

Leseprobe aus Kapitel 10 ‚Sensorik‘ des Buchs

‚Strukturbildung und Simulation technischer Systeme‘

Weitere Informationen zum Buch finden Sie unter

strukturbildung-simulation.de

Der dritte Abschnitt des Kapitels 10 ‚Sensorik‘ befasst sich mit der Photometrie. Dabei geht es um die Frage, welche Anteile der von einer Licht-Quelle gesendeten Strahlung ein Sensor erkennt. Zur Beantwortung dieser Frage ist zu klären, wieweit sich die Frequenz-Spektren der Licht-Quelle und des Sensors überlappen (Faltung).

10.3.2 Spektroskopie

Bei der Spektroskopie wird das empfangene Licht durch ein Prisma in seine Farben zerlegt. Das ermöglicht

- die Erkennung spektraler Verteilungen in Licht-Quellen
- die chemische Analyse durchscheinender Materialien (Gase, Flüssigkeiten)

Die Photometrie dient in der Chemie zur Analyse durchscheinender Materialien. Die integrale Photometrie dient zur quantitativen Analyse (Stoff-Mengen-Bestimmung) mit weißem Licht. Die spektrale Photometrie ermöglicht qualitative Analysen (Stoff-Sorten-Bestimmung).

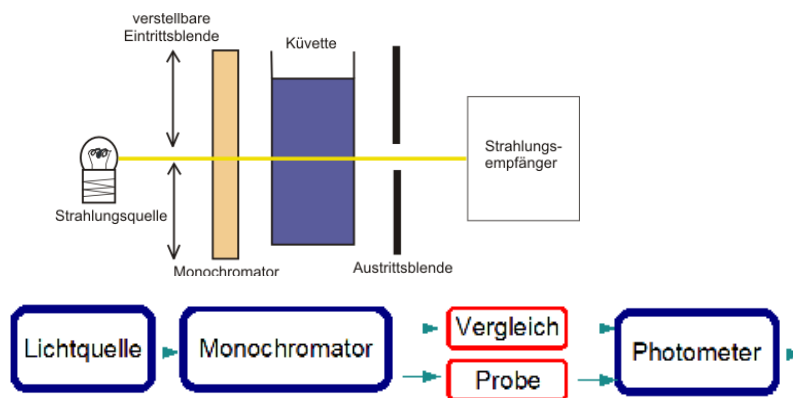


Abb. 10.3.2-1 Spektrometrie: Photometrische Messungen durch das Durchleuchten einer Flüssigkeit

Als Licht-Quelle dient nicht nur sichtbares, sondern auch infra-rotes und ultra-violettes Licht. Dabei wird die Transmission einer Probe mit der einer gleichartigen Referenz, in der nur die gesuchte Substanz fehlt, verglichen. Zur genaueren Spezifizierung der Messung engt man den Spektral-Bereich des Analyse-Lichts durch Monochromatoren ein. Dadurch wird die Photometrie zur Spektrometrie. Damit lassen sich noch wenige mg einer Substanz nachweisen.

Der Spektrograph

Spektrographen dienen zur Messung und Aufzeichnung von Licht einzelner Farben, die aus weißem Licht mittels Prisma oder Gitter-Monochromator herausgefiltert werden. Zur Analyse wird eine Küvette K, die die Proben-Substanz enthält, in den Lichtweg gebracht.

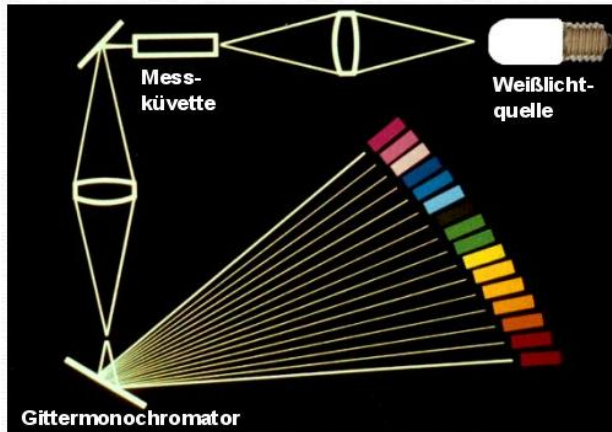


Abb. 10.3.2-2 Optische Spektroskopie. Die Mess-Küvette enthält die zu untersuchende, gasförmige oder in einer Flüssigkeit gelöste Substanz. Am Ort jeder einzelnen Farbe des Licht-Spektrums muss die Intensität gemessen werden. Das soll hier durch Simulation erfolgen.

Aufgezeichnet wird die Intensität des transmittierten Lichts der einzelnen Farben. Die Licht-Messung und ihre Simulation ist das Thema dieses Kapitels.

Spektrometer bestehen aus

- einem Prisma zur Zerlegung des Lichts in seine Farben und einer
- Photo-Elektronik zur Umwandlung der einzelnen Farben in elektrische Signale.

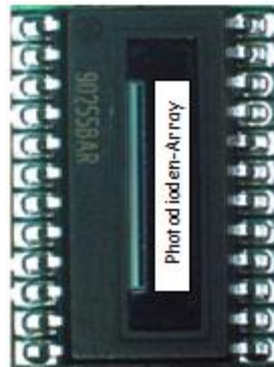
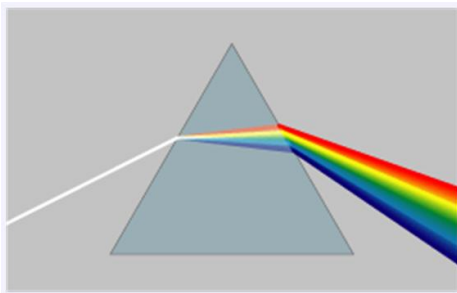


Abb. 10.3.2-3 Prisma und Photodioden-Array (PDA) sind die wichtigsten Bestandteile eines Spektrographen ohne bewegliche Teile.

Das Prisma

Prismen sind Glaskörper (dispersives Medium) mit dreieckigem Querschnitt. Durch die Dichte-Änderung (Dispersion) wird das Licht zweimal gebrochen: beim Eintritt und beim Austritt. Die Brechung ist umso stärker, je kurzwelliger das Licht, d.h. je höher seine Frequenz ist. Dadurch spaltet sich das Licht in seine Farben auf. Weißes Licht erscheint in den Farben des Regenbogens.

Das Photo-Dioden-Detektor-Array (PDA)

Mittels PDA's werden Licht-Spektren simultan (unverzögert) in elektrische Signale verwandelt. Sie bestehen aus einer **Photodioden-Zeile** zur Umwandlung der Farben eines

Prismas in Photostrom. Die Anzahl der Photodioden (meist 1024) bestimmt die spektrale Auflösung.

