

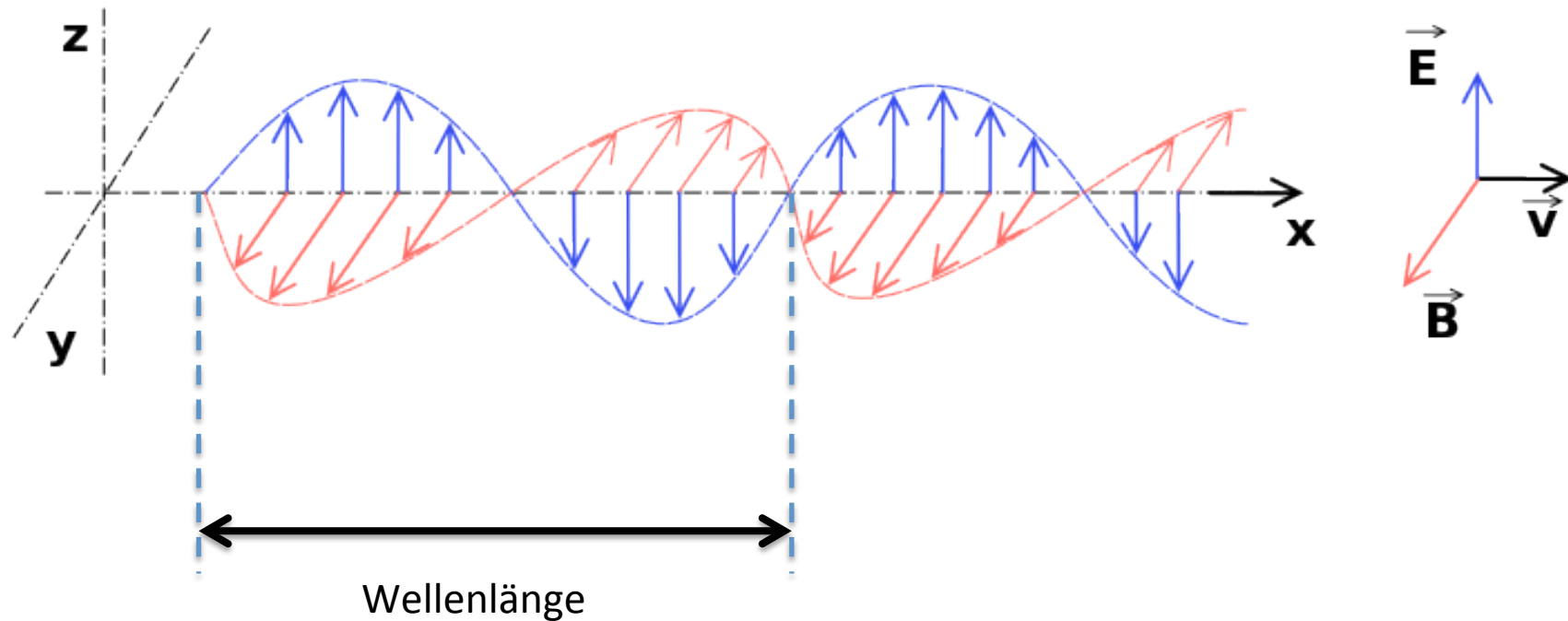
Allgemeine physikalische Betrachtung von Licht und dessen Wirkung

Herbert Störi
Institut für Angewandte Physik
TU Wien

Überblick

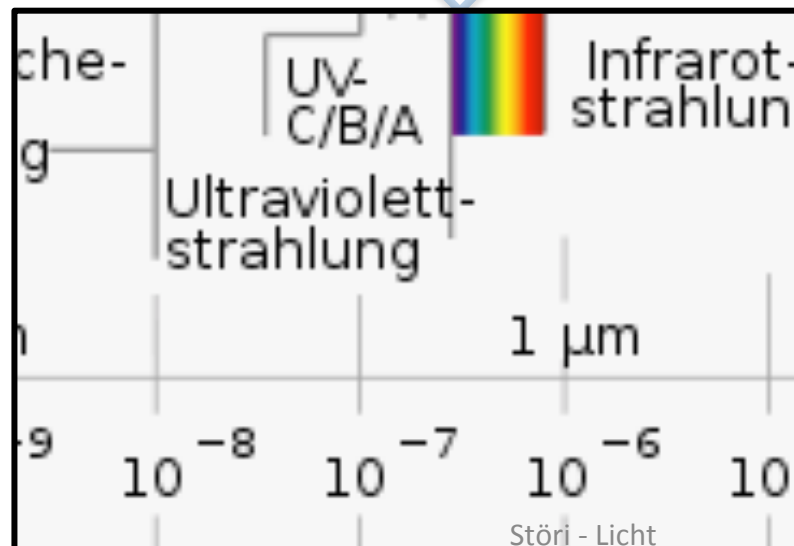
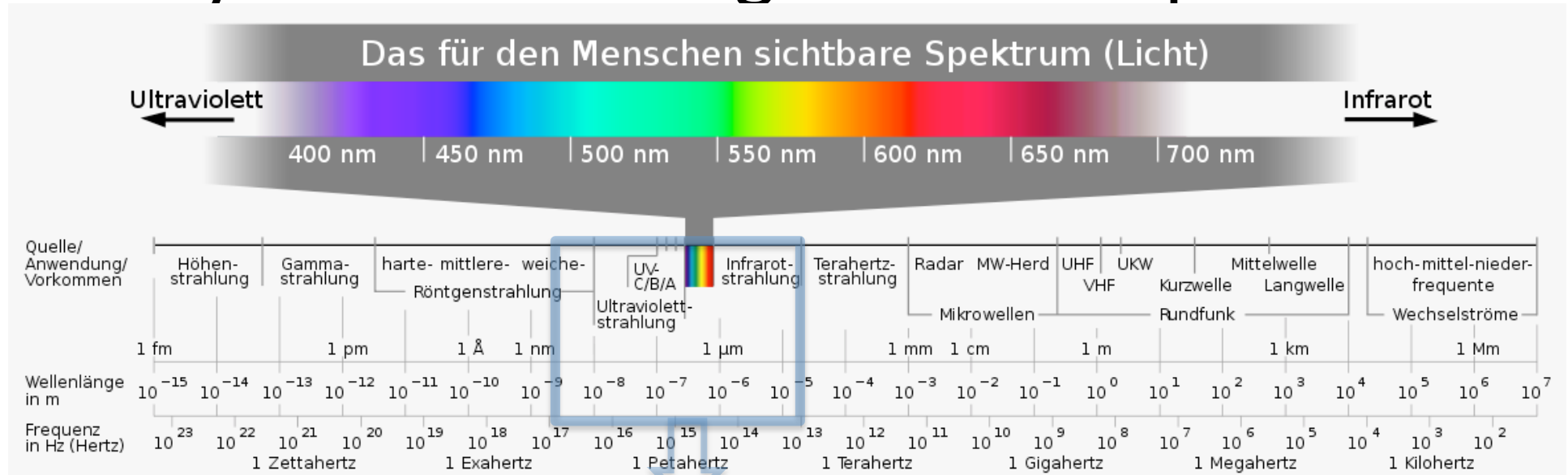
- Physik
 - Natur des Lichts
 - Entstehung
 - Wirkung
- Technik
 - Lichtquellen
- Mensch
 - Wahrnehmung von Helligkeit und Farbe
 - Gefahren

Physik: Elektromagnetische Welle



Quelle: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Onde_electromagnetique.svg

Physik: Elektromagnetisches Spektrum



Die Wellenlänge des sichtbaren Lichts liegt knapp unter 1/1000 mm

Quelle https://de.wikipedia.org/wiki/Elektromagnetisches_Spektrum#/media/File:Electromagnetic_spectrum_c.svg

Physik: Photon, Schwarzer Körper

- Photon

- Elektromagnetische Wellen kommen in kleinen Paketen, genannt **Photonen**
- Die Energie eines Photons ist umgekehrt proportional zur Wellenlänge
 - Kurze Wellen -> Energiereiche Photonen
 - Lange Wellen -> Energiearme Photonen

