

3.1 VIS/NIR-Spektroskopie @home

Hard- und Software-Voraussetzungen:

- Computer (Windows/macOS/Linux) oder Tablet (iPadOS/Android)
Hinweis: Ein Smartphone bietet an dieser Stelle ein etwas zu kleines Display, das macht die Bedienung schwierig bis unmöglich.
- Webbrowser mit JavaScript

In diesem Experiment sollen virtuell die Spektralverteilungen verschiedener Lichtquellen sowie das Transmissionsvermögen verschiedener Körper für elektromagnetische Strahlung im Spektralbereich des sichtbaren Lichtes und der unmittelbar angrenzenden Bereiche untersucht werden.

Mit den folgenden Fragen sollten Sie sich bereits vor der Versuchsdurchführung beschäftigen. Sie sind die Grundlage für das Gespräch mit Ihrer Tutorin/Ihrem Tutor vor dem Versuch. Informationen zu diesen Themen erhalten Sie in jedem grundlegenden Physik-Lehrbuch, wie Sie es auch für die Experimentalphysik-Vorlesung verwenden.

- a) Was versteht man in der Physik unter dem Begriff „Spektrum“?
- b) Welchen Wellenlängen umfasst das sichtbare Spektrum in etwa?
- c) Wie werden die direkt angrenzenden Spektralbereiche genannt?
- d) Wie sieht das Sonnenspektrum qualitativ aus?
- e) Nicht alles Licht, das auf ein Medium trifft, wird transmittiert. Selbst dann nicht, wenn das Medium (weitestgehend) farblos und transparent ist. Welche Vorgänge treten außerdem noch auf?

3.1.1 Grundlagen

3.1.1.1 Sichtbares Licht

Das menschliche Auge reagiert auf elektromagnetische Wellen mit Wellenlängen (im Vakuum bzw. näherungsweise in Luft gemessen) von ca. 380 nm bis ca. 780 nm mit dem Sinnesindruck „hell“.¹ Die unmittelbar angrenzenden Spektralbereiche rufen keinen derartigen Sinnesreiz hervor, können aber bei entsprechender Intensität durchaus dauerhafte Schäden am Auge hervorrufen, sodass hier besondere Vorsicht geboten ist.

Eine gängige Einteilung der Spektralbereiche ist in Tabelle 3.1 dargestellt.

¹Dieser Bereich ist nicht scharf begrenzt. Die Empfindlichkeit der menschlichen Sehzellen nimmt zu den Rändern dieses Bereichs hin stark ab, so dass es letztlich von der Intensität der Strahlung abhängt, ob sie noch „sichtbar“ ist (siehe auch Abbildung 3.2).

²Dieser Wellenlängenbereich wurde früher als weiche Röntgenstrahlung ((engl.) *soft X-ray*) bezeichnet, dann aber aus „kosmetischen“ Gründen in EUV umbenannt – ein ähnlicher Vorgang wie bei der Kernspintomographie, die heute als Magnetresonanztomographie ((engl.) *Magnetic Resonance Imaging = MRI*) bezeichnet wird, möglicherweise auch, um das Wort „Kern“ zu vermeiden.

³Die Obergrenze der Energie von Photonen in der Höhenstrahlung (und damit gleichzeitig der höchstenergetischen bekannten γ -Strahlung) ist unklar, die Interpretation der experimentellen Ergebnisse ist derzeit (Stand 2006) offen. Es ist aber davon auszugehen, dass zumindest die sog. Planck-Energie $E_{\text{Planck}} = 1,22 \cdot 10^{28}$ eV eine Obergrenze darstellt.

Die Photonen stellen nur einen kleinen Teil der gesamten Höhenstrahlung dar. Der überwiegende Teil besteht aus Protonen und α -Teilchen. Weiterhin kommen auch schwere Atomkerne, Elektronen und Neutrinos vor.

