

Laborversuch

A8

# Lichtquanten

15.05.2019

Windisch

---

Versuchsleiter:

Burkhardt Simon

Assistent:

Rosenmund Jonas

Dozent:

Prof. Dr. Minamisawa Renato

Grundlagenlabor 4 – EIT – FS2019

## Inhalt

1.	Arbeitsgrundlagen .....	3
1.1	Die Natur der elektromagnetischen Strahlung .....	3
1.2	Photoeffekt.....	3
1.2.1	Äusserer Photoeffekt.....	4
1.2.2	innerer Photoeffekt.....	4
1.3	Bestimmung der Planck'schen Konstante nach Millikan.....	5
1.4	Grundlagen Halbleiter .....	6
2.	Durchführung .....	7
2.1	Versuchsanordnung.....	7
2.2	Messvorgang .....	8
2.3	Proben Versuchsobjekt .....	9
2.4	Messungen .....	10
3.	Auswertung .....	11
3.1	Direkte Messung der Photospannung bei den Spektrallinien.....	11
3.2	Messung der Gegenspannung nach Millikan .....	12
3.3	Messung des Photoeffekts bei LEDs.....	13
3.3.1	Bestimmung der Dominanten Wellenlänge .....	13
3.3.2	Messung der Durchlasskennlinie mit Knickspannung .....	14
4.	Fehlerrechnung .....	16
4.1	Fehlerquellen.....	16
4.2	Berechnung des Fehlers .....	16
4.2.1	Statistische Fehler .....	16
4.2.2	Systematische Fehler.....	17
4.2.3	Berechnung des gesamten Fehlers .....	17
5.	Resultate und Diskussion .....	18
6.	Quellen .....	19
7	Anhang.....	20

## 1. Arbeitsgrundlagen

### 1.1 Die Natur der elektromagnetischen Strahlung

Um eine bessere Vorstellung von der Ausbreitung und der Wechselwirkung von elektromagnetischer Strahlung mit materiellen Körpern zu haben, wird die Strahlung mit zwei verschiedenen Modellen betrachtet.

**Licht als Welle:** Interferenzen und Beugung werden beschrieben durch die Wellentheorie der elektromagnetischen Strahlung. Die Welle wird durch folgende Größen charakterisiert.

Wellenlänge  $\lambda$ , Frequenz f

$$\lambda \cdot f = c$$

(1.1)

**Licht als Teilchen:** Emission und Absorption werden beschrieben durch die Quantentheorie der elektromagnetischen Strahlung. Hier wird mit dem Plankschen Wirkungsquantum h die Energie von Strahlung beschrieben.

$$\text{Energie : } E_\gamma = h \cdot f = \frac{h \cdot c}{\lambda} = \frac{1240}{\lambda [\text{nm}]} [\text{eV}]$$

(1.2)

Beschreibung	Symbol		Einheit
Planksches Wirkungsquantum	h	6.626 068 96 ± 33*10 <sup>-34</sup>	Js

### 1.2 Photoeffekt

Der Photoeffekt beschreibt die Absorption von Lichtquanten durch Materie, bei der das Photon verschwindet. Dabei wird ein Teil der Energie auf die Materie übertragen. Es wird unterschieden zwischen äusserem und innerem Photoeffekt.

### 1.2.1 Äusserer Photoeffekt

Dieser spielt sich auf der Oberfläche von Materialien ab. Die Lichtquanten schlagen sog. Photoelektronen heraus, wodurch ein Photoelektronenstrom entsteht. Dabei muss die Strahlung eine ausreichende Energie aufbringen, um die Bindungsenergie des Elektrons aufzubrechen. Diese wird als Austrittsarbeit  $W_a$  bezeichnet. Das Photon erfährt bei dem Ereignis einen Energieverlust. Die beim Austritt aus dem Material maximal zurückbleibende Energie wird durch folgende Gleichung beschrieben.

$$\hat{E}_k = E_{\gamma} - W_a = h \cdot f - W_a \quad (2.1)$$

Beschreibung	Symbol	Einheit
maximale Photonenergie nach Zusammenstoss	$E_k$	[J]
Photonenergie vor Zusammenstoss	$E_{\gamma}$	[J]
Austrittsarbeit	$W_a$	[J]
plancksches Wirkungsquantum	$h$	[Js]
Frequenz der Strahlung	$f$	[Hz]

Der äussere Photoeffekt wird im Zusammenhang mit Photovoltaik und Strahlungsdetektoren angewandt. Das Element, das aus Photonen einen Photoelektronenstrom erzeugt wird Photokathode genannt. Der Strom kann vervielfacht werden mit einem Photomultiplier. Bei hohen Verstärkungen erhält man einen empfindlichen Photodetektor.

### 1.2.2 innerer Photoeffekt

Bei diesem Effekt werden durch die in ein Material eindringenden Lichtquanten neue Ladungsträger erzeugt. Dabei wird zwischen Photoleiter (LDR, Lichtwiderstand) und Photodioden unterschieden.

Bei der Photodiode werden durch die eindringenden Lichtquanten Elektron-Loch Paare erzeugt. Die p- und n- Schichten laden sich auf und die sog. **Photospannung** entsteht. Bei Belastung fliesst ein Strom. So wird der pn-Übergang als Solarzelle betrieben. Beim Anlegen einer Spannung in Sperrichtung fliesst ein Photostrom, der proportional zur Strahlungsleistung ist.