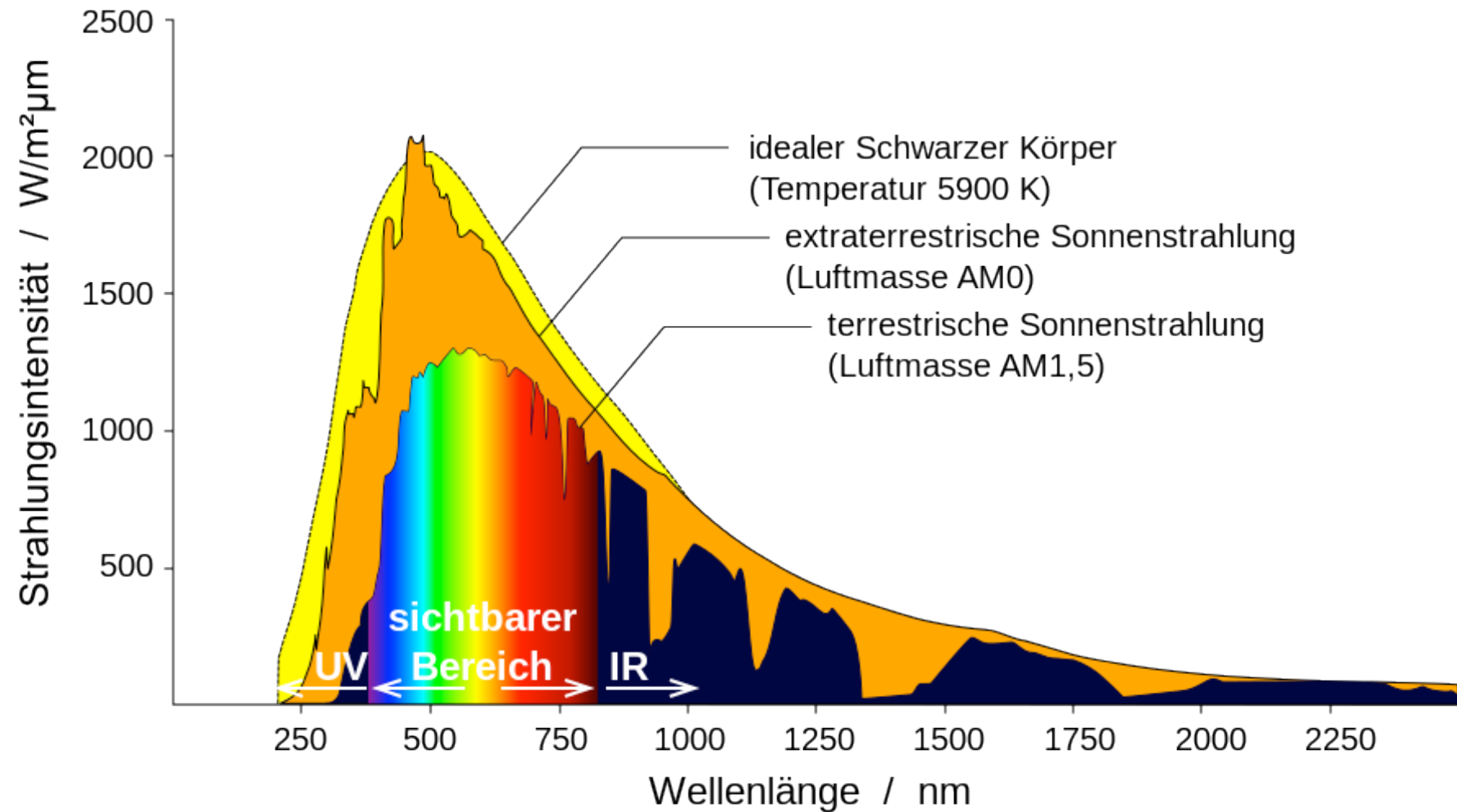
- Schwarzer Körper

- Idealisierung: perfekt schwarz, glüht
- Real: kleines Loch in einem glühenden Hohlraum
- Erzeugt eine Mischung von Photonen aller Wellenlängen
 - Hohe Temperatur -> mehr Strahlung, mehr kurzwellige Photonen
 - Niedrige Temperatur -> weniger Strahlung, eher langwellige Photonen

Entstehung von Photonen

- **Atome**
 - Photonen fixer Wellenlänge(n)
 - Als Lichtquelle für Beleuchtung wenig brauchbar
 - Beispiele:
 - **Niederdruck-Natrium und Quecksilberdampflampen** Anregung durch Elektronen
- **Moleküle**
 - Photonen in einem Bereich von Wellenlängen
 - Beispiele:
 - **Farbstoffe** Anregung: chemisch oder durch kurzwellige Strahlung
 - **OLEDs** Anregung elektrisch
 - **Glühwürmchen** Anregung chemisch??
- **Kristalle**
 - Photonen in einem relativ engen Wellenlängenbereich
 - Mischungen möglich! (Leuchtstoffröhren)
 - Beispiele
 - **Leuchtstoffe** Anregung durch kurzwellige Strahlung oder Elektronen
 - **LEDs** Anregung elektrisch
- **Heiße Körper**
 - Photonen (fast) aller Wellenlängen
 - Beispiele
 - **Glühlampe** Anregung Thermisch
 - **Lichtbogen-Lampen** Anregung durch Elektronen Stör-Licht Xenon-Scheinwerfer, Beamer-Lampen

Spektrum (Sonnenlicht)



Quelle: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Sonne_Strahlungsintensitaet.svg

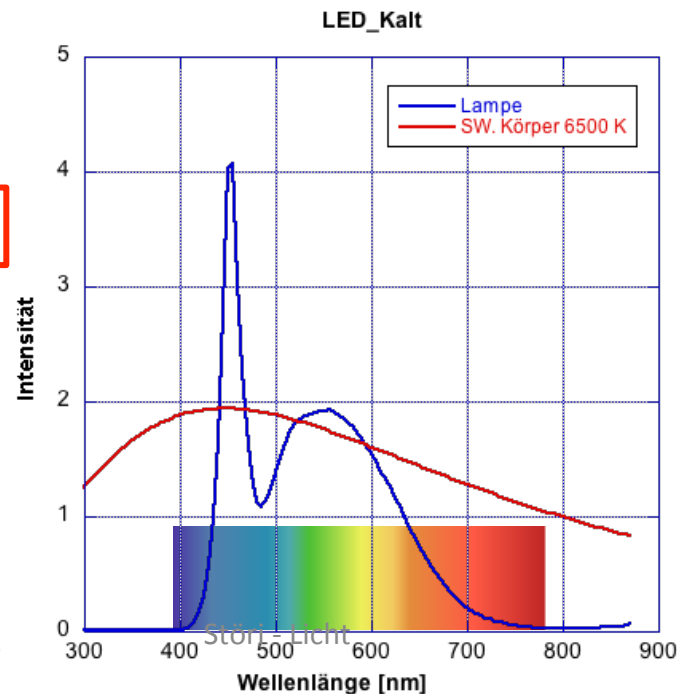
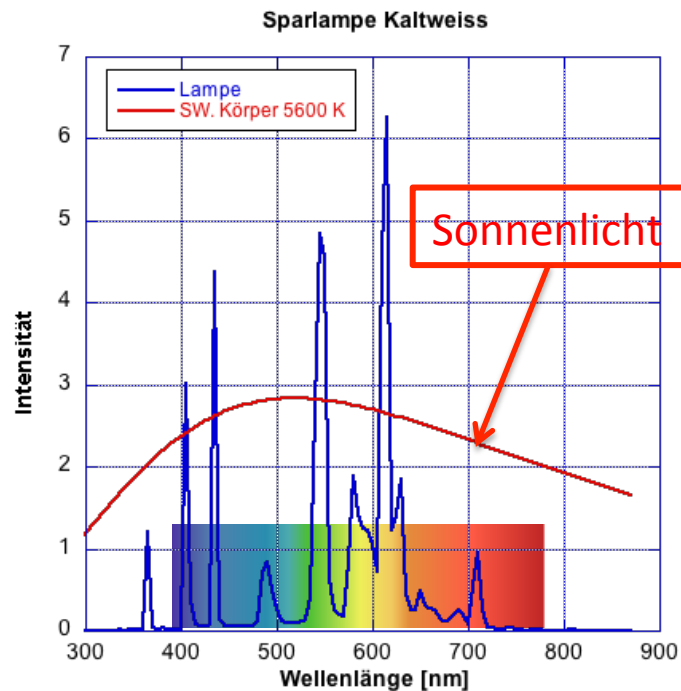
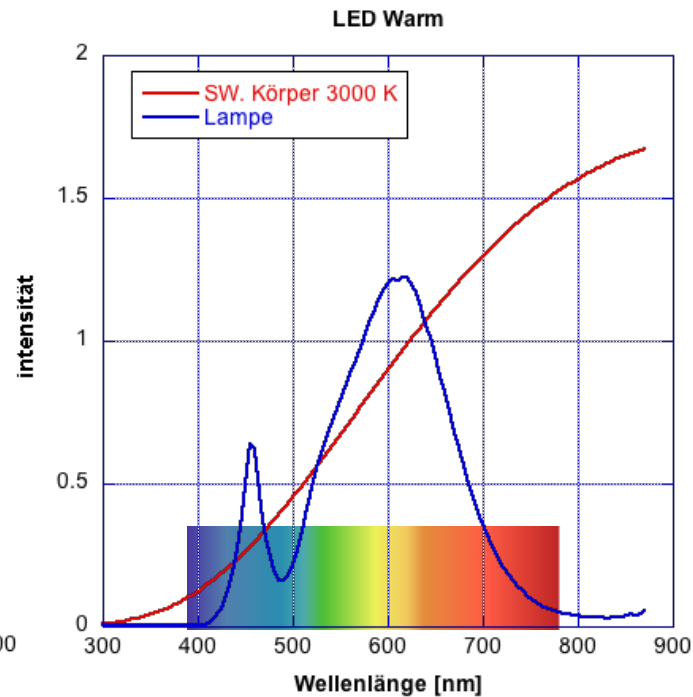
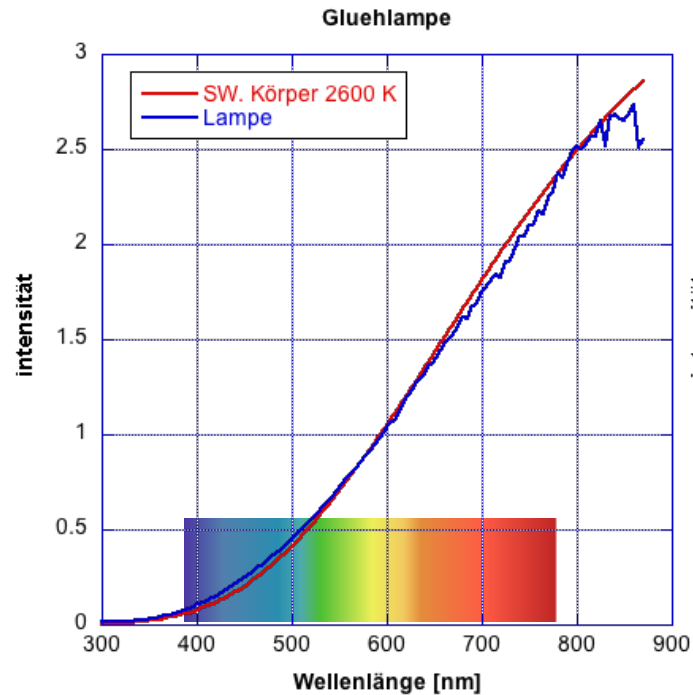
Wirkung von elektromagnetischer Strahlung

