

h -Bestimmung mit Leuchtdioden



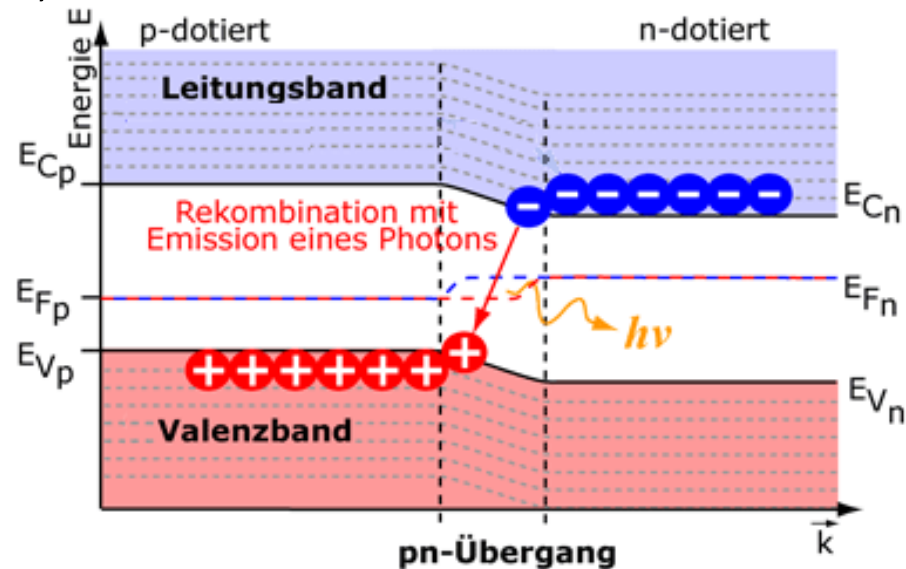
Vorstellung einer
möglichen
experimentellen
Durchführung im
Unterricht



September 2019
(überarbeitet 2024)

Theorie

- Wird eine LED in Durchlassrichtung gepolt, baut sich die Sperrschicht am p-n-Übergang mit zunehmender Spannung ab, die Stromstärke steigt exponentiell an.
- Elektronen aus dem Leitungsband rekombinieren mit Fehlstellen im Valenzband.
- Die Energiedifferenz ΔE (\rightarrow Bandlücke) wird in Form eines Lichtquants emittiert.
- Wenn es gelingt für eine LED die Bandlücke ΔE zu bestimmen und wenn man die passende Frequenz ν des emittierten Lichts kennt, sollte es möglich sein, das Wirkungsquantum h zu bestimmen.



Grafikquelle:
<https://kompodium.infotip.de/quantenpunkt-displays.html>
letzter Zugriff 23.09.2019 , bearbeitet

Idee

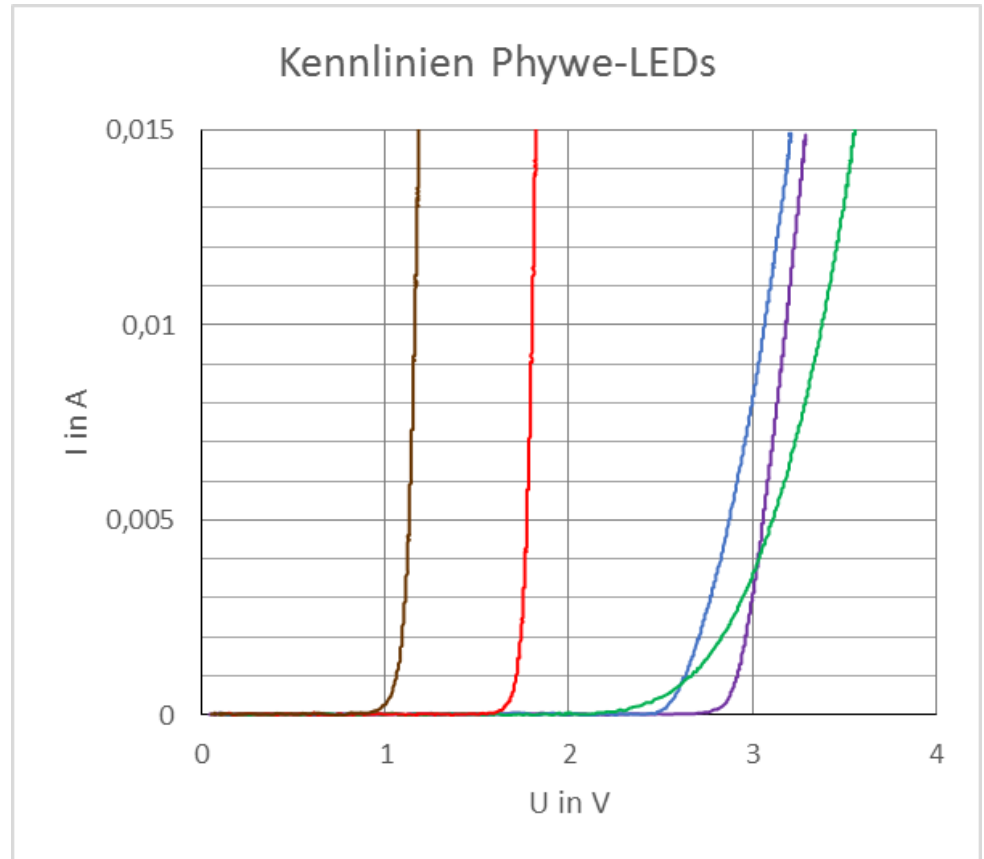
- Bestimmung von ΔE durch die Bestimmung einer für die LED „charakteristischen Spannung“ U_C , die mit dem emittierten Licht in Beziehung gesetzt wird:

$$U_C \cdot e = h \cdot \nu$$

- LED in Durchflussrichtung:
Ab einer **charakteristischen Spannung U_C** setzt Strom und damit Lichtaussendung ein.
- Bei Zimmertemperatur tragen allerdings auch Gitterschwingungen zur Rekombination bei.