Beispiel-Spektren:

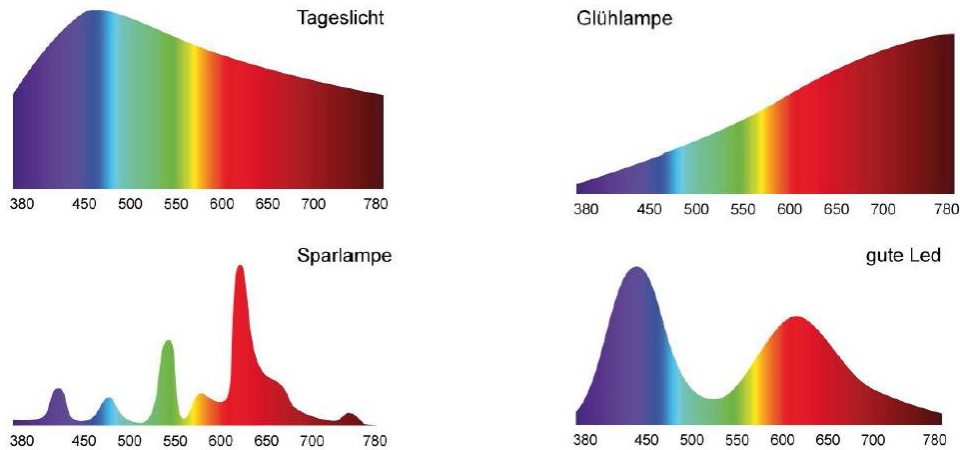


Abb. 10.3.2-4 Spektrale Intensitäts-Verteilungen bei vier Licht-Quellen: Atomare Strahler besitzen symmetrische Gauß-Verteilungen, thermische Strahler besitzen unsymmetrische Planck-Verteilungen mit den größten Anteilen im Infra-roten.

Absorptions- und Emissions-Spektren

Durchquert weißes Licht auf seinem Weg ein durchscheinendes Medium, so können einzelne Wellenlängen absorbiert werden. Das äußert sich im Spektrum durch dunkle Spektral-Linien. Weil man die Absorption aller möglichen Materialien gemessen hat, kennt man die Lage ihrer Absorptions-Linien im Spektrum. So kann man umgekehrt die in einer durchleuchteten Probe enthaltenen Stoffe durch ihre Spektral-Linien bestimmen.

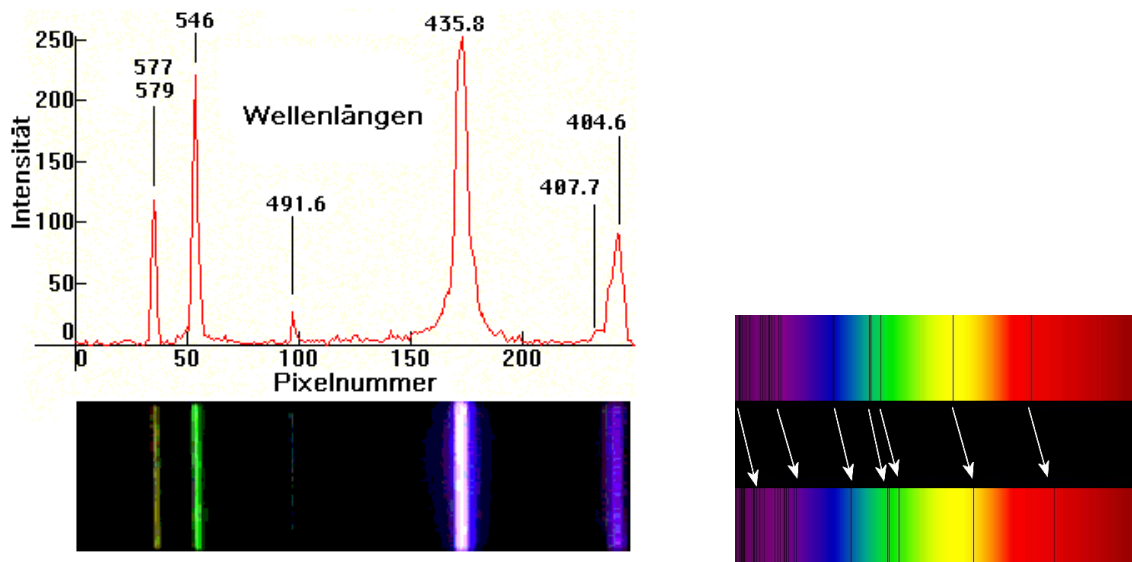


Abb. 10.3.2-5 Das Emissions-Spektrum einer Quecksilberdampf-Lampe – oben das Spektrogramm, darunter die Spektral-Linien. Rechts: ins Rote verschobene Spektral-Linien eines Sterns, der sich von der Erde weg bewegt.

Rot- und Blau-Verschiebung

Mittels Spektroskopie - nicht nur des sichtbaren, sondern auch des infra-roten und ultravioletten Lichts - erhält man Informationen über die entferntesten Sterne und Galaxien. Astro-Physiker bestimmen daraus die Elemente und Moleküle in deren Umgebung und ihre Geschwindigkeiten in allen Koordinaten des Raums. So erhält man Informationen über Aufbau und Entstehung des gesamten Universums mit aller Energie, der Zeit, dem Raum und allen Kräften und Gesetzen.

Ist das spektroskopierte Gas kalt, entstehen **dunkle Absorptions-Linien**, ist es heiß, enthalten die Spektren **helle Emissions-Linien**. Da das gesamte Universum expandiert, bewegen sich die meisten Sterne und Galaxien von uns weg (eine der wenigen Ausnahmen: unsere Nachbar-Galaxie, der Andromeda-Nebel). Durch die Flucht-Geschwindigkeit wird das empfangene Licht langwelliger, die Spektral-Linien sind ins Rote verschoben (analog zum Doppler-Effekt). Bei Annäherung der Sterne werden die gemessenen Wellenlängen kürzer, sie sind ins Blaue verschoben. Aus der Verschiebung der Spektral-Linien kann die Geschwindigkeit relativ zur Erde berechnet werden.

Bei allen weit von uns entfernten Galaxien ist Flucht-Geschwindigkeit v_{Flucht} proportional zur Entfernung D von der Erde (und jedem anderen Punkt im Universum):

$$v_{\text{Flucht}} = H_0 \cdot D$$

Der Zusammenhang wurde 1925 vom Amerikaner Edwin Hubble entdeckt.

