

## Technische Optik 13

1 von 37

Prof. Dr. Ulrich Sowada  
Institut für Mechatronik  
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
-----------------	---------------	----------	----------------	----------------

Unsere Augen empfangen Lichtreize, wandeln sie um und leiten sie an das Gehirn weiter, wo Helligkeitsempfindungen und Bilder entstehen.

Das Ziel der Lichttechnik besteht darin, messtechnische Größen zu finden, die den empfundenen Helligkeiten Werte zuordnen.

Wir unterscheiden in der Disziplin Lichttechnik die beiden Abschnitte

- **Helligkeit** und
- **Farbmetrik**.

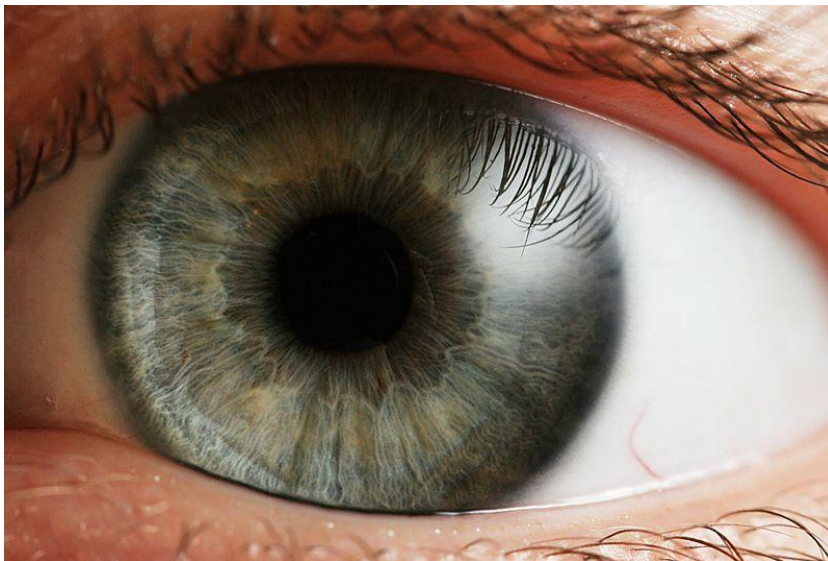
## Technische Optik 13

2 von 37

Prof. Dr. Ulrich Sowada  
Institut für Mechatronik  
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
-----------------	---------------	----------	----------------	----------------

Der Ort für die Aufnahme sichtbarer Reize ist das menschliche Auge.



## Technische Optik 13

3 von 37

Prof. Dr. Ulrich Sowada  
Institut für Mechatronik  
Fachhochschule Kiel

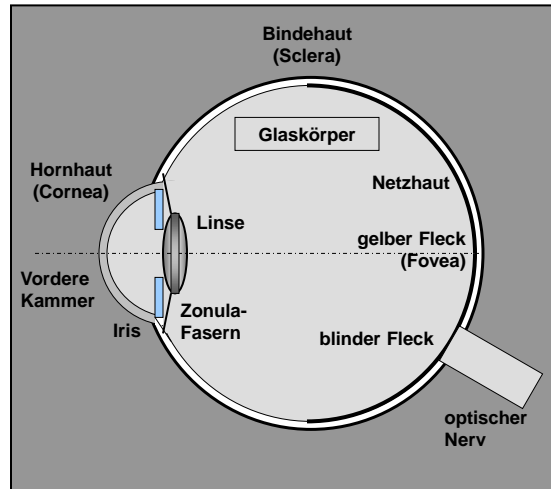
1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
-----------------	---------------	----------	----------------	----------------

Zwar ist die Funktion unserer Augen kompliziert, aber der Aufbau mit den Komponenten (s. schematische Abbildung) ist noch überschaubar.

Für die optische Abbildung ist der Radius an der Vorderfläche der Hornhaut ( $r = 7,8 \text{ mm}$ ) und der dort vorhandene Sprung in der Brechzahl ( $n = 1$ ;  $n' = 1,335$ ) besonders wichtig.

Dadurch entsteht hier eine Brechkraft  $D$  (paraxiale Näherung):

$$D = \frac{n' - n}{r} = \frac{0,335}{0,0078 \text{ m}} = 43 \text{ dpt}$$



Das sind etwa 73 % der gesamten Brechkraft. Die Krümmung der Hornhaut spielt also für die Abbildung die Hauptrolle; die Linse ist in ihrer Bedeutung sekundär.

## Technische Optik 13

4 von 37

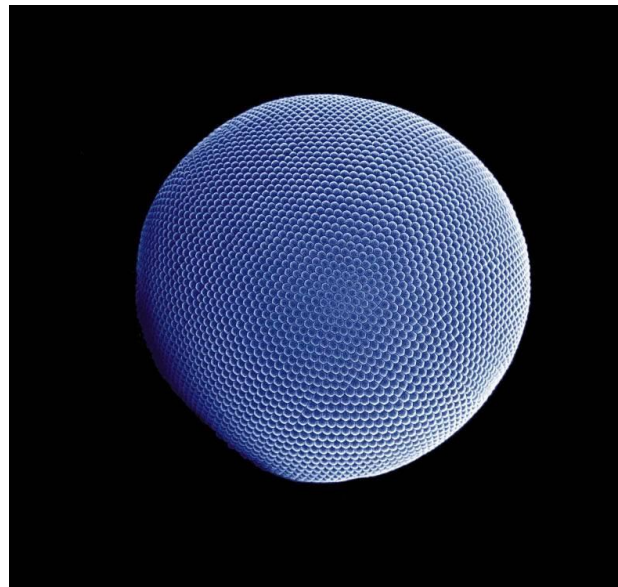
Prof. Dr. Ulrich Sowada  
Institut für Mechatronik  
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
-----------------	---------------	----------	----------------	----------------

Andere Lebewesen haben andere Augen entwickelt. Gezeigt ist ein Auge von Krill aus den polnahen Gewässern, der Nahrung vieler Wale.

Das Auge besteht aus einer großen Zahl von Ommatidien (Einzahl: Ommatidium). Sie bestehen aus einem Lichttrichter und einer Sehzelle mit Helligkeitsempfindung, die am inneren Ende sitzt. Der Lichttrichter überträgt nur das aus einem kleinen Winkel einfallende Licht.

Wie das Bild aussieht, hat uns noch kein Krill-Wesen verraten.



## Technische Optik 13

5 von 37

Prof. Dr. Ulrich Sowada  
Institut für Mechatronik  
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
5.1 Lichtstrom	5.2 Beleuchtungsstärke	5.3 Lichtstärke	5.4 Leuchtdichte	

Bei der Helligkeitsmessung strebt man ein Messverfahren an, das einen Zahlenwert für die menschliche Helligkeitsempfindung liefert. Für viele technische Aufgaben reichen vier Größen:

deutsch	englische Bezeichnung	Symbol
Lichtstrom	luminous flux	$\Phi$
Beleuchtungsstärke	luminous intensity	E
Lichtstärke	illuminance	I
Leuchtdichte	luminance	L

Wir wollen uns zunächst mit der Bedeutung dieser Größen beschäftigen; anschließend wird eine Messung behandelt, bevor Sie an Beispiel-Aufgaben überprüfen können, wieviel Sie gelernt haben.