Probleme

- LED-Kennlinien (ohne Vorwiderstand) zeigen einen exponentiellen Verlauf, d.h. die Kennlinie gibt keinen Hinweis auf eine solche Spannung U_C .
- Die Bestimmung der Spannung, bei der subjektiv die Leuchterscheinung der LED einsetzt, ist ungenau:
 - Wellenlängenempfindlichkeit des Auges, Einfluss des Umgebungslichtes, Vernachlässigung thermischer Effekte ...



Lösungsangebot

Bestimmung von ΔE durch die Bestimmung einer für die LED „charakteristischen Spannung“ U_C , die mit dem emittierten Licht in Beziehung gesetzt wird:

$$U_C \cdot e = h \cdot \nu$$

Probleme:

- Energiebilanz für die Lichtemission einer stromdurchflossenen LED:

$$E_{Ph} = h \cdot \nu = U_C \cdot e + E_{th} - R_i \cdot I \cdot e$$

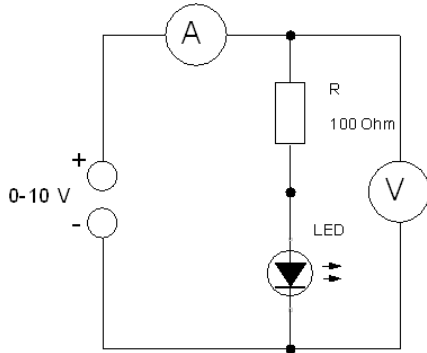
E_{th} : thermische Energie der Elektronen, R_i : Innenwiderstand der LED
 E_{th} und R_i lassen sich nur abschätzen.

- LEDs emittieren kein monochromatisches Licht, sondern ein relativ breites Spektrum.

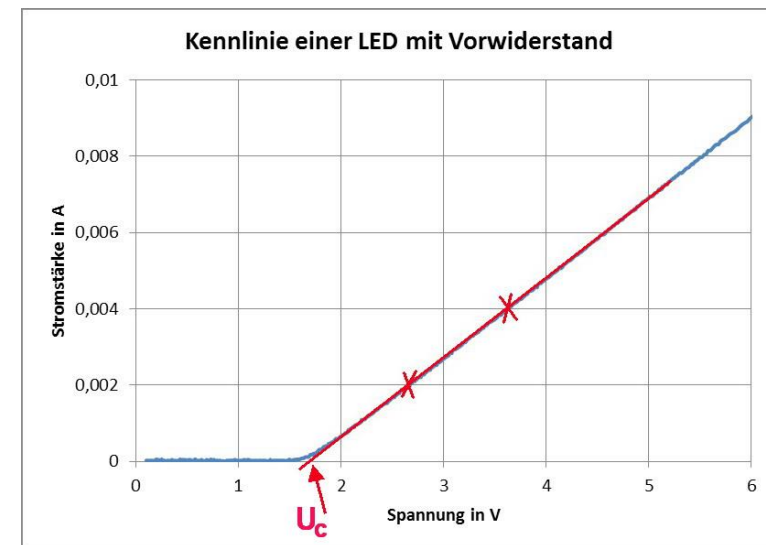
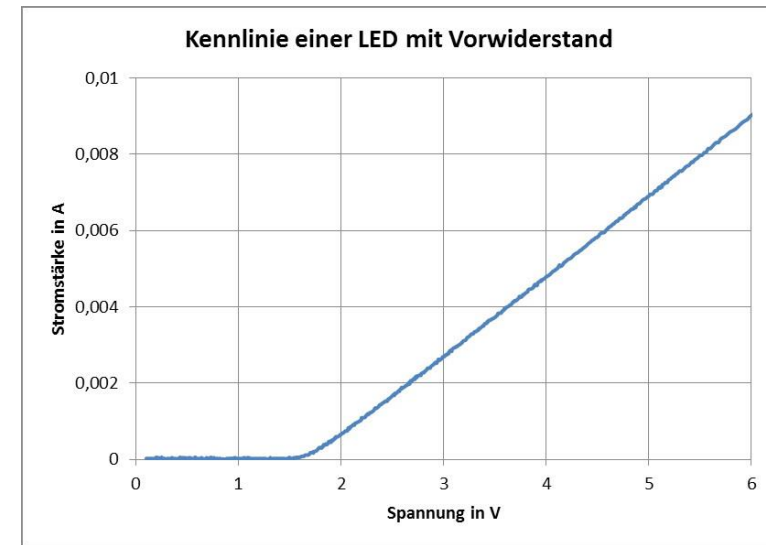
Lösungsangebot:

- Man betrachtet sehr kleine Stromstärken, hier geht $R_i \cdot I \cdot e$ gegen Null
- Man betrachtet das langwellige Ende der Spektren, weil man davon ausgeht, dass E_{th} hier den geringsten Einfluss hat.

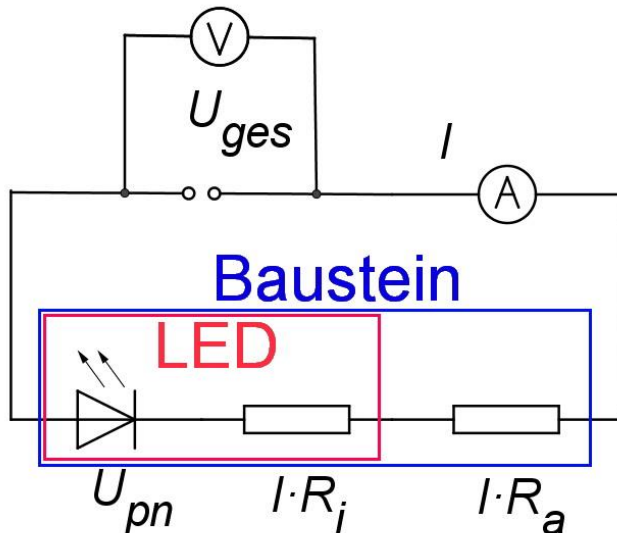
Bestimmung der charakteristischen Spannung



- Das Experiment liefert: Die Kennlinie der Kombination aus LED und Vorwiderstand ist für $I \geq 2$ mA nahezu linear.
- Durch lineare Anpassung (Extrapolation) findet man den Schnittpunkt mit der Spannungsachse.
- Annahme: Schnittpunkt entspricht der charakteristische Spannung U_C der jeweiligen LED.
- U_C ist unabhängig vom verwendeten Vorwiderstand (siehe nächste Folien).



