

Farbexperimente mit RGB-Leuchtdioden

Christian Hanisch*, Wolfgang Oehme⁺, Michael Ziese*

*Physikalisches Grundpraktikum, Fakultät für Physik und Geowissenschaften, Universität Leipzig

⁺ Bereich Didaktik der Physik, Fakultät für Physik und Geowissenschaften, Universität Leipzig
oehme@physik.uni-leipzig.de

Kurzfassung

Interessante Farbeffekte treten auf, wenn man durch ein Glasprisma auf Hell-Dunkel- oder Farbstrukturen schaut. In der vorliegenden Arbeit werden Kombinationen aus Spalt und Steg untersucht, um solche Farbeffekte zu hinterfragen. Bei den Experimenten werden RGB-LED-Leuchten eingesetzt, um Spalt- und Stegmasken variabel und homogen mit farbigem Licht auszuleuchten. Dadurch gelingt es, das den Spalt durchsetzende Licht in unterschiedliche Umgebung einzubetten. Mit einem Geradsichtprisma werden Spektren des Spaltlichts, des Umgebungslichts und des Gesamtlichts erzeugt. Ein einfaches RGB-Modell unterstützt die Analyse der Spektren. Selbst zunächst überraschende Farbfelder lassen sich dadurch mit den Gesetzmäßigkeiten der Newtonschen Optik erklären.

1. Einleitung

Der Blick durch ein Glasprisma in die kahle Krone einer Eiche liefert ein vielschichtiges Farbbild, dessen Original man kaum erahnen kann. Einfachere Verhältnisse liegen bei Strukturen aus Spalten und Stegen einheitlicher Breite vor, wie sie in dieser Arbeit untersucht werden.



Abb. 1: Blick in die Krone einer Eiche (links: Original; rechts: Blick durchs Prisma)

J. W. v. Goethe entdeckte vor über 200 Jahren bei seinen systematischen Studien an definierten Hell-Dunkel-Feldern die Kantenspektren und die komplementären Spektren ([1, 2], s. Abb.2). Er war bestrebt aufzuzeigen, dass Farben erst beim Wettstreit des Lichts an solchen Hell-Dunkel-Kanten entstehen. Bei aller Kritik an Newtons Vorgehen [3] gelang es ihm aber nicht, Newtons Nachweis zu entkräften, wonach das Sonnenlicht bereits die Spektralfarben enthält [4-6].

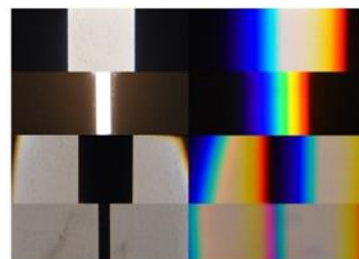


Abb. 2: Spektren bei variabler Spalt- und Stegbreite (Kantenspektren und komplementäre Spektren)

In den letzten Jahren wurden Untersuchungen vorgestellt, die einige der Betrachtungen Goethes auf Farbfelder erweitern [7-9]. Die im Folgenden beschriebenen Experimente mit RGB-LED-Leuchten als Lichtquellen erlauben es, diese Untersuchungen nachzuvollziehen, zu erweitern und zu hinterfragen. Ein RGB-Modell, das auf dem Spaltspektrum des verwendeten Lichts aufbaut und die Regeln der additiven Farbmischung nutzt, unterstützt die Aussagen der experimentellen Ergebnisse.

2. Experimente mit RGB-Leuchtdioden

2.1. Experimentieranordnung

Eine kurze und eine lange optische Bank bilden im Winkel von 90° eine stabile Einheit (s. Abb.3). Die beiden RGB-LED-Leuchten wurden an die optische Bank angepasst und mit einer Steuereinheit betrieben. Sie leuchten eine Spalt- bzw. eine Stegblende homogen mit dem ausgewählten Licht aus. Im Kreuzungspunkt der optischen Bänke befindet sich ein

Strahlteiler, der die Teilbilder überlagert. Danach folgt ein Geradsichtprisma, das während der Experimente entfernt und exakt wieder in der gleichen Position eingesetzt werden kann. Dies ermöglicht es, im beliebigen Wechsel das Spalt-, das Steg- und das Gesamtlicht sowie die entsprechenden Spektren auf dem Schirm abzubilden. Blenden und Linsen sorgen für einen optimalen Strahlengang.