## Technische Optik 13

6 von 37

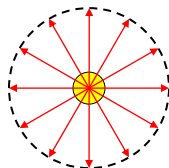
Prof. Dr. Ulrich Sowada  
Institut für Mechatronik  
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
5.1 Lichtstrom	5.2 Beleuchtungsstärke	5.3 Lichtstärke	5.4 Leuchtdichte	

Der Lichtstrom  $\Phi$  ist ein Maß für den Strom an Photonen (= Anzahl pro Sekunde), der von einer Lichtquelle abgegeben wird, bewertet mit seiner Sichtbarkeit.

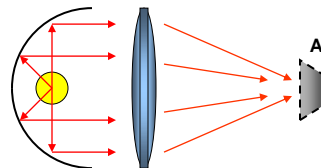
Als eine Lichtquelle können wir eine punktförmig strahlende Lampe haben.

Dann muss die Fläche, durch die alle Strahlen dringen, diesen Punkt umschließen, und das leistet im einfachsten Fall eine Kugeloberfläche.



Oberfläche der Kugel vom Radius  $r$ :  
 $A = 4\pi \cdot r^2$

Wenn durch Verbindung einer Lampe mit Reflektor und Kondensor die Strahlen in eine bestimmte Richtung geleitet werden, nennt man das eine Leuchte.



Fläche in diesem Fall:  $A_1$

## Technische Optik 13

7 von 37

Prof. Dr. Ulrich Sowada  
Institut für Mechatronik  
Fachhochschule Kiel

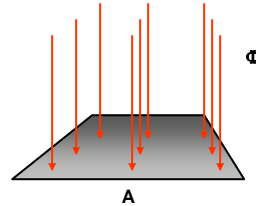
1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
5.1 Lichtstrom	5.2 Beleuchtungsstärke	5.3 Lichtstärke	5.4 Leuchtdichte	

Die **Beleuchtungsstärke E** ist ein Maß für den Lichtstrom, der pro Flächeneinheit auf eine Oberfläche auftrifft, bewertet nach der Sichtbarkeit.

Die Einheit ist  $[E] = \text{lm} / \text{m}^2 = \text{lx (Lux)}$ .

Das Bild zeigt schematisch einen Lichtstrom  $\Phi$ , der auf eine Fläche der Größe A einfällt:

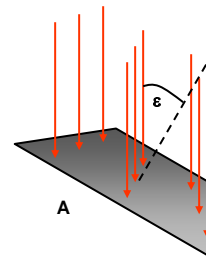
$$E = \Phi / A$$



Wenn zwischen Einfallsrichtung und Flächennormale ein Winkel  $\varepsilon$  liegt, gilt

$$E = (\Phi / A) \cdot \cos(\varepsilon)$$

Die Beleuchtungsstärke E ist am größten, wenn die Empfängerfläche zur einfallenden Strahlung den Einfallswinkel  $\varepsilon = 0^\circ$  bildet.



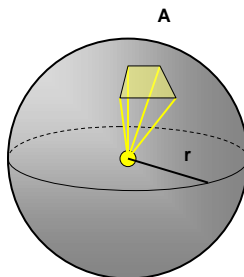
## Technische Optik 13

8 von 37

Prof. Dr. Ulrich Sowada  
Institut für Mechatronik  
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
5.1 Lichtstrom	5.2 Beleuchtungsstärke	5.3 Lichtstärke	5.4 Leuchtdichte	

Die **Lichtstärke I** ist ein Maß für den Strom an Photonen (Anzahl pro Sekunde), die pro Raumwinkel  $\Omega$  von einer Lichtquelle ausgehen, bewertet nach ihrer Sichtbarkeit. Die SI-Einheit ist gleich  $[I] = \text{lm} / \text{sr} = \text{cd (Candela)}$ . Das Wort wird auf der zweiten Silbe betont.



Wir gehen von einer Kugel mit dem Radius r aus.

Im Kugelmittelpunkt ist eine Lichtquelle.

Ein Stück A der Kugeloberfläche wird beleuchtet. Die Randstrahlen treffen den Rand dieser Fläche, bei einer eckigen Fläche also auch die Ecken.

Die Randstrahlen umschließen ein Gebilde, das man als Raumwinkel  $\Omega$  bezeichnet. Die Einheit ist „Steradian“, abgekürzt sr.

Der Raumwinkel ist definiert als  $\Omega = A / r^2$ . Der größtmögliche Raumwinkel liegt vor, wenn A die gesamte Kugeloberfläche bildet; dann ist  $A = 4\pi \cdot r^2$ . Also hat der größtmögliche Raumwinkel den Wert  $\Omega_{\text{max}} = 4\pi$  sr. Wie auch für Winkel in der Ebene (Radiant, „rad“) steht „sr“ (ausgesprochen: Steradian) nicht für eine physikalische Einheit.

Wenn die Fläche nicht auf der Kugeloberfläche liegt, nimmt man die dorthin projizierte Fläche für A.

## Technische Optik 13

9 von 37

Prof. Dr. Ulrich Sowada  
Institut für Mechatronik  
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
5.1 Lichtstrom	5.2 Beleuchtungsstärke	5.3 Lichtstärke	5.4 Leuchtdichte	

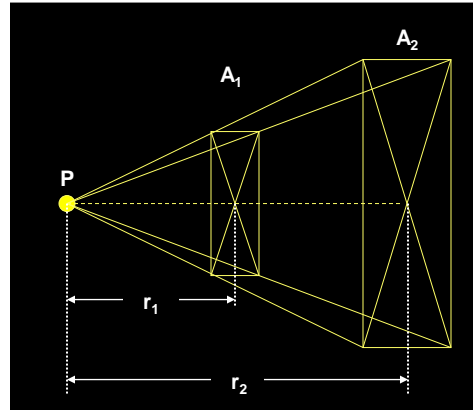
Das Verständnis für den Raumwinkel gründet sich auf der geradlinigen Ausbreitung von Licht im Raum.