Spannungen an einer LED



In einem einfachen Modell geht man davon aus, dass bei der LED ein Teil der Spannung am p-n-Übergang anliegt und ein weiterer Teil am Innenwiderstand abfällt. Damit ergibt sich folgender Zusammenhang:

$$U_{ges} = U_{pn} + I \cdot R_i + I \cdot R_a$$

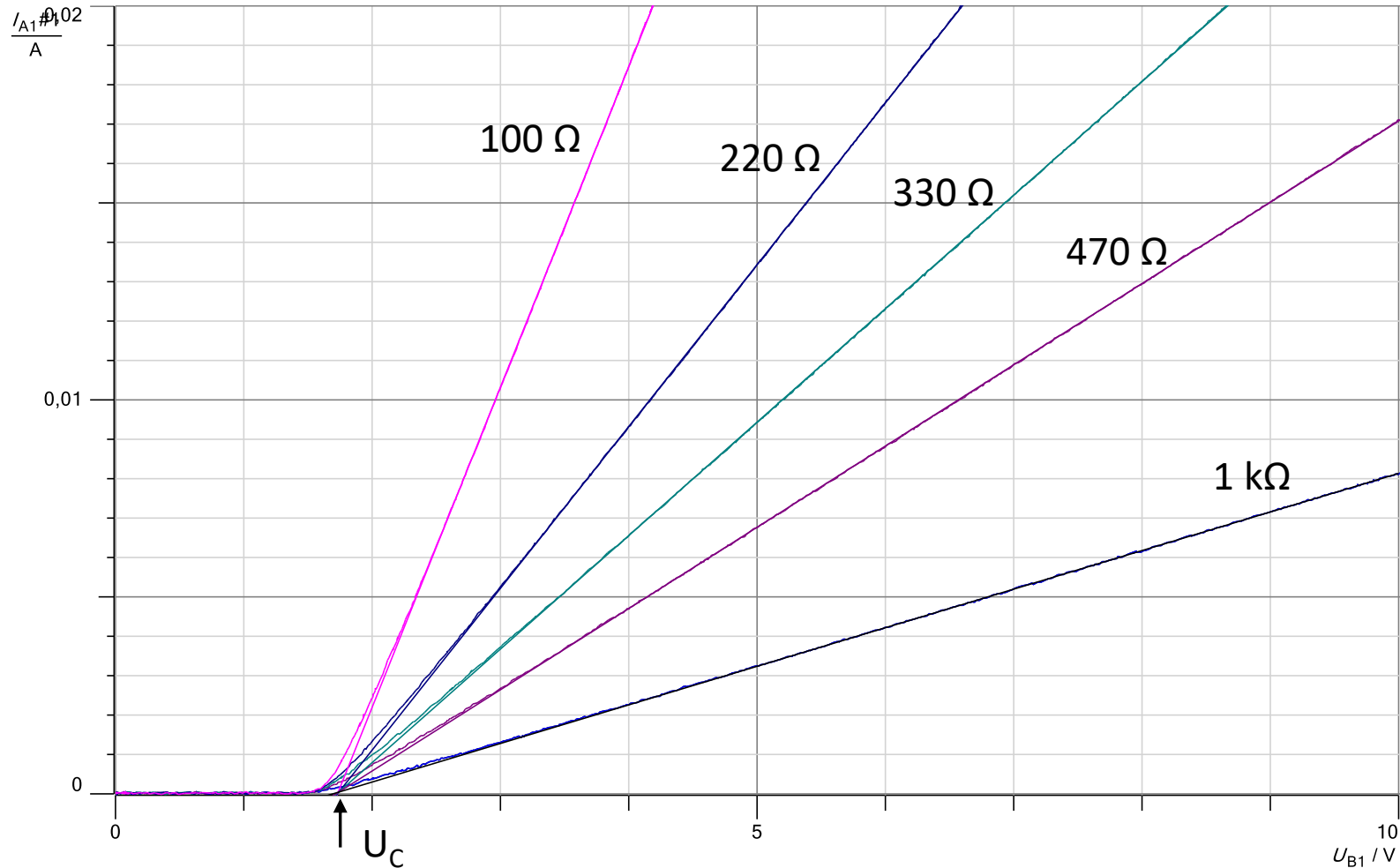
$$I = \frac{U_{ges} - U_{pn}}{R + R_i}$$

Für den Fall, dass $R_i = \text{const.}$ gilt, haben wir einen linearen Zusammenhang.