Abkürzung	Bezeichnung	Wellenlänge λ im Vakuum		Frequenz f		Energie E				
VLF	Längstwellen ((engl.) <i>very low frequency</i>)	∞ m	$\geq \lambda \geq$	10 km	0	$\lesssim f \lesssim$	30 kHz	0	$\lesssim E \lesssim$	$1,24 \cdot 10^{-10}$ eV
LW	Langwellen	20 km	$\geq \lambda \geq$	1 km	15 kHz	$\lesssim f \lesssim$	300 kHz	$6,2 \cdot 10^{-11}$ eV	$\lesssim E \lesssim$	$1,24 \cdot 10^{-9}$ eV
MW	Mittelwellen	1 km	$\geq \lambda \geq$	200 m	300 kHz	$\lesssim f \lesssim$	1,5 MHz	$1,24 \cdot 10^{-9}$ eV	$\lesssim E \lesssim$	$6,2 \cdot 10^{-9}$ eV
KW	Kurzwellen	200 m	$\geq \lambda \geq$	10 m	1,5 MHz	$\lesssim f \lesssim$	30 MHz	$6,2 \cdot 10^{-9}$ eV	$\lesssim E \lesssim$	$1,24 \cdot 10^{-7}$ eV
UKW/VHF	Ultrakurzwellen ((engl.) <i>very high frequency</i>)	10 m	$\geq \lambda \geq$	1 m	30 MHz	$\lesssim f \lesssim$	300 MHz	$1,24 \cdot 10^{-7}$ eV	$\lesssim E \lesssim$	$1,24 \cdot 10^{-6}$ eV
UHF	((engl.) <i>ultra high frequency</i>) Mikrowellen	1 m	$\geq \lambda \geq$	0,1 m	300 MHz	$\lesssim f \lesssim$	3 GHz	$1,24 \cdot 10^{-6}$ eV	$\lesssim E \lesssim$	$1,24 \cdot 10^{-5}$ eV
FIR	fernes Infrarot	0,1 m	$\geq \lambda \geq$	1 mm	3 GHz	$\lesssim f \lesssim$	300 GHz	$1,24 \cdot 10^{-5}$ eV	$\lesssim E \lesssim$	$1,24 \cdot 10^{-3}$ eV
MIR	mittleres Infrarot	1000 μ m	$\geq \lambda \geq$	15 μ m	300 GHz	$\lesssim f \lesssim$	$2 \cdot 10^{13}$ Hz	$1,24 \cdot 10^{-3}$ eV	$\lesssim E \lesssim$	$8,27 \cdot 10^{-2}$ eV
NIR	nahes Infrarot	15 μ m	$\geq \lambda \geq$	1,4 μ m	$2 \cdot 10^{13}$ Hz	$\lesssim f \lesssim$	$2,14 \cdot 10^{14}$ Hz	$8,27 \cdot 10^{-2}$ eV	$\lesssim E \lesssim$	$8,86 \cdot 10^{-1}$ eV
VIS	sichtbares Licht ((engl.) <i>visible light</i>)	1,4 μ m	$\geq \lambda \geq$	700 nm	$2,14 \cdot 10^{14}$ Hz	$\lesssim f \lesssim$	$4,28 \cdot 10^{14}$ Hz	$8,86 \cdot 10^{-1}$ eV	$\lesssim E \lesssim$	1,77 eV
UVA	Ultraviolett A	780 nm	$\geq \lambda \geq$	400 nm	$3,84 \cdot 10^{14}$ Hz	$\lesssim f \lesssim$	$7,49 \cdot 10^{14}$ Hz	1,59 eV	$\lesssim E \lesssim$	3,1 eV
UVB	Ultraviolett B	400 nm	$\geq \lambda \geq$	320 nm	$7,49 \cdot 10^{14}$ Hz	$\lesssim f \lesssim$	$9,37 \cdot 10^{14}$ Hz	3,1 eV	$\lesssim E \lesssim$	3,87 eV
UVC/VUV	Vakuum-Ultraviolett	320 nm	$\geq \lambda \geq$	280 nm	$9,37 \cdot 10^{14}$ Hz	$\lesssim f \lesssim$	$1,07 \cdot 10^{15}$ Hz	3,87 eV	$\lesssim E \lesssim$	4,43 eV
EUV/XUV	extremes Ultraviolett ²	280 nm	$\geq \lambda \geq$	190 nm	$1,07 \cdot 10^{15}$ Hz	$\lesssim f \lesssim$	$1,58 \cdot 10^{15}$ Hz	4,43 eV	$\lesssim E \lesssim$	6,53 eV
X	Röntgenstrahlung ((engl.) <i>X-ray</i>)	190 nm	$\geq \lambda \geq$	1 nm	$1,58 \cdot 10^{15}$ Hz	$\lesssim f \lesssim$	$3 \cdot 10^{17}$ Hz	6,53 eV	$\lesssim E \lesssim$	1,24 keV
γ	γ -Strahlung, Höhenstrahlung ³	12,5 nm	$\geq \lambda \geq$	1,25 pm	$2,4 \cdot 10^{16}$ Hz	$\lesssim f \lesssim$	$2,4 \cdot 10^{20}$ Hz	100 eV	$\lesssim E \lesssim$	1 MeV
		0,5 nm	$\geq \lambda \geq$	0	$6 \cdot 10^{17}$ Hz	$\lesssim f \lesssim$	∞ Hz	2,48 keV	$\lesssim E \lesssim$	∞ eV