Das war das erste Indiz für den Urknall (Big Bang, der Tag ohne Gestern, der Wirkung ohne Ursache). Die **Hubble-Konstante H_0** beschreibt die Proportionalität zwischen Flucht-Geschwindigkeit und Entfernung:

$$H_0 = v_{\text{Flucht}}/D \approx 22 \text{ km/s pro Lichtjahr} = 0,073 \cdot 10^{-9} / \text{Jahr}$$

Der Kehrwert von H_0 ist das Alter des Universums: $t_{\text{Uni}} = 1/H_0 \approx 13,7 \text{ Milliarden Jahre}$.

Spektrale Verteilungen

Lampen emittieren Licht nur mit bestimmten Wellenlängen, die ihre Farben bestimmen. Sensoren sind nur für bestimmte Wellenlängen empfindlich. Um sie an das zu messende Licht anpassen zu können, muss sowohl das Emissions-Spektrum der Lampe, als auch das Absorptions-Spektrum des Sensors bekannt sein. Dazu geben Hersteller die spektralen Verteilungen ihrer Produkte an.

Spektrale **Verteilungs-Funktionen** $V(\lambda)$ zeigen, bei welchen Wellenlängen ein Strahler Leistung emittiert und wo ein Sensor sie absorbiert.

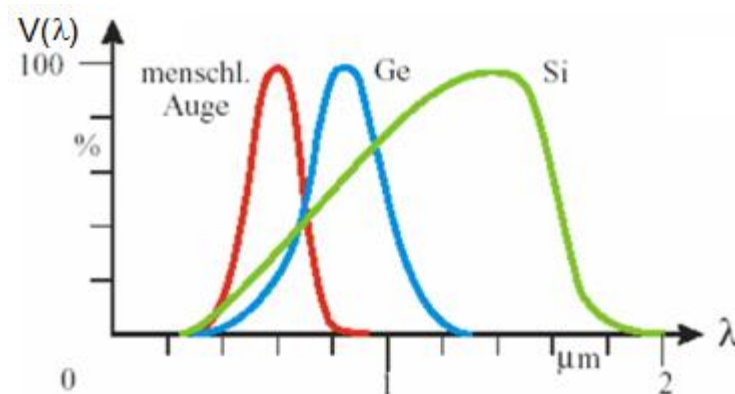


Abb. 10.3.2-6 Spektrale Empfindlichkeiten des menschlichen Auges und von Germanium- und Silizium-Dioden. Das Auge ist bei etwa $0,6\mu\text{m}$ (rot) am empfindlichsten, Germanium bei $0,9\mu\text{m}$ (nahes Infrarot), Silizium bei $1,4\mu\text{m}$ (ferneres Infrarot).

Spektrale Verteilungen sind durch drei Angaben gekennzeichnet:

1. Die **Form**.
Sie ist beim menschlichen Auge symmetrisch zum Zentrum und ähnelt einer **Gauß-Verteilung**. Wie noch gezeigt werden wird, ist die Verteilung bei thermischen Strahlern, wie z.B. den Glüh-Lampen, unsymmetrisch. Für Simulationen werden wir sie durch Kennlinien nachbilden.
2. Das spektrale **Zentrum** gibt die Farbe des Lichts an, bei der die Empfindlichkeit maximal ist. Es liegt beim Auge bei **555nm**, der Wellenlänge des **grünen** Lichts.
3. Die **Halbwerts-Breite HWB** beschreibt den spektralen Empfindlichkeits-Bereich um das Zentrum herum. Sie beträgt beim Auge **100nm**. Beim **Zentrum - 1·HWB** beginnt das **ultra-violette** Licht, beim **Zentrum + 2· HWB** beginnt das **infra-rote** Licht.

Die Hersteller photometrischer Komponenten geben die relativen **Empfindlichkeiten** $V(\lambda)$, das Verhältnis aus der absorbierten Licht-Leistung P.L zur insgesamt auftreffenden Strahlungs- Leistung P.Str an:

$$V(\lambda) = \frac{P.L}{P.ges} \cdot 100\%$$

$V(\lambda)$ der Sensoren liegt uns für die meisten Licht-Quellen und –Sensoren als **Abbildung** vor.

Wenn es gelingt, $V(\lambda)$ durch eine Funktion zu beschreiben, können photometrische Systeme mit höherer Mathematik berechnet werden. Da wir über die Möglichkeit der Simulation verfügen, verzichten wir auf dieses schwerfällige Verfahren. Wenn die analytische Berechnung der spektralen Verteilung **nicht möglich** ist, muss $V(\lambda)$ durch eine **Kennlinie** nachgestellt werden.

Für beide Fälle sollen Beleuchtungs-Messer mit einer Photo-Diode und einem Photo-Transistor simuliert werden. Das Ziel dabei ist die Berechnung des

Kalibrier-Parameters $k.lx = i.Pho/E$, z.B. in mA/lx

für Photo-Dioden und -Transistoren. Wie die Kalibrier-Konstante $k.lx$ aus den Parametern des photometrischen Systems berechnet wird, zeigen wir in diesem Abschnitt. Dann kann ein Lux-Meter auch dann kalibriert werden, wenn die Kalibrier-Konstante $k.lx$ nicht explizit angegeben ist. Das ist z.B. bei dem anschließend simulierten **Photo-Transistor PBY62** der Fall.

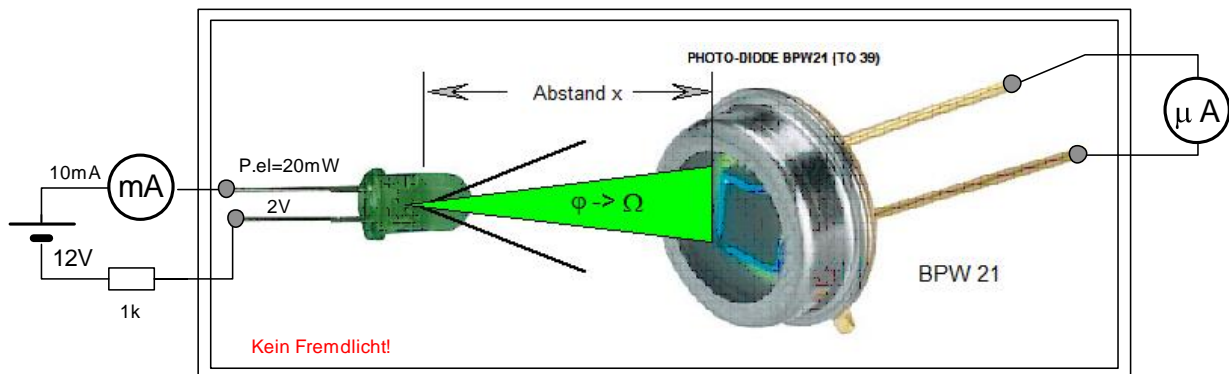


Abb. 10.3.2-7 Photometrische Mess-Strecke:

Photo-Dioden setzen die **Beleuchtungs-Stärke E** in einen proportionalen **Photostrom i.Pho** um. Als Beleuchtungs-Messer dient uns zuerst die **Photo-Diode BPW21**. Ihre spektrale Empfindlichkeit hat ihr Maximum genau wie das menschliche Auge bei grünem Licht (555nm). Ihr Empfindlichkeits-Spektrum (**HWB=270nm**) ist aber fast dreimal breiter als das des menschlichen Auges (**HWB=100nm**). Deshalb sieht die BPW21 alle Farben wie wir, nur empfindlicher. Der Hersteller (Siemens) gibt die visuelle Empfindlichkeit der BPW21 mit **10nA/lx** an.