- Wärme
 - Deponierte Energie erwärmt Körper
 - Energie einzelner Photonen ist zu gering
 - Beispiele
 - Brennglas
 - Mikrowellen-Herd
 - Badezimmer-Strahler
 - Laserschweißen
 - Thermokamera Erwärmung verändert Widerstand von Mikrobolometern
- Photonen
 - Energie einzelner Photonen wirkt
 - Mindestenergie je Photon erforderlich
 - Beispiele
 - Film Photonen zersetzen Silberjodid
 - Digitalkamera Photonen erzeugen Elektronen-Loch-Paare im Chip
 - Sehzellen Photonen zersetzen Sehfärbstoffe
 - Sonnenbrand Photonen schädigen DNA von Hautzellen

Technik: Lichtquellen

- **Glühlampe**
 - Vorteil: Ähnlich Schwarzkörperstrahlung
 - Problem: Maximale Temperatur 2800 K, Wirkungsgrad max. 3%
- **Bogenlampe (HID, High Intensity Discharge Lamp)**
 - Beispiele: Xenon-Scheinwerfer, Lampen für Beamer
 - Vorteil: Ähnlich Schwarzkörperstrahlung, hohe Temperatur
 - Problem: Technisch aufwendig
- **Fluoreszenzlampe (Neon-Röhre, Sparlampe)**
 - UV-Strahlung des Quecksilbers regt Leuchtstoff an
 - Vorteil: guter Wirkungsgrad (ca. 20%), fast alle Spektren machbar
 - Problem: Unhandlich, Quecksilbergehalt
- **LED (Light Emitting Diode)**
 - Konvertiert elektrische Energie in einem Halbleiter direkt in Licht
 - Wirkungsgrad blauer Dioden über 50%
 - Vorteil: extrem kompakt, exzellenter Wirkungsgrad (bis 50%)
 - Probleme: Schmalere Spektralbereiche
 - Lösung: Viele **verschiedene LEDs** oder **Blaue LED + Leuchtstoff**

Spektren techn. Licht- Quellen kalibriert, Fehler $\pm 20\%$



Quelle Diagramme:
Ferialpraktikum Ivo Wakounig 2014
Diverse Leuchtkörper aus dem Handel –
Nur als Beispiele
Quelle Spektrum:
http://www.bs-wiki.de/mediawiki/index.php/Elektromagnetisches_Spektrum

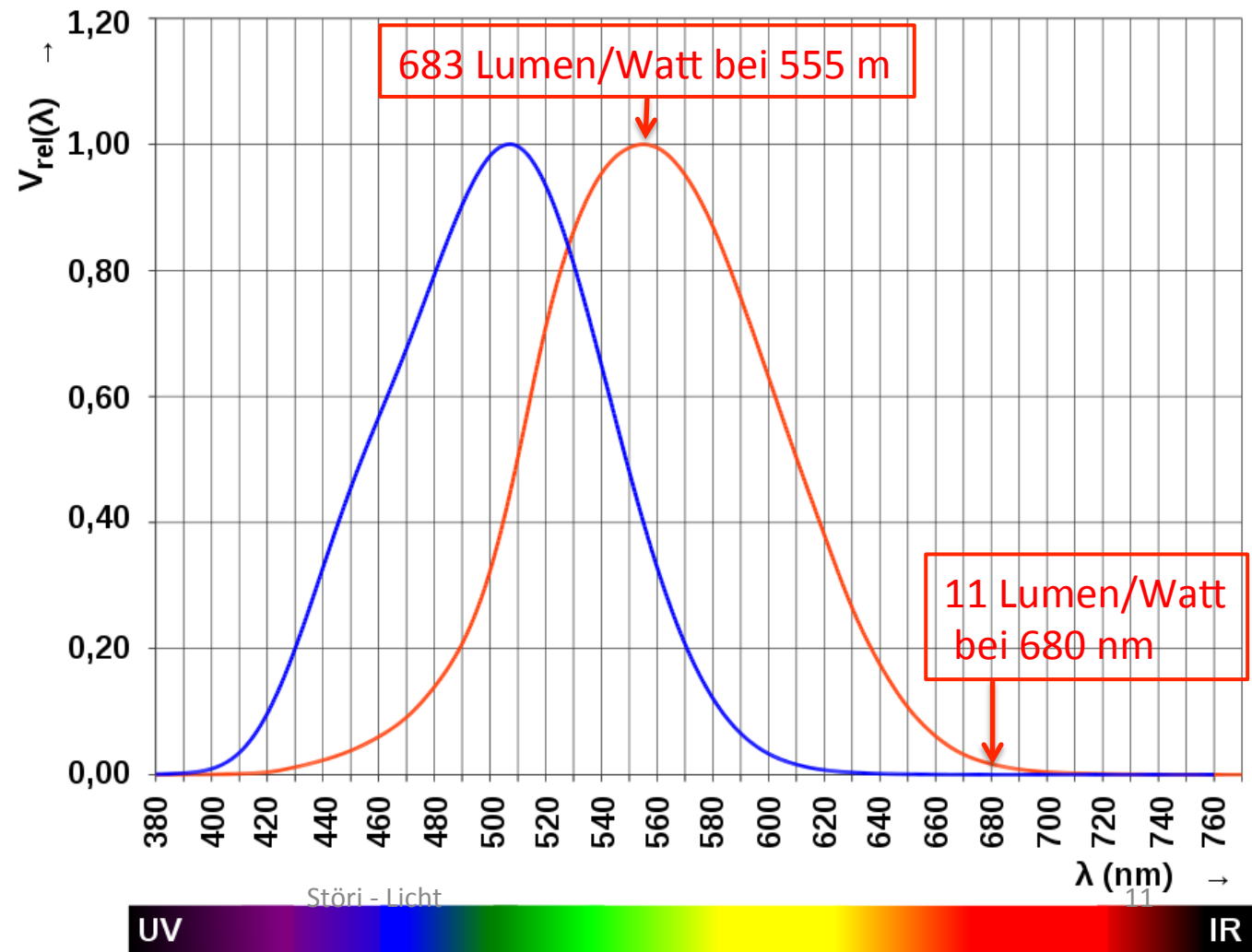
Der Mensch – Wahrnehmung von Helligkeit

Die Empfindlichkeit des menschliche Auges

- Wellenlängenabhängigkeit für Farbsehen
- Wellenlängenabhängigkeit im Dunklen
- Quellen für Daten:
CIE – Comission International de l' Eclairage
- DIN 5031
- Quelle Diagramm:

<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:V-lambda-phot-scot.svg>

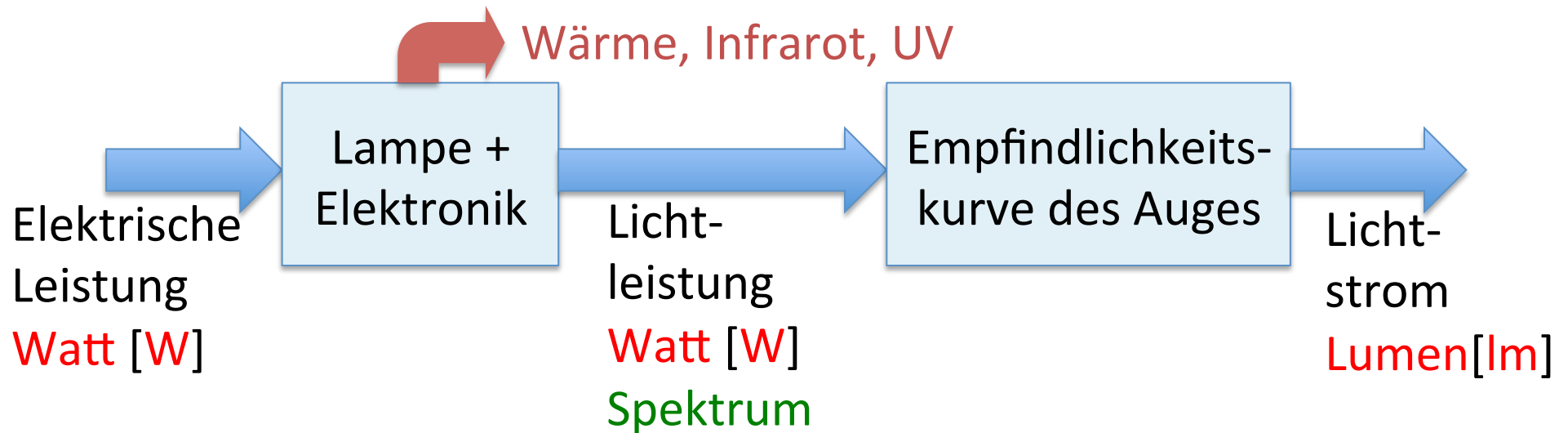
Wie kommt man zu diesen Kurven??
Unsicherheit!