Wenn als Quelle ein Punkt P vorliegt, muss als Funktion des Abstandes r einer Messfläche der Größe A gelten:

$$\frac{A_1}{r_1^2} = \frac{A_2}{r_2^2}$$

Dann wird ein gleich großer Lichtstrom durch beide Flächen dringen. Daher definiert man als Raumwinkel  $\Omega$ :

$$\Omega = \frac{A}{r^2}$$



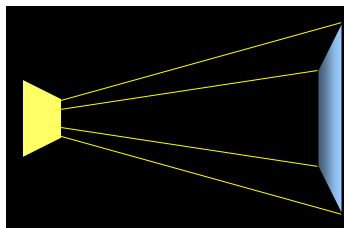
## Technische Optik 13

10 von 37

Prof. Dr. Ulrich Sowada  
Institut für Mechatronik  
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
5.1 Lichtstrom	5.2 Beleuchtungsstärke	5.3 Lichtstärke	5.4 Leuchtdichte	

Die Leuchtdichte L ist ein Maß für die Lichtstärke pro Flächeneinheit, bewertet nach ihrer Sichtbarkeit. Die Einheit ist  $[L] = \text{cd} / \text{m}^2$ .



Die Lichtstärke einer strahlenden Oberfläche hängt z. B. von der Temperatur ab.

Bei gleicher Temperatur lässt sich die Lichtstärke einer Lichtquelle aber auch steigern, indem die Größe der leuchtenden Fläche vergrößert wird.

#### Richtigstellung:

Bei der technischen Spezifikation von Daten-Projektoren wird oft von „ANSI-Lumen“ gesprochen. Das ist seit Juli 2003 eine ungültige Bezeichnung, weil es keine vom ANSI (American National Standards Institute; das ist nicht dasselbe wie NIST) angegebene Messvorschrift mehr gibt. Daher sollte nur noch die Einheit „Lumen“ (lm) verwendet werden (s. auch DIN EN 61947 - 1).

## Technische Optik 13

11 von 37

Prof. Dr. Ulrich Sowada  
Institut für Mechatronik  
Fachhochschule Kiel

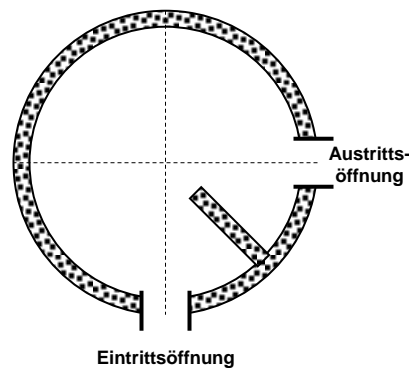
1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
-----------------	---------------	----------	----------------	----------------

Bei Messungen von Licht nach DIN ist immer eine Ulbricht-Kugel vorgeschrieben (Richard Ulbricht, 1849 - 1923). Was bewirkt sie?

Bei der Kugel wird die innere Oberfläche verwendet. Sie ist mit einem rauen Stoff hoher Reflektivität für alle Wellenlängen beschichtet (z. B.  $\text{BaSO}_4$ ).

Die Kugel hat zwei Öffnungen; durch die Eintrittsöffnung kommt Licht hinein. Eine Platte (engl.: "baffle") erzwingt, dass es nur indirekt zur Austrittsöffnung gelangen kann.

So kommt an der Austrittsöffnung nur Licht an, das vorher an der Innenwand der Kugel mindestens einmal reflektiert wurde. Die Richtungsverteilung des austretenden Lichts ist dann durch das Lambertsche Gesetz gegeben, unabhängig von der Richtungsverteilung des eintretenden Lichts.



## Technische Optik 13

12 von 37

Prof. Dr. Ulrich Sowada  
Institut für Mechatronik  
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
-----------------	---------------	----------	----------------	----------------

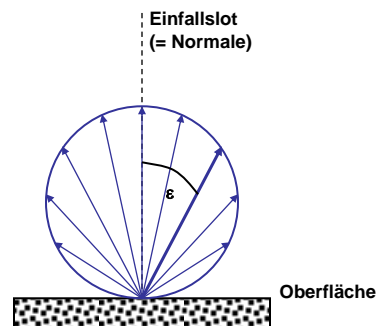
Wenn ein Lichtstrahl auf einer rauen Oberfläche diffus reflektiert wird, wird seine Richtungsverteilung im Idealfall durch das Lambertsche Gesetz beschrieben (Johann Heinrich Lambert, 1728 - 1777).

Wir betrachten ein Flächenstück der Größe A und fragen:

Wieviel Lichtstrom  $\Phi$  wird in welche Richtung (Winkel  $\varepsilon$  gegen die Normale gemessen) abgestrahlt?

Unter idealen Bedingungen ist der Lichtstrom  $\Phi$  proportional zur Größe A der leuchtenden Fläche, zum Cosinus des Winkels  $\varepsilon$  und zur „Helligkeit“ L der Oberfläche:

$$\Phi = A \cdot \cos(\varepsilon) \cdot L$$



Wenn der Lichtstrom in eine bestimmte Richtung durch die Länge eines Vektors symbolisiert wird, liegen die Spitzen der Vektoren, die von einem Punkt ausgehen, auf dem Kreis, der im leuchtenden Punkt die Oberfläche berührt (eine Konsequenz des Satzes von Thales: Alle Winkel im Halbkreis sind rechte).

## Technische Optik 13

13 von 37

Prof. Dr. Ulrich Sowada  
Institut für Mechatronik  
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
-----------------	---------------	----------	----------------	----------------

Wo gibt es Oberflächen, die Licht nach dem **Lambertschen Gesetz** abgeben?

Die Oberfläche einer LED ist ein Lambert-Strahler. Interessante Anwendungen von Weißlicht-LED haben sich mit der neu verfügbaren Lichtausbeute für Tageslicht-Leuchten in der Automobiltechnik ergeben.

12 Weißlicht-LED von Osram Opto Semiconductors sorgen in jeder Frontleuchte des Audi A4 für ...



## Technische Optik 13

14 von 37

Prof. Dr. Ulrich Sowada  
Institut für Mechatronik  
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
-----------------	---------------	----------	----------------	----------------

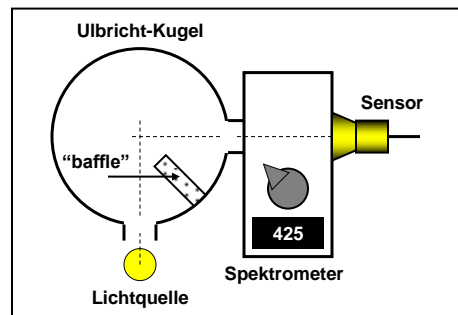
Am Anfang steht die Bestimmung der **spektralen Strahldichte**  $\Phi_{e,\lambda}$ . Der Index „e“ deutet eine Leistungs- oder Energiemessung (SI-Einheit), der Index „ $\lambda$ “ die Wellenlängenabhängigkeit an. Ohne Index ist  $\Phi$  der helligkeitsbewertete Lichtstrom.

Zur Vorstellung dessen, was diese Größe  $\Phi_{e,\lambda}$  bedeutet, zeigt die Abbildung ein Messverfahren, mit dem  $\Phi_{e,\lambda}$  bestimmt wird.

Das Licht einer Lichtquelle wird in eine Ulbricht-Kugel gegeben. Dort wird es vielfach diffus reflektiert.