10.2.3.1 Die Photo-Diode

In Photo-Dioden sind die Ladungen der Sperrschicht einer Diode das vermittelnde Medium. Dazu besitzen sie ein Fenster für das auftreffende Licht. Wird sie der Bestrahlung durch Licht ausgesetzt, erfolgt eine Ladungstrennung wie bei allen Halbleitern auch durch Wärmestrahlung

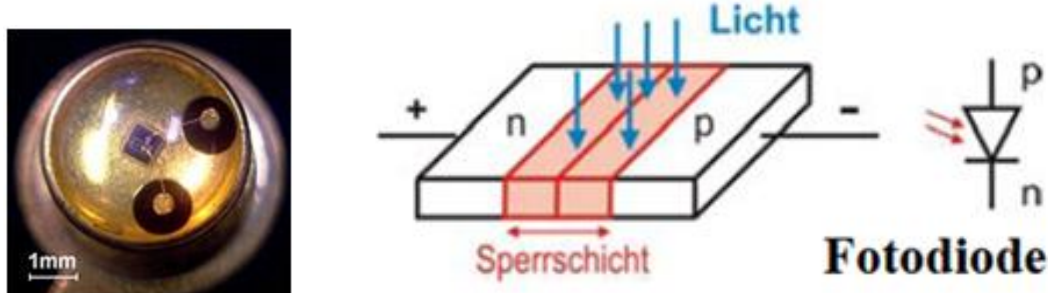


Abb. 10.3.2-8 Photo-Diode. Der Photo-Strom ist der Intensität des einfallenden Lichts proportional. Die Grenzfrequenz liegt weit über 10MHz.

Die Kennlinien einer Photo-Diode sehen denen in der nächsten Abbildung gezeigten Kennlinien eines Photo-Transistors ähnlich. Nur sind die Photoströme der Diode um die Stromverstärkung des Transistors (B , um 100) geringer.

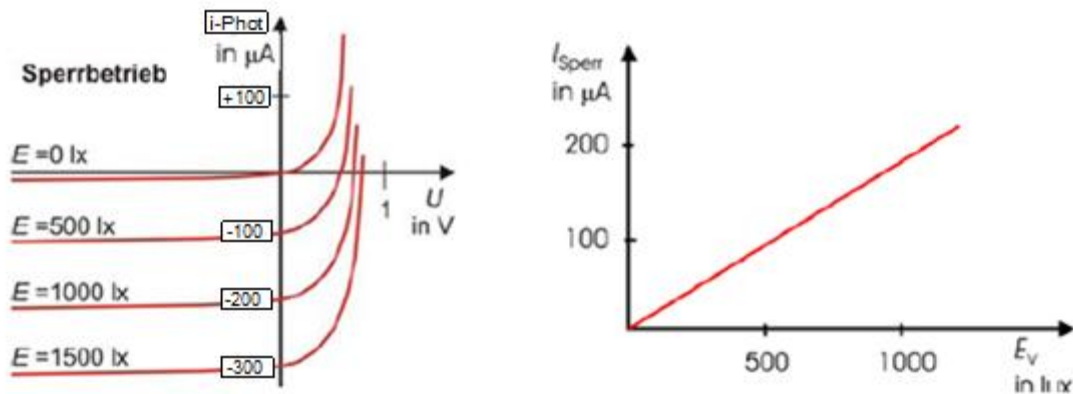


Abb. 10.3.2-9 Kennlinienfeld eines Photo-Transistors. Die Kollektor-Ströme sind um die Stromverstärkung (B , einige 100) größer als die eines Photo-Transistors.

Der durch die Beleuchtung ausgelöste Sperrstrom (= Photostrom) ist der Beleuchtungsstärke E (in lx) bei Signal-Frequenzen **bis zu einigen MHz** direkt proportional. Das Ziel der folgenden Berechnungen und Simulationen besteht darin, den Zusammenhang zwischen der **physiologisch bewerteten (visuellen) Beleuchtungs-Stärke E** und dem (radiometrischen) **Photo-Strom i_{Pho}** zu finden. Ist er bekannt, kann der Sensor in der Einheit der Beleuchtungs-Stärke Lux (lx) kalibriert werden. So wird die Photo-Diode zum Beleuchtungs-Messer (Belichtungs-Messer).

Sensor-Signale, wie z.B. der (Kurzschluss-)Strom einer Photo-Diode, sind der gesamten empfangenen (integralen) **Strahlungs-Leistung P_{Str}** proportional. Um einen Photo-Strom maximieren zu können, muss man die **spektralen Verteilungen** der **Licht-emittierenden Quelle** und des **Licht-absorbierenden Sensors** aneinander anpassen.

10.2.3.2 Die spektrometrischen Parameter

Photometrische Berechnungen benötigen Parameter, die die Hersteller opto-elektrischer Bauelemente in Datenblättern angeben. Die wichtigsten der darin gemachten Angaben sollen nun am Beispiel einer Photo-Diode erläutert werden. Untersucht werden soll, wieweit der Sensor die Strahlung des Emitters **erkennt**. Dazu ist die **spektrale Überlappung (Faltung)** des Absorptions-Spektrum (Sensor) mit dem Emissions-Spektrum (Quelle) zu berechnen.

