Technische Universität Chemnitz, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
Professur Opto- und Festkörperelektronik, Prof. Dr. Ch. Radehaus
Praktikum zur Lehrveranstaltung Festkörperelektronik und -photonik

Festkörperelektronik und -photonik
Untersuchung spektralempfindlicher Sensoren

Versuchsziel: Das Versuchsziel besteht darin, die vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten von Farbsensoren aufzuzeigen und für Studenten praktisch anwendbar zu machen. Dabei soll speziell auf die Farbselektierung, die Ermittlung der Schwerpunktwellenlänge einer optischen Strahlung und die Möglichkeit der berührungslosen Temperaturmessung mittels Zweischichtfarbsensoren eingegangen werden.

1. Einleitung

Die spektrale Analyse von Licht im UV/VIS/NIR-Vereich ist für viele Anwendungen in der Forschung, in der Automatisierung und Qualitätssicherung der Produktion, im Umweltschutz und in der Medizin usw. im Zusammenhang mit komplexer Informationsverarbeitung von steigender Bedeutung.
So ist die Möglichkeit der automatischen Farberkennung oftmals eine Bedingung für optimale Produktionsbedingungen in Bereichen der Wirtschaft, wo Farben kontrolliert, synthestiert, appliziert werden. Hierzu sind in erster Linie die Druck-, Papier-, Automobil-, Textil- und Kunststoffindustrie zu nennen. Aufgaben können dabei die Sicherstellung der Homogenität einer Farbe, die Reproduzierbarkeit (Farbvergleich) oder die Messung einer Farbe sein, wobei meist eine farbmetrische Beurteilung erfolgt.
Automatische Montagesysteme erfordern z.B. eine komplexe Objektindentifikation mit leistungsfähigen Muster-, Lage- und Farberkennungstechnologien; Bildverarbeitungssysteme allgemein stützen sich auf Bilddaten, welche Farbinformationen enthalten können.
Eine zunehmende Bedeutung der Farberkennung und -kontrolle ist in der Pharmazie (Kontrolle der Verpackung von Medikamenten, Steuerung der Herstellungsprozesse), wo Farberkennung in komplexe Meßsysteme integriert ist, zu verzeichnen.
Die Lebensmittelindustrie bedient sich der Farbmessung zur Qualitätssicherung. So sind z.B. Weißgrad von Zucker und Mehl bzw. die Farbe von Likören Verkaufsargumente.
Die Umwelttechnik nutzt die Farbe als Indikator, so z.B. für die Kontrolle des Abwassers in Molkereien.
Das bei einem geschlossenen Stoffkreislauf notwendige Recycling von Elektronikschrott erfordert die Vorsortierung, die nur durch komplizierte Bildverarbeitung und Farberkennung automatisiert und so wirtschaftlich gestaltet werden kann.
Auch die Medizin birgt eine Reihe von Anwendungsfällen, in denen die objektive Farbmessung bei der Prophylaxe, Indikation und Heilung eine wertvolle Entscheidungshilfe für den behandelnden Arzt darstellt.
Die hier behandelten Zweifarbsensoren eignen sich zur intensitätsunabhängigen Messung der Wellenlänge einer monochromatischen Strahlung. Fällt polychromatisches Licht auf den Sensor, wird über alle Wellenlängen gewichtet integriert und damit die Schwerpunktwellenlänge bestimmt.

2 Theoretische Grundlagen zum Praktikumsversuch

2.1 Grundlegendes Modell des Farbempfindens

Farbe ist eine subjektive Größe, die über Reize der Netzhaut, welche von selbstleuchtenden oder beleuchteten Körpern ausgelöst werden, im Bewußtsein des Menschen entstehen . Allgemein kann man für den entsprechenden Farbeindruck schreiben:

Strahlungsquelle * bestrahlter Körper (Probe) * Empfänger (Auge,Farbsensor) = Farbeindruck

spektrale Strahlungsdichte $P(\lambda)$ * spektraler Remissionsfaktor $R(\lambda)$ * spektrale Empfindlichkeit $S(\lambda)$ = Farbeindruck

Normspektralwerte $x(\lambda),y(\lambda),z(\lambda)$ Normfarbwerte X,Y,Z

Die drei den Farbeindruck bestimmenden Komponenten sollen nun beschrieben werden.

2.1.1 Strahlungsquelle

Die von den Strahlungsquellen ausgesandte elektromagnetische Strahlung umfaßt einen Wellenlängenbereich von insgesamt 24 Zehnerpotenzen. Sie setzt sich aus der kosmischen Strahlung, der Gammastrahlung, der Röntgenstrahlung und der optischen Strahlung zusammen. Es schließen sich die Mikro,-Radar,-Rundfunk,-und Fernsehwellen als langwelligste Strahlungsarten an. Als optische Strahlung wird der Bereich von 10nm - 1mm bezeichnet. Dieser untergliedert sich in:

- ultravioletter Bereich (10nm ... 380nm)
- sichtbarer Bereich (380nm ... 780nm)
- naher Infrarotbereich (780nm ... 1,5um)
- mittlerer Infrarotbereich (1,5um ... 6um)
- ferner Infrarotbereich (6um ... 40um)
- ultraferner Infrarotbereich (40um ... 1mm)