### 1.3 Bestimmung der Planck'schen Konstante nach Millikan

Bei der Gegenfeldmethode wird eine Vakuumröhre an einer Spannung angeschlossen. Es fliesst dabei ein Ruhestrom. Wird die Kathode mit monochromatischem Licht einer bestimmten Wellenlänge bestrahlt, tritt der Photoeffekt ein, Elektronen werden herausgelöst und beschleunigt. Der Photostrom fliesst. Nun kann eine Gegenspannung angelegt werden, um dem Stromfluss entgegen zu wirken. Bei der kritischen Spannung  $U_0$  verschwindet der Photostrom vollständig. Da jedoch ohne äussere Spannung zwischen Anode und Kathode eine Spannung  $U_C$  vorhanden ist, lautet die Gleichung für die kinetische Energie des Photons:

$$e \cdot (U_o - U_c) = \hat{E}_k \quad (3.1)$$

Setzt man  $E_k$  mit der Gleichung (2.1) gleich, erhält man:

$$(U_o - U_c) = \frac{1}{e} * (hf - W_a) \quad (3.2)$$

Beschreibung	Symbol	Einheit
plancksches Wirkungsquantum	$h$	[Js]
Frequenz der Strahlung	$f$	[Hz]
Elementarladung	$e = 1.602e-19$	[C]
Austrittsarbeit	$W_a$	[J]
äussere Nullspannung	$U_C$	[V]
angelegte Gegenspannung	$U_0$	[V]

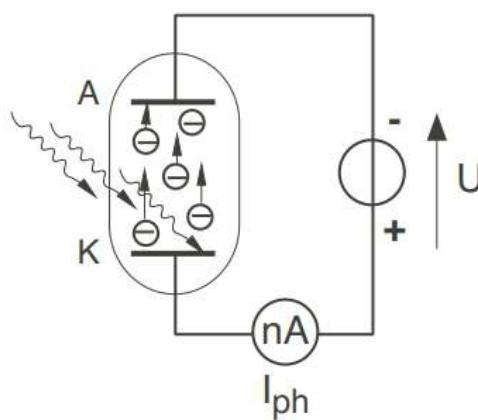


Abbildung 1: bestrahlte Vakuumröhre mit angelegter Gegenspannung  $U$  und Messung des Photostromes  $I_{ph}$  [1]

## 1.4 Grundlagen Halbleiter

An einem pn-Übergang in einem Halbleiter kommen je eine n- und p-dotierte Zone an einander. An der Grenze vermischen sich die überschüssigen Elektronen der n-Zone mit den Löchern aus der p-Zone. Dies nennt man Diffusionsstrom. Durch die Verschiebung von Ladungsträgern liegt am Halbleiter eine sogenannte Diffusionsspannung  $U_d$  an.

Beim Anlegen einer externen Spannung in Durchflussrichtung p→n, kommt es zu einem Stromfluss in der Raumladungszone zwischen den dotierten Schichten. Die Elektronen werden zurück in die n-dotierte Schicht gedrängt, wo diese sich mit den Atomen rekombinieren.

Die Rekombination bedeutet, dass die Elektronen ihr Energieniveau vom Leitungsband in das Valenzband wechseln. Dadurch wird Energie in Form von Licht frei.

Dies ist die Umkehrung des inneren Photoeffektes. Die freiwerdende Energie ist dabei abhängig vom verwendeten Halbleitermaterial und dessen chemischen Eigenschaften. Die Formel 1.2 besagt, dass eine bestimmte Energie einer bestimmten Wellenlänge von Licht entspricht. Die Farbe des Lichts ist materialabhängig.

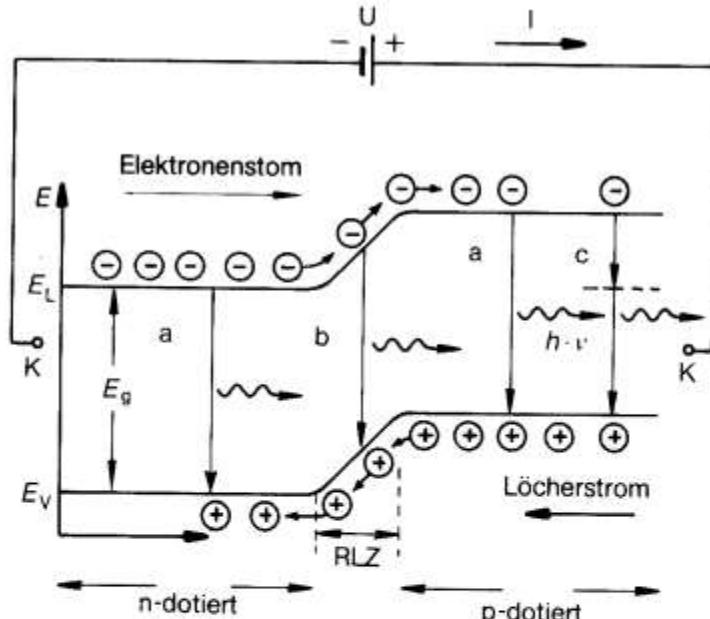


Fig.2 (aus HP 8.6)

$E_L$  : Unterkante des Leitungsbandes

$E_V$  : Unterkante des Valenzbandes

$E_g$  : Bandabstand

RLZ: Raumladungszone

a --> Rekombination im Bahngelände

b --> Rekombination in der RLZ

c --> Rekombination über Störstellen

Für die Wellenlänge des freigesetzten Lichtes gilt:

$$\lambda = \frac{h * c}{\Delta E} \quad (4.1)$$

Man kann vereinfacht annehmen, dass die freiwerdende Energie in Funktion der Knickspannung wir folgt berechnet werden kann:

$$e \cdot U_K \approx E_\gamma = \frac{hc}{\lambda} \quad U = \frac{hc}{e} \cdot \frac{1}{\lambda} \quad (4.2)$$

## 2. Durchführung

### 2.1 Versuchsanordnung

Siehe Bild auf der nächsten Seite für eine Darstellung des Versuchsaufbaus.