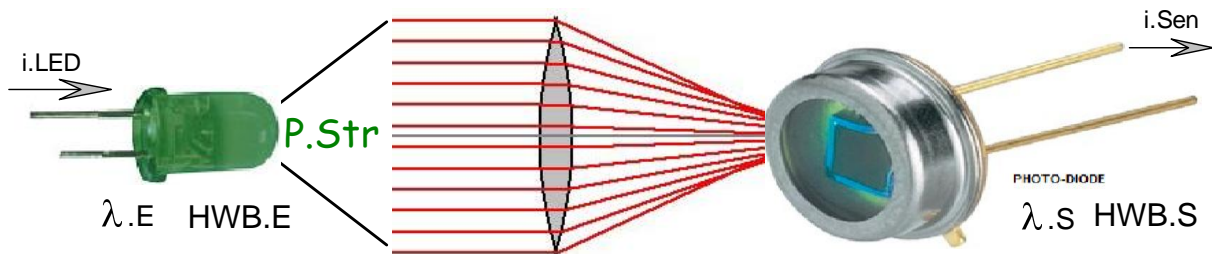


Abb. 10.3.2-10 Mess-Strecke zur Untersuchung der spektralen Überlappung (Faltung) von Emitter und Sensor: Die Sammellinse konzentriert die gesamte emittierte Strahlung auf den Sensor.

Hersteller-Angaben ist das Emissions-Spektrum der Licht-Quelle und das Absorptions-Spektrum des Sensors. Sie kennzeichnet ein **spektrales Zentrum** und die **Halbwertsbreite**. Für photometrische Simulationen werden diese Parameter der beteiligten Bauelemente benötigt. Welche die sind, zeigen wir am Beispiel einer Photo-Diode. Danach wird gezeigt, wie man die Strahlungs-Faltung mit ihnen berechnet.

Die Photo-Diode BPW21

Bei den nun folgenden Simulationen zur Photometrie benötigen wir einen Sensor als Beispiel. Gut dokumentiert ist die **Photodiode BPW21** von **Siemens**. Auf dem nächsten Bild sehen Sie ihre spektrale Empfindlichkeit im Vergleich zu der des menschlichen Auges (visuell).

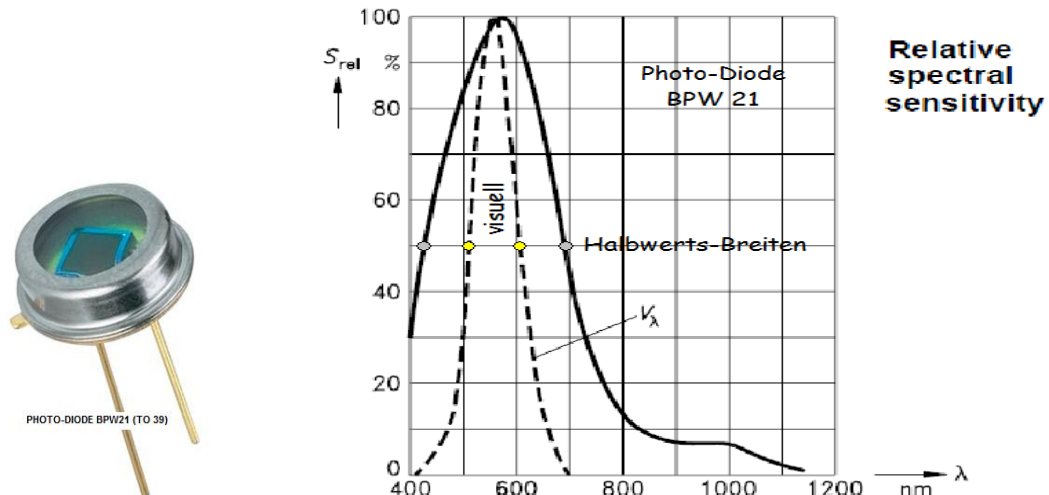


Abb. 10.3.2-11 Vergleich der spektralen Empfindlichkeiten von Photo-Diode und Auge. Weil die Maxima bei der gleichen Wellenlänge liegen (ca.560nm), sehen beide das gleiche Licht. Weil die Halbwertsbreite der Photo-Diode fast dreimal so groß ist wie die des Auges, ist sie fast dreimal empfindlicher.

Im nächsten Bild zeigen wir Ihnen einen Ausschnitt des Datenblattes der Photodiode BPW21. Die für uns wichtigen Punkte sind nummeriert. Sie sind ganz allgemein zum Verständnis der Photometrie erforderlich und werden nun Punkt für Punkt erklärt.

Kennwerte ($T_A = 25\text{ °C}$, Normlicht A, $T = 2856\text{ K}$)		BPW 21	
Characteristics ($T_A = 25\text{ °C}$, standard light A, $T = 2856\text{ K}$)			
Bezeichnung Description	Symbol Symbol	Wert Value	Einheit Unit
*1 Fotoempfindlichkeit, $V_R = 5\text{ V}$ Spectral sensitivity	S	10 (≥ 5.5)	nA/lx
*2 Wellenlänge der max. Fotoempfindlichkeit Wavelength of max. sensitivity	$\lambda_{S\text{ max}}$	550 Zentrum: λ_{Zent}	nm
*3 Spektraler Bereich der Fotoempfindlichkeit $S = 10\%$ von S_{max} Spectral range of sensitivity $S = 10\%$ of S_{max}	λ	350 ... 820 50% -> 420 ... 690 HWB = 270	nm nm nm
*4 Bestrahlungsempfindliche Fläche Radiant sensitive area	A	7.34	mm ²
*5 Abmessung der bestrahlungsempfindlichen Fläche Dimensions of radiant sensitive area	$L \times B$ $L \times W$	2.73 × 2.73	mm × mm
*6 Abstand Chipoberfläche zu Gehäuseoberfläche Distance chip front to case surface	H	1.9 ... 2.3	mm
*7 Spektrale Fotoempfindlichkeit, $\lambda = 550\text{ nm}$ Spectral sensitivity	S_λ	0.34	A/W
*8 Quantenausbeute, $\lambda = 550\text{ nm}$ Quantum yield	η	0.80	Electrons Photon
*9 Leerlaufspannung, $E_v = 1000\text{ lx}$ Open-circuit voltage	V_o	400 (≥ 320)	mV
Kurzschlußstrom, $E_v = 1000\text{ lx}$ Short-circuit current	I_{sc}	10	μA
*10 Anstiegs- und Abfallzeit des Fotostromes Rise and fall time of the photocurrent $R_L = 1\text{ k}\Omega$; $V_R = 5\text{ V}$; $\lambda = 550\text{ nm}$; $I_p = 10\text{ }\mu\text{A}$	t_r, t_f	1.5	μs
Durchlaßspannung, $I_F = 100\text{ mA}$, $E = 0$ Forward voltage	V_F	1.2	V

Abb. 10.3.2-12 Auszug aus dem Datenblatt der Photo-Diode BPW21. Erläuterungen im Text.