Ein angeschlossenes Gitter-Spektrometer lässt eine eingestellte Wellenlänge zum Sensor durch.

Das Sensor-Signal ist ein Maß für die spektrale Strahldichte  $\Phi_{e,\lambda}$  bei der eingestellten Wellenlänge  $\lambda$  und wird als Funktion von  $\lambda$  registriert.



Diese Messung wird zunächst mit einer kalibrierten Lichtquelle durchgeführt (Sekundärstandard); ihre spektrale Strahldichte  $\Phi_{e,\lambda}$  als Funktion der Wellenlänge ist bekannt („Normlampe“).

## Technische Optik 13

15 von 37

Prof. Dr. Ulrich Sowada  
Institut für Mechatronik  
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
-----------------	---------------	----------	----------------	----------------

Zur Wirkung der Ulbricht-Kugel (Richard Ulbricht, 1849 - 1923): Die richtige Anwendung eines Gitter-Spektrometers setzt die Beleuchtung des Eintrittsspalts mit divergentem Licht voraus, damit das Gitter möglichst vollständig bestrahlt wird. (Warum?)

Das Auflösungsvermögen des Spektrometers ist proportional zur Zahl der beleuchteten Gitterlinien. Daher ist es vorteilhaft, das Gitter vollständig auszuleuchten.

Eine Ulbricht-Kugel (englisch: "integrating sphere") hat die Aufgabe, durch eine Austrittsöffnung mit gleichmäßiger Helligkeit Strahlung unter großer Divergenz auszugeben, unabhängig davon wie parallel die eintretende Strahlung war. Die Kugel ist innen mit einer Schicht (für den sichtbaren Spektralbereich z. B.  $\text{BaSO}_4$ , für den IR-Bereich Gold) versehen, die für einen möglichst breiten Wellenlängen-Bereich einen sehr hohen Wert der diffusen Reflektivität besitzt (wie das erreicht wird, ist ein Firmen-Geheimnis des Herstellers; s. [www.Labsphere.com](http://www.Labsphere.com)).

Bei der Messung von Laserstrahlung müssen Kohärenzeffekte vermieden werden; sonst entstehen auf der Sensor-Oberfläche destruktive und konstruktive Interferenzen, die zu starken Schwankungen des Sensor-Signals führen. Das leistet eine Ulbricht-Kugel, weil die austretenden Strahlen durch diffuse Reflexion unterschiedlich lange Wege zurückgelegt haben.

## Technische Optik 13

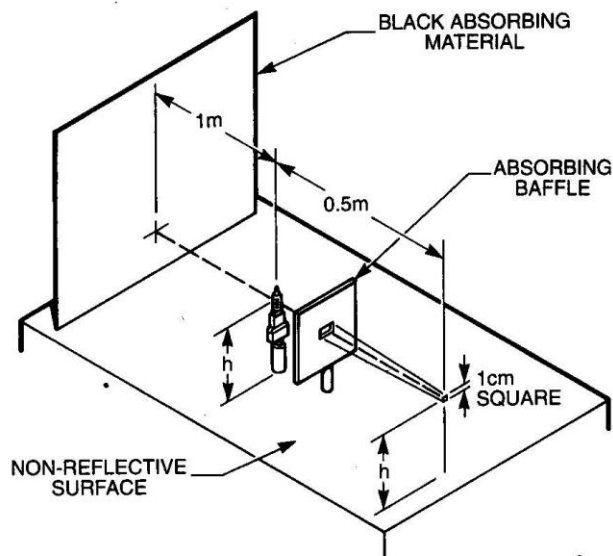
16 von 37

Prof. Dr. Ulrich Sowada  
Institut für Mechatronik  
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
-----------------	---------------	----------	----------------	----------------

Ein Sekundärstandard (in unserem Labor eine Wolfram-Halogenlampe mit einer elektrischen Leistung von 45 W) ist kalibriert für die Bestrahlung eines Flächenstücks von  $1 \text{ cm}^2$  Größe in 50 cm Abstand.

Die Kalibrierung stimmt nur für direkte Strahlen. Daher müssen Strahlen, die von der Rückwand oder der Bodenplatte reflektiert werden, daran gehindert werden, die Eingangsöffnung der Ulbricht-Kugel zu erreichen.





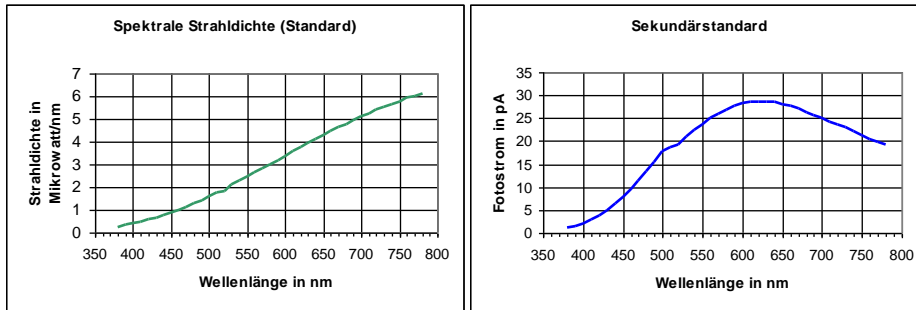
## Technische Optik 13

17 von 37

Prof. Dr. Ulrich Sowada  
Institut für Mechatronik  
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
-----------------	---------------	----------	----------------	----------------

Der Sekundärstandard wurde nach Vorschrift in einem abgedunkelten Laborraum aufgestellt und das in 50 cm Abstand durch eine Fläche von 1 cm<sup>2</sup> in die Ulbricht-Kugel eintretende Licht für die Messung benutzt.



Aus den Kalibrierdaten (links) und dem gemessenen Photostrom (rechts) lässt sich für jede Wellenlänge der Zusammenhang zwischen Photostrom  $i_p$  und Strahldichte  $\Phi_{e,\lambda}$  bestimmen. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Umwandlung von Strahlungsleistung in Sensorstrom von der Wellenlänge abhängig ist.

## Technische Optik 13

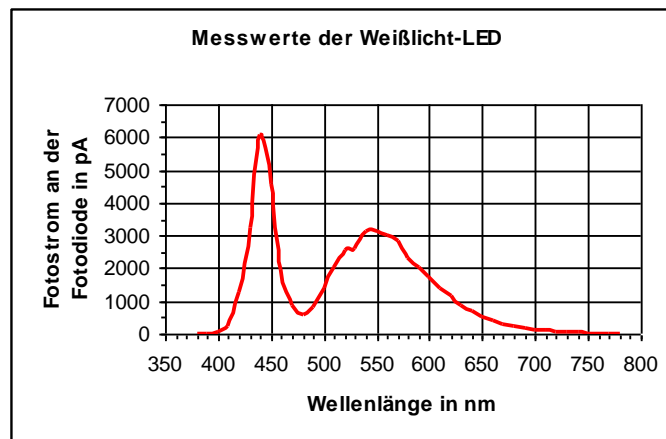
18 von 37

Prof. Dr. Ulrich Sowada  
Institut für Mechatronik  
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
-----------------	---------------	----------	----------------	----------------

Eine Weißlicht-LED wird anschließend direkt in die Ulbricht-Kugel gehalten und der Photostrom der Diode am Ausgang des Spektrometers registriert.