Folgende Apparaturen und Messgeräte kamen zum Einsatz:

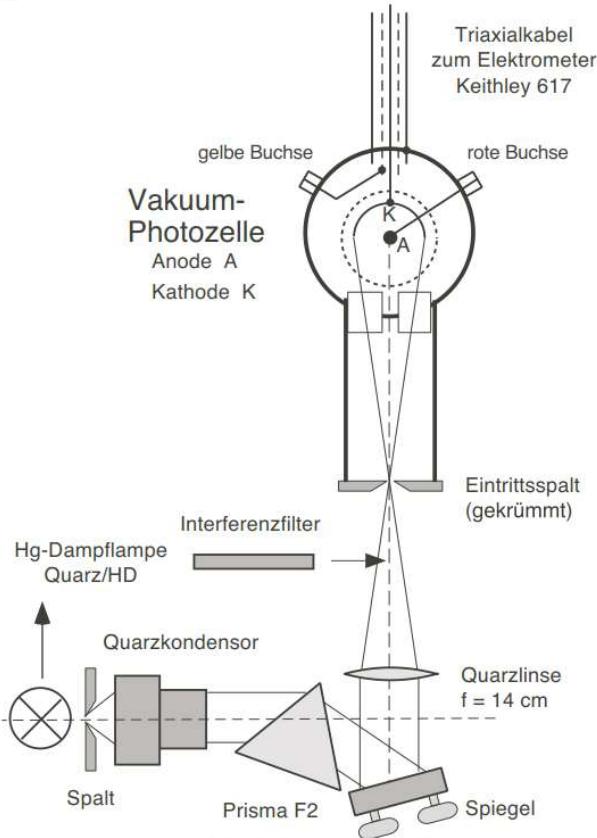
Beschreibung	Prüf-Nr
Keithley 617 Programmable Electrometer	P-E11-059
Keithley 2000 Multimeter	(unleserlich)
Hewlett Packard 33120A Function / Waveform Generator	P-P3-00
Ocean Optics HR4000CG-UV-NIR High-Resolution Spectrometer	P-O-064
LeCroy WaveRunner 6051A Oscilloscope	P-06-103

## 2.2 Messvorgang

### Messung der Photospannung (direkt)

Der Versuchsaufbau befindet sich gemeinsam mit dem Experiment 2 auf einer optischen Bank und geht aus der nachstehenden Fig. 4 hervor:

Das Licht der Hg-Dampf-Lampe wird mit Hilfe eines Flint-Prismas F2 spektral zerlegt und fällt über einen Oberflächenspiegel auf den Eintrittsspalt der Photozelle. Die Anode ist durch eine Blende abgeschattet. Wegen der unterschiedlichen Lichtwege im Prisma ist das Spaltbild leicht gekrümmmt. Es wird durch Verschieben der Quarzlinse scharf gestellt und mit den Stellschrauben des Spiegels justiert. Die Spaltbreite ist so einzustellen, dass die Hg-Linien gelb und grün gerade deutlich getrennt sind. Vor Messbeginn muss man die Quecksilberdampf-Lampe etwa 10 Min. einbrennen lassen. Zur Absorption von UV-Licht wird für alle  $\lambda > 400$  nm das Langpassfilter Schott OG 400 zwischen Kondensor und Prisma geschaltet. Bei der grünen und gelben Hg-Linie wird kurzwelligeres Streulicht ebenfalls mit Hilfe von Kantenfiltern eliminiert (siehe unten beim Vorgehen).



Es handelt sich um eine Vakuum-Photodiode CETRON 1P39. Die Photokathode hat die Form eines Halbzylinders, ihre Oberfläche ist unbekannt. Die Anode ist als axialer Stift ausgebildet und durch eine Blende abgeschattet. Diese Geometrie ist nicht gerade günstig und hat zur Folge dass der Photostrom nicht scharf einsetzt, d.h. die Dioden-Kennlinie keinen guten "Knick" aufweist. Aus diesem Grund kann man nicht einfach die Kennlinie aufnehmen, sondern muss den Einsatzpunkt "von Hand" suchen. Die Zelle ist mit einem Triaxialkabel an das Keithley Elektrometer 617 angeschlossen. Der Zentralleiter ist mit der Kathode verbunden, während Anode und innerer Schirm separat auf Buchsen herausgeführt sind, die äussere Abschirmung ist geerdet.

#### Raumbeleuchtung

Tageslicht abschirmen und Deckenbeleuchtung ausschalten. Glühlampen von Tischlampen stört nicht.

### Messung nach Millikan (mit Gegenspannung)

Die Photozelle wird als Photodiode geschaltet und zwischen Anode und Kathode eine variable Gegenspannung angelegt. Diese wird aus 2 Monozellen bezogen und über einen Spannungsteiler ( $10\text{ k}\Omega$ -Helipot) geregelt. Gemessen wird die **Gegenspannung  $U_0$  für Photostrom Null**, welche wiederum der maximalen kinetischen Energie der Photoelektronen entspricht. Das Elektrometer dient als empfindliches Ampèremeter

## 2.3 Proben Versuchsobjekt

### Messung der Photospannung

Beschreibung	Farbe	$\lambda$ [nm]
Quecksilberdampflampe (Hg)	gelbe Wellenlänge	579
	grüne Wellenlänge	546
	blaue Wellenlänge	436
	violette Wellenlänge	405
	violette Wellenlänge	365

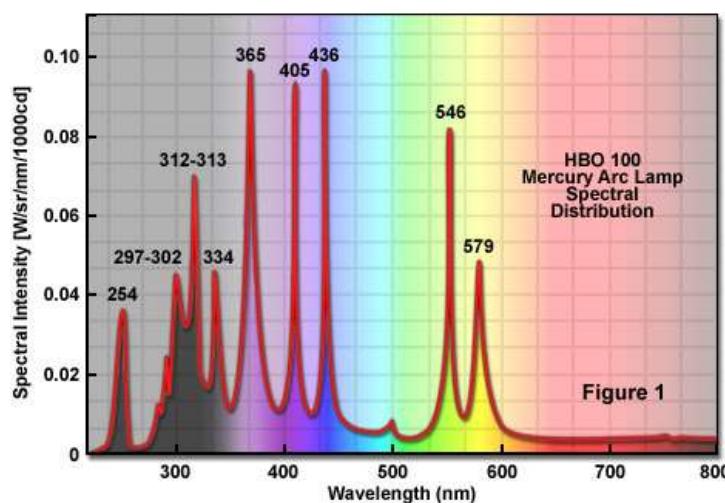


Abbildung 2: Spektrallinien von Quecksilber [2]

### Messung der Knickspannung bei Leuchtdioden

Die Nachfolgenden Leuchtdioden wurden ausgemessen. Die dominante Wellenlänge ist Teil der Messaufgabe. Die angegebenen Wellenlängen sind dem Abschnitt 3.3.1 entnommen.