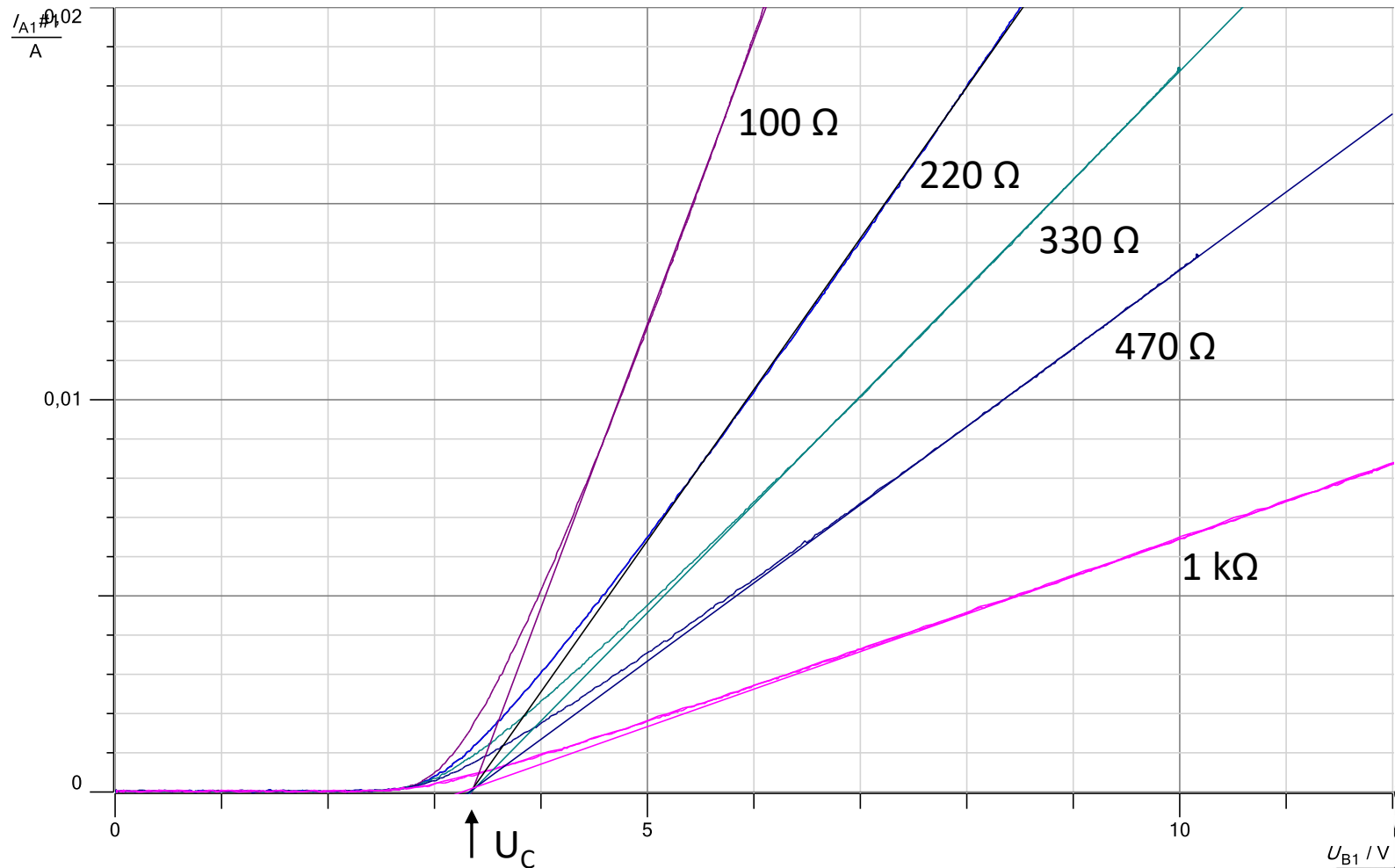
Wenn U_{ges} gegen U_{pn} geht, geht I gegen 0.

Damit wäre $U_{ges} (I = 0)$ die gesuchte Spannung U_C .

Kennlinien für eine rote LED mit Vorwiderstand



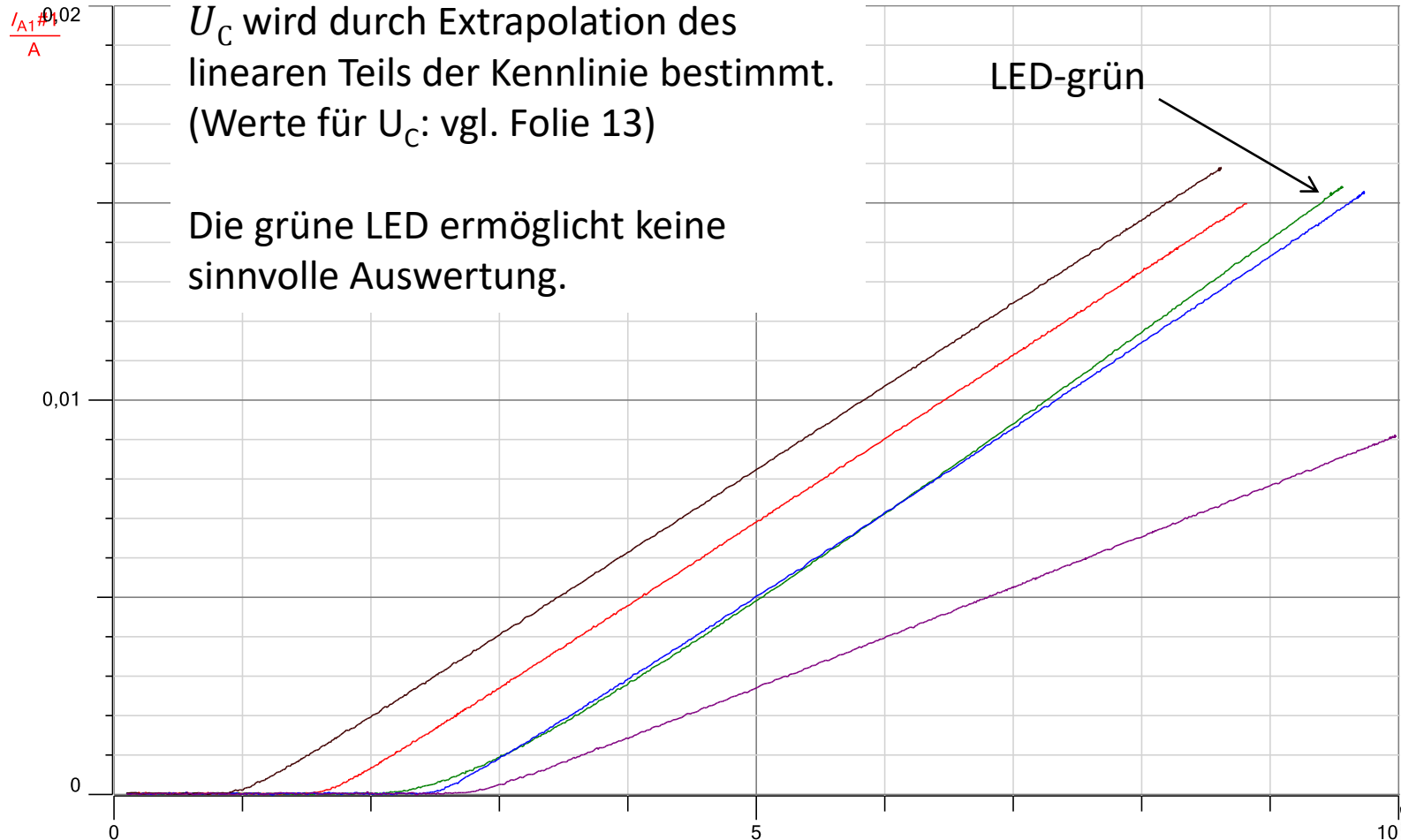
Kennlinien für eine blaue LED mit Vorwiderstand



