

Leseprobe aus Kapitel 10 ‚Sensorik‘ des Buchs  
‚Strukturbildung und Simulation technischer Systeme‘

Weitere Informationen zum Buch finden Sie unter

[strukturbildung-simulation.de](http://strukturbildung-simulation.de)

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

### 10.3.1.1 Der spektrometrische Algorithmus

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**  $k_{lx}=i_{Phot}/E$ , also des Zusammenhangs zwischen dem (integralen) **Photostrom**  $i_{Phot}$  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

Photostrome 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.

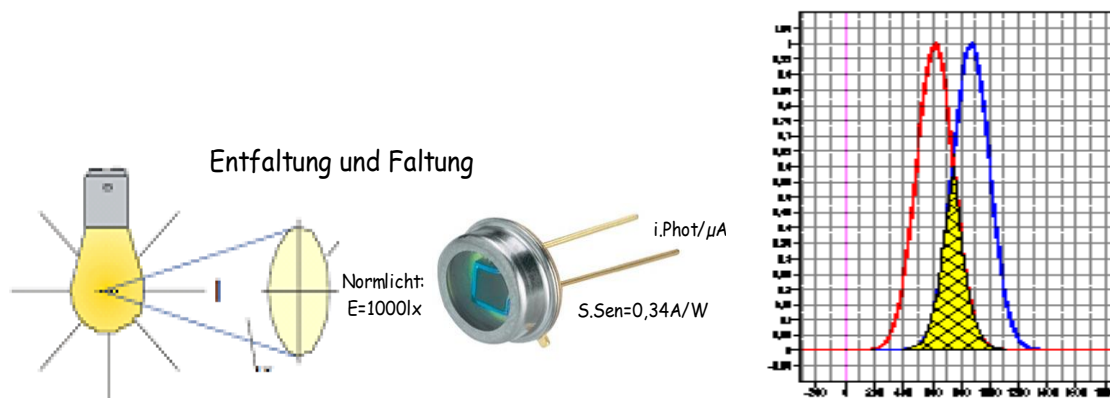


Abb. 10-91 Bei Beleuchtung erzeugt die Photo-Diode einen Photo-Strom. Die (visuelle) Beleuchtungs-Stärke wird mittels Lux-Meter gemessen. Zur Berechnung des (integralen) Photostroms gibt der Hersteller der Diode einen Strahlungs-Parameter  $k_{Str}$  zur Berechnung des Photostroms aus der (integralen) 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:  $P_{Sen} = \text{Fltg.Int}(\text{Quelle} \rightarrow \text{Sensor}) \cdot P_{Str}$ .

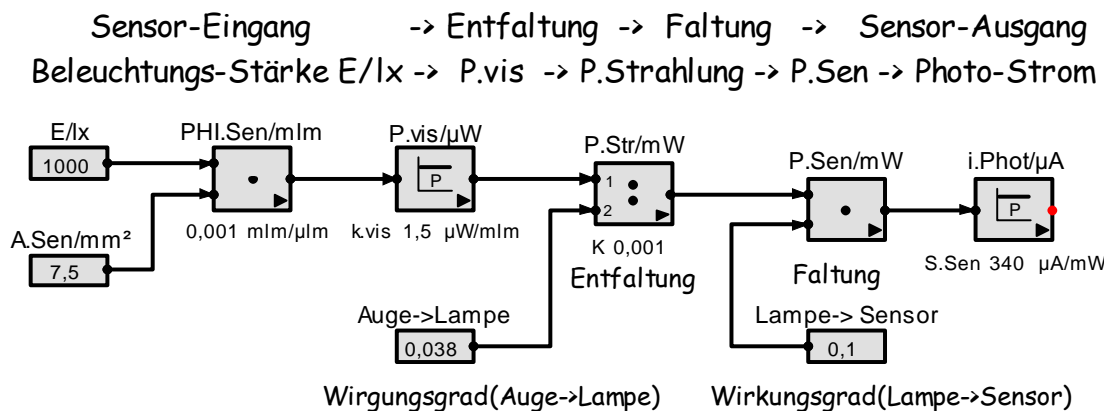
Misst man die **physiologisch bewertete** Beleuchtungs-Stärke E in Lux (lx), so bedeutet dies, dass die Strahlung der Quelle mit der Empfindlichkeit des menschlichen Auges gefaltet wird.