Beschreibung	Farbe	$\lambda$ [nm]
Leuchtdiode 5mm	Infrarot	930.8
Leuchtdiode 5mm	Rot	645.3
Leuchtdiode 5mm	Gelb	593.6
Leuchtdiode 5mm	Grün	519.6
Leuchtdiode 5mm	Blau	465.1
Leuchtdiode 5mm	Weiss	469.2

## 2.4 Messungen

Die Messdaten sind im Anhang zu finden

Das Vorgehen der 1. Messung ist nachfolgend aufgelistet:

1. Direkte Messung der Photospannung der 5 Spektrallinien der Quecksilberdampflampe
2. Messung der Gegenspannung bei den 5 Spektrallinien

Die 2. Messung mit den Leuchtdioden hat den folgenden Ablauf:

Für jede LED wird zuerst die Spektrallinie und anschliessend die Durchlasskennlinie aufgenommen. Jeder LED ist ein Vorwiderstand von  $10\Omega$  vorgeschalten. Gemessen wird der Spannungsabfall über dem Widerstand, um auf den Strom zu schliessen.

### 3. Auswertung

Nachfolgend werden die Messwerte und deren angenäherte Funktionen grafisch dargestellt.

#### 3.1 Direkte Messung der Photospannung bei den Spektrallinien

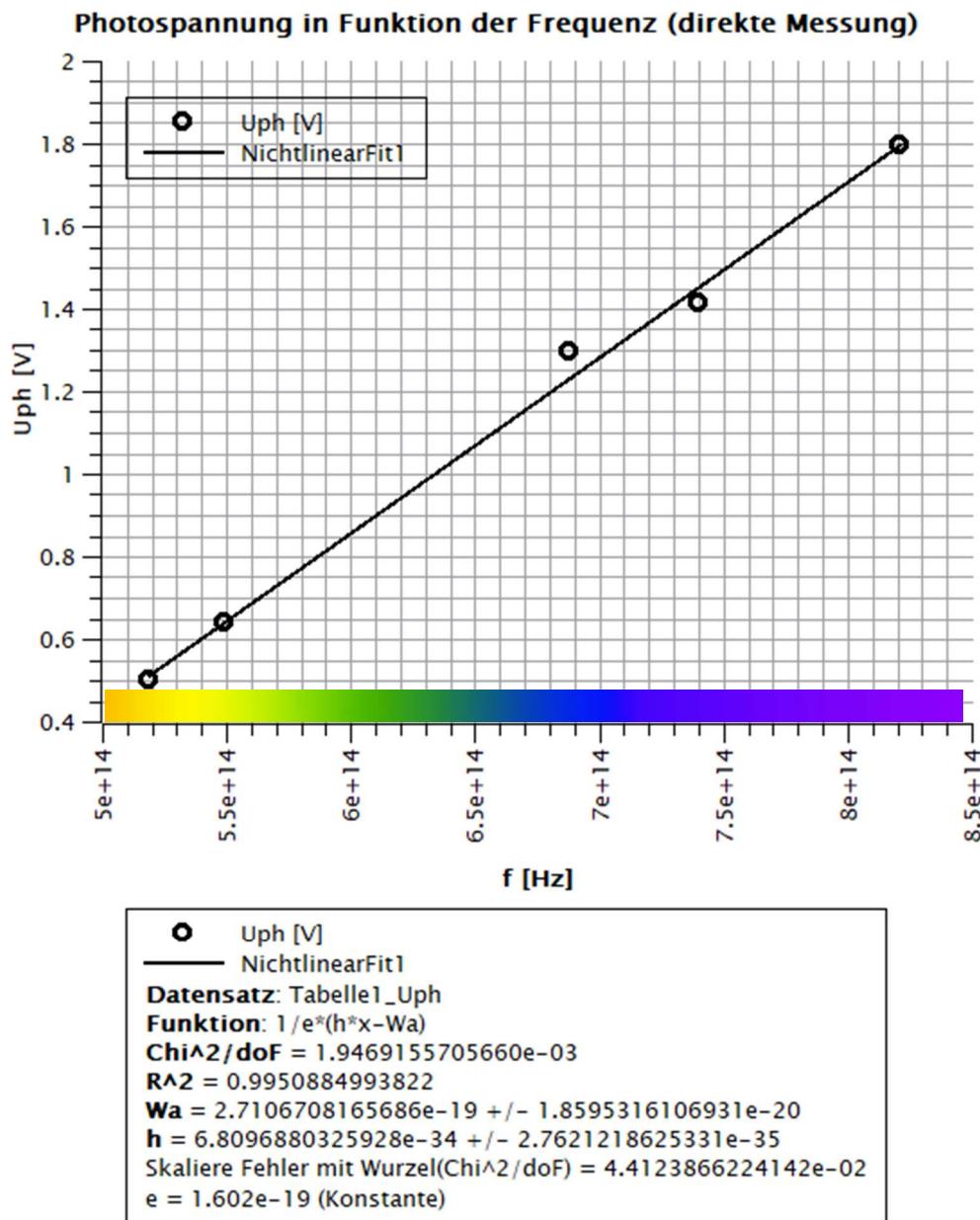
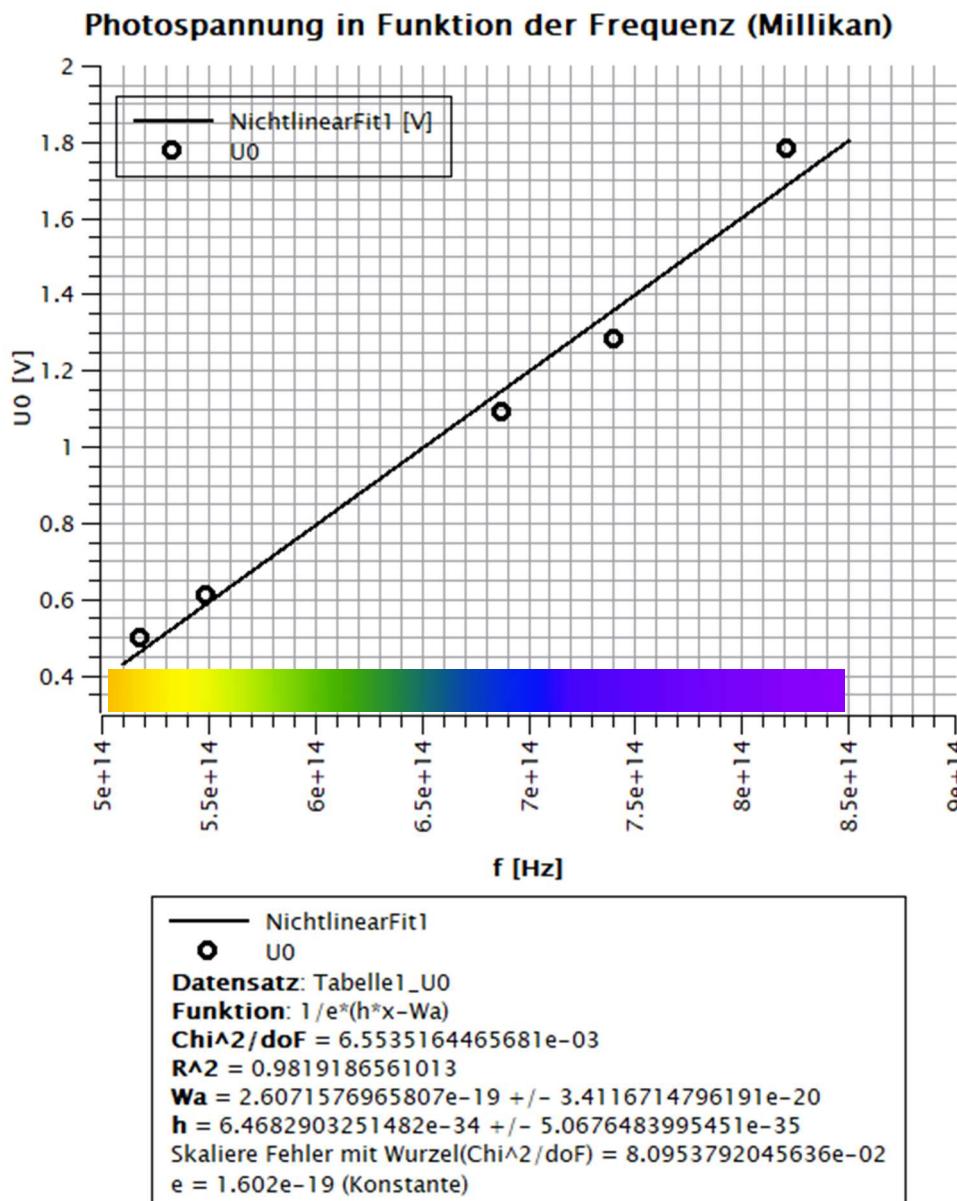