Der interessante Wellenlängen-Bereich erstreckt sich von 380 bis 780 nm.



Bei diesem neuartigen Typ von Lichtquelle entsteht die Empfindung „weiß“ durch eine Mischung von blau-violetten (um 440 nm) und gelb-grünen (um 550 nm) Farbanteilen.

## Technische Optik 13

19 von 37

Prof. Dr. Ulrich Sowada  
Institut für Mechatronik  
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen

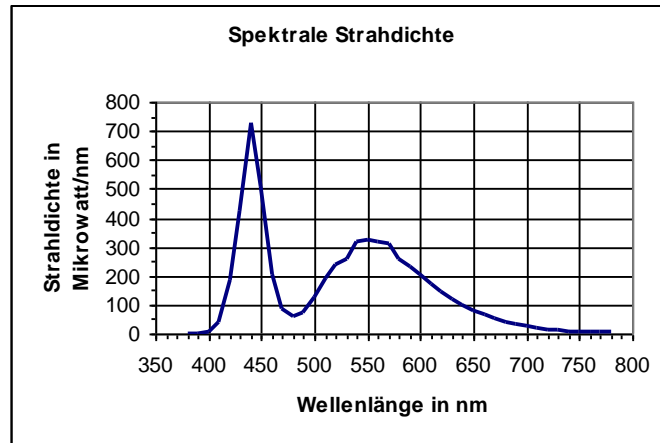
2 Lichtwellen

3 Linsen

4 Lichtmessung

5 Lichttechnik

Für jede eingestellte Wellenlänge kann durch Dreisatz aus dem Fotostrom des Sekundärstandards und seiner spektralen Strahlidichte die spektrale Strahlidichte  $\Phi_{e,\lambda}$  für die Weißlicht-LED berechnet werden. Die Grafik zeigt die ermittelten Werte für die konkrete Weißlicht-LED.



Diese Werte sind höher als die des Sekundärstandards, denn von der LED wurde die gesamte Strahlung in die Ulbricht-Kugel gegeben, während vom Sekundärstandard (50 W Wolfram-Halogen-Lampe) nur ein kleiner Teil in 50 cm Abstand in die Ulbricht-Kugel eintritt.

## Technische Optik 13

20 von 37

Prof. Dr. Ulrich Sowada  
Institut für Mechatronik  
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen

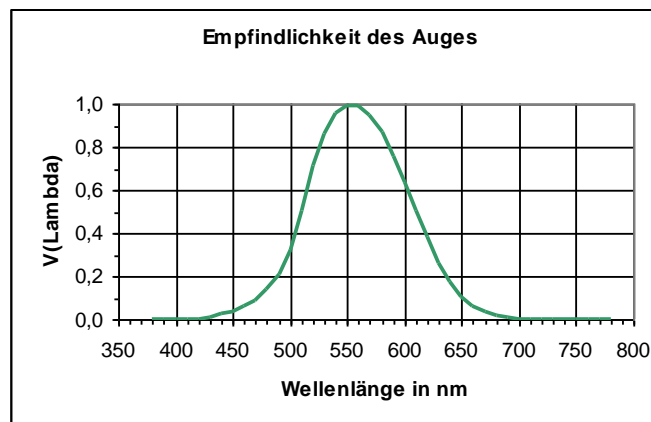
2 Lichtwellen

3 Linsen

4 Lichtmessung

5 Lichttechnik

Je nach Wellenlänge empfindet das Auge gleiche Lichtleistungen verschieden hell. Das beschreibt die  $V_\lambda$ -Kurve. Die Werte der  $V_\lambda$ -Kurve sind in der DIN 5032 (Lichtmessung) tabelliert. Sie wurden durch Vergleiche der Empfindung vieler Menschen ermittelt.



Bei  $\lambda = 555 \text{ nm}$  ist  $V_\lambda = 1$ ; zu kürzeren und zu längeren Wellenlängen hin fällt der Wert ab und erreicht bei 380 nm (am kurzwelligen Ende) und bei 780 nm (am langwelligen Ende) die Werte  $V_\lambda = 0$ . Dadurch wird der sichtbare Spektralbereich erfasst.

## Technische Optik 13

21 von 37

Prof. Dr. Ulrich Sowada  
Institut für Mechatronik  
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen

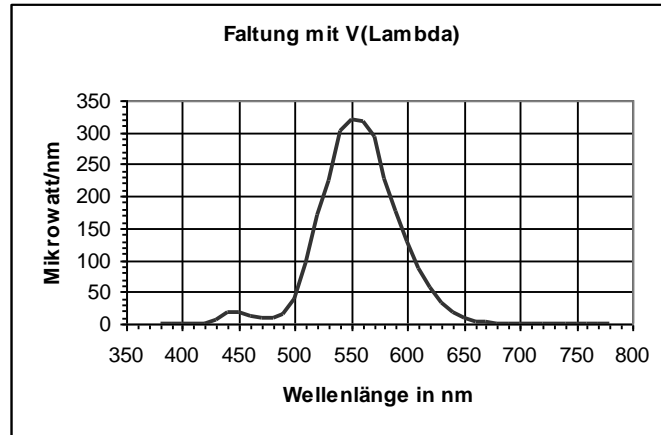
2 Lichtwellen

3 Linsen

4 Lichtmessung

5 Lichttechnik

Das Produkt der spektralen Strahldichte  $\Phi_{e,\lambda}$  für die Weißlicht-LED mit der  $V_\lambda$ -Kurve führt zu einer veränderten Form. Diese Form ist fast identisch mit derjenigen der Sonne, nachdem sie mit  $V_\lambda$  multipliziert wurde. Von dem Maximum der spektralen Strahldichte bei 440 nm ist nur noch eine kleine Beule übrig.



Wegen des kleinen Wertes von  $V_\lambda$  bei Wellenlängen um und unter 450 nm liegt der für die Helligkeitsbewertung dominante Teil der Strahlung um 550 nm herum.

## Technische Optik 13

22 von 37

Prof. Dr. Ulrich Sowada  
Institut für Mechatronik  
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen

2 Lichtwellen

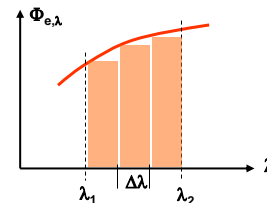
3 Linsen

4 Lichtmessung

5 Lichttechnik

Was bedeutet es, die Leistung von Licht als Funktion der Wellenlänge anzugeben?