Definition lichttechnischer Größen

- **Lichtstrom** [**Lumen**, **lm**]
 - Leistung des Lichts in **Watt**, gewichtet mit der **wellenlängenabhängigen Empfindlichkeit** des menschlichen Auges. Maximal 683 lm/W bei 555 nm
- **Beleuchtungsstärke** [**Lux**, **lx**, **lm/m²**]
 - Fällt ein Lichtstrom von 1 **Lumen** auf einen **Quadratmeter**, ist die Beleuchtungsstärke 1 **Lux**
- **Lichtstärke** [**Candela**, **cd**, **lm/sr**]
 - Ist eine Lichtquelle von 1 **Candela** 1 **Meter** von einer Oberfläche entfernt, beträgt die Beleuchtungsstärke 1 **Lux**
 - Strahlt die Lichtquelle gleichmäßig in alle Richtungen (4π Steradianen) erzeugt eine Lichtquelle von 1 **cd** einen Lichtstrom von $4\pi \approx 12,6$ **lm**
 - Die Lichtstärke kann von der Richtung abhängen

Lichttechnische Größen - Lichtausbeute

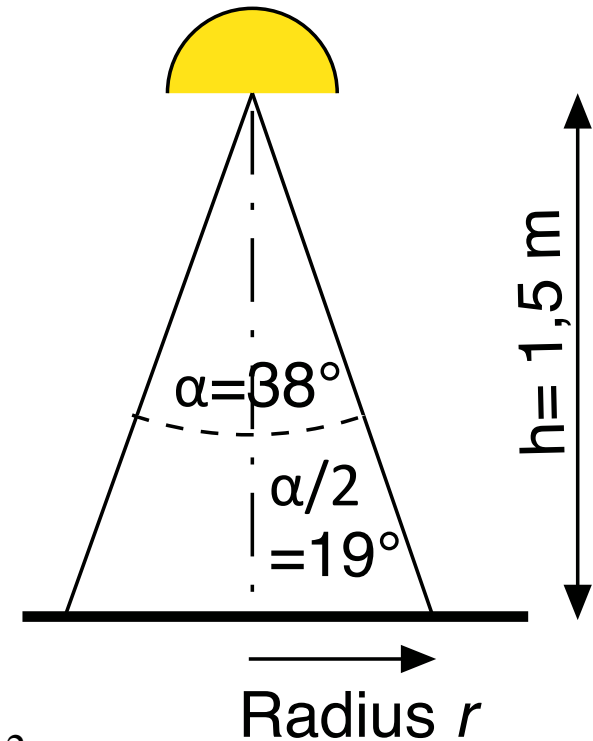


- **Theoretisch** maximale Lichtausbeute, abhängig vom Spektrum
 - Lichtstrom/Lichtleistung
 - Bei 555 nm 683 Lumen/Watt
 - Weißes Licht 240 Lumen/Watt
- **Praktische** Lichtausbeute
 - Lichtstrom/Elektrische Leistung, inkludiert Wirkungsgrad der Lampe
 - Glübirne 10...15 Lumen/Watt
 - Leuchtstoff-Lampe 60...90 Lumen/Watt
 - LED 50...120 Lumen/Watt

Rechenbeispiel 1: Spot

- Spot

- Lichtstrom $\Phi = 240 \text{ lm}$
- Abstrahlwinkel $\alpha = 38^\circ$
- Höhe $h = 1,5 \text{ m}$
- Beleuchtete Fläche A



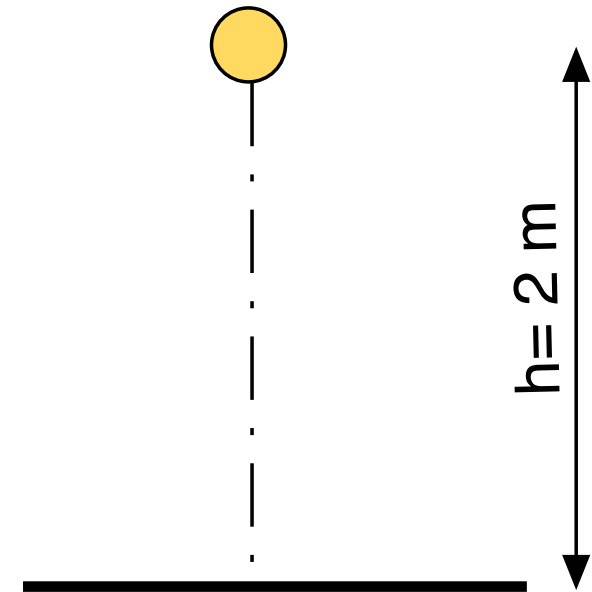
$$A = r^2 \pi = \left[h \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) \right]^2 \pi = [1,5 \tan(19^\circ)]^2 \pi$$

$$A = [1,5 \cdot 0,345]^2 \cdot 3,14 = 0,83 \text{ m}^2$$

- Beleuchtungsstärke $E = \Phi/A = 240 \text{ lm}/0,83 \text{ m}^2 = 289 \text{ lx}$
- Stark vereinfacht, kein Streulicht!

Rechenbeispiel 2: Glühlampe

- Nackte Glühlampe 100W
 - Lichtstrom $\Phi = 1300 \text{ lm}$
 - Strahlt in alle Richtungen
 - Höhe $h = 2 \text{ m}$
 - Lichtstärke $I = \Phi / 4\pi$
 $I = 1300 \text{ lm} / 12,6 = 103 \text{ cd}$
 - Beleuchtungsstärke $E = I / r^2$
 $E = 103 \text{ lm} / (2 \text{ m})^2 = 25,7 \text{ lx}$
 - Stark vereinfacht, kein Streulicht!



Zusatzfrage zu Beispiel 1

- Welche Lichtstärke hat der Spot?
 - Lichtstärke [cd] = Lichtstrom [lm] / Raumwinkel [sr]
- Raumwinkel Ω des Kegels von 38° ist ca. 0,34 sr
 - Siehe Wikipedia -> Raumwinkel
- Lichtstärke $I = \Phi/\Omega = 240 \text{ lm}/0,34 \text{ sr} = 706 \text{ cd}$
- Reflektoren lohnen sich!

Farbsehen

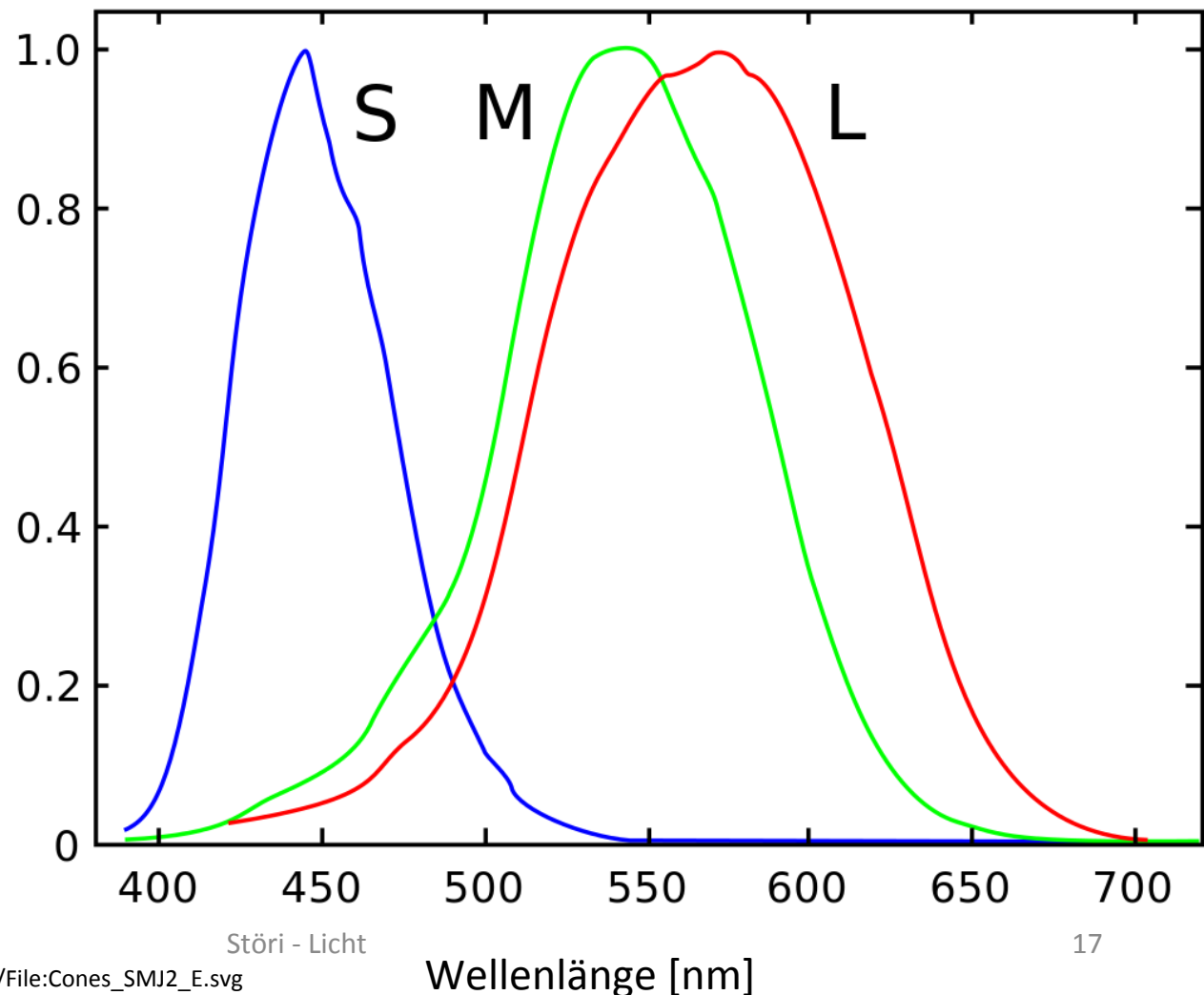
Das menschliche Auge hat 3 verschiedenartige Zäpfchen
Das Diagramm zeigt die 3 spektralen Empfindlichkeitsfunktionen