Abbildung 3: Direkt gemessene Photospannung Uph in Funktion der Frequenz f bei einer Quecksilberdampflampe

## 3.2 Messung der Gegenspannung nach Millikan


 Abbildung 4: Gegenspannung  $U$  nach Millikan in Funktion der Frequenz  $f$  bei einer Quecksilberdampflampe

### 3.3 Messung des Photoeffekts bei LEDs

#### 3.3.1 Bestimmung der Dominanten Wellenlänge

Die dominante Wellenlänge wurde mit Logger-Pro ausgelesen und jeweils beim Intensitätsmaximum angesetzt. Nachfolgend sind qualitativ die Kurven aufgezeichnet. Jeweils darunter befindet sich die Wellenlänge, bei der die maximale Wellenlänge vorherrscht.

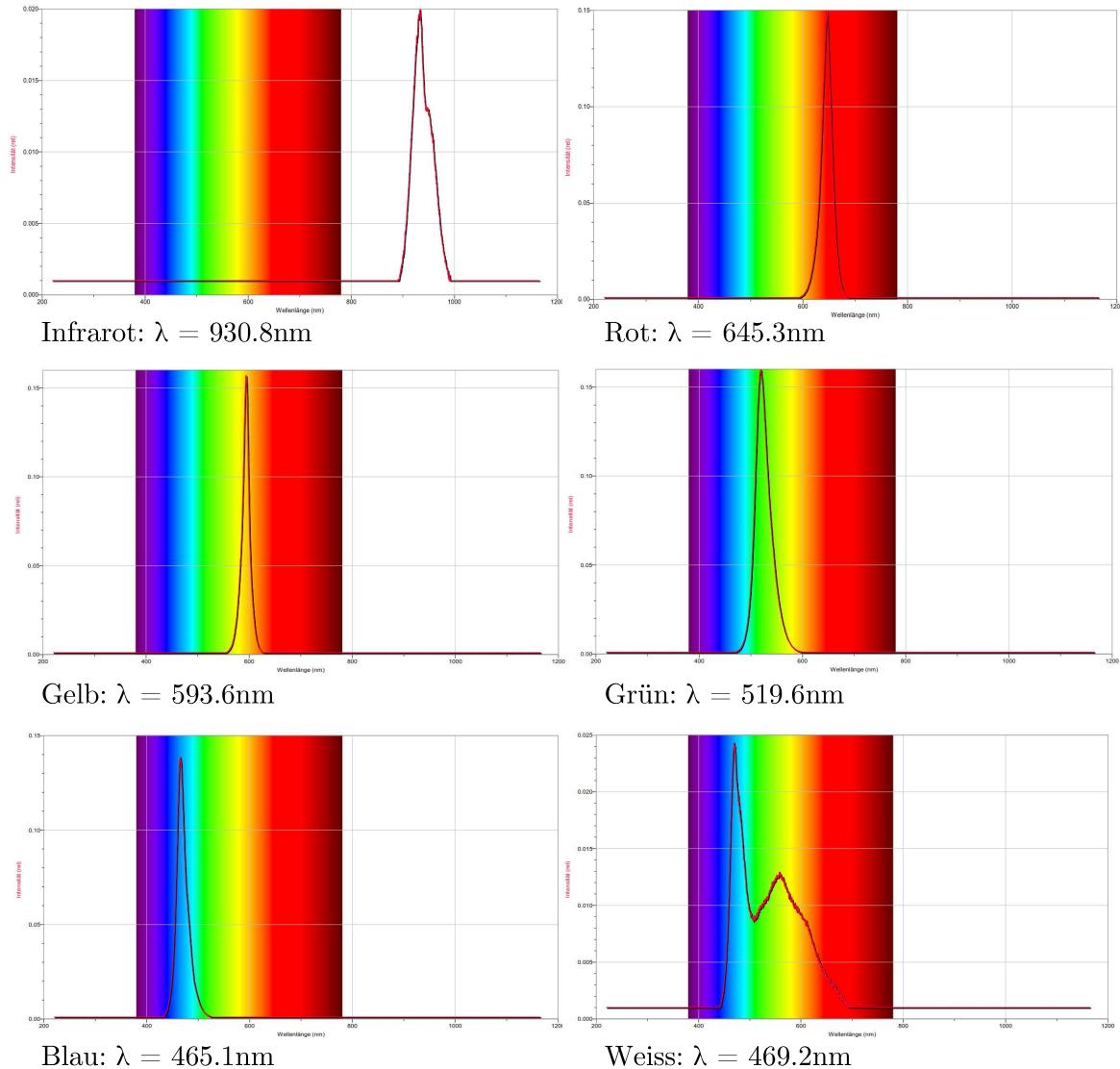


Abbildung 5: Spektrum von sechs verschiedenen 5mm Leuchtdioden

### 3.3.2 Messung der Durchlasskennlinie mit Knickspannung

Nachfolgend sind die Durchlasskennlinien der fünf gemessenen LED Dioden abgebildet.

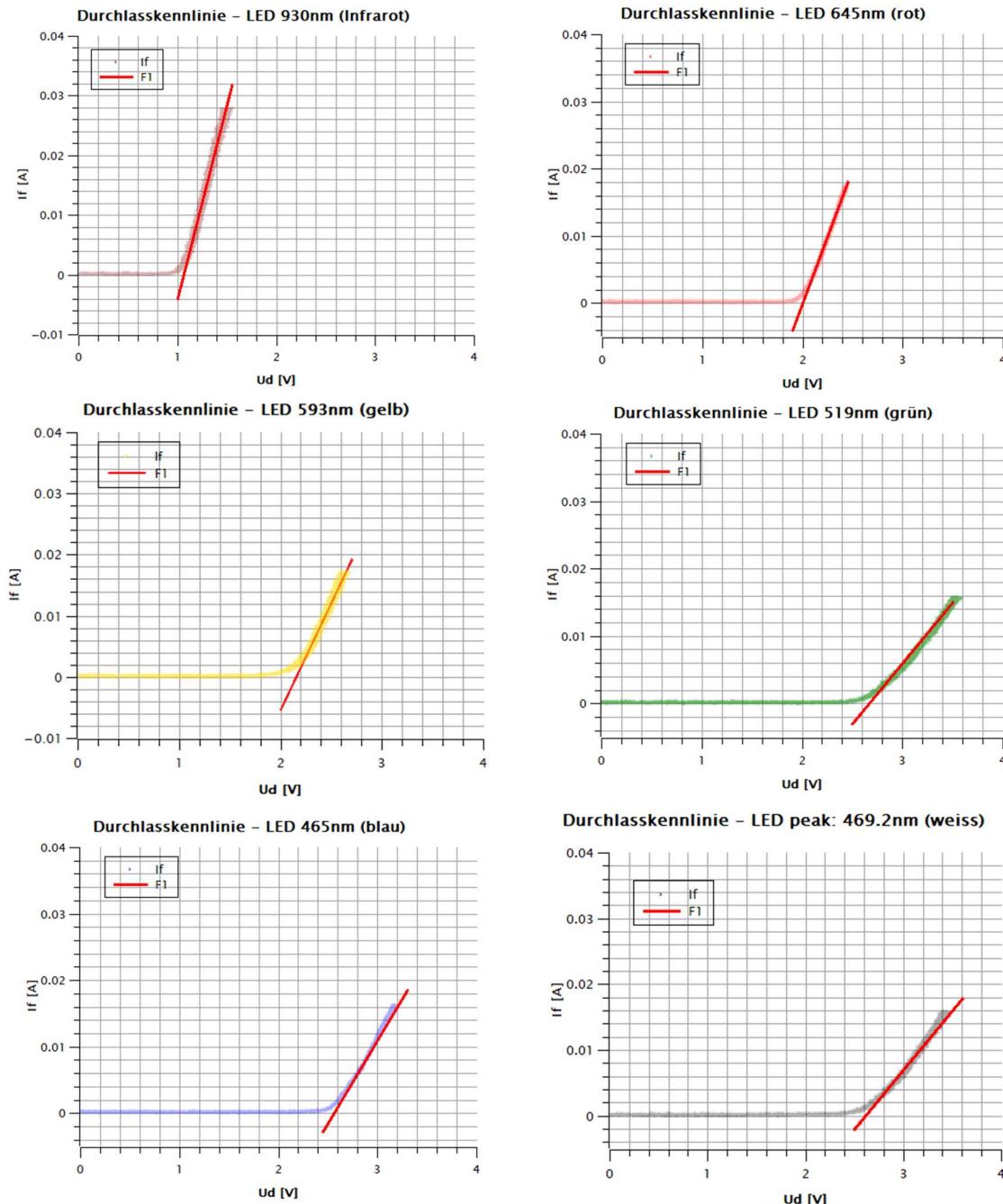


Abbildung 6: Spannungs-Strom-Kennlinien von 6 Leuchtdioden mit unterschiedlichen Farben