Wenn für eine kontinuierliche Lichtquelle die Veränderung der Strahldichte  $\Phi_{e,\lambda}$  als Funktion der Wellenlänge  $\lambda$  gering ist, kann die Lichtleistung  $P$  statt durch Integration recht genau durch Addition der Rechtecke berechnet werden; das ist so wie bei den Ober- und Untersummen bei der Herleitung des Begriffs des bestimmten Integrals.



$$P = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_{e,\lambda} * d\lambda \approx \sum_{n=1}^N \Phi_{e,\lambda,n} * \Delta\lambda$$

Für die Berechnung der „Helligkeit“ wird numerisch integriert; weil die „Funktionen“  $\Phi_{e,\lambda}$  und  $V_\lambda$  nicht in geschlossener Form bekannt sind, wird also numerisch integriert:

$$\text{Helligkeit} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_{e,\lambda} * V_\lambda * d\lambda \approx \sum_{n=1}^N \Phi_{e,\lambda,n} * V_\lambda * \Delta\lambda$$

## Technische Optik 13

23 von 37

Prof. Dr. Ulrich Sowada  
Institut für Mechatronik  
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
-----------------	---------------	----------	----------------	----------------

Aus der spektralen Strahldichte  $\Phi_{e,\lambda}$  wird der Lichtstrom  $\Phi$  nach einer Vorschrift der CIE (Commission Internationale d'Éclairage) ermittelt:

$$\Phi = K_m * \int_{380nm}^{780nm} \Phi_{e,\lambda} * V_\lambda * d\lambda$$

Photometrisches Strahlungsäquivalent:  $K_m = 683 \text{ lm / W}$

Hellempfindlichkeit des menschlichen Auges:  $V_\lambda$

Die Anbindung der lichttechnischen Einheiten an die anderen SI-Einheiten ist durch das photometrische Strahlungsäquivalent  $K_m$  (dreistellige Genauigkeit!) vorgegeben. Mehr als drei signifikante Stellen sind unzulässig!

Für unsere Weißlicht-LED erhalten wir

$$\Phi = 18 \text{ lm.}$$

Durch Messung von Strom und Spannung wurde die aufgenommene Leistung zu  $P = 1 \text{ W}$  bestimmt. Diese Weißlicht-LED hat also eine Lichtausbeute von  $18 \text{ lm/W}$ .

## Technische Optik 13

24 von 37

Prof. Dr. Ulrich Sowada  
Institut für Mechatronik  
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
-----------------	---------------	----------	----------------	----------------

Der Lichtstrom  $\Phi$  repräsentiert die von einer Lichtquelle durch eine bestimmte Fläche hindurch tretende Strahlungsleistung, bewertet mit der wellenlängenabhängigen Sichtbarkeit.

Wenn wir diese Fläche gedanklich auf einer Kugel um die Lichtquelle herum anordnen, wird durch den Lichtstrom die gesamte Lichtausbeute der Lichtquelle angegeben. Für verschiedene Lichtquellen, die aus elektrischer Energie Licht erzeugen, kann also eine Effizienz dadurch angegeben werden, dass man den Lichtstrom durch die aufgenommene elektrische Leistung dividiert:

Lampe	Effizienz in lm / W
Glühlampe	7
Halogen-Glühlampe	15
Leuchtstoff-Röhre	35
Weißlicht-LED	bis zu 70

Die Weißlicht-LED im Audi A4 geben einen Lichtstrom von 18 lm ab.

In das Modell Audi RS 6 wird eine andere Sorte mit 50 lm Lichtstrom eingebaut.

## Technische Optik 13

25 von 37

Prof. Dr. Ulrich Sowada  
Institut für Mechatronik  
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
-----------------	---------------	----------	----------------	----------------

Beispiel:

Eine Weißlicht-LED sendet in einen Winkel von  $120^\circ$  einen Lichtstrom von 75 lm aus. Wie groß ist die Beleuchtungsstärke, wenn eine Fläche von 50 cm \* 50 cm ausgeleuchtet wird?

Die beleuchtete Fläche hat eine Größe von  $A = 0,25 \text{ m}^2$ . Sie wird nach der Formel  $E = \Phi/A$  mit  $E = 300 \text{ lx}$  beleuchtet.

Wenn der Lichtstrom schräg einfällt (Winkel  $\alpha$  gegen die Flächen-Normale), dann muss dieser Wert noch mit  $\cos(\alpha)$  multipliziert werden.

Zum Vergleich: Ein Stück Papier wird in einer Vollmondnacht mit 12 lx beleuchtet, am hellen Tag durch die Sonne mit 30 000 lx.

## Technische Optik 13

26 von 37

Prof. Dr. Ulrich Sowada  
Institut für Mechatronik  
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
-----------------	---------------	----------	----------------	----------------

Beispiel:

Eine Weißlicht-LED sendet in einen Winkel von  $120^\circ$  einen Lichtstrom von 75 lm aus. Wie groß ist die Lichtstärke I?

Wir wollen die Gleichung benutzen: 
$$I = \frac{\Phi}{\Omega}$$

Wir müssen zunächst den Raumwinkel bestimmen. Die beleuchtete Fläche ist kreisförmig. Im Abstand  $r = 1 \text{ m}$  hat sie den Radius:

$$R = 1 \text{ m} * \tan(60^\circ) = 1,73 \text{ m}$$

Wenn R um r rotiert, entsteht ein Kreis mit der Fläche A:

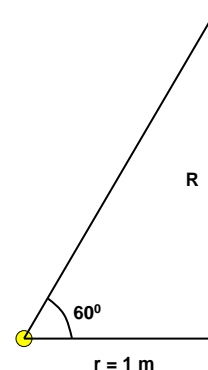
$$A = 9,4 \text{ m}^2$$

Der Raumwinkel in Steradian beträgt:

$$\Omega = 9,4 \text{ sr}$$

Für die Lichtstärke ergibt sich:

$$I = 8 \text{ cd}$$



## Technische Optik 13

27 von 37

Prof. Dr. Ulrich Sowada  
Institut für Mechatronik  
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
-----------------	---------------	----------	----------------	----------------

Die Leuchtdichte  $L$  gibt an, welche Lichtstärke  $I$  pro Fläche vorliegt:  $L = I / A$ . Die Einheit ist  $\text{cd} / \text{m}^2$ .

Typische Werte von Leuchtdichten:

Objekt	Leuchtdichte in $\text{cd} / \text{m}^2$
Sonnenscheibe am Mittag	$1,6 \cdot 10^9$
Sonnenscheibe am Horizont	$10^7$
Matte Glühlampe	$10^5$
Oberfläche einer Leuchtstoffröhre	$10^4$
LED-Anzeige für Außenbereich	5000
Oberfläche des Vollmondes	2500

Die Leuchtdichte ist das, was Menschen als „Helligkeit“ wahrnehmen. Bei zu hohen Werten entsteht Blendung.