Die meisten Wellenlängen
regen 2 oder 3 verschiedene
Zäpfchen an.

Farbwahrnehmung ist das
Verhältnis der Anregungen.

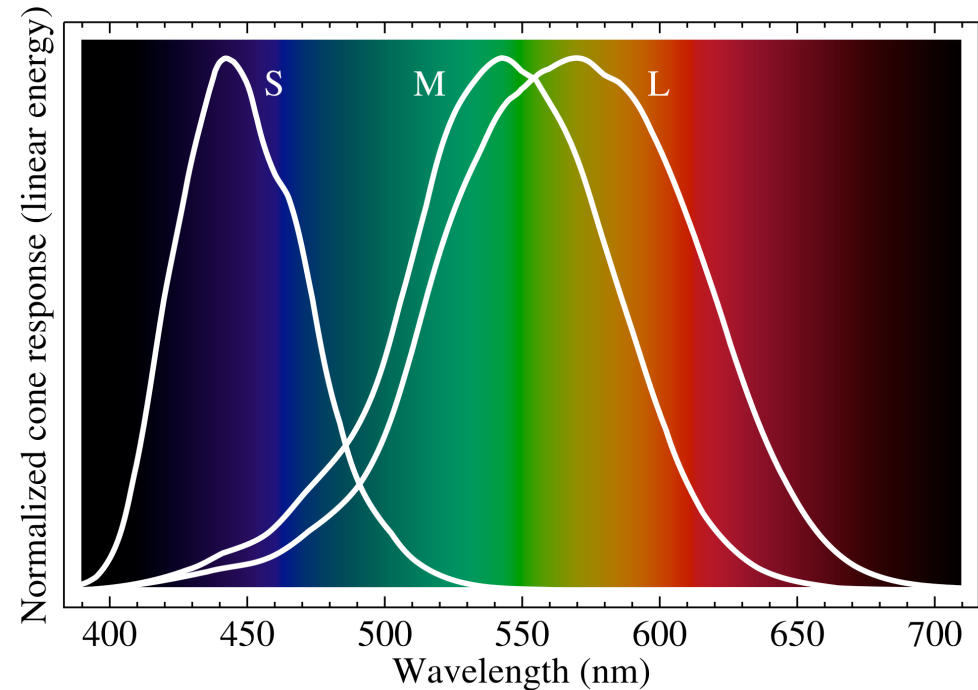
Das Diagramm ist
normalisiert. Die blaue
Kurve ist in Wirklichkeit circa
um den Faktor 20 niedriger,
die rote Kurve um ca. 30%.

Die Summe der 3 Kurven
ergibt die Empfindlichkeits-
kurve von Folie 11



Tri-Stimulus-Farben

- Die Anregung einer einzelnen Art von Zäpfchen berechnet sich aus dem Spektrum des Lichts gewichtet mit der **Empfindlichkeitsfunktion** der Art von Zäpfchen.
- Auch monochromatisches Licht regt 2 oder alle 3 Arten von Zäpfchen an.
- Die feinste Farbunterscheidung liegt im Bereich Rot-Gelb-Grün
- Die **Empfindlichkeitsfunktionen** sind relativ breit, **bizarre Spektren von Lampen stören daher relativ wenig.**



Empfindlichkeitsfunktionen

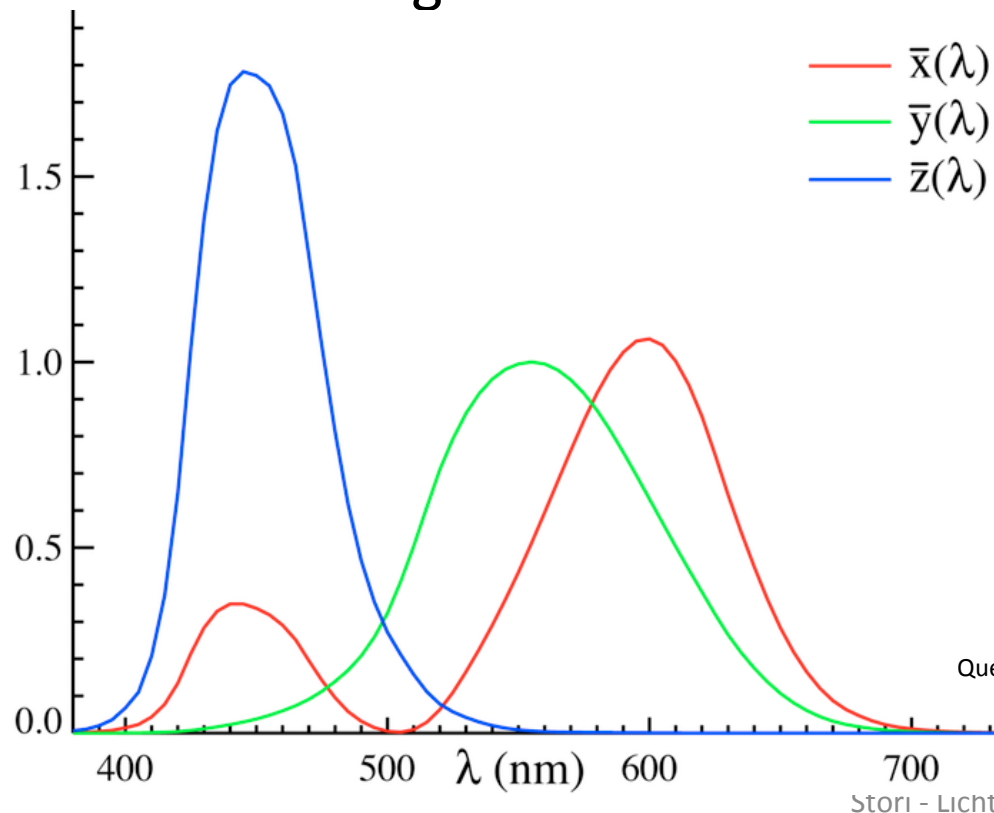
Quelle: https://en.wikipedia.org/wiki/Color_vision#/media/File:Cone-fundamentals-with-srgb-spectrum.svg

Tri-Stimulus-Farben (2)

- Das Spektrum des Lichts, multipliziert mit der **L-Kurve** und addiert ergibt die **rote** Anregung **L**.
- Das Spektrum des Lichts, multipliziert mit der **M-Kurve** und addiert ergibt die **grüne** Anregung **M**.
- Das Spektrum des Lichts, multipliziert mit der **S-Kurve** und addiert ergibt die **blaue** Anregung **S**.
- Die Summe von **roter**, **grüner** und **blauer** Anregung ergibt die **Helligkeit**
 $H = L + M + S$
 - Das Ergebnis ist identisch mit der Helligkeit, welche sich ergibt, wenn das Spektrum mit der Empfindlichkeitskurve aus Folie 11 multipliziert und addiert wird.
 - Wir haben eigentlich die Helligkeit **H** nur in der Teile **L**, **M** und **S** zerteilt.
- Die **Art und Sättigung der Farbe** ergibt sich aus den Verhältnissen von **L**, **M** und **S**
- Digitalkameras, Farbbildschirme, Beamer, etc. arbeiten mit 3 Farbsignalen, die aber meist anders definiert sind.