Abb. 3: Versuchsaufbau

Abb.4 veranschaulicht das Vorgehen anhand eines Weiß-Magenta-Farbfeldes. An einer RGB-LED-Leuchte sind die rote, die grüne und die blaue LED angeschaltet, wodurch der Spalt mit weißem Licht beleuchtet wird. An der anderen Leuchte sind die rote und die blaue LED angeschaltet, um das Feld um den Steg mit magentafarbenem Licht auszuleuchten. Im Strahlteiler werden beide Lichter überlagert. Das Geradsichtprisma erzeugt das Spektrum des überlagerten Lichts.

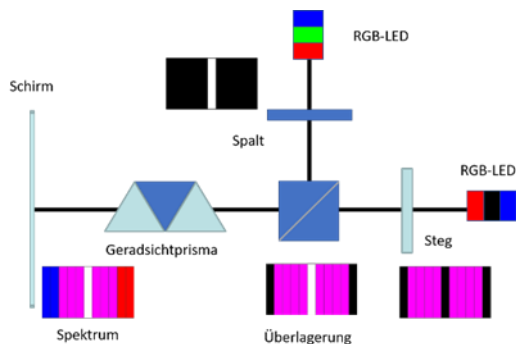
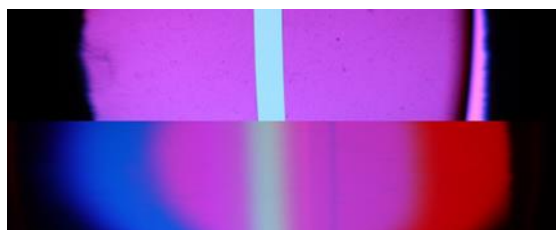


Abb. 4: Prinzip des Versuchsaufbaus

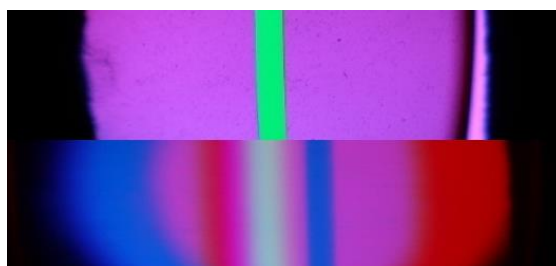
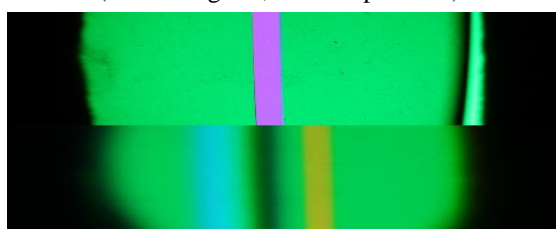
2.2. Ausgewählte Experimente

Vier ausgewählte Farbfelder sollen im Folgenden näher betrachtet werden. Wird die Stegmaske mit magentafarbenem Licht und der Spalt mit weißem Licht beleuchtet, so entsteht ein magentafarbenes Feld mit zentralem Weiß. Durchläuft dieses Licht ein Geradsichtprisma, so stellt sich keine Veränderung im Zentrum ein (s. Abb. 5). Tauscht man die Lichtzuordnung, dann bleibt auch diese nach dem Prisma erhalten (s. Abb. 6), wie bereits durch die Untersuchungen von Rang u.a. [7] bekannt ist.

Abb. 5: Weiß-Magenta-Feld
(oben: Original; unten: Spektrum)Abb. 6: Magenta-Weiß-Feld
(oben: Original; unten: Spektrum)

In beiden Fällen erkennt man nur an den hinzukommenden Kantenspektren, dass das Licht ein Prisma durchlaufen hat. Dass das zentrale weiß und magentafarbene Licht nicht verändert wurde, steht scheinbar im Gegensatz zur Newtonschen Optik [3].

Wir nehmen jetzt eine drastische Veränderung vor, indem wir statt des weißen Lichts grünes Licht einsetzen. Bleibt das magentafarbene Licht erhalten, so entstehen die bereits von Nussbaumer [9] studierten Farbfelder. Obwohl im Falle des Grün-Magenta-Feldes (s. Abb.7) kein weißes Licht eingesetzt wurde, entsteht im Spektrum ein zentraler weißer Bereich. Im Gegensatz dazu führt ein Farbtausch dazu, dass im Spektrum eine zentrale schwarze Linie erscheint (s. Abb.8). Während im ersten Fall weiteres Licht ins Zentrum gelangt, fällt im zweiten Fall dorthin kein Licht.

Abb. 7: Grün-Magenta-Feld
(oben: Original; unten: Spektrum)Abb. 8: Magenta-Grün-Feld
(oben: Original; unten: Spektrum)

Rang u.a. [7] leiteten aus der Tatsache, dass das Zentrum des Magenta-Weiß-Feldes durch ein Prisma nicht verändert wird, eine Unzerlegbarkeit des Magenta in weißer Umgebung ab und versuchten dies durch weitere Experimente zu bekräftigen.