Tabelle 3.1: Übliche Einteilung der Wellenlängen- und Energiebereiche elektromagnetischer Strahlung. Diese Einteilung unterliegt einer gewissen Willkür und ist nicht international vereinheitlicht. Daher kommt es auch je nach Definition zu Überlappungen der Bereiche. In der Literatur sind durchaus abweichende Einteilungen zu finden.

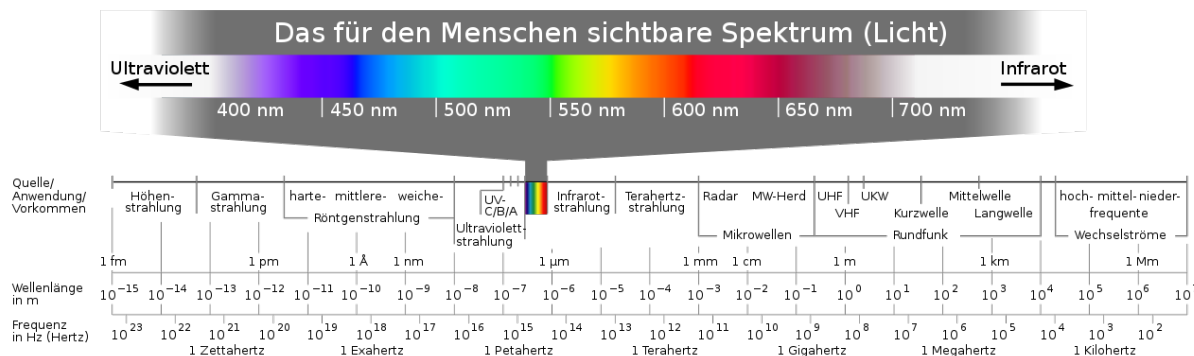


Abbildung 3.1: Elektromagnetisches Spektrum [Quelle: https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Electromagnetic_spectrum_-de_c.svg&oldid=390796021]

3.1.1.2 Schwarzkörperstrahlung

Jeder Körper, der eine Temperatur von $T > 0\text{ K}$ besitzt, sendet elektromagnetische Wellen aus. Das Spektrum hängt dabei von der Temperatur ab. Ein ideal strahlender Körper wird auch als Schwarzer Körper bezeichnet, weil er nicht nur ideal strahlt, sondern auch Licht aller Wellenlängen ideal absorbiert und daher schwarz aussieht, solange er nicht heiß ist.