Jede Kennlinie wurde mit einer linearen Tangente  $y = m*x + q$  gefüttet. Die Parameter der einzelnen Tangenten sind nachfolgend in der Tabelle aufgeführt. Für den Nulldurchgang folgt für die Knickspannung:

$$U_k = x = -\frac{q}{m} [V]$$

Farbe	$\lambda$ [nm]	m	q	Knickspannung $U_k$ [V]	Planksche Konstante h [ $\text{m}^2\text{kg/s}$ ]
IR	930.8	0.065	-0.069	1.06	5.28 E-34
Rot	645.3	0.040	-0.080	2.00	6.89 E-34
Gelb	593.6	0.035	-0.0753	2.15	6.82 E-34
Grün	519.6	0.018	-0.048	2.67	7.40 E-34
Blau	465.1	0.025	-0.064	2.56	6.36 E-34
Weiss	469.2	0.018	-0.047	2.61	6.54 E-34

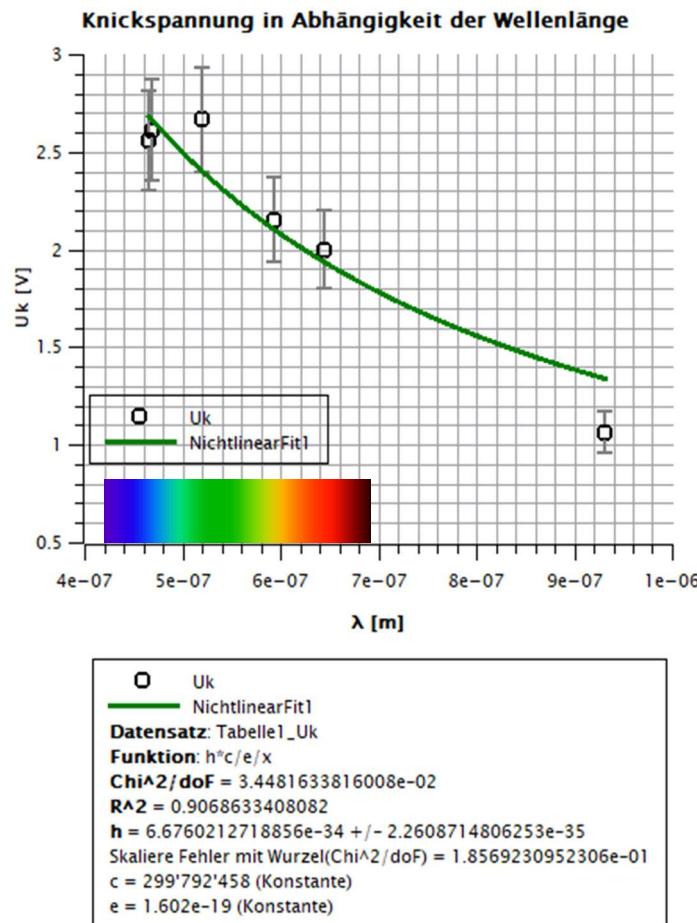


Abbildung 7: Knickspannungen von sechs verschiedenen Leuchtdioden mit Fitkurve zur Bestimmung der Planckschen Konstante h

## 4. Fehlerrechnung

In diesem Abschnitt werden die Fehlerquellen bewertet und die Fehlerrechnung für die Messung der Knickspannung durchgeführt.

Die beiden Versuche zur Messung der Photospannung (direkt und nach Millikan) sind qualitative Versuche. Die Messgenauigkeit war zu Begin des Versuches mit 10% geschätzt worden. Aus diesem Grund wird hier die detaillierte Fehlerrechnung weggelassen.

Beim zweiten Versuch ist die grösste Fehlerquelle, die Knickspannung korrekt zu bestimmen. Für die Fehlerrechnung wird die Formel 4.2 analysiert.

### 4.1 Fehlerquellen

Folgende Fehlerquellen werden für die Messung der Knickspannung betrachtet. Die Grössen sind in der Formel 4.2 enthalten. Die Lichtgeschwindigkeit c und die Elementarladung e werden als genaue Werte ohne Abweichung der Literatur entnommen.

Grösse	Messgenauigkeit	Absolut	Quelle
Knickspannung U	10%	$s_U = 0.261V$	Schätzung (weiss)
Peak Wellenlänge $\lambda$		$s_\lambda = 3 \text{ nm}$	Schätzung (weiss)
Statistische Abweichung h		$s_{hs} = 2.26 \text{ E-35 Js}$	Fitkurve

Grösse		Wert	Quelle
Lichtgeschwindigkeit	c	299 792 458 m/s	SI [3]
Elementarladung	e	1.602 E-19 C	SI [4]

### 4.2 Berechnung des Fehlers

#### 4.2.1 Statistische Fehler

Zum statistischen Fehler gehört die Abweichung der Planckschen Konstante aus der Fitkurve aller Knickspannungen in **Abbildung 7**.

$$s_{hstat} = 22.608 \text{ e-36 Js}$$

#### 4.2.2 Systematische Fehler

Mit der folgenden Formel wird der systematische Messfehler berechnet.

$$s_{\text{hsys}} = \left( \left( \frac{\partial h}{\partial U_k} \Bigg| \bar{U}_k * s_{U_k} \right)^2 + \left( \frac{\partial h}{\partial \lambda} \Bigg| \bar{\lambda} * s_{\lambda} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}}$$

Dabei sind die Teilfehler:

$$\left( \frac{\partial h}{\partial U_k} \Bigg| \bar{U}_k * s_{U_k} \right)^2 = \left( \frac{e\lambda}{c} \Bigg| \bar{U}_k * s_{U_k} \right)^2 = \left( \frac{1.602e-19 \text{ C} * 585.8e-9 \text{ m}}{299\,792\,458 \frac{\text{m}}{\text{s}}} * 0.261\text{V} \right)^2 = (8.1701e-35)^2$$

$$\left( \frac{\partial h}{\partial \lambda} \Bigg| \bar{\lambda} * s_{\lambda} \right)^2 = \left( U_k * \frac{e}{c} \Bigg| \bar{\lambda} * s_{\lambda} \right)^2 = \left( 2.08\text{V} * \frac{1.602e-19 \text{ C}}{299\,792\,458 \frac{\text{m}}{\text{s}}} * 3e-9\text{m} \right)^2 = (3.33e-36)^2$$

$$s_{\text{hsys}} = \sqrt{(81.701e-36)^2 + (3.33e-36)^2} = 8.177e-35 \text{ Js}$$