**P.Auge = Fltg.Int(Quelle->Auge)·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->Auge).**

Als Struktur sieht der photometrische Algorithmus so aus:



Struktur 10-14 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 7,5mm<sup>2</sup>) erhalten wir den **visuellen Sensor-Fluss PHI.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<sup>2</sup>)=10<sup>-3</sup>mm<sup>2</sup>.
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·m<sup>2</sup>; A.Sen=7,5mm<sup>2</sup>; 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 Faltung-Integrale ergibt hier den Faktor 2,6. Damit wird der Kalibrier-Parameter  $k_{lx} = 3,8nA/lx \cdot 2,6 = 9,9nA/lx$ . 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. 10-92 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.**

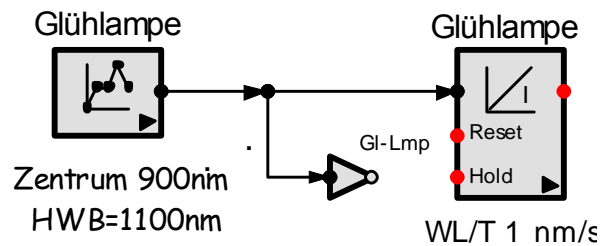
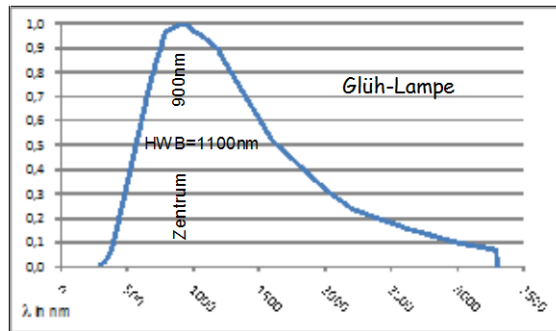
**Achtung:** *Faltungs-Integrale sind **nicht-linear** abhängig von den Halbwerts-Breiten und spektralen Zentren. Sie müssen daher für jede Kombination Quelle-Sensor individuell bestimmt werden.*

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.

10.3.1.2 Spektrale Verteilungen  $V(\lambda)$  als Kennlinien-Glied (KL)

Unsymmetrische Verteilungs-Funktionen, wie die von allen thermischen Strahlern (Sonne, Glüh-Lampe), kann man nicht durch einfache analytische Gleichungen beschreiben. Zur Simulation bleibt dann nur noch die Anfertigung einer Tabelle. Das soll nun für SimApp am Beispiel einer Glühlampe gezeigt werden.



**Struktur 10-15 Spektren und Integrale:** Links: Emissions-Spektrum einer Glühlampe als EXCEL-Grafik. Rechts: Simulation des Spektrums und Berechnung seiner Fläche durch Integration. Die Glühlampe emittiert den größten Teil ihrer Leistung als infrarote Strahlung. Ihr Emissions-Maximum liegt bei 900nm, ihre Halbwerts-Breite ist 1100nm.

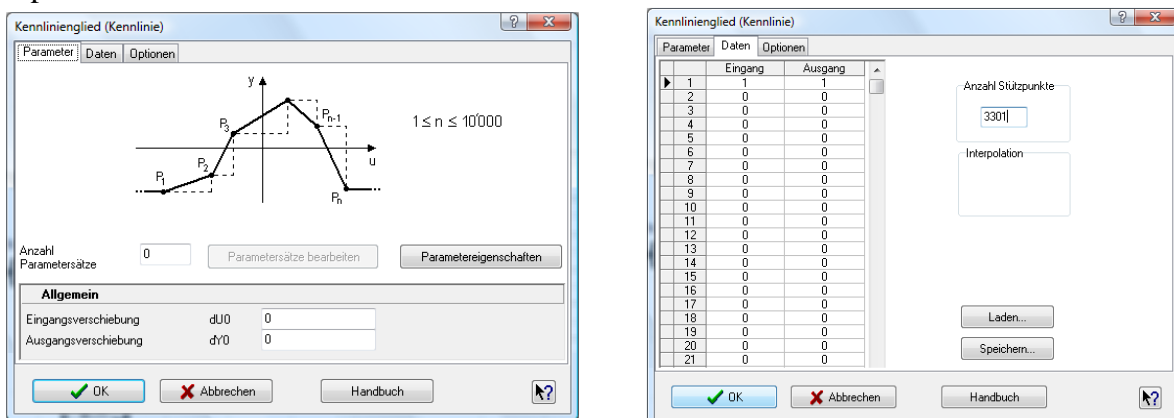
Kennlinie



Anfertigung einer Kennlinie in SimApp

Hersteller geben optische Verteilungs-Funktionen  $V(\lambda)$  nur als Abbildung an. Zur Simulation benötigen wir sie aber als Datensatz in einem Kennlinien-Block. Da für Glüh-Lampen ein Simulations-Bereich von 0 bis 3300 benötigt wird, müssten wir 3301 Werte-Paare eintragen. Da dies praktisch kaum zu leisten ist, erzeugen wir die Datei zuerst als EXCEL-Tabelle, die wir anschließend nach **SimApp** kopieren können. Das hat zusätzlich den Vorteil, aus dem Datensatz eine EXCEL-Grafik erzeugen zu können.

Die folgende Abbildung zeigt den geöffneten **Kennlinien-Block** im **Simulations-Programm SimApp**. Die noch zu erstellende EXCEL-Tabelle wird unter DATEN\LADEN hinein kopiert.



**Abb. 10-93** Der SimApp Kennlinien-Block. Links: das Eröffnungsbild, rechts der Daten-Eintrag.