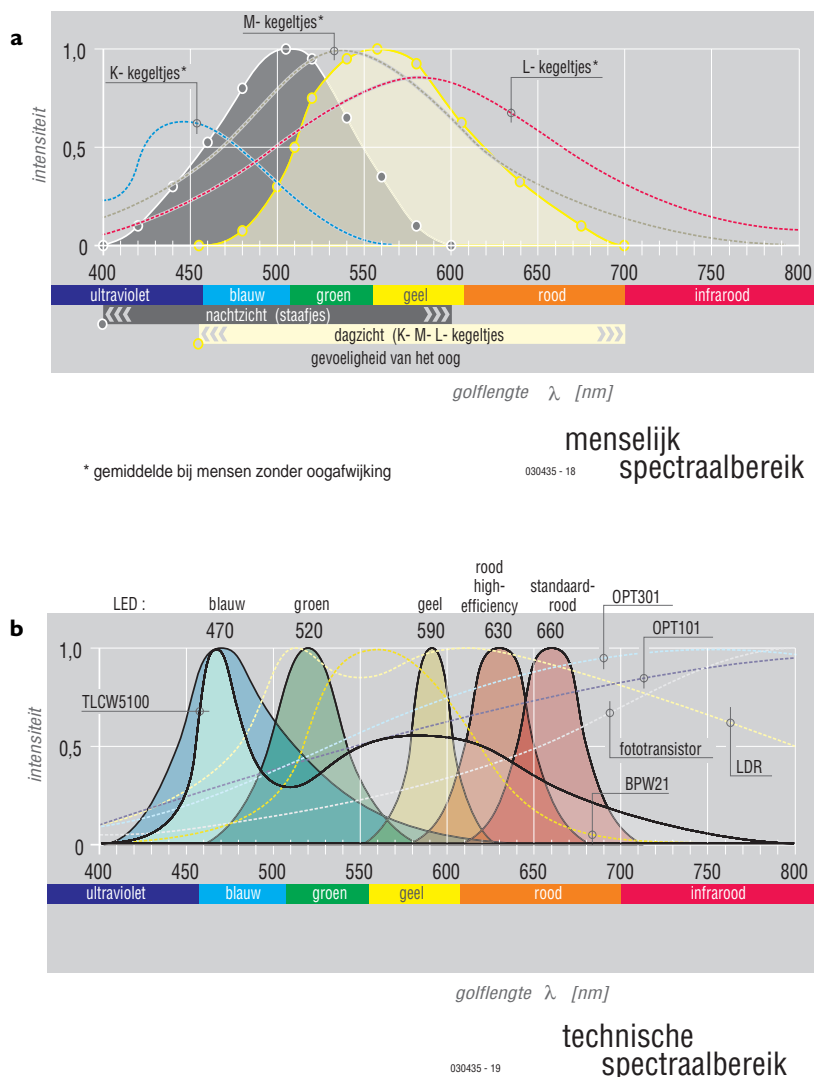
Voor het zien in de nacht zijn ongeveer 120 miljoen staafjes actief, voor het zien overdag ongeveer zes miljoen kegeltjes. Net zoals

LED's verschillen in bandbreedte en stralingsintensiteit, reageren gevoelige cellen verschillend op helderheid, contrast en kleur met steeds grotere bandbreedte. De drie types daglichtgevoelige kegeltjes reageren sterk overlappend op kort-, midden- en langgolvig licht (K/M/L-kegeltjes) in tegenstelling tot de bijna monochromatische kleurentstraling van LED's.

Omdat de cellen die gevoelig zijn voor korgolvig licht minder sterk op prikkels reageren, zien de kleuren in het blauwe deel van het spectrum er donkerder uit dan in het groen-rode deel. Door de grote overlap van de spectrale gevoeligheid van de K-M-L-kegeltjes is een mens met een normaal gezichtsvermogen vooral gevoelig voor kleurig daglicht (fotopisch zien) rond 555 nm (groen). De

lichtgevoelige sensor BPW21 en bijvoorbeeld lichtsignaleringsystemen bij de spoorwegen en de scheepvaart zijn hierop afgestemd. Daarentegen houden moderne verkeerslichtinstallaties langs de wegen sinds kort juist rekening met mensen waarbij het kleurencien niet normaal is en hebben groene waarschuwingslichten om die reden een hoog gehalte aan blauw licht.