In der Praxis vorkommende Strahlungsquellen wie Sonne, Glühlampe, Kerzenlicht u.a. senden meist polychromatisches Licht aus. Da sich die ausgesandte Strahlungsleistung über das gesamte Spektrum erstreckt, spricht man von einem kontinuierlichen Spektrum. Strahlungsquellen wie Natrium- oder Quecksilberdampflampen besitzen dagegen ein diskontinuierliches Spektrum. Es wird als Linienspektrum bezeichnet.
Das gemischte Spektrum einer Leuchtstofflampe entsteht durch Überlagerung des vom Leuchtstoff herrührenden kontinuierlichen Spektrums durch das Linienspektrum der Gasentladung.
Alle diese Quellen besitzen eine charakteristische spektrale Strahlungsdichte. Für die farbmetrische Berechnung wurden von der internationalen Beleuchtungskommission CIE Standards für die mittlere Energieverteilung einige häufig vorkommender Lichtquellen festgelegt. Die nachfolgende Graphik zeigt die Strahlungsenergieverteilung der Normlichtarten.

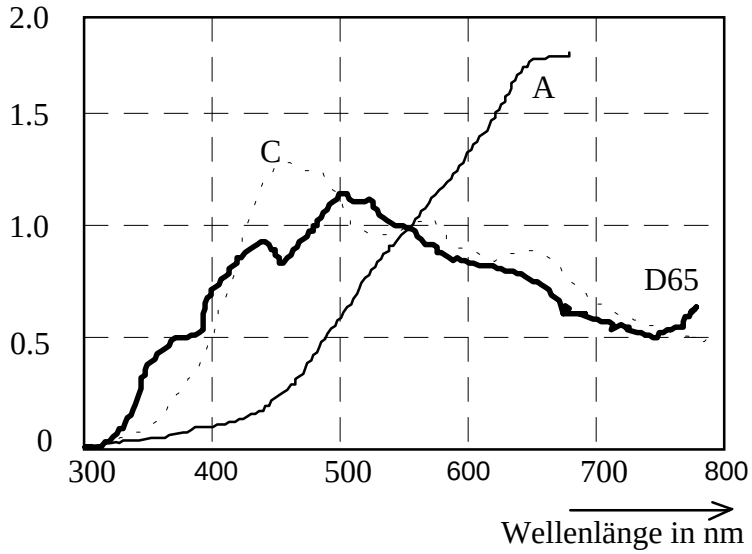

Bild 1. Strahlungsenergieverteilung der Normlichtarten
- Abendlicht (Glühlampenlicht) A
- Tageslicht bei bedecktem Himmel C
- mittleres Tageslicht D65

2.1.2 Probe (beleuchteter Körper)

Trifft eine optische Strahlung auf einen Körper, so wirken die Gesetze der Absorption, Transmission und Reflexion. Für die Farberkennung spielen die Reflexion und die Transmission eine entscheidende Rolle. Die einfallende Strahlung wird auf verschiedene Art und Weise reflektiert.

a) Ein Teil wird gerichtet von der Oberfläche des Körper entsprechend dem Reflexionsgesetz zurückgeworfen. Er wird also gleich dem Einfallswinkel reflektiert. Man bezeichnet ihn in der Farbmetrik als Glanzlicht. Das Verhältnis von einfallender zur regulär reflektierter Lichtstrahlung stellt sich als "Glanz eines Körpers" dar. Bei der Farberkennung mittels Farbsensoren ist dieser Anteil nicht von Interesse, da die spektrale Zusammensetzung durch die Beschaffenheit des Körpers kaum beeinflußt wird. Der Winkel von einfallender Strahlung und der Ausrichtung des Sensors sollte deshalb bezüglich der Senkrechten zur Probenoberfläche immer verschieden sein.

b) Der für die Farberkennung wichtige Teil der Strahlung tritt in die Oberfläche des Körpers ein und wird an den Oberflächenschichten mehrfach reflektiert, bis er dann irgendwann geschwächt in unbestimmter Richtung wieder austritt. Dieses Verhalten wird als Streuung oder diffuse Reflexion bezeichnet. An den Oberflächenschichten erfährt die eindringende Strahlung eine oberflächenabhängige Absorption, die für die verschiedenen Wellenlängenbereiche unterschiedlich stark zum tragen kommt.

Die spektrale Zusammensetzung des von der Oberfläche wieder abgegebenen Lichts ist somit das Resultat der Absorptionseigenschaften der Oberflächenschichten des Körpers.

Der im menschlichen Auge erzeugte Farbreiz ist somit einerseits durch die Strahlungsquelle und andererseits durch die Remissionseigenschaften der Probe bestimmt.

2.1. Strahlungsempfänger (Auge / Sensor)

Auf künstliche Strahlungsempfänger (Sensoren) soll in späteren Kapiteln eingegangen werden. Ihr natürliches Vorbild, das Auge, ist Bestandteil dieses Abschnitts.