#### 4.2.3 Berechnung des gesamten Fehlers

$$s_h = \left( (s_{\text{hsys}})^2 + (s_{\text{hstat}})^2 \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$s_h = \sqrt{(81.77e-36)^2 + (22.608 e-36 )^2} =$$

$$\underline{8.48 E-35 \text{ Js}}$$

## 5. Resultate und Diskussion

Nachfolgend sind die Resultate mit ihrer Unsicherheit dargestellt. Die beiden Messungen der Photospannung sind nur qualitativ richtig, seien aber trotzdem zum Vergleich eingetragen.

Die Plancksche Konstante konnte auf eine signifikante Ziffer genau bestimmt werden. Der Vergleich mit anderen Messungen und derjenigen der CODATA zeigt, dass der Gemessene Wert mit seiner Unsicherheit den gesuchten Wert trifft.

Der grösste Teil des Fehlers wird durch die manuelle Ausmessung der Knickspannung und der dadurch hoch (10%) eingeschätzten Unsicherheit verursacht. Um eine genauere Messung zu erhalten, wäre als erstes eine Genauere Analyse der x-y-Daten der Diodenkennlinien notwendig.

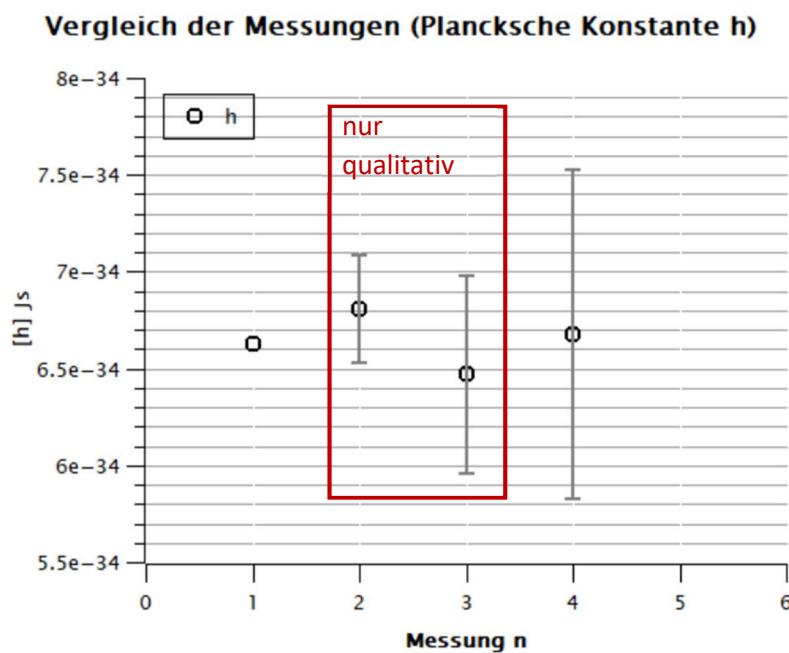


Abbildung 8: Vergleich der unterschiedlichen Messungen zur Bestimmung der Planckschen Konstante h

n	Beschreibung	$h [10^{-34} \text{ Js}]$	
1	Wert aus der Literatur	$6.62607015 \times 10^{-34}$	Quelle: [5]
2	Messung der Photospannung (direkt)	$6.8 \pm 0.3 \times 10^{-34}$	(statistischer Fehler)
3	Messung der Photospannung (Milikan)	$6.5 \pm 0.5 \times 10^{-34}$	(statistischer Fehler)
4	Messung des Photoeffektes bei LEDs	$6.7 \pm 0.8 \times 10^{-34}$	

## 6. Quellen

- [1] A 8 *Lichtquanten Version 14*, Windisch: FHNW Hochschule für Technik, 2014.
- [2] M. Davidson, „ZEISS Microscopy Online Campuss - Mercury Arc Lamps,“ [Online]. Available: <http://zeiss-campus.magnet.fsu.edu/articles/lightsources/mercuryarc.html>. [Zugriff am 17 May 2019].
- [3] „CODATA Value: speed of light in vacuum,“ CODATA recommended values, 2018. [Online]. Available: <https://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?c>. [Zugriff am 21 May 2019].
- [4] „CODATA Value: elementary charge,“ CODATA recommended values, 2018. [Online]. Available: <https://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?e>. [Zugriff am 21 May 2019].
- [5] „CODATA Value: Planck constant,“ CODATA, 2018. [Online]. Available: <https://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?h>. [Zugriff am 21 May 2019].

## 7 Anhang

Farbe				Knickspannung theorie			Knickspannung	Plancksche Konstante	Messfehler (10%)
	<b><math>\lambda</math> [nm]</b>	<b><math>\lambda</math> [m]</b>	<b>f [Hz]</b>	<b>U [V]</b>	m	q	<b>Uk [V]</b>	<b>h</b>	<b>s_U [V]</b>
IR	930.8	9.308E-07	3.2208E+14	1.33216445	0.065	-0.069	1.061538	5.28E-34	0.106153846
rot	645.3	6.453E-07	4.6458E+14	1.9215538	0.04	-0.08	2	6.9E-34	0.2
gelb	593.6	5.936E-07	5.0504E+14	2.08891285	0.035	-0.0753	2.151429	6.82E-34	0.215142857
grün	519.6	5.196E-07	5.7697E+14	2.38641006	0.018	-0.048	2.666667	7.4E-34	0.266666667
blau	465.1	4.651E-07	6.4458E+14	2.66604745	0.025	-0.064	2.56	6.36E-34	0.256
weiss	469.2	4.692E-07	6.3894E+14	2.64275078	0.018	-0.047	2.611111	6.55E-34	0.261111111