3.1.1.3 Wien'sches Verschiebungsgesetz

Je nach Temperatur eines Körpers liegt das Maximum seiner Strahlungsintensität bei einer anderen Wellenlänge. Der Zusammenhang wird durch das Wien'sche Verschiebungsgesetz beschrieben:

$$\lambda_{\max} = \frac{2,8978 \cdot 10^{-3} \text{ K m}}{T} \quad (3.1)$$

mit

$$\begin{aligned} \lambda_{\max} &= \text{Wellenlänge der maximalen Intensität} \\ T &= \text{absolute Temperatur („Kelvin-Temperatur“)} \end{aligned}$$

Für die Sonne ergibt sich bei einer effektiven Oberflächentemperatur von 5778 K für das Maximum eine Wellenlänge von $\frac{2,8978 \cdot 10^{-3} \text{ K m}}{5778 \text{ K}} = 5,015 \cdot 10^{-7} \approx 500\text{ nm}$.

Glühlampen haben das Strahlungsmaximum bei sehr viel größeren Wellenlängen. Für eine typische effektive Temperatur des Glühdrahtes von 2700 K liegt das Maximum bei einer Wellenlänge von $\frac{2,8978 \cdot 10^{-3} \text{ K m}}{2700 \text{ K}} = 1,073 \cdot 10^{-6} \approx 1000\text{ nm}$ und damit nicht mehr im Bereich des sichtbaren Lichts, sondern im Infrarot-Bereich. Eine Glühlampe ist also optimal geeignet als Wärmestrahler, aber nicht als Lichtquelle.

3.1.1.4 Elektrische Glühlampe („Glühlampe“)

Elektrische Glühlampen gibt es schon seit Anfang des 19. Jahrhunderts. Sie nutzen einen elektrisch erhitzten Draht (in den Anfängen teilweise auch einen leitfähigen Kohlefaden), um thermi-

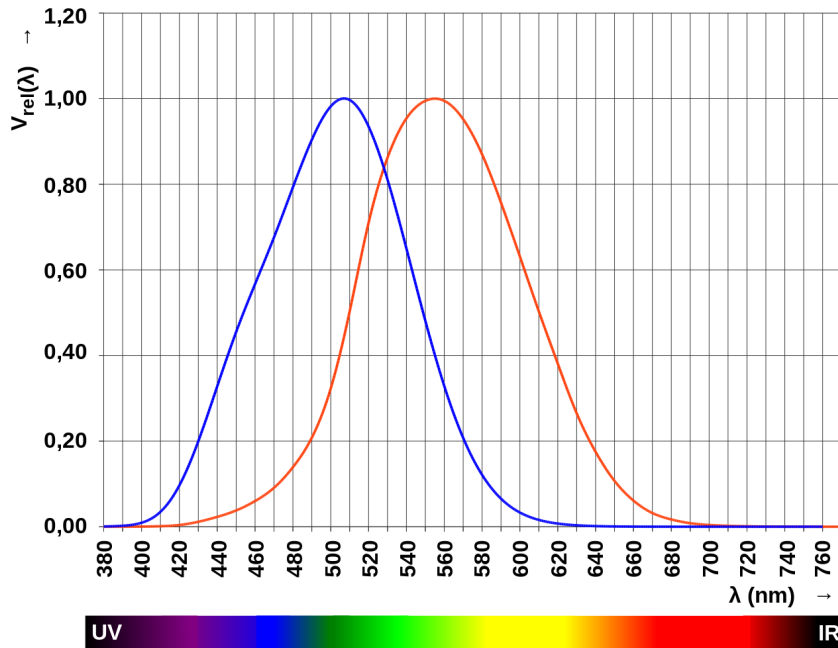


Abbildung 3.2: Relative spektrale Empfindlichkeit des menschlichen Auges für Nachtsehen (blau) und Tagsehen (rot) [Quelle <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:V-lambda-phot-scot.svg&oldid=250556156>]