CIE 1931 Normalfarbsystem

- Wir ersetzen die Kurven **L**, **M** und **S** durch synthetische Kurven **x(λ)**, **y(λ)** und **z(λ)** des Standardbeobachters. **y(λ)** ist gleichzeitig die Empfindlichkeitsfunktion aus Folie 11.
- Daraus ergeben sich die drei Anregungen **X**, **Y** und **Z**



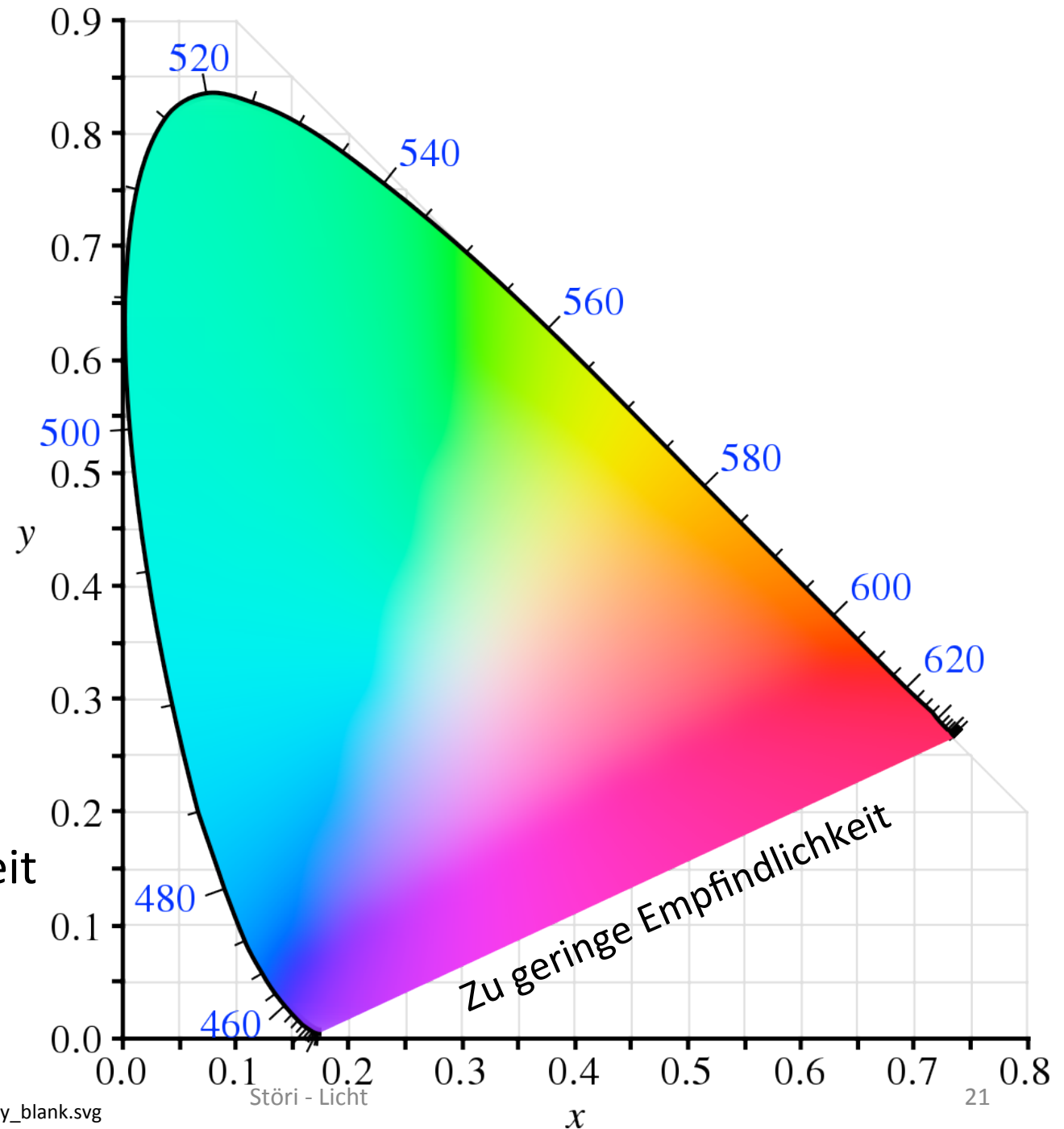
Farbraum CIE xyY

Helligkeit +
Verhältnisse
der 3 Anregungen

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

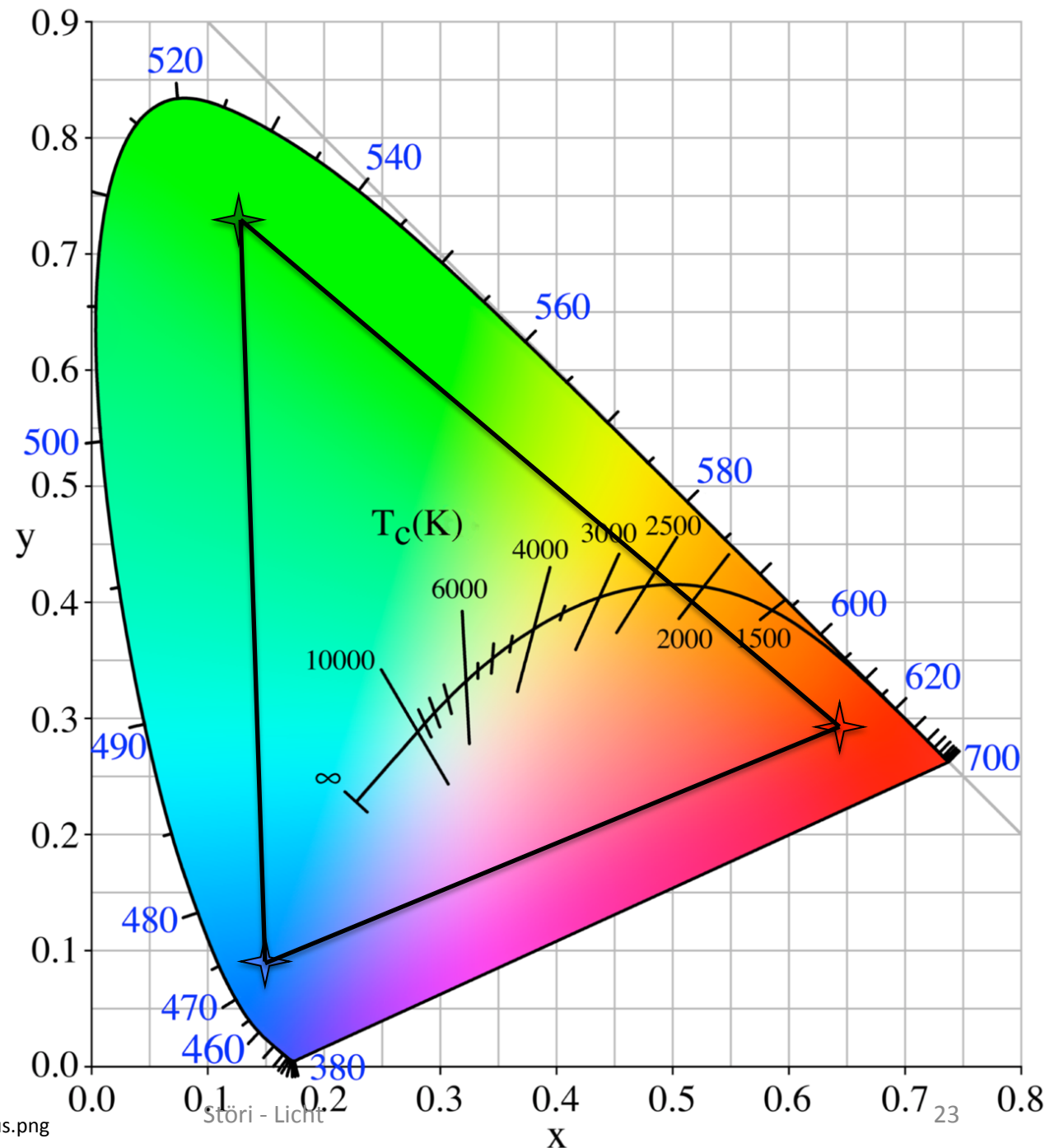
$$y = \frac{Y}{X + Y + Z}$$

Y ist auch die Helligkeit



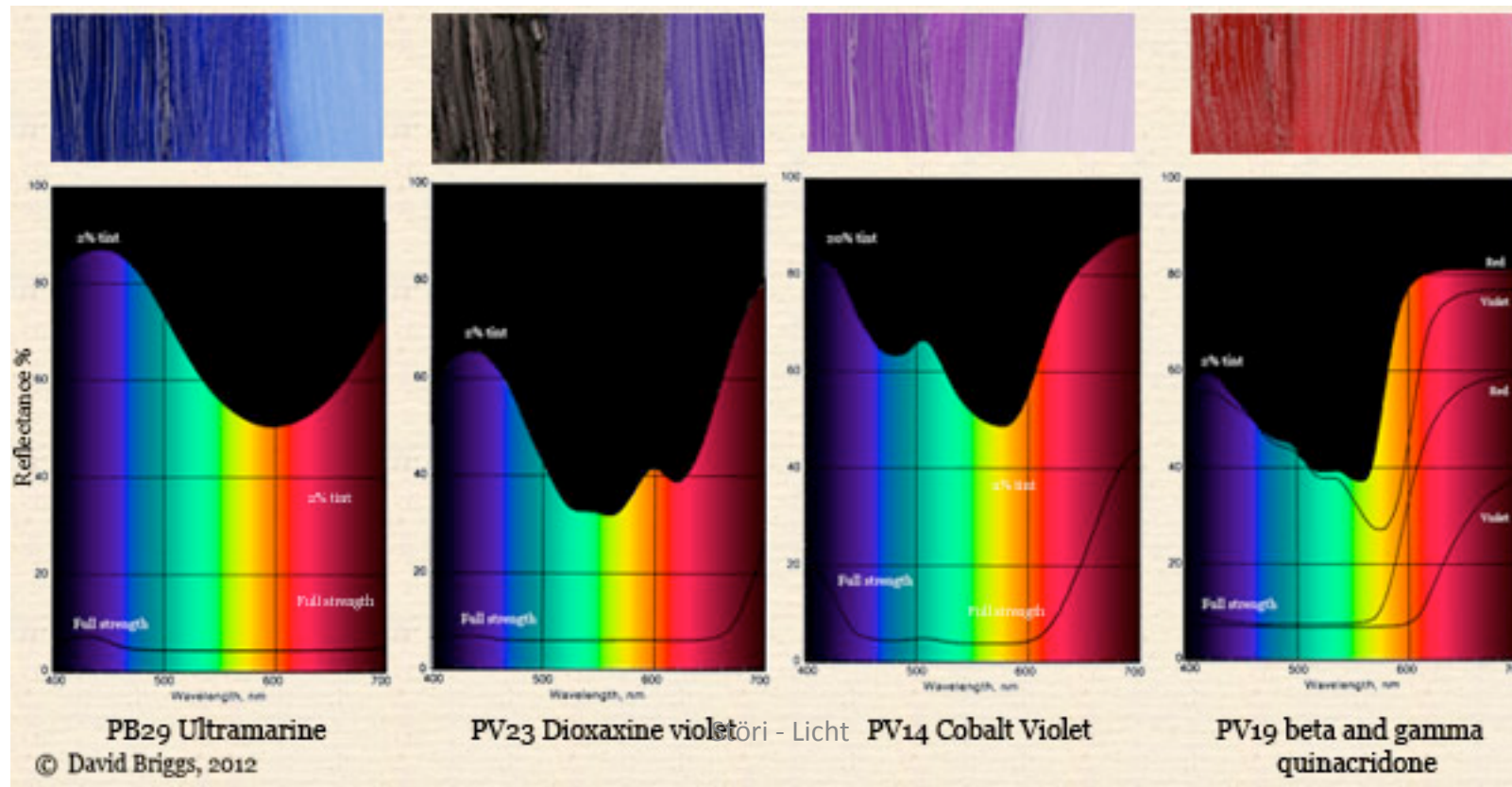
Farben der
Pixel

Mit 3 realen Farben
können nie alle
Farben dargestellt
werden.



Farbwiedergabe – reflektiertes Licht

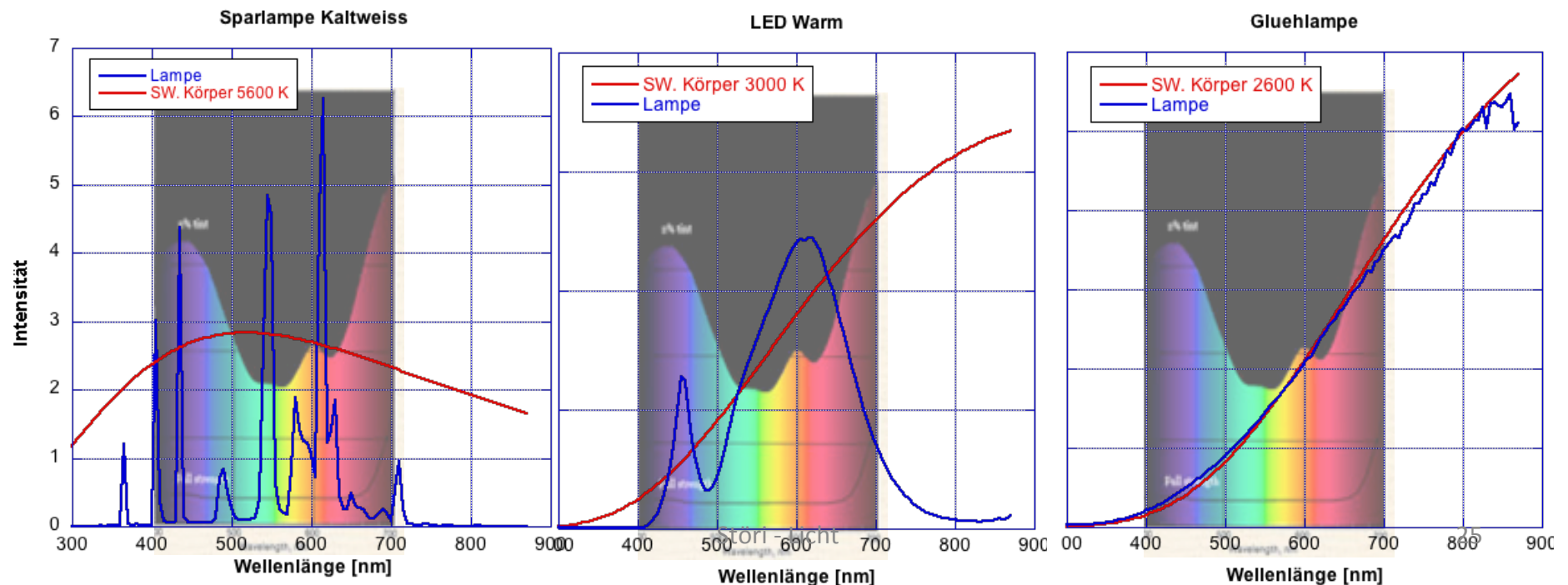
- Das Licht von einer bunten Oberfläche, welches wir sehen, ist das Produkt aus dem Spektrum der Quelle und dem Reflexionsspektrum der Oberfläche!
 - Spektrale Features der Lichtquelle sind hier wichtig!
- Beispiele von Reflexionsspektren



Ein Reflexionsspektrum - 3 Lichtquellen

- **Sparlampe:** Gute Farbwiedergabe nicht zu erwarten!
- **LED:** Einigermaßen OK
 - Extremes Violett und Mangenta?
- **Glühlampe:** Per Definition 100% Farbwiedergabe (CRI=100)
 - Blautöne schwer zu unterscheiden!!

Quellen: Siehe Folie 10 und 24



Farbwiedergabe – reflektiertes Licht

- Für die empfundene Farbe einer Lichtquelle spielt die detaillierte Form des Spektrums keine wesentliche Rolle

Aber:

- Beim Betrachten nicht selbst leuchtender Oberflächen ist das anders! (Reflektiertes Licht = Spektrum der Lichtquelle X Reflexionsspektrum)
 - Farbwiedergabe (color rendering) ist ein Problem
 - Dieselbe Oberfläche schaut in verschiedenem Licht verschieden aus