Onze ooglenzen absorberen ultraviolet licht. Bij zogenaamde grauwe staar kan de natuurlijke hoornachtige lens operatief vervangen worden door een kunstmatige kunststof lens. Hierdoor ziet men dan UV-licht tot onder de 300 nm dankzij de K-kegeltjes. Insecten zijn bijzonder gevoelig voor UV-licht. Mensen met een normaal gezichtsvermogen hebben bij nachtzicht



Figuur 4. Vergelijking van het menselijke (a) met het technische (b) spectraalbereik.

(scotopisch zien) een maximum in de spectrale gevoeligheid bij 507 nm. Bij de gegevensoverdracht van de lichtgevoelige cellen naar de hersenen is er overspraak tussen naburige cellen, en wel op het netvlies, de gezichts-zenuwen en de hersencellen. Een virtueel beeld ontstaat pas bij het verwerken van deze zenuwpulsen in relatie met eerder opgeslagen informatie. Het oog zelf fungeert hierbij alleen maar als meetwaarde-opnemer, de lichtgevoelige cellen zelf hebben geen weet van kleur of vorm. Die zetten alleen maar licht-energie om in een chemisch-elektrische prikkel en daarin zit geen kleur of beeldinformatie.

Dat is te vergelijken met een grafische processor met zijn drie RGB-draden naar de monitor: Er worden alleen maar spanningen overgedragen, maar geen kleur of beeldinformatie. Het oog bewerkt het fotorealistische beeld dat door de lens en de pupil op de afzonderlijke receptoren valt in zekere zin digitaal voor. Door de overspraak op naburige receptoren, gezichts-zenuwen en hersencellen zien wij weer een pixelvrij fotorealistisch beeld zonder hinderlijke rasters, moiree-effecten en kleurenranden, zoals je die wel bij een monitor kan zien of in de druktechniek. Daar zit nu eenmaal geen intelligentie ingebouwd. Aldus krijg je dus pas een kleurenprikkel in de hersenen na de verwerking van de informatie van alle receptoren en gezichts-zenuwen.

Van Isaac Newton stamt de uitspraak: "De kleur zit niet in het licht, niet in het oog, maar in ons brein."

Deze ingewikkelde chemisch-elektrische omzettingen en overdrachten maken een normalisatie onmogelijk, temeer nog omdat de hoeveelheid lichaamseigen stoffen de kleurervaring kan veranderen, bijvoorbeeld bij vitaminegebrek. Dan is er nog de zogenaamde black-out die kan ontstaan bij de afbraak van lichaamseigen producten, waarbij de hersenen steeds meer wit zien, de kleuren steeds meer verbleken en de grijstinten helderder worden.

Het zuivere kleurenaspect in onze hersenen is oninteressant. Dat wordt duidelijk als we (tevergeefs) proberen om de afstand tot een lichtbron te bepalen. We weten hoe-

ver een ster aan de nachtelijke hemel ongeveer van ons af kan staan, we schatten op zijn hoogst de afstand tot een lamp aan de hand van de omgeving. Daarvoor heeft ons brein – in relatie tot de opgeslagen ervaringen – de structuur en de oppervlaktekenmerken nodig in combinatie met de kleurenstraling om dan pas met al deze kleurinformatie een beeld op te wekken. Daarnaast houdt ons brein dan ook nog rekening met andere invloeden die via het voelen, smaken, ruiken en horen tot ons komen. En natuurlijk ook de informatie van het tweede oog!