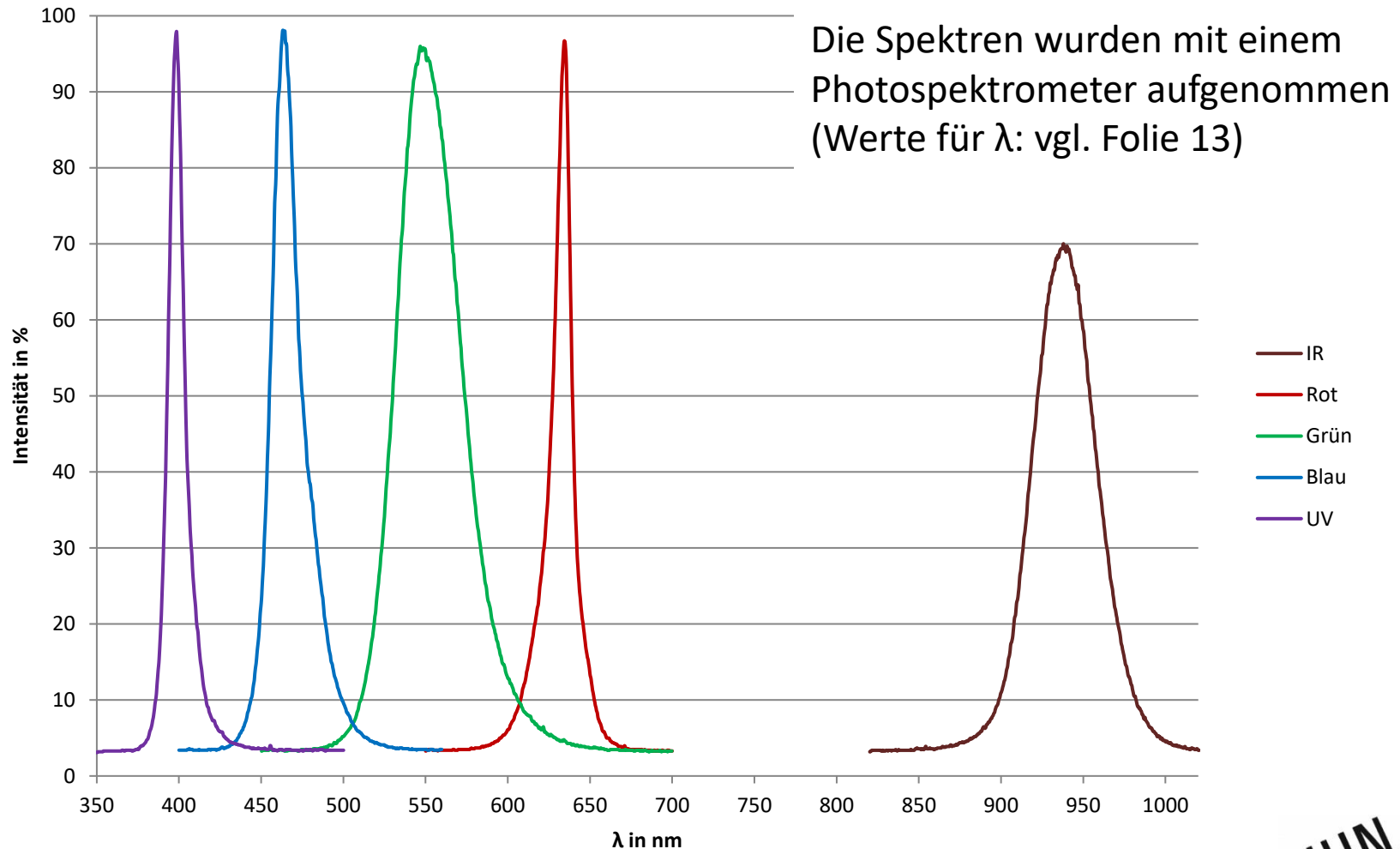
Kennlinien für die LEDs aus dem Phywe-Optikkasten

Kennlinien der LED-Bausteine aus dem Phywe-Experimentierkasten:
 U_C wird durch Extrapolation des linearen Teils der Kennlinie bestimmt.
(Werte für U_C : vgl. Folie 13)

Die grüne LED ermöglicht keine sinnvolle Auswertung.