sche Strahlung (Schwarzkörperstrahlung) zu erzeugen. Energieeffizienz (Lichtausbeute pro eingesetzter elektrischer Energie) und Lebensdauer sind nicht besonders gut (Begründung für die Energieeffizienz siehe oben, die Lebensdauer ist zwangsläufig dadurch begrenzt, dass der Glühdraht im Laufe der Zeit verdampft und dadurch irgendwann an einer dünnen Stelle mechanisch zerbricht), weshalb diese Art der Beleuchtung heute nur noch wenig eingesetzt wird.

Die Farbwiedergabe bei Beleuchtung mittels Glühlampen ist andererseits recht gut (d. h. die Farben sehen sehr ähnlich aus wie im Tageslicht) und sie können sehr einfach in ihrer Helligkeit geregelt („gedimmt“) werden. Bei geringerer Helligkeit verschiebt sich das emittierte Spektrum ins Rötliche, was in vielen Fällen sogar ein erwünschter Effekt ist („gemütliches Licht“).

3.1.1.5 Gasentladungslampe, Leuchtstofflampe und Energiesparlampe

In vielen Lichtquellen wird ein elektrischer Strom durch ein ionisiertes Gas im Inneren einer durchsichtigen Glasröhre geleitet. Dabei werden die Ionen und Elektronen durch ein elektrisches Feld beschleunigt. Durch Stöße zwischen Elektronen, Ionen und Atomen werden Ionen und Atome energetisch angeregt. Anschließend wird die Anregungsenergie zum Teil in Form von elektromagnetischer Strahlung wieder abgegeben. Ein anderer Teil wird in thermische Energie umgewandelt.

Sofern die elektromagnetische Strahlung im Wellenlängenbereich des sichtbaren Lichts liegt, kann sie direkt verwendet werden. Das ist z. B. der Fall bei den „echten Neonröhren“ von Leuchtreklamen aus den 1950er-Jahren. Je nach verwendeten Edelgas leuchtet die Röhre in einer anderen Farbe. Unter <https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Leuchtr%C3%B6hre&oldid=185429758#Farben> finden Sie einige Beispiele. Auch die im IBE verwendeten Spektrallampen sind von diesem Typ und enthalten jeweils nur ein Element, Helium, Neon oder Sauer-

stoff.

In vielen Leuchtröhren wird der Strom allerdings vorwiegend durch Quecksilbergas geleitet, das hauptsächlich unsichtbare UV-Strahlung emittiert. Dann wird auf der Innenwand der Glasröhre ein „Leuchtstoff“ aufgebracht, der durch den Vorgang der Fluoreszenz die UV-Strahlung in sichtbares Licht umwandelt. Die Art des Leuchtstoffs bestimmt die Farbe. Ohne UV-Bestrahlung sieht der Leuchtstoff immer weiß aus, völlig unabhängig davon, wie er beim Betrieb der Röhre leuchtet. Ähnliche Leuchtstoffe finden sich in vielen Waschmitteln, insbesondere in praktisch allen Weiß- und Gardinenwaschmitteln. Sie werden dort unter der Bezeichnung „optische Aufheller“ in der Inhaltsangabe aufgelistet und dienen dazu, UV-Licht in weißes Licht umzuwandeln, damit die Stoffe besonders „sauber“ aussehen. Das ist auch der Grund, warum weiße Hemden bei Partys unter „Schwarzlicht“ (d. h. UV-Licht) so schön leuchten.

Leuchtstoffröhren sind um ungefähr einen Faktor 5 effizientere Lichtquellen als Glühlampen.

3.1.1.6 Leuchtdiode (LED)

Die derzeit effizientesten Alltags-Lichtquellen sind Leuchtdioden (LED = *light emitting diode*).