## Technische Optik 13

28 von 37

Prof. Dr. Ulrich Sowada  
Institut für Mechatronik  
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
-----------------	---------------	----------	----------------	----------------

**Beispiel:**

Die Beleuchtungsstärke auf einer Projektionsleinwand beträgt  $500 \text{ lx}$ . Der Projektor ist  $5 \text{ m}$  entfernt. Wie groß ist die Lichtstärke?

Pro Quadratmeter fällt bei  $E = 500 \text{ lx}$  ein Lichtstrom von  $\Phi = 500 \text{ lm}$  an.

Der Raumwinkel hat die Größe  $\Omega = 1 \text{ m}^2 / (25 \text{ m}^2) = 0,04 \text{ sr}$ .

Die Lichtstärke beträgt  $I = \Phi / \Omega = 12500 \text{ cd}$ .



## Technische Optik 13

29 von 37

Prof. Dr. Ulrich Sowada  
Institut für Mechatronik  
Fachhochschule Kiel

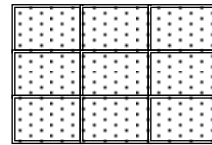
1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
-----------------	---------------	----------	----------------	----------------

Zur Messung der Helligkeit von Datenprojektoren wurden bis 2003 die Normen IT7.227-1997 und IT7.227-1998 des *American National Standards Institutes* verwendet. Diese beiden Normen wurden 2003 zurückgezogen, und man verwendet heute EN 61947-1.

Daher ist es unzulässig, heute beim Verkauf von Projektoren den Lichtstrom in ANSI-Lumen anzugeben.

Die Norm EN 61947-1 sieht vor: Bei der Messung des Lichtstroms wird die Projektionsfläche in 9 Felder eingeteilt und die Beleuchtungsstärke  $E$  in jedem Feld gemessen. Dann werden diese Werte gemittelt und mit der Größe der Projektionsfläche  $A$  multipliziert:

$$\Phi = E \cdot A$$



## Technische Optik 13

30 von 37

Prof. Dr. Ulrich Sowada  
Institut für Mechatronik  
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
-----------------	---------------	----------	----------------	----------------

Für die Aufgabe der Farbmeterik soll einem Farbreiz, der ins Auge gelangt, ein oder mehrere Zahlenwerte zugewiesen werden.

Wir müssen dabei zwischen selbst leuchtenden Objekten (Display, LED) und beleuchteten Objekten (bedrucktes Papier, lackiertes Blech) unterscheiden. Im ersten Fall entsteht der Farbreiz durch die Eigenschaften der Objekte, im zweiten Fall durch eine Kombination der einfallenden Strahlungszusammensetzung mit den beleuchteten Objekten: Ein gedrucktes Bild ändert seine Farbtöne, wenn Licht mit anderer spektraler Zusammensetzung benutzt wird.

## Technische Optik 13

31 von 37

Prof. Dr. Ulrich Sowada  
Institut für Mechatronik  
Fachhochschule Kiel

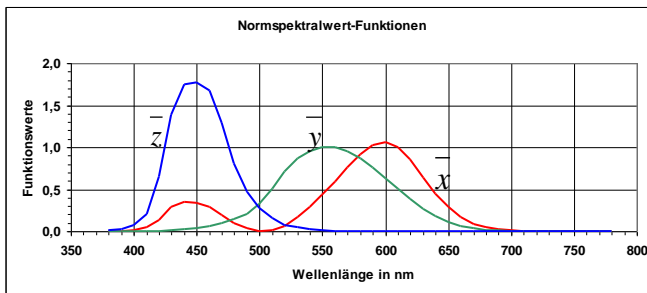
1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
-----------------	---------------	----------	----------------	----------------

Der Messwert für den Eindruck „Farbe“ wird durch ein von der CIE vorgegebenes Verfahren ermittelt. Die Methode ist in DIN 5033 „Farbmessung“ beschrieben.

Es werden drei Normspektralwert-Funktionen eingeführt:

$$\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$$

Ihre Werte als Funktion der Wellenlänge entnimmt man DIN 5033. Grafisch aufgetragen erkennt man drei Kurven, die im roten, grünen und blauen Spektralbereich ihre Maxima haben.



$\lambda$	$\bar{x}$	$\bar{y}$	$\bar{z}$
380	0.0014	0.0000	0.0065
390	0.0042	0.0001	0.0201
400	0.0143	0.0004	0.0679
410	0.0435	0.0012	0.2074
420	0.1344	0.0040	0.6456
430	0.2839	0.0116	1.3856
440	0.3483	0.0230	1.7471
450	0.3362	0.0380	1.7721
460	0.2908	0.0600	1.6692
470	0.1954	0.0910	1.2876
480	0.0956	0.1390	0.8130
490	0.0320	0.2080	0.4652
500	0.0049	0.3230	0.2720
510	0.0083	0.5030	0.1582
520	0.0633	0.7100	0.0782
530	0.1655	0.8620	0.0422
540	0.2904	0.9540	0.0203
550	0.4334	0.9950	0.0087
560	0.5945	0.9950	0.0039
570	0.7621	0.9520	0.0021
580	0.9163	0.8700	0.0017
590	1.0263	0.7570	0.0011
600	1.0622	0.6310	0.0008
610	1.0026	0.5030	0.0003
620	0.8544	0.3810	0.0002
630	0.6424	0.2650	0.0000
640	0.4479	0.1750	0.0000
650	0.2835	0.1070	0.0000
660	0.1649	0.0610	0.0000
670	0.0874	0.0320	0.0000
680	0.0468	0.0170	0.0000
690	0.0227	0.0082	0.0000
700	0.0114	0.0041	0.0000
710	0.0058	0.0021	0.0000
720	0.0029	0.0010	0.0000
730	0.0014	0.0005	0.0000
740	0.0007	0.0002	0.0000
750	0.0003	0.0001	0.0000
760	0.0002	0.0001	0.0000
770	0.0001	0.0000	0.0000
780	0.0000	0.0000	0.0000

## Technische Optik 13

32 von 37

Prof. Dr. Ulrich Sowada  
Institut für Mechatronik  
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
-----------------	---------------	----------	----------------	----------------

Für die Berechnung des Lichtstroms  $\Phi$  wurden die spektrale Strahldichte  $\Phi_{e,\lambda}$  und die  $V_\lambda$ -Kurve miteinander multipliziert und darüber numerisch integriert.