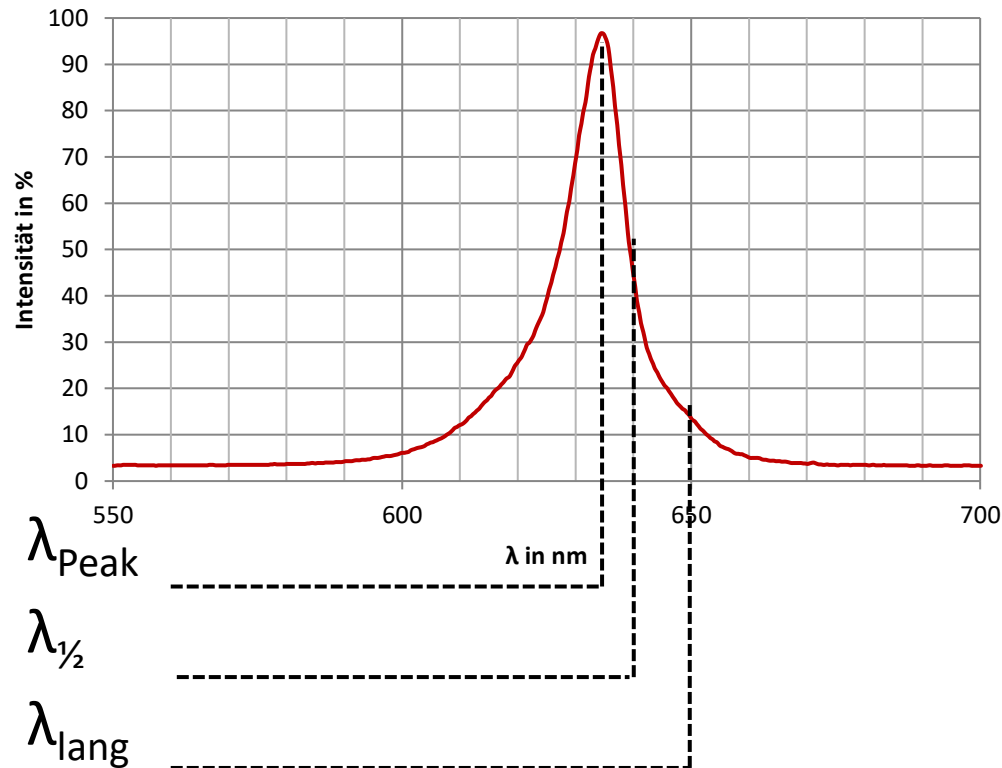


Die Spektren der Phywe-LED



Bestimmung „der“ Wellenlänge

Spektrum der roten LED

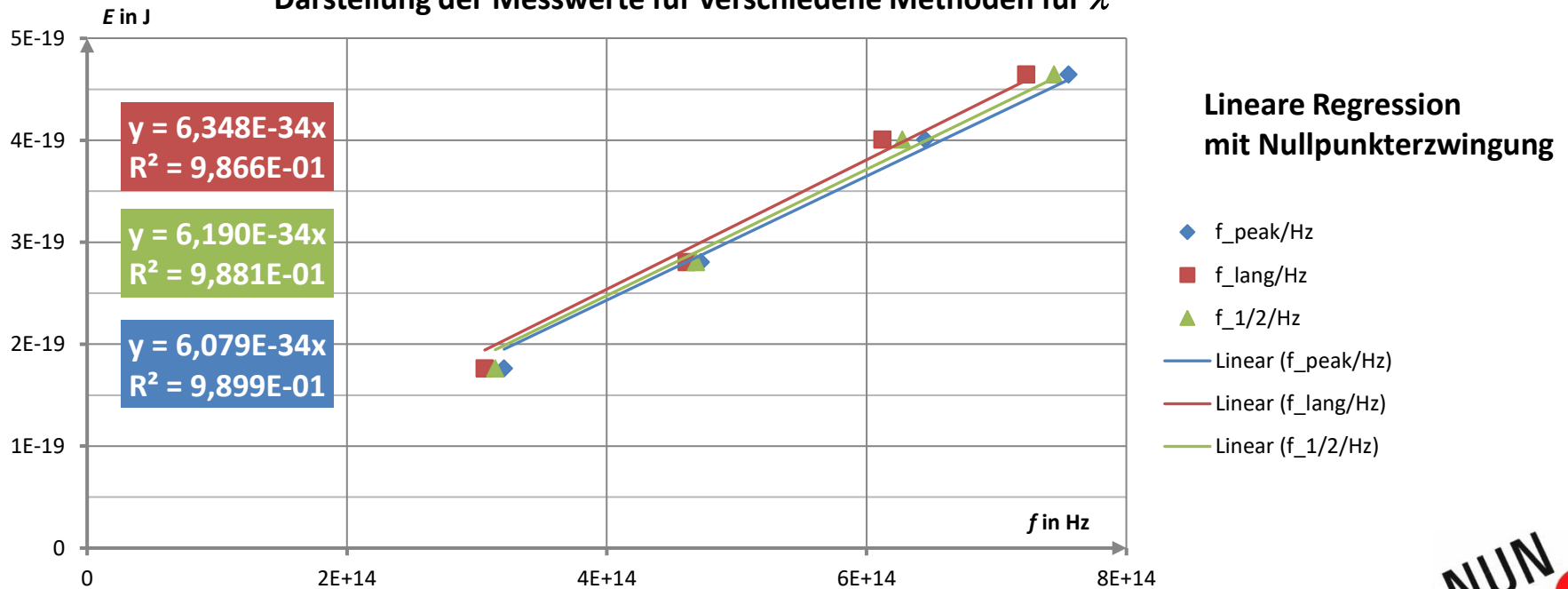


Man betrachtet das langwellige Ende der Spektren, weil man davon ausgehen kann, dass E_{th} hier den geringsten Einfluss hat.