Dabei handelt es sich um Halbleiterbauelemente (ähnlich den Transistoren und Microchips), die elektrische Energie direkt in elektromagnetische Strahlungsenergie umwandeln können. Je nach verwendetem Material ergibt sich eine andere Wellenlänge. Die heute oft verwendeten weißen LEDs bestehen letztlich aus einer blauen LED, deren blaues Licht zum Teil durch Fluoreszenz einer geeigneten Leuchtstoffmischung in andere Wellenlängen umgewandelt wird. Das menschliche Auge nimmt die Mischung dann als weiß wahr.

LEDs sind um ungefähr einen Faktor 8 effizientere Lichtquellen als Glühlampen und sparen somit auch am meisten Geld bei der Wohnungsbeleuchtung. Die höheren Anschaffungskosten sind dabei schnell wieder eingespart, zumal die LEDs viel länger betrieben werden können!

3.1.2 Versuchsdurchführung

Auf der Seite

<https://tetfolio.fu-berlin.de/web/993871>

finden Sie mehrere Versuchsteile in Form von Interaktiven Bildschirm-Experimenten (IBE), die im Rahmen des AP@home verwendet werden. Die Bedienung der IBE ist jeweils direkt auf der entsprechenden Webseite beschrieben.

Experimentieren Sie bei allen Versuchsteilen mit allen Untersuchungsobjekten des jeweiligen IBE und **speichern Sie dabei für die in der Anleitung angegebenen Objekte** jeweils einen Screenshot der auf dem IBE-Monitor angezeigten Spektren zur späteren Auswertung. Nutzen Sie dazu die vergrößerte Anzeige im IBE und notieren Sie sich jeweils, zu welchem Untersuchungsobjekt das auf dem Screenshot zu sehende Spektrum gehört.

Allgemeine Hinweise zur Bedienung:

- Wenn Sie unter dem Bild des IBE auf das gelbe „+“ klicken, werden Ihnen Hilfetexte zur Bedienung eingeblendet.
- Die Bedienelemente im Bild sind teilweise recht klein. Sie wissen, dass Sie an der richtigen Stelle sind, wenn der Mauszeiger seine Form ändert („Hand“-Symbol statt Pfeil).

- Die Darstellung des Spektrums auf dem „Monitor“ innerhalb des IBE kann durch Klicken auf das Symbol in der rechten oberen Ecke dieses „IBE-Monitors“ vergrößert werden.

3.1.2.1 Emissionsspektren von Haushaltslampen

<https://tetfolio.fu-berlin.de/web/1019287>

Speichern Sie folgende Spektren:

- Glühlampe
- Energiesparlampe
- eine der beiden LED-Lampen

3.1.2.2 Emissionsspektren von Spektrallampen

<https://tetfolio.fu-berlin.de/web/1033997>

Speichern Sie das folgende Spektrum:

- He-Spektrallampe

3.1.2.3 Emissionsspektrum einer Glühlampe

<https://tetfolio.fu-berlin.de/web/1034049>

Speichern Sie je ein Spektrum für eine schwach leuchtende Glühlampe (Betriebsspannungsregler nach links gedreht) und ein Spektrum für eine stark leuchtende Glühlampe (Betriebsspannungsregler nach rechts gedreht).

Versuchen Sie die Messung sowohl im Modus „Auto Gain ON“ als auch im Modus „Auto Gain OFF“ durchzuführen. Notieren Sie Ihre Beobachtungen.

Hinweis: Die dargestellten Spektren zeigen nicht den korrekten Kurvenverlauf, weil bei der Aufnahme absichtlich auf die Kalibrierung (Korrektur der wellenlängenabhängigen Empfindlichkeit des Spektrometers) verzichtet wurde, um die Verschiebung des Maximums deutlicher sichtbar zu machen.