Als Struktur sieht die Berechnung des Photostroms aus der Bestrahlungs-Intensität so aus:

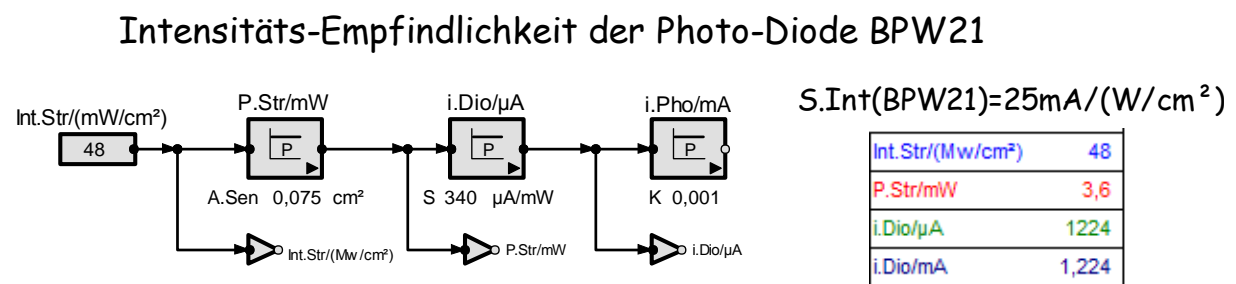


Abb. 10.3.2-13 (integrale) Strahlungs-Intensität, -Leistung und Photostrom

Erläuterungen zum Datenblatt der Photo-Diode BPW21

Zu 1: Die visuelle **Foto-Empfindlichkeit** $S = 10\text{nA/lx}$. S dient zur Berechnung des Photostroms bei der Messung von **weißem Licht**.

Mit S kann gerechnet werden, wenn mit der BPW21 ein **Lux-Meter** gebaut werden soll.

Zu 2: Das spektrale Zentrum: Bei Licht mit der Wellenlänge λ . **mit=550nm** hat die Diode ihre maximale Empfindlichkeit. Das ist nur 5nm kleiner als die des Auges.

Zu 3: Die Halbwertsbreite HWB: Hier wird der Bereich spektraler Empfindlichkeit angegeben, in dem $S(\lambda)$ größer als 10% von S_{max} ist. Er reicht von $\lambda_1=350\text{nm}$ bis $\lambda_2=820\text{nm}$. Wir rechnen hier jedoch mit **Halbwerts-Breiten HWB**, bei der die **Empfindlichkeit über 50% vom Maximum** ist. Vergleicht man die 10%-Angaben mit den 50%-Werten, so erkennt man, dass sie sich etwa um den Faktor 1,2 unterscheiden.

Dann ist die untere Messgrenze $\lambda_1 \cdot 1,2=420\text{nm}$, die obere Grenze ist $\lambda_2/1,2=690\text{nm}$.

Als Differenz ergibt sich für die BPW21 die Halbwerts-Breite **HWB=270nm**.

Zu 4: Die Bestrahlungs-empfindliche Fläche der Diode ist **A.Sen=7,34mm²**.

Damit kann der Licht-Strom-Verbrauch $\Phi \cdot S = A \cdot S \cdot E$ des Sensors aus der gemessenen Beleuchtungs-Stärke E errechnet werden.

Zu 5: Hier werden Länge H und Breite B des rechteckigen Sensors genannt. Mit dem Abstand x zwischen Quelle und Sensor ermöglicht das die Berechnung des Messwinkels $\alpha=H/x$, aus dem sich der Raum-Winkel $\Omega(\alpha)$ ergibt. $\Omega(\alpha)$ wird wiederum zur Berechnung der **Licht-Stärke** $I = \Phi \cdot S / \Omega$ gebraucht..

Zu 6: Hier wird der Bereich der Richtungs-Empfindlichkeit als Halbwinkel $\alpha/2=55^\circ$ angegeben (50%-Grenze der Intensität). Bei Simulationen rechnen wir hier mit dem vollen Winkel $\alpha=110^\circ$.

Zu 7: Hier wird eine angeblich **spektrale Foto-Empfindlichkeit** S_λ mit $0,34\text{A/W}$ genannt. Mit S ist aber die **gesamte (integrale) Strahlungs-Empfindlichkeit** des Sensors gemeint:

$S = i_{\text{Pho}} / P_{\text{Str}}$ ermöglicht die Berechnung des **Photo-Stroms** i_{Pho} aus der **insgesamt einfallenden Strahlungs-Leistung** P_{Str} :

$$S = 0,34\text{A/W} = 340\mu\text{A/mW}$$

Die **Empfindlichkeit S** ermöglicht die Berechnung des **Photo-Stroms** i_{Pho} aus der insgesamt auf die **Sensor-Fläche** A_{Sen} treffende **Strahlungs-Leistung** P_{Str} :

$$i_{\text{Pho}} = S(\text{BPW21}) \cdot P_{\text{Str}}$$

Photo-Dioden bewerten die auftreffende **Strahlungs-Leistung** P_{Str} mit ihrem Absorptions-Spektrum. Der Photostrom ist proportional zu P_{Str} und dem über alle Wellenlängen integrierten Absorptions-Spektrum. Wie dieses berechnet wird, zeigen wir nach dieser Datenblatt-Erläuterung.

In anderen Publikationen wird die **Intensitäts-Empfindlichkeit** S des Sensors angegeben:

$$S_{\text{Int}} = i_{\text{Pho}} / \text{Int}_{\text{Str}} \text{ – z.B. in } \text{A}/(\text{W}/\text{cm}^2)$$

... mit der **Bestrahlungs-Intensität** $\text{Int} = P_{\text{Str}} / A_{\text{Sen}}$.

Um vergleichbare Verhältnisse zu bekommen, kann die Intensitäts-Empfindlichkeit S_{Int} aus der **Leistungs-Empfindlichkeit S** und der **Sensor-Fläche A_{Sen}** berechnet werden:

$$S_{\text{Int}} = i_{\text{Pho}}/I_{\text{Str}} = S \cdot A_{\text{Sen}}$$

Zahlenwerte: $S=0,34\text{A/W}$; $A_{\text{Sen}}=7,5\text{mm}^2 = 75 \cdot 10^{-3}\text{cm}^2 \rightarrow S_{\text{Int}} = 25,5\text{mA}/(\text{W}/\text{cm}^2)$

Der Parameter S_{λ} dient zur Berechnung des Photostroms i_{Pho} aus der gesamten (integralen), den Sensor treffenden, Strahlungs-Leistung P_{Str} . Die Angabe ‚spektral - gemessen bei 555nm‘ besagt nur, dass in der Umgebung des Empfindlichkeits-Zentrums der Diode gemessen worden ist. Sonst spielt diese Angabe für die integrale Intensität keine Rolle. Nach Auffassung des Verfassers ist die Bezeichnung ‚spektral‘ daher nicht korrekt. Wie er anschließend zeigen wird, sind spektrale Leistungen auf das Wellenlängen-Intervall (z.B. die Halbwertsbreite HWB) bezogen und werden z.B. in $\mu\text{W}/\text{nm}$ angegeben.