Für die messtechnische Erfassung der Farbe nehmen wir die spektrale Strahldichte und multiplizieren mit diesen drei Normspektralwert-Funktionen, um anschließend zu integrieren. Das liefert die Normspektralwerte:

$$X = \int_{380\text{nm}}^{780\text{nm}} \Phi_{e,\lambda} * \bar{x}(\lambda) * d\lambda \quad Y = \int_{380\text{nm}}^{780\text{nm}} \Phi_{e,\lambda} * \bar{y}(\lambda) * d\lambda \quad Z = \int_{380\text{nm}}^{780\text{nm}} \Phi_{e,\lambda} * \bar{z}(\lambda) * d\lambda$$

Für die numerische Berechnung der Integrale wird auch hier die Rechteck-Näherung angewendet. Aus den Normfarbwerten X, Y und Z berechnet man die Farbkoordinaten x und y der Normfarbtafel:

$$x = \frac{X}{X + Y + Z} \quad y = \frac{Y}{X + Y + Z}$$



## Technische Optik 13

33 von 37

Prof. Dr. Ulrich Sowada  
Institut für Mechatronik  
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
-----------------	---------------	----------	----------------	----------------

Die Verhältnisse werden für Licht aus drei ausgewählten einzelnen Wellenlängen (monochromatisches Licht) stark vereinfacht.

Beispiel:

Gegeben sind die Normspektralwert-Funktionen für 450, 550 und 650 nm:

$\lambda / \text{nm}$	$\bar{x}$	$\bar{y}$	$\bar{z}$	Farbeindruck:
450	0,3362	0,0380	1,7721	blau
550	0,4334	0,9950	0,0087	grün
650	0,2835	0,1070	0,0000	rot

Wie lauten die Koordinaten in der Normfarbtafel?

## Technische Optik 13

34 von 37

Prof. Dr. Ulrich Sowada  
Institut für Mechatronik  
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
-----------------	---------------	----------	----------------	----------------

Von den Integralen zur Berechnung der Normfarbwerte bleiben nur jeweils die Anteile bei den gegebenen Wellenlängen übrig. Daher bekommen wir ( $\lambda = 450 \text{ nm}$ ):

$$x_1 = \frac{0,3362}{0,3362 + 0,0380 + 1,7721} = 0,1566 \quad y_1 = \frac{0,0380}{0,3362 + 0,0380 + 1,7721} = 0,0177$$

Für die anderen Wellenlängen ( $\lambda = 550 \text{ nm}$  und  $\lambda = 650 \text{ nm}$ ) erhalten wir:

$$x_2 = \frac{0,4334}{0,4334 + 0,9950 + 0,0087} = 0,3016 \quad y_2 = \frac{0,9950}{0,4334 + 0,9950 + 0,0087} = 0,6924$$

$$x_3 = \frac{0,2835}{0,2835 + 0,1070 + 0,0000} = 0,7260 \quad y_3 = \frac{0,1070}{0,2835 + 0,1070 + 0,0000} = 0,2740$$

Auf diese Weise lassen sich von selbstleuchtenden, monochromatischen Lichtquellen die Koordinaten der Farborte in der Normfarbtafel bestimmen.

## Technische Optik 13

35 von 37

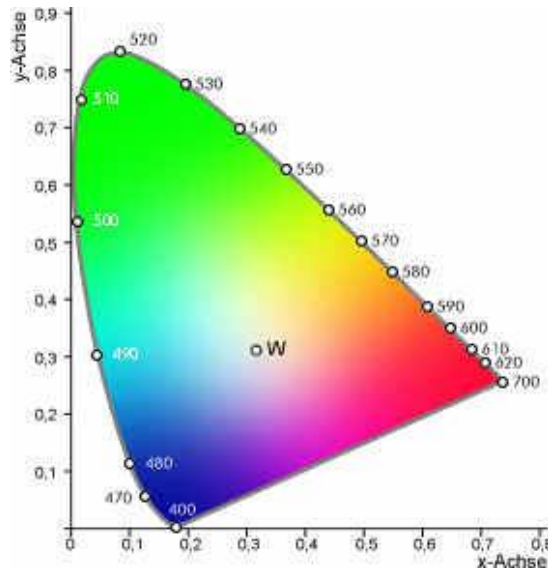
Prof. Dr. Ulrich Sowada  
Institut für Mechatronik  
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
-----------------	---------------	----------	----------------	----------------

In der Normfarbtafel sind oft um einen Schuhsohl-artigen Bereich herum Zahlen eingetragen; das sind die Wellenlängen, denn der Rand der Schuhsohle wird durch monochromatisches Licht hergestellt.

Der Bereich enthält alle Farbtöne, die das menschliche Auge erkennen kann. Farben auf dem Rand lassen sich mit einem Bildschirm oder auf bedrucktem Papier nicht herstellen.

Im Inneren ( $x = 0,33$  und  $y = 0,33$ ) liegt der Weißpunkt W (auch „Unbuntpunkt“ genannt). Der Farbton einer Mischfarbe aus zwei Farbtönen liegt auf der Verbindungsgeraden. Für einen flächigen Bereich braucht man mindestens drei Grundfarben.



## Technische Optik 13

36 von 37

Prof. Dr. Ulrich Sowada  
Institut für Mechatronik  
Fachhochschule Kiel

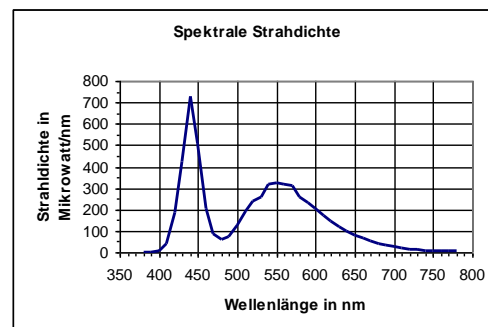
1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
-----------------	---------------	----------	----------------	----------------

Beispiel

Um den Farbton erkennen zu können, empfehlen erfahrene Verkäufer, ins Tageslicht zu gehen. Warum ist zum Beispiel unter Beleuchtung mit einer Weißlicht-LED kein guter Farbeindruck zu bekommen?

Eine Weißlicht-LED erzeugt den Eindruck „weißes Licht“ durch Farbmischung aus zwei Komponenten (blau und orange). Die liegen auf entgegengesetzten Seiten des Weißpunktes und sind daher für einen solchen Trick geeignet, wenn die Leistung aufeinander abgestimmt ist. Wenn ein Objekt (Kleidungsstück oder Schuh) grüne Farbtöne enthält, werden die verfälscht.

Der Grund liegt darin: Bei einfarbiger Beleuchtung kann überhaupt kein Farbeindruck entstehen. Wenn wir aus zwei nahezu einfarbigen Lichtquellen Weißlicht mischen, fehlt die dritte Farbton, um in der Normfarbtafel von der Verbindungsgeraden herunter zu kommen.



## Technische Optik 13

37 von 37

Prof. Dr. Ulrich Sowada  
Institut für Mechatronik  
Fachhochschule Kiel

1 Lichtstrahlen	2 Lichtwellen	3 Linsen	4 Lichtmessung	5 Lichttechnik
-----------------	---------------	----------	----------------	----------------

Natürlich sollte man mit Licht immer vorsichtig umgehen:



*"For God's sake, Edwards. Put the laser pointer away."*

Bild aus dem Magazin "The New Yorker" vom 2. 1. 1999