Ongeveer 8...10% van alle Europese mannen en 0,5...1% van de vrouwen hebben een erfelijk bepaalde lagere gevoeligheid voor rood en/of groen. Normaal is een verhouding van gevoeligheden van de drie dagzicht K/M/L-kegeltjes van 10% blauw, 48% groen en 42% rood. Bij kleurenblindheid zijn de drie typen kegeltjes anders verdeeld (bijvoorbeeld bij kleurenblindheid voor groen met 30% blauw, 30% groen en 40% rood), waarbij behoorlijke verschillen kunnen optreden. De een kan nog goed het verschil zien tussen groen en rood, een ander ziet geen enkel verschil en weer anderen hebben alleen in het centrale gezichtsveld zo'n probleem. De verdeling van de kegeltjes varieert bij ieder mens ook over het gehele oppervlak van het netvlies: De herkenning van rood-groen neemt permanent af als je verder weg gaat van het centrale punt waarop we scherp zien (de buitenste rand van de halve bol van de achterkant van het oog).

Totale kleurenblindheid komt maar zeer zelden voor, bij 0,003% van de bevolking. Ook een kleurenprobleem in het gebied van geel-blauw komt slechts zelden voor (0,004%). Deze erfelijke afwijking verandert overigens niet tijdens de levensloop. Ook is het niet mogelijk dat kleurenblindheid later ontstaat; je hebt het geërfd of niet.

De norm voor rood-groen geldt voor midden-Europa. De achtergrond daarvan ligt in de oertijd van de verzamelaars en de jagers, toen het nog belangrijk was voor het overleven om rode bessen tussen de groene bladeren te vinden of een bloedspoor in het bos te volgen.

Deze norm van ons is, als je het nauwkeurig bekijkt, een overgevoeligheid voor rood-groen-contrasten, die in andere omgevingen zoals het woestijn- of het poolgebied helemaal niet nodig is.

Dit vermeende gebrek van het gezichtsvermogen is dus eigenlijk een verbetering van het zien in een bepaald landschap.

Voor beroepen zoals webontwerper of industrieel ontwerper, die zich bezighouden met de optische aspecten van een apparaat, is het doorgaans belangrijk met deze fenomenen rekening te houden omdat toch een groot deel van de bevolking kleurenblind (of eigenlijk kleurenslechtziend) is. Wat is wit? Wat is blauw? Wat is neutraal grijs? Deze aspecten hebben hun invloed op het simultaancontrast (schijnbare kleurvastheid van een vlak voor een achtergrond), kleurenstereoscopie (rood lijkt dichtbij, blauw verder weg), de onmogelijkheid van het lezen van rode tekst op een groene achtergrond, en andere kleurverschuivingen. En tenslotte is ons leven, onze stemming ook nog eens kleurgevoelig.

De techniek in onze elektronische media lijkt op de biologie van onze ogen. Alleen de omzetting in onze zenuwen en hersenen tot een foto lukt tot nu toe nog niet met technische middelen.

Conclusie

Het direct aansluiten van standaard-LED's als lichtsensor op opamps met J-FET-ingangen moet weloverwogen gebeuren. Daarbij blijkt dat de verschillende chip-technologieën aanleiding geven tot verschillend oscillatorgedrag bij het schakelen.

Bij oude IC's is de oscillatiefrequentie in het schakelpunt met C2 en R3 alleen maar integrerend in de hand te houden. De moderne opamps daarentegen gebruiken de RC-schakeling aan de niet inverterende ingang voor een beter schakelgedrag met toegevoegde hysteresis. Dat hangt af van het geïntegreerde compensatiesysteem dat van buitenaf echter niet zichtbaar is.

Alle opamps uit de lijst zijn echter geschikt voor de eenvoudige lichtsensor-schakeling volgens figuur 2, met het uitgangsfiler van drie seconden. De onderlinge verschillen zijn aanzienlijk kleiner dan die van de uitwendige passieve onderdelen.

Al met al hebben we nu een nauwkeuriger en goedkopere SMD-opbouw met minder onderdelen op een kleiner oppervlak verkregen dan met een discrete schakeling met een JFET BF245, een standaard opamp en een instel potentiometer.