- **Farbwiedergabeindex** (color rendering index CRI)
 - Vergleicht (rechnerisch) die Farbwiedergabe von
 - Zu untersuchender Lichtquelle
 - Schwarzer Körper gleicher (Farb-)Temperatur
 - Das Auge passt das Farbempfinden an die jeweilige Farbtemperatur an. Vergleiche Weißabgleich bei Kameras
 - Hat Schwachstellen! Nur 8 Farben!
- Vergleich von Farben am **Monitor** und auf **Papier**!
 - Der beim Drucken erreichbare Farbbereich (Gamut) ist ziemlich klein.

Gefahren durch Lichtquellen

- **Haftungsausschluss:** Ich erzähle Ihnen, wovor **ich** mich **fürchte** oder nicht fürchte und begründe das.
 - Vielleicht irre ich mich.
 - Sie dürfen sich fürchten, wovor Sie wollen.
 - Langzeitfolgen sind sehr schwierig zu untersuchen, was Stoff für allerlei Ängste gibt.
- Mir bekannte **Gefahren**/Ängste im Zusammenhang mit **LEDs**
 - Blaulicht-Schäden
 - Gefahren hoher Leuchtdichten
 - Neurologisch Störungen durch Flackern
 - Störung der inneren Uhren (circadiane Rhythmik)
 - ... Ihr Diskussionsbeitrag

Blaulicht

- **Netzhaut kann durch intensive blaues Licht geschädigt werden.**
 - Die Wellenlängenabhängigkeit ist bekannt (ungefähr)
 - Die Helligkeit von **rein blauem Licht** wird vom Auge unterschätzt. Natürliche Schutzmechanismen wirken zu wenig.
 - Pupille verengen
 - Wegschau-Reflex (Alle Lebewesen vermeiden es, direkt in die Sonne zu schauen)
- **Schutzmaßnahmen:**
 - Vermeiden intensiver, rein blauer Lichtquellen (blaue Power-LEDs)
 - Falls erforderlich (Machine Vision): So einbauen, dass man nicht hinein schauen kann.
- **Blauer Peak im Spektrum weißer LEDs:**
 - Natürliche Schutzmechanismen greifen (realistischer Helligkeitseindruck)

Blaulicht (2)