Nussbaumer [9] schloss aus seinen Experimenten, dass sich das Verhalten der Spektralfarben gravierend ändert, wenn sie in verschiedene Farbfelder eingebettet werden. So verschwindet das Spaltgrün im Spektrum, wenn es in ein Magentafeld eingebettet war (s. Abb.7). Analog verhält es sich mit Rot in einem Cyanumfeld und Blau in gelber Umgebung.

Diesen Vorstellungen fügten wir die noch verwunderlichere scheinbare Unzerlegbarkeit weißen Lichts in geeigneter Umgebung hinzu (s. Abb.5). Spätestens dadurch wird klar, dass alle diese Vorstellungen kritisch zu hinterfragen sind.

Um diese Erscheinungen zu verstehen, wird nun die Möglichkeit der Anordnung genutzt, Teilspektren des Spalt- und Steglichts zu erzeugen und mit dem Originallicht und dem Gesamtspektrum zu vergleichen. Ein einfaches RGB-Modell soll diese Argumentation unterstützen. Beim Modell und der Überlagerung der Teilspektren werden die Regeln der additiven Farbmischung genutzt.

3. RGB-Modell und additive Farbmischung

3.1. RGB-Modell: Grundidee und Annahmen

Grundidee: Wenn eine Spalt- oder Stegmaske mit weißem Licht beleuchtet wird, dann treffen gleichzeitig rotes, grünes und blaues Licht auf. Durch ein Glasprisma werden diese Lichtanteile unterschiedlich abgelenkt.

Bei geeigneter Spaltbreite entsteht ein Spektrum des weißen Lichts mit der Farbfolge Rot, Grün, Blau in schwarzer Umgebung (Newtonspektrum, s. Abb.9 links). Bei entsprechend breitem Steg entsteht ein Spektrum mit der Farbfolge Cyan, Magenta, Gelb in weißer Umgebung, das beidseitig von einem Farbsaum abgeschlossen wird (Goethespektrum, s. Abb.9 rechts).

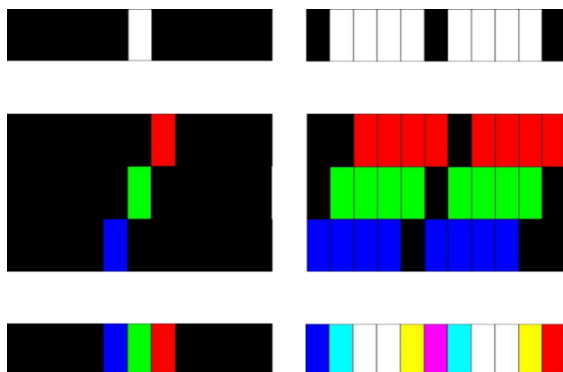


Abb. 10: Modell (links) und seine Anwendung auf das Stegspektrum (rechts)

Verwendet man ein Geradsichtprisma, so kann trotz weiter bestehender Farbaufspaltung ein nahezu geradliniger Lichtweg erzielt werden. Dabei wird grünes Licht, so ist das Geradsichtprisma konstruiert, nicht abgelenkt.

Annahmen des Modells: Grünes Licht wird nicht abgelenkt; rotes Licht um eine Spaltbreite nach der einen und blaues Licht um eine Spaltbreite nach der anderen Seite. Jedes Lichtfeld wird in Streifen von Spaltbreite unterteilt.

3.2. Additive Farbmischung

Die drei Grundfarben der additiven Farbmischung sind Rot (R), Grün (G) und Blau (B). Ihre paarweise Überlagerung ergibt Gelb (Yellow; Y), Magenta (M) und Cyan (C). Die Überlagerung aller drei Farben führt konsequenterweise wieder zu Weiß (W).

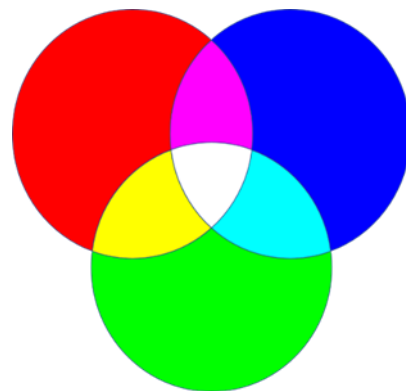


Abb. 1: Additive Farbmischung

Formal kann man also folgende Gleichungen der Farbaddition aufstellen:

$$W=R+G+B; R+G=Y; R+B=M; G+B=C; \\ W=Y+B; W=M+G; W=C