Die im Inneren des Auges befindliche Netzhaut besteht aus einer Vielzahl lichtempfindlicher Sinneszellen. Diese werden in Stäbchen und Zapfen unterteilt. Die Stäbchen sind für das Hell-Dunkel-Sehen verantwortlich. Die spektrale Zusammensetzung (Farbe) der einfallenden Strahlung wird über die Zapfen ermittelt. Dazu gibt es drei Arten dieser Reizzentren mit unterschiedlicher spektraler Empfindlichkeit:

1. Zapfenart (violett, blau)
2. Zapfenart (grün, gelb)
3. Zapfenart (gelb, rot)

Es wird über das gesamte Strahlungsspektrum, entsprechend der Empfindlichkeit der drei Zapfenarten, integriert. Das Maximum der Stäbchenempfindlichkeit liegt bei etwa 555nm. Diese Erkenntnis wurde beispielsweise bei der Färbung des Schutzleiters in elektrotechnischen Anlagen genutzt. Er trägt die Farbe grün/gelb und liegt somit im Bereich der maximalen Empfindlichkeit.

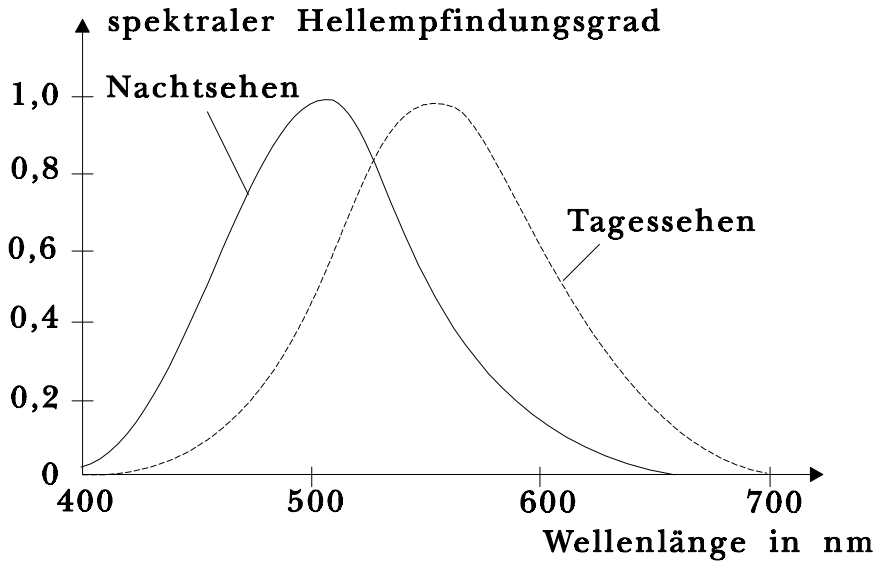

Bild 2. Spektrale Hellempfindlichkeit des menschlichen Auges

Es entsteht durch die unterschiedliche spektrale Empfindlichkeit (s.Bild 2 und 3) der 3 Zapfenarten und komplizierte biochemische Prozesse im Gehirn ein Farbempfinden in unserem Bewußtsein.
Ist der Anteil aller Wellenlängen gleich, so entsteht ein weißer bzw. grauer Farbeindruck. Dominiert dagegen eine Wellenlänge, so wird diese Strahlung als farbig empfunden.
Da diese subjektiven Eindrücke von Mensch zu Mensch verschieden sind, wurde ein "Normalbeobachter" für ein definiertes Farbsehen ermittelt. In der folgenden Graphik werden die Normspektralwerte $x(\lambda)$, $y(\lambda)$, $z(\lambda)$ als Empfindlichkeitskurven der drei Zapfenarten für einen " Normalbeobachter " dargestellt .