Zu 8: Hier ist die maximale Quanten-Ausbeute des Sensors genannt: 80%.

Dieser Wert besagt, dass der Sensor 80% der einfallenden Photonen zur Erzeugung eines freien Elektrons nutzt. Das zeigt, wie gut es hier den Entwicklern gelungen ist, den Photo-Sensor zu optimieren. Er ist kaum noch zu verbessern.

Zu 9: Hier wird der Photostrom bei einer Licht-Stärke von 1000lx angegeben. Dies entspricht der unter 1 gemachten Angabe: **$k_{\text{lx}}=10\text{nA}/\text{lx}$** .

Zu 10: Die Anstiegs- und Abfall-Zeiten, hier je $1,5\mu\text{s}$, zeigen die ‚Langsamkeit‘ des Sensors beim schlagartigen An- und Abschalten des Lichts an.

Die Periode t_0 der Frequenz, mit der das Licht geschaltet wird, muss groß gegen die Summe der An- und Abfall-Zeit sein (hier $3\mu\text{s}$), damit der Photo-Strom ebenfalls annähernd rechteckig verläuft.

Die im nächsten Punkt behandelten Anwendungs-Beispiele werden zeigen, dass die hier genannten Schalt-Zeiten auf die Zeitkonstanten der Beschaltung der Diode zurück zu führen sind. Die Photo-Diode selbst ist viel schneller.

Zahlenwerte:

Schaltzeit laut Datenblatt: $t_{\text{S}}=3\mu\text{s}$

-> die Mess-Grenzfrequenz für Sinus-Formen: $f_{\text{g}} = 1/T_{\text{S}} = 333\text{kHz}$.

Wenn eine Rechteck-Schwingung noch einigermaßen erhalten bleiben soll, darf ihre Frequenz höchstens 1/10-tel davon sein (33kHz). Dass dies durch geeignete Schaltungen noch viel schneller geht, zeigen wir im Punkt ‚Anwendungen‘.

10.2.4 Spektrometrie

Ziel der folgenden Berechnungen von Anordnungen aus einer Licht-Quelle und einem Licht-Sensor aus Photo-Diode und Photo-Transistor ist die Bestimmung des **Kalibrier-Parameters $k_{\text{lx}}=i_{\text{Pho}}/E$** , also des Zusammenhangs zwischen dem (integralen) **Photostrom i_{Pho}** und der **visuellen Beleuchtungs-Stärke E** . Zur Erklärung der spektralen Kopplung zwischen einer Licht-Quelle und einem Sensor benötigen wir den Begriff der **Faltung**.

Die photometrische Faltung

Photoströme entstehen nur dann, wenn sich die spektrale Empfindlichkeit des Sensors mit der spektralen Emission der Licht-Quelle überlappt. Dieser (nicht-lineare) Zusammenhang wird als ‚Faltung‘ bezeichnet. Das Sensor-Signal ist proportional zur **Fläche der spektralen Überschneidung** von Sensor und Quelle, genannt das ‚Faltungs-Integral‘. Man könnte es auch den ‚photometrischen Wirkungsgrad‘ nennen. Da dies aber zu Verwechslungen mit dem photo-elektrischen (technischen) Wirkungsgrad führen kann, tun wir dies nicht.

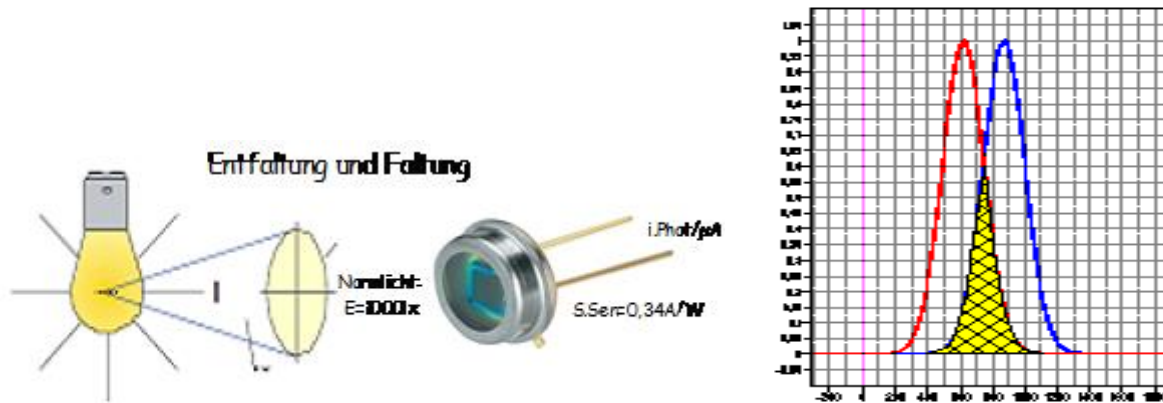


Abb. 10.3.2-14 Bei Beleuchtung erzeugt die Photo-Diode einen Photo-Strom. Die (visuelle) Beleuchtungs-Stärke wird mittels Lux-Meter gemessen. Zur Berechnung des (integralen) Photostroms gibt der Hersteller der Diode einen Strahlungs-Parameter k.Str zur Berechnung des Photostroms aus der (integralen) Beleuchtungs-Intensität an.

Photo-Ströme entstehen durch die Faltung der Sensor-Empfindlichkeit mit dem Emissions-Spektrum der Licht-Quelle. D.h., der Sensor **bewertet** die einfallende Strahlung P.Str mit seinem Faltungs-Integral zur Licht-Quelle. Mathematisch ist das eine **Multiplikation** von P.Str mit diesem Faltungs-Integral: $P.Sen = Fltg.Int(Quelle \rightarrow Sensor) \cdot P.Str$.

Misst man die **physiologisch bewertete** Beleuchtungs-Stärke E in Lux (lx), so bedeutet dies, dass die Strahlung der Quelle mit der Empfindlichkeit des menschlichen Auges gefaltet wird. $P.Auge = Fltg.Int(Quelle \rightarrow Auge) \cdot P.Str$.

Um aus Beleuchtungs-Stärke E die insgesamt einfallende Strahlung P.Str zu berechnen, muss es entfaltet werden. Mathematisch ist dies eine **Division** von E durch das Faltungs-Integral. $P.Str = P.Auge / Fltg.Int(Quelle \rightarrow Auge)$.