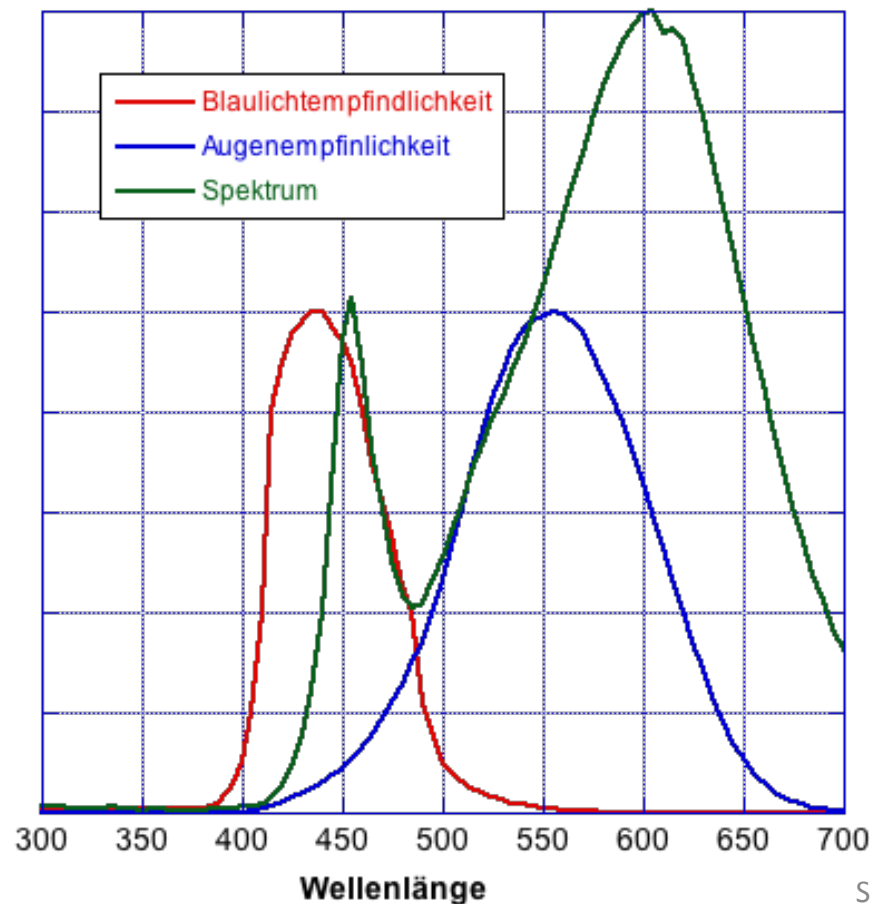
Spektrum einer warmweißen LED

Im Vergleich zu:

Blaulichtempfindlichkeit

Progress in Retinal and Eye Research 30 (2011) 239-257

Augenempfindlichkeit (gem. DIN 5031)

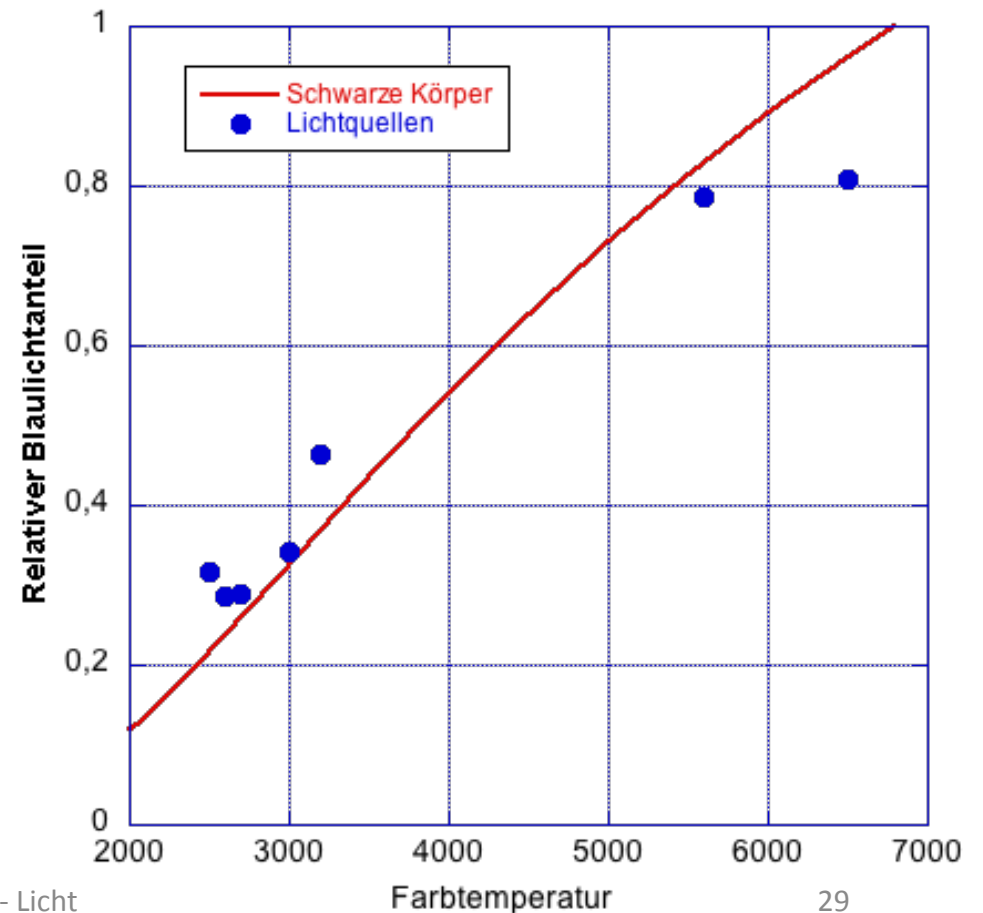


Quelle: Siehe Folie 10

Blaulichtanteil relativ zum
Lichtstrom

Schwarze Körper

Glühlampen, Halogenlampen,
Sparlampe, LEDs, Sonne



Störi - Licht

Blaulicht (3)

- **Blauer Peak im Spektrum weißer LEDs:**
 - Der integraler Anteil des Blaulichts (Watt) relativ zur Helligkeit (Lumen) ist bei weißen LED ähnlich wie bei anderen Lichtquellen (Sonne, Glühlampen, Neonröhren) mit gleicher Farbtemperatur.
 - Voraussetzung: Die bekannte Wellenlängenabhängigkeit ist ungefähr richtig
 - Beruht auf eigenen Messungen und Rechnungen (**Fehler nicht ganz auszuschließen**)
 - Natürliche Schutzmechanismen greifen
 - Weiße LEDs geben einen realistischen Helligkeitseindruck
- **Möglicherweise** haben Personen, die immer im Sonnenlicht arbeiten, im Alter eine leicht erhöhte Häufigkeit von Makula-Degeneration.
 - Allerdings ist Sonnenlicht viel stärker als Kunstlicht 128.000 lx zu ca. 500 lx

Hohe Leuchtdichte

- Grundsätzlich gefährlich
 - Intensität des Bildes auf der Netzhaut ist zu hoch.
 - Auch eine 100W Halogenlampe kann Schäden verursachen.
 - Die natürlichen Schutzmechanismen (Wegschauen) sind nicht immer verlässlich.
- Der scharfe Schattenwurf wird oft als unangenehm empfunden.
- Lösung:
 - Diffuse Lichtquellen in Arbeits- und Aufenthaltsräumen
 - LED-Balken
 - LED-Leuchtkörper mit Mattglashülle
 - Viele kleine LEDs haben ohnedies einen besseren Wirkungsgrad

Flackern

- Viele Lichtquellen schwanken in Rhythmus der Netzfrequenz (100 Hz, selten 50 Hz)
- Die Empfindlichkeit auf Flackern ist subjektiv verschieden.
- Vor allem im peripheren Bereich des Gesichtsfeldes ist Zeitauflösung größer (Fluchtreflex!)
- Die Stärke des Effekts hängt von der Technik der Lichtquelle ab:
 - **Glühbirnen**, vor allem Niedervoltlampen gleichen Schwankungen durch thermische Trägheit des Fadens teilweise aus.
 - **Neonröhren** mit magnetischem Vorschaltgerät flackern stark.
 - **Sparlampen** und Neonröhren mit elektronischem Vorschaltgerät flackern kaum.
 - Bei **LED**-Lampen hängt das von der verbauten Elektronik ab. Man sollte LEDs mit echtem Gleichstrom betreiben.
 - Pulsmodulation im KHz-Bereich stört eher nicht.
 - Was machen Dimmer???
 - **Hersteller sagen dazu nahezu nichts!**

Störung innerer Uhren

- Wahrscheinlich gibt es im Auge Sensoren, die der Steuerung der inneren Uhren des Menschen dienen und selektiv auf blaues Licht (Sonne) empfindlich sind.
- **Beobachtung:** bis nach Mitternacht mit Computer, Tablett oder Handy spielen stört den Schlafrhythmus.
 - Ob das der LED-Hintergrundbeleuchtung zuzuschreiben ist?
 - Neonröhren haben genauso viel Blaulicht
- Vorschlag: In Räumen, in denen spät gearbeitet wird, könnte man Warmton-Beleuchtung einsetzen.

Zusammenfassung

- LEDs sind eine sinnvolle technische Lichtquelle
- Die **Farbwiedergabe** ist nicht perfekt, aber auch nicht schlechter als etwa bei Neonbeleuchtung
 - Spezielle LEDs mit extrem guter Farbtreue sind erhältlich (CRI 98)
- Ich fürchte mich nicht vor dem **Licht der blauen LED**, die in weißen LEDs die Anregung übernimmt.
- **Flackern** sollte vermieden werden, was aber möglich ist.
- Lichtquellen **extremer Leuchtdichte** sollten vermieden werden.
- Für Aktivität am **späten Abend** wäre warm-weiße Beleuchtung zu überlegen (ArbeitsmedizinerIn fragen!).