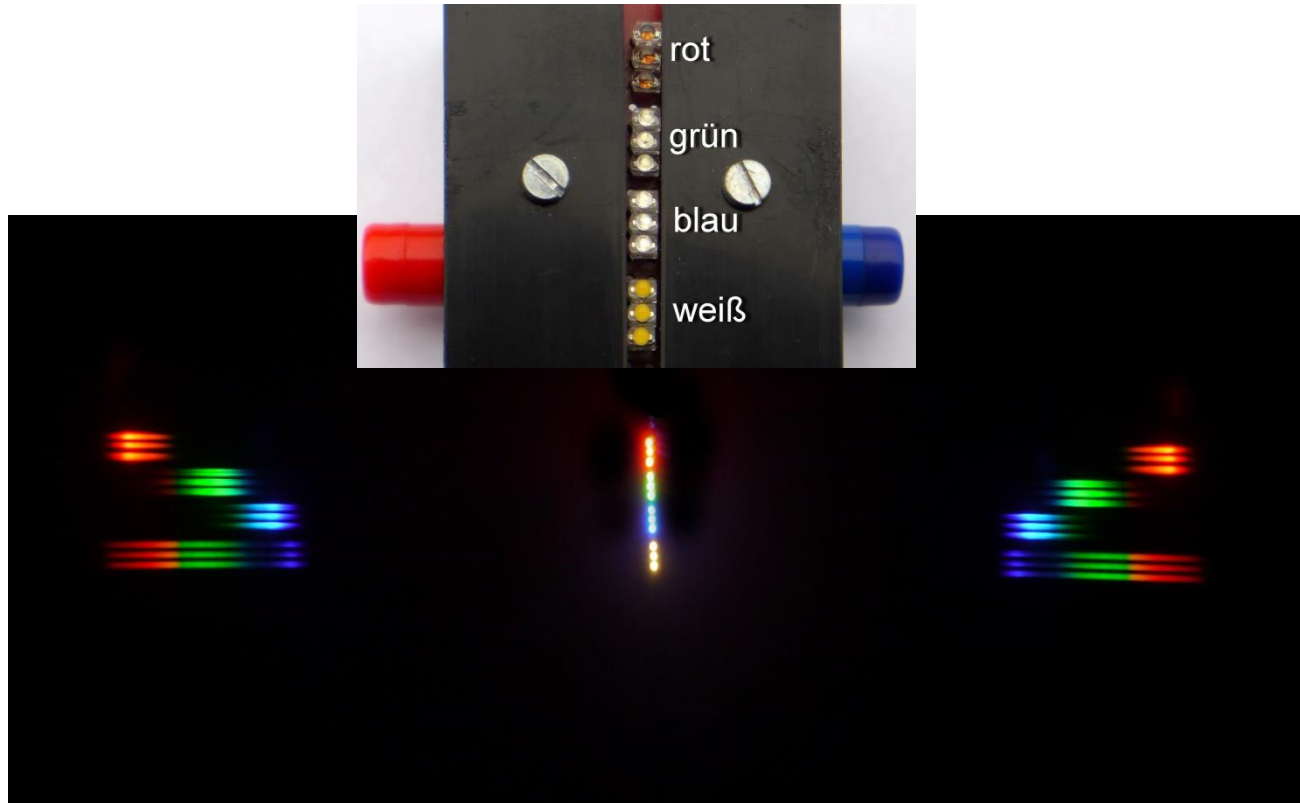
Auswertung für die LED aus dem Phywe-Optikkasten

	U_c/V	e*U/J	$\lambda_{\text{peak}}/\text{nm}$	f_peak/Hz	$\lambda_{\text{lang}}/\text{nm}$	f_lang/Hz	$\lambda_{1/2}/\text{nm}$	f_1/2/Hz
IR	1,10	1,76E-19	935	3,21E+14	980	3,06E+14	955	3,14E+14
Rot	1,75	2,80E-19	635	4,72E+14	650	4,62E+14	640	4,69E+14
Blau	2,50	4,01E-19	465	6,45E+14	490	6,12E+14	478	6,28E+14
UV	2,90	4,65E-19	397	7,56E+14	415	7,23E+14	403	7,44E+14

Darstellung der Messwerte für verschiedene Methoden für λ



Das Spektrum bei veränderter Spannung

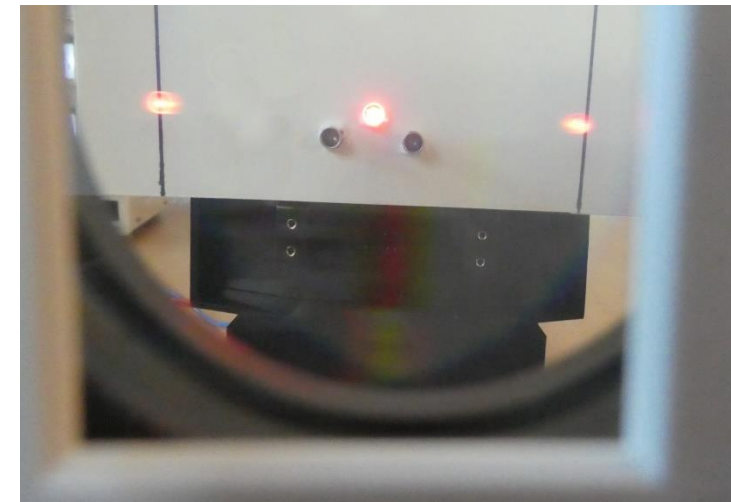
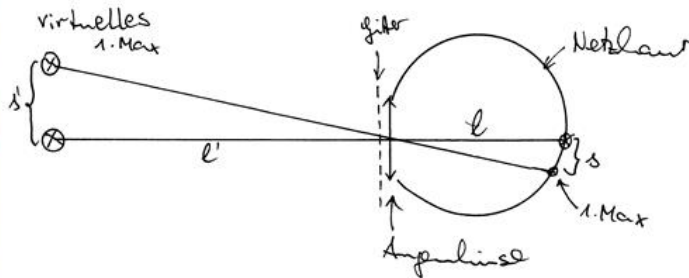
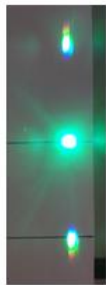