Als Struktur sieht der photometrische Algorithmus so aus:

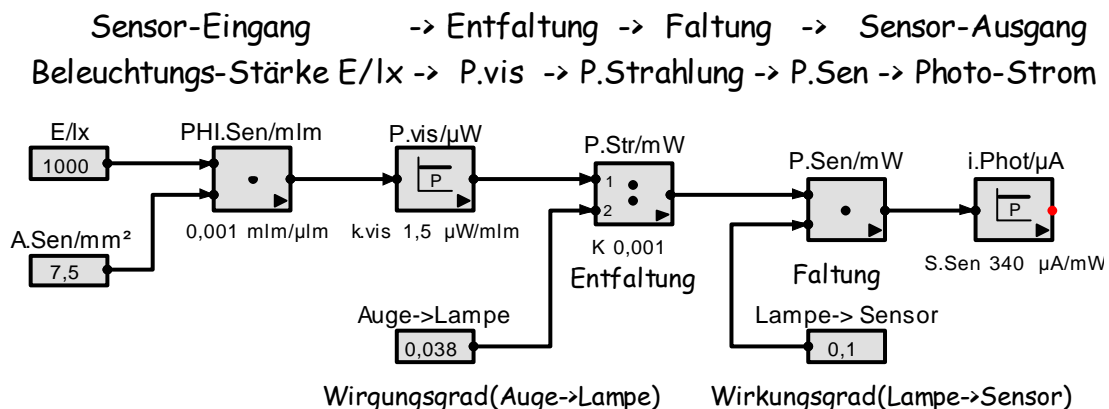


Abb. 10.3.2-15 Faltung und Entfaltung:

Das photometrische Berechnungs-Schema

Die obige Struktur zeigt, wie aus der visuellen Beleuchtungs-Stärke E über die insgesamt einfallende (integrale) **Strahlungs-Leistung P.Str** der **Photo-Strom i.Phot** berechnet wird.

1. Aus dem Produkt der Beleuchtungs-Stärke E (hier 100lx) und der **Sensor-Fläche A.Sen** (hier 7,5mm²) erhalten wir den **visuellen Sensor-Fluss PHL.Sen** (hier 7,5mlm).
Die Einheit Milli-Lumen **mlm** ergibt sich aus dem Produkt der Beleuchtungs-Stärke E in Lux lx und der Sensor-Fläche A in m(m²)=10⁻³mm².
2. Mit der Konstanten k.vis=1,5mW/lm=1,5μW/mlm errechnet sich daraus die visuelle Strahlungs-Leistung P.vis (hier 11μW), die das Auge wahrnimmt.
3. Durch die Entfaltung mit dem **Wirkungsgrad(Auge->Lampe)** wird aus der visuellen Leistung die gesamte, am Sensor einfallende Strahlungs-Leistung P.Str (hier 290μW).
4. Durch die erneute Faltung der spektralen Quellen-Intensität mit der spektralen Empfindlichkeit des Sensors erhält man die vom Sensor absorbierte Strahlungs-Leistung P.Sen (hier 29μW).
5. Mit der vom Hersteller angegebenen Strahlungs-Empfindlichkeit S (hier 0,34A/W =340μA/mW) des Sensors folgt daraus zuletzt der Photo-Strom i.Phot (hier 9,8μA).

Damit können wir den Kalibrier-Parameter k.lx allgemein berechnen:

$$k.lx = \frac{i.Phot}{E} = A.Sen * k.vis * S.Sen * \frac{Fltg.Int(Lampe \rightarrow Sensor)}{Fltg.Int(Lampe \rightarrow Auge)}$$

Zusammenfassung der Konstanten für die Photo-Diode BPW21 zu k.Sen:

k.vis=1,5mW/lm – mit lm=lx·m²; A.Sen=7,5mm²; S.Sen=0,34A/W – ergibt **k.Sen=3,8nA/lx**.

Noch zu berechnen sind

das **Fltg.Int(Lampe->Sensor) = 10%** und das **Fltg.Int(Lampe->Auge) = 3,8%**.

Das Verhältnis der Faltungen-Integrale ergibt hier den Faktor 2,6. Damit wird der Kalibrier-Parameter **k.lx = 3,8nA/lx·2,6 = 9,9nA/lx**. Das stimmt mit der Hersteller-Angabe (10nA/lx) überein und zeigt, dass der angegebene Algorithmus zur Berechnung des **Photo-Stroms i.Pho** aus der **Beleuchtungs-Stärke E** wahrscheinlich richtig ist.

Wichtige Faltungs-Integrale

Damit fehlen uns zur Berechnung des Kalibrierungs-Parameters k.lx nur noch die Faltungs-Integrale von der **Lampe zum Auge einerseits** und von der **Lampe zum Sensor andererseits**. Die Rechnungen sollen nun durch Simulation beispielhaft für vier wichtige Licht-Quellen und zwei gebräuchliche Sensoren durchgeführt werden:

Quellen: **Glüh-Lampe, rote LED, grüne LED und blaue LED**
Sensoren: **Photo-Diode BPW21 und Photo-Transistor BPY62**

Die Ergebnisse fasst die folgende Tabelle zusammen:

Zentrum; HWB k.lx (weißes Licht) Quelle: Zentrum; HWB	555;100nm ----- Quelle -> Auge	560;270nm 10nA/lx Quelle -> BPW21	800;400nm 4,0nA/lx Quelle -> BPY62
LED, rot: 630;52nm	0,9%	3,4%	2,3%
LED, grün: 560;32nm	2,4%	2,5%	0,8%
LED, blau: 460;11nm	0,05%	0,55%	0,09%
Glüh-Lmp: 900;1100nm	3,8%	10%	27%

Abb. 10.3.2-16 Faltungs-Integrale der Kopplungen unterschiedlicher Quellen und Sensoren. Am besten an weißes Licht angepasst ist der Photo-Transistor BPY62. Warum er trotzdem nicht so empfindlich wie die Photo-Diode BPW21 ist, wird die Berechnung zeigen.

Achtung: *Faltungs-Integrale* sind **nicht-linear** abhängig von den Halbwerts-Breiten und spektralen Zentren. Sie müssen daher für jede Kombination *Quelle-Sensor* individuell bestimmt werden. Das werden wir nachfolgend für typische Beispiele tun.

Nur in einem Sonderfall, wenn ähnliche **spektrale Verteilungen** (hier Gauß) mit gleichem **spektralen Zentrum** vorliegen, und wenn die Halbwertsbreite des Sensors größer als die der Quelle ist, verhalten sich die Intensitäten wie die Halbwerts-Breiten HWB.

Dieser Sonderfall liegt vor, wenn das menschliche Auge das grüne Licht einer LED sieht, für das es am Empfindlichsten ist. Diesen Fall werden wir nun zur Bestimmung des photometrischen Strahlungs-Äquivalents verwenden.