3.1.2.4 Emissionsspektren von Leuchtdioden (LED)

<https://tetfolio.fu-berlin.de/web/1034027>

Speichern Sie folgende Spektren:

- „480 nm“-LED
- „590 nm“-LED
- „950 nm“-LED

3.1.2.5 Emissionsspektren von Bildschirmfarben eines Handy-Displays

<https://tetfolio.fu-berlin.de/web/1034071>

Speichern Sie folgende Spektren:

- blau
- grün
- rot
- weiß

3.1.2.6 Transmissionsspektroskopie

<https://tetfolio.fu-berlin.de/web/1034142>

Speichern Sie folgende Transmissionsspektren:

- Fluorescein
- blaue Tinte

3.1.2.7 Flammenspektroskopie

<https://tetfolio.fu-berlin.de/web/1126024>

Speichern Sie folgende Spektren:

- KCl
- NaCl
- LiCl

3.1.2.8 Fraunhoferlinien im Sonnenspektrum

<https://tetfolio.fu-berlin.de/web/1034176>

Speichern Sie ein Sonnenspektrum.

3.1.3 Auswertung

3.1.3.1 Emissionsspektren von Haushaltslampen

Beschreiben Sie vergleichend die charakteristischen Eigenschaften der gespeicherten Spektren.

Was kostet elektrische Beleuchtung? Berechnen Sie jeweils die Kosten für die elektrische Energie, die durch den Betrieb der folgenden etwa gleich hellen Leuchtmittel entstehen, wenn diese 1 Jahr lang jeden Tag für 5 Stunden betrieben werden und Ihr Energieversorger Ihnen einen Preis von $0,30 \frac{\text{€}}{\text{kWh}}$ in Rechnung stellt:

- $P_1 = 100$ W Glühbirne
- $P_2 = 20$ W Energiesparlampe
- $P_3 = 13$ W weiße LED

Hinweis für den Fall, dass die Formeln und Bezeichnungen in Vergessenheit geraten sein sollten:

$$\text{elektrische Leistung} = P \quad (3.2)$$

$$\text{elektrische Arbeit} = W_{\text{el}} = P \cdot t \quad (3.3)$$

$$\text{Kosten} = W_{\text{el}} \cdot 0,30 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} \quad (3.4)$$

3.1.3.2 Emissionsspektren von Spektrallampen

Bestimmen Sie jeweils die Wellenlängen der stärksten Spektrallinien und schätzen Sie die Messunsicherheit ab.

Vergleichen Sie Ihr Ergebnis mit den Wellenlängen aus folgender Datenbank:

https://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/lines_form.html

3.1.3.3 Emissionsspektren von Leuchtdioden (LED)

Bestimmen Sie jeweils die Wellenlänge des Emissionsmaximums und schätzen Sie die Messunsicherheit ab.

Stimmen Ihre Ergebnisse mit den Angaben auf den LED überein?

Hinweis: Auch bei dieser Messung scheint das Spektrometer nicht kalibriert worden zu sein. Warum kann das zu dem beobachteten Ergebnis führen?

3.1.3.4 Emissionsspektrum einer Glühlampe

Beschreiben Sie qualitativ die Veränderungen des Spektrums bei Änderung der Betriebsspannung.

3.1.3.5 Emissionsspektren von Bildschirmfarben eines Handy-Displays

Bestimmen Sie jeweils die Wellenlänge der maximalen Emission für die drei Grundfarben des Displays und schätzen Sie die Messunsicherheit ab.

3.1.3.6 Transmissionsspektroskopie

Bestimmen Sie jeweils die Wellenlänge der minimalen Transmission und schätzen Sie die Messunsicherheit ab.

3.1.3.7 Flammenspektroskopie

Bestimmen Sie jeweils die Wellenlängen der stärksten Spektrallinien und schätzen Sie die Messunsicherheit ab.

Vergleichen Sie Ihr Ergebnis mit den Wellenlängen aus folgender Datenbank:

https://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/lines_form.html

3.1.3.8 Fraunhoferlinien im Sonnenspektrum

Für diesen Versuchsteil ist keine Auswertung vorgesehen.