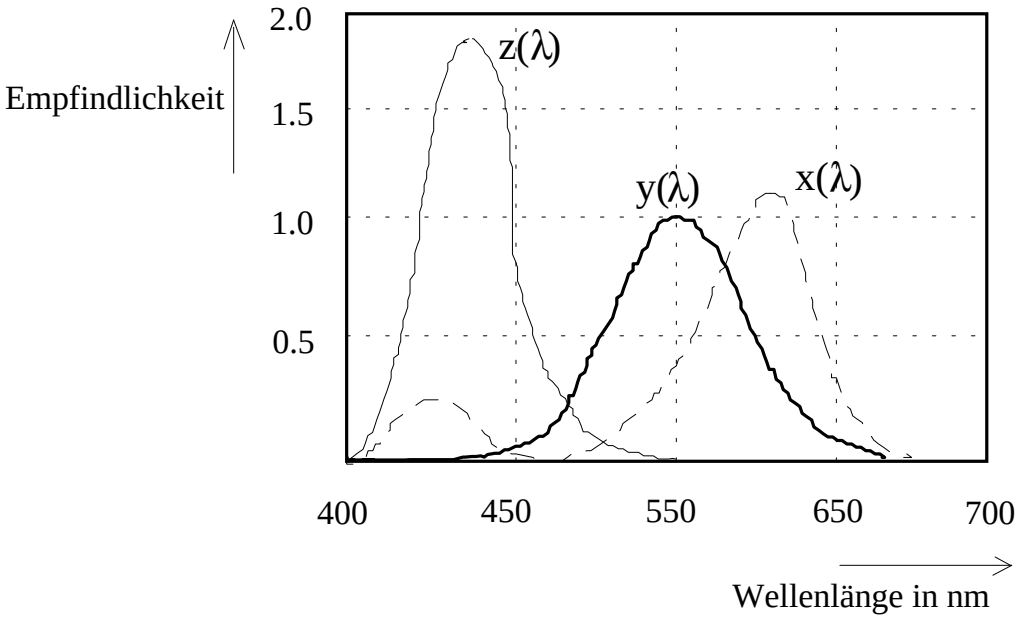

Bild 3. Spektrale Empfindlichkeit der drei Zapfenarten

2.2 Farbsensoren allgemein

2.2.1 Bauformen und Arbeitsweise von Farbsensoren

Anlagen zur Bestimmung der spektralen Zusammensetzung des Lichts wie Monochromator, Spektrometer und Interferometer werden schon seit längerem eingesetzt.
Eine preisgünstigere Variante sind spektralempfindliche Festkörperbauelemente. Sie ermitteln den spektralen Schwerpunkt einer polychromatischen Strahlung (Mischlicht), das heißt es wird die Wellenlänge ermittelt, für die der Sensor bei monochromatischer Strahlung das gleiche Signal bringen würde. Bei monochromatischem Licht kann mit diesen Sensoren die genaue Wellenlänge bestimmt werden. Die Farberkennung als Hilfsmittel für die Automatisierung in vielen Bereichen der Industrie wird mit neuartigen Farbsensoren möglich.
Generell bestehen Fotoelemente aus dotierten oder eigenleitenden Schichten auf der Grundlage kristalliner, amorpher oder polykristalliner Halbleitermaterialien.
Farbsensoren enthalten mindestens zwei dieser Fotoelemente, wie z.B. Fotowiderstände oder Fotodioden. Sie sind zueinander entweder vertikal oder horizontal angeordnet.
Eine Möglichkeit besteht darin, drei fotoempfindliche Schichten nebeneinander im Substrat anzuordnen und sie mit drei verschiedenartigen Filter abzudecken. Diese müssen eine Transmissionscharakteristik besitzen, die die im Bild 3 gezeigte spektrale Empfindlichkeit der drei Zapfenarten in den 3 Fotoelementen realisiert. Fällt nun Licht einer bestimmten spektralen Zusammensetzung auf diese Anordnung, so kann über die in den einzelnen Fotoelementen erzeugten Fotoströme auf die Farbanteile der auftreffenden Strahlung geschlossen werden.
Im Versuch werden Sensoren mit zwei fotoempfindlichen Schichten verwendet. Sie sind vertikal zueinander angeordnet. Dies hat den Vorteil, daß bei jeder Bestrahlung die gleiche effektive Fläche in beiden fotoempfindlichen Schichten wirkt.

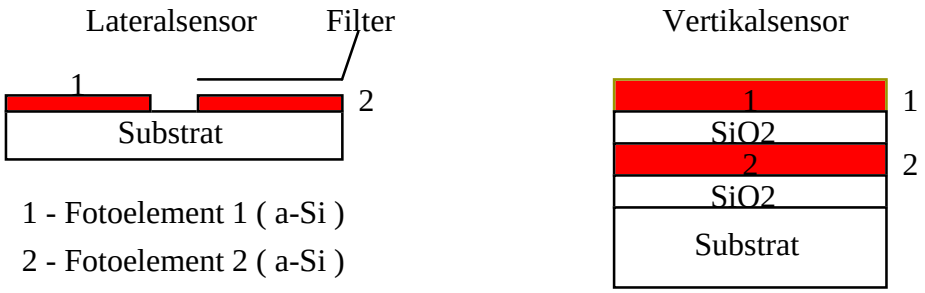

Bild 4. Bauformen von Zweischichtfarbsensoren

Die Funktionsweise eines Farbsensors beruht auf der unterschiedlichen spektralen Empfindlichkeit der beiden Fotoelemente. Bei der Horizontalstruktur wird diese durch eine unterschiedliche Tiefe der pn-Übergänge, durch verschiedene Halbleitermaterialien oder durch Abdecken eines Elementes mit einem Filter erreicht.

Die Vertikalstruktur besitzt diese Eigenschaft automatisch durch den stapelförmigen Aufbau. Bei dieser Anordnung wird auf Grund der Wellenabhängigkeit des Absorptionskoeffizienten α im oberen Fotoelement vorwiegend Licht kurzer Wellenlängen (blau - grün) absorbiert, während das untere Fotoelement den durchdringenden langwelligen Strahlungsanteil (orange-rot) aufnimmt.