Ein Video hierzu liegt dem Material bei:
LED-Spektren-Spannung.mp4.

eA: Wellenlängenbestimmung mit der subjektiven Methode

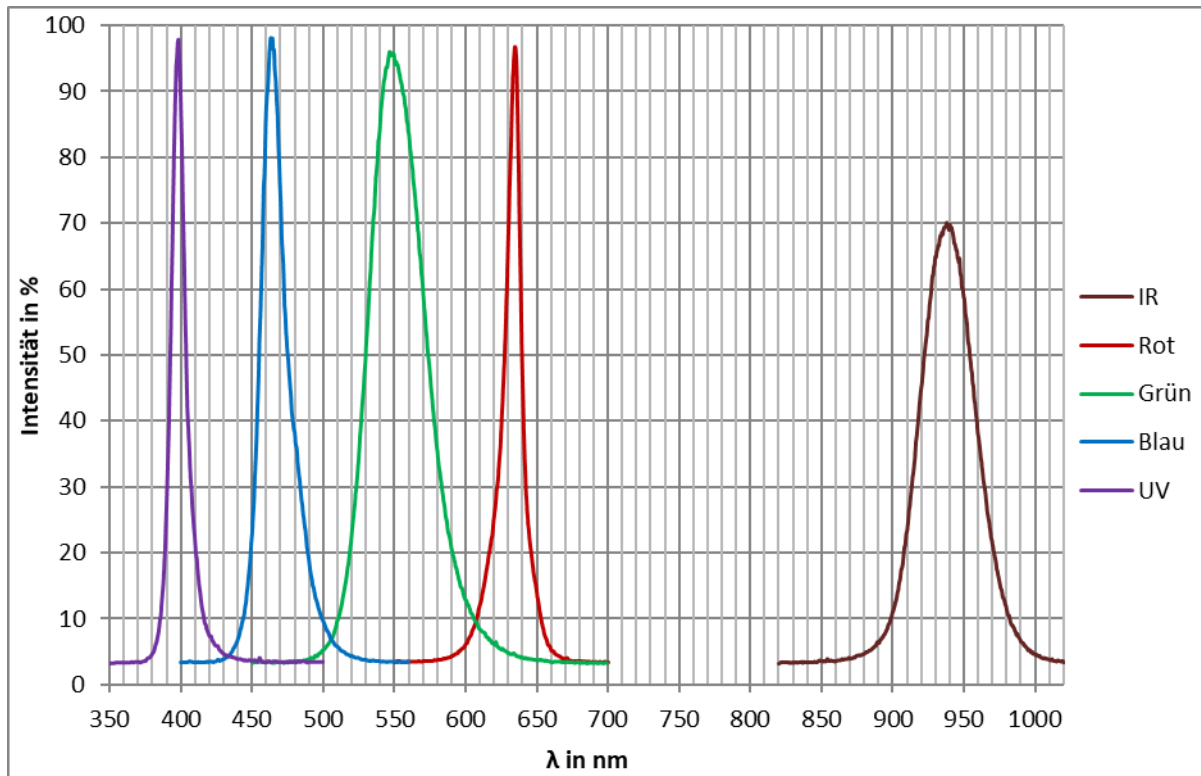
Subj. Methode
nicht für gA im KC!

- Messung bei geringer Betriebsspannung der LED
- Messung des langwelligen Endes des Spektrums
- Gitter steht an der Tischkante
- „Schirm“ mit festen Markierungen (z. B. für $a_1 = 5 \text{ cm}$) wird verschoben.



gA: Wellenlängenbestimmung aus Spektrometerspektren

- Ablesen jeweils des langwelligeren Endes des Spektrums der einzelnen LED (grüne LED ungeeignet)



Spektrums der LED aus dem Phywe Schülerübungskasten Optik/Quantenphysik aufgenommen mit dem Photospektrometer von Ocean-Optics (→ LD - Didactic).

Vorgehen im Schülerversuch

- Es wird nicht die komplette Kennlinie aufgenommen, sondern es werden für jede LED zwei Wertepaare ($I_1(U_1)$ und $I_2(U_2)$) ermittelt, z. B für $I_1 = 4 \text{ mA}$ und $I_2 = 8 \text{ mA}$.
- Anschließend wird der Schnittpunkt ($= U_C$) der dadurch bestimmten Geraden mit der Spannungsachse berechnet.
- eA: Das Spektrum der jeweiligen LED wird bei geringer Intensität subjektiv vermessen, dabei bestimmt man am langwelligen Ende des Spektrums die gerade noch erkennbare Wellenlänge der LED.
- gA: Ablesen der Wellenlängen am jeweils langwelligen Ende der Spektrometerspektren der Leuchtdioden.

(Zwischen subjektiver Methode und Spektrometerspektren kann es dabei zu deutlichen Abweichungen kommen.)

- Hinweis: grüne LEDs liefern aufgrund ihres Aufbaus und der verwendeten Halbleitermaterialien keine sinnvollen Ergebnisse.

Fazit

- Das hier vorgestellte Verfahren zur h -Bestimmung mit LED ist im Unterricht gut durchführbar.
- Man erreicht damit eine gute Annäherung an das Plancksche Wirkungsquantum.
- Es ist aber nicht unproblematisch:
 - Es ist eine Idealisierung, dass $U_C \cdot e = h \cdot \nu$ gilt.
 - Eine schlüssige Theorie für U_C fehlt.
 - Näherungen (z.B. Einfluss von E_{th}) lassen sich nur z. T. begründen.

Vorschlag:

- Was sagt man den Schülerinnen und Schülern?
 - „Die Theorie der LED legt nahe, dass man mit Hilfe von LEDs h bestimmen kann.“
 - „Lasst uns diese Hypothese untersuchen, indem wir das Verfahren durchführen!“
 - Kritische Reflexion des Verfahrens!