Dies wird bei der meßtechnischen Bestimmung der Wellenlänge bzw. des spektralen Schwerpunkts ausgenutzt. Man wertet das Verhältnis der Lichtleistungen, die auf die Fotoelemente auftreffen, über die resultierenden Fotoströme aus. Wie die nachfolgende mathematische Beschreibung zeigt, ist dieses Verhältnis intensitätsunabhängig, aber über den Absorptionskoeffizienten durch die Wellenlänge des einfallenden Lichtes bestimmt. Bei gleichen Schichtdicken und Vernachlässigung der Reflexionsverluste ergeben sich

$$P_o = P \cdot (1-r)\cdot(1-\exp(-\alpha\cdot d)) \qquad (1)$$

$$P_u = P \cdot (1-r)\cdot(1-\exp(-\alpha\cdot d))\cdot\exp(-\alpha\cdot d) \qquad (2)$$

zu

$$Q(\lambda) = \frac{P_o}{P_u} = \exp(\alpha\cdot d)\ . \qquad (3)$$

P- einfallende Leistung
r- Reflexionskoeffizient

Je nach Anwendungsfall wird nach innerer und äußerer Quotientenbildung unterschieden.

2.2.2 Äußere Quotientenbildung

Diese Variante der Quotientenbildung zum Erhalt eines intensitätsunabhängigen Spektralsignals wird bei Farbsensoren auf der Basis von Fotodioden angewendet. Unabhängig von den zuvor genannten Ausführungsformen wird das Spektralsignal aus dem Verhältnis der beiden generierten Fotoströme gebildet. Dabei wird vorausgesetzt, daß die Dunkelströme im Vergleich zu den Fotoströmen vernachlässigbar klein sind.

$$Q = \frac{I_{Pho}}{I_{Phu}} \qquad (4)$$

mit

$$I_{Ph}(\lambda, E) = S_E(\lambda)\cdot A_E\cdot E(\lambda) \qquad (5)$$

spektrale Empfindlichkeit $S_E = \frac{\lambda}{h\cdot c}\cdot\eta(\lambda)\cdot e$

Quantenwirkungsgrad	η
Empfangsfläche	A
Strahlungsflußdichte	E

Legt man einen geeigneten Transmissionsfilter über ein Fotoelement der lateralen Anordnung, so entsteht ein Signal, welches in bestimmten Intensitätsgrenzen nur noch von der spektralen Zusammensetzung der auftreffenden Strahlung abhängig ist.

$$Q = \frac{A_E \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_0(\lambda) \cdot P_0(\lambda) \cdot d\lambda}{A_E \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_1(\lambda) \cdot P_1(\lambda) \cdot d\lambda} = \frac{P_0}{P_1} \qquad (6)$$

Gleiches gilt für vertikale Anordnungen ohne Filter. Dort ist das Quotientensignal ebenfalls über den Absorptionskoeffizienten α von der Wellenlänge der einfallenden Strahlung abhängig.
Auf das offene bzw. obere Fotoelement wirkt die gesamte Strahlungsleistung E_0. Das mit einem Filter abgedeckte bzw. untere Fotoelement wird dagegen nur von einem Teil der Strahlung erreicht. Dieser ist abhängig von den Filtereigenschaften bzw. vom oberen Fotoelement und wird wie folgt berechnet:

$$P_1 = (1 - r) \cdot P_0 \cdot \exp(-\alpha \cdot d) \qquad (7)$$

Somit ergibt sich ein über den Absorptionskoeffizienten α nur noch von der Wellenlänge abhängiges Quotientensignal.

$$Q = \frac{P_0}{\left[(1 - r) \cdot P_0 \cdot \exp(-\alpha \cdot d)\right]}$$

$$Q = \frac{1}{\left[(1 - r) \cdot \exp(-\alpha \cdot d)\right]} \qquad (8)$$

Der Quotient der beiden Fotoströme wird über eine äußere Beschaltung gebildet. Sie folgt aus der nachstehenden mathematischen Umformung.

$$Q = \frac{I_{Pho}}{I_{Phu}}$$

$$\ln Q = \ln(I_{Pho} - I_{Phu}) \qquad (9)$$

$$\ln Q = \ln I_{Pho} - \ln I_{Phu}$$

Diese Funktion läßt sich relativ leicht in einer elektronischen Schaltung realisieren. Zwei Operationsverstärker bilden über eine entsprechende Beschaltung den Logarithmus der Fotoströme. Die beiden resultierenden Signale werden einem Differenzverstärker zugeführt, und man erhält das gewünschte Ausgangssignal.
Wird eine Vorspannung angelegt, weitet sich die Raumladungszone. Die Folge ist eine erhöhte Empfindlichkeit der einzelnen Fotoelemente und eine bessere Ansprechzeit.
Betreibt man die Fotodioden als Stromquellen, also ohne Vorspannung, fällt der Dunkelstrom weg, und der Farbsensor arbeitet bis zu einer sehr geringen Lichtintensität intensitätsunabhängig. Dies ist ein Vorteil gegenüber der zuerst genannten Variante, da bei ihr die minimale Beleuchtungsstärke durch den fließenden Dunkelstrom begrenzt wird.

2.4 Temperaturmessung mittels Farbsensoren

Temperaturstrahler: Jeder Körper mit einer Temperatur T > 0K sendet eine elektromagnetische Strahlung aus. Ihre spektrale Zusammensetzung ist stark von der Temperatur der Strahlenquelle bestimmt. Je höher die Temperatur, um so Energiereicher, sprich kurzwelliger, ist die ausgesandte Strahlung. Sie erstreckt sich vom mittleren Infrarot (5µm) bis in den sichtbaren Bereich.

T < 300 K $\lambda \approx 1 \ldots 15$ µm
T > 1000 K $\lambda \approx 0{,}4 \ldots 0{,}7$ µm (sichtbarer Bereich)

Für alle Temperaturstrahler gilt nach dem Kirchhoffschem Gesetz, daß der spektrale Emissionsgrad ε gleich dem Absorptionsgrad α ist.

$$\varepsilon(\lambda, T) = \alpha(\lambda, T) \tag{10}$$

Diese Gesetzmäßigkeit zeigt sich an einem Körper, der sich im thermodynamischen Gleichgewicht befindet. Da seine innere Energie konstant ist, muß die absorbierte und emittierte Strahlungsenergie gleich groß sein.
Der spektrale Emissionsgrad ergibt sich aus dem Verhältnis :

$$\varepsilon(\lambda, T) = \frac{\textit{spezifische spektrale Ausstahlung } (T_1)}{\textit{emittiete Strahlung des schwarzen Strahlers}(T_1)} = \frac{M_\lambda(\lambda, T)}{M_{\lambda s}(\lambda, T)} \tag{11}$$

Somit kann man die spezifische Ausstrahlung eines Temperaturstrahlers aus dem Produkt des entsprechenden Absorptionskoeffizient und der spezifischen Ausstrahlung eines schwarzen Strahlers bestimmen.

$$M_\lambda(\lambda, T) = \alpha(\lambda, T) \cdot M_{\lambda s}(\lambda, T) \tag{12}$$

Als "Schwarzer Strahler", auch Planckscher Strahler, wird ein idealer Strahler bezeichnet, der eine in beliebigem Winkel einfallende Strahlung aller Wellenlängen vollständig absorbiert bzw. in jeder Richtung Strahlung aller Wellenlängen mit maximaler Energie aussendet. Praktisch wird dies jedoch nicht für den gesamten Temperaturbereich möglich sein, und man beschränkt sich auf begrenzte Abschnitte. Nach Planck berechnet sich die spektrale spezifische Ausstrahlung des schwarzen Körpers wie folgt:

$$M_{\lambda s}(\lambda, T) \cdot d\lambda = \frac{2\pi \cdot c^2 \cdot h}{\lambda^5} \cdot \frac{d\lambda}{\exp\frac{h \cdot c}{\lambda \cdot K \cdot T} - 1} \quad ; \quad c - \text{Lichtgeschwindigkeit}$$

$$M_{\lambda s}(\lambda, T) \cdot d\lambda = \frac{c_1}{\lambda^5} \cdot \frac{d\lambda}{\exp\frac{c_2}{\lambda \cdot T} - 1} \quad ; \quad c_1 = 2\pi \cdot c^2 \cdot h = 3{,}74832 \cdot 10^{-16}\,\text{Wm} \tag{13}$$

$$; \quad c_2 = \frac{c \cdot h}{K} = 1{,}438786 \cdot 10^{-2}\,\text{mK}$$

Unter der Voraussetzung $\lambda T << C_2$ bzw. $C_2/\lambda T >> 1$ $\lambda T < 3000$umK kann man das vereinfachte Wiensche Gesetz verwenden. Der resultierende Fehler ist dabei kleiner 1%.

$$M_{\lambda,s} \approx c_1 \cdot \frac{1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp\left(\frac{c_2}{\lambda \cdot T}\right)} \tag{14}$$

relativer Fehler : $$\frac{\Delta M_{\lambda,s}}{M_{\lambda,s}} = \frac{M_{\lambda,s,Wien} - M_{\lambda,s,Planck}}{M_{\lambda,s,Wien}} = -e^{-C_2/\lambda T} \tag{15}$$

Gilt $\lambda T >> C_2$ bzw. $C_2/\lambda T$, so kann das Plancksche Gesetz durch das Rayleigh-Jeans-Gesetz angenähert werden. Die angeführten Bedingungen erlauben die folgende Reihenentwicklung:

$$\exp(c_2/\lambda T) - 1 = 1 + \left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) + \frac{1}{2}\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right)^2 + \ldots - 1 \approx \frac{c_2}{\lambda T} \tag{16}$$

Setzt man diese Vereinfachung in das Plancksche Gesetz ein, so ergibt sich für den Bereich langer Wellenlängen:

$$M_{\lambda,s} = \frac{c_1 T}{c_2 \lambda^4} \tag{17}$$

Aus der folgenden Graphik geht hervor, daß die spektrale Zusammensetzung der ausgesandten Strahlung eines „Schwarzen Strahlers“ stark von der Temperatur abhängt.

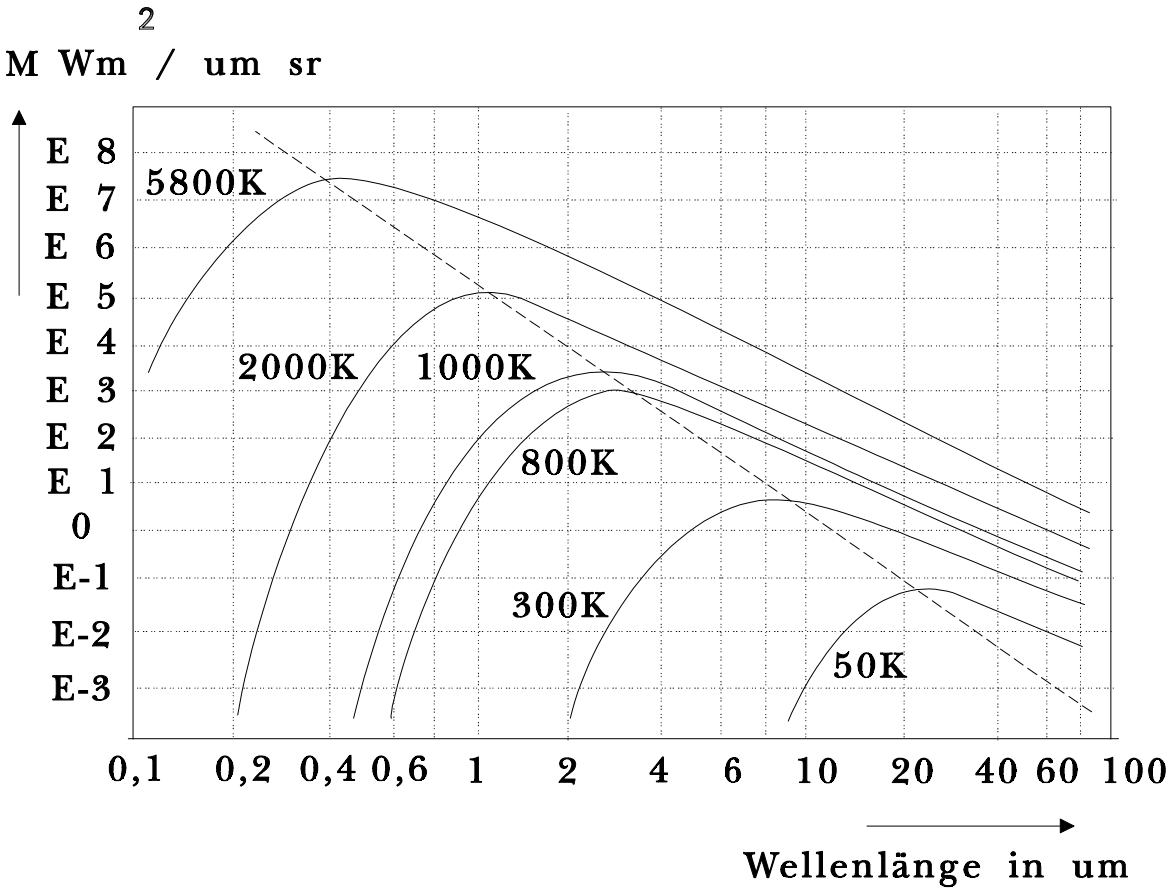

Bild 5. Schwerpunktverschiebung bei steigender Temperatur

Die maximale Wellenlänge und auch die Schwerpunktwellenlänge verschieben sich mit steigender Temperatur zu kleineren Wellenlängen hin.
In Bild 5 läßt sich jede Temperatur einer bestimmten Schwerpunktwellenlänge zuordnen. Sie ist entscheidend für die Farbe der ausgesandten Strahlung. Diese Tatsache macht es möglich Zweischichtfarbsensoren, die ja gerade diese Schwerpunktwellenlänge bestimmen, zur Temperaturmessung zu verwenden.
Durch Integration über alle Wellenlängen resultiert die gesamte spezifische Ausstrahlung, auch Stephan-Boltzmann-Gesetz genannt.

$$M_S(T) = \int_0^\infty M_{\lambda,S}(\lambda,T)\cdot d\lambda = \sigma \cdot T^4 \quad ; \quad \sigma = \frac{2\pi^5 \cdot K^4}{15 \cdot c^2 \cdot h^3} = 5{,}67 \cdot 10^{-12} \frac{W}{cm^2 \cdot K^4} \qquad \textbf{(18)}$$

Bezieht man den Betrag der Umgebungsstrahlung mit ein, so ergibt sich:

$$M_s(T) = \sigma\left[T^4 - T_o^4\right] \quad ; \quad T_o \text{ - Umgebungstemperatu} \qquad (19)$$

Das Produkt aus Temperatur und maximaler Wellenlänge ist konstant und wird als "Wiensches Verschiebungsgesetz" bezeichnet.

$$T \cdot \lambda_{max} = \frac{h \cdot c}{4{,}95K} = 2898 \ \mu m\ K \qquad (20)$$

Diese einfache lineare Beziehung zwischen Wellenlänge und Temperatur macht es möglich, beim "Schwarzen Strahler" jeder maximalen Wellenlänge eine ganz bestimmte Temperatur zuzuordnen. Im folgenden Bild wird dieser direkte Zusammenhang graphisch dargestellt.

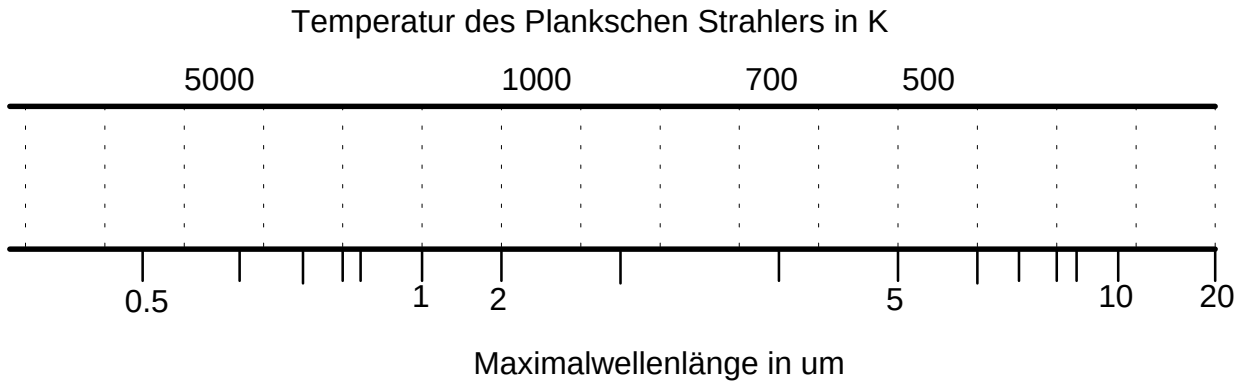

Bild 6. Abhängigkeit von Temperatur und Maximalwellenlänge

In der Praxis vorkommende Strahlungsquellen sind in der Regel nicht ideal und lassen sich nur bedingt als "Schwarze Strahler" auffassen. Der Absorptions- bzw. Emissionskoeffizient kann bei "Schwarzen Strahlern" mit 1 angegeben werden. Im realen Fall gilt jedoch $\alpha = \varepsilon < 1$. Ist die Spektralverteilung proportional zum idealen "Schwarzen Strahler" und somit $\varepsilon = \alpha =$ konstant < 1, so spricht man von einem "Grauen Strahler". Weicht sie jedoch von der des "Schwarzen Strahlers" ab, so ist $\alpha \neq$ konst., und man bezeichnet ihn als "Selektiven Strahler". In diese Gruppe sind alle Lumineszensstrahler einzuordnen.

3. Versuchsaufgaben

Farbbestimmung (F2)

- Farbpaletten (Bayferrox 130 und Heliogenblau 6880) in Kartei des Rechners (F2) einlesen
- Vergleichsmessungen von Bayferrox 920 und Sicoechtscharlach L4552 (F4) durchführen
- Bestimmen Sie von 5 selbst ausgewählten Farbtafeln verschiedener Farbpaletten das Pigmentverhältnis (F3)

Temperaturmessung (F3)

- Es sind das Spektral- und Intensitätssignal des Farbsensors in Abhängigkeit der Temperatur des Wolframfadens einer Glühlampe zu ermitteln (T-Bereich 1100 - 1900 Grad Celsius) (F2)
- Stellen Sie die in Tab. 1 aufgeführten Lampenströme ein und halten Sie sowohl die vom Pyrometer als auch vom Rechner angezeigte Temperatur in der Tabelle fest. Ermitteln Sie die Differenz (F3)
- Überprüfen Sie die Intensitätsabhängigkeit für zwei verschiedene Temperaturen (1450 u. 1750 Grad Celsius). Variieren Sie dazu den Abstand Sensor - Strahlungsquelle von 150 mm bis 500 mm in 50 mm Schritten. Tragen Sie die jeweils angezeigten Temperaturwerte in einem Diagramm auf. (F3)

Ausmessen des Farbsensors am Monochromator (F4)

- Nehmen Sie die Intensitätssignale beider Schichten des Sensors über einen Wellenlängenbereich von 460 nm bis 1000 nm am Monochromator auf. Hardcopy von Wertetabelle und graphische Darstellung dem Versuchsprotokoll beifügen.

Bestimmung der Wellenlänge von LED’s (F5)

- Bestimmen Sie die Schwerpunktwellenlänge der zur Verfügung stehenden LED’s bei denen in Tab. 2 aufgeführten Flußströmen. Tragen Sie die ermittelten Werte in die Tabelle ein. Welche Tendenz zeichnet sich ab? Womit läßt sich diese Erscheinung begründen?

4. Literatur

/1/ Paul, R.: Optoelektronische Halbleiterbauelemente, Stuttgart: Teubner, 1985

/2/ Hauptmann, P.: Sensoren, Prinzipien und Anwendungen, Carl-Hanser Verlag MünchenWien, 1991

/3/ H.J. Paus, Physik in Experimenten und Beispielen, Carl-Hanser Verlag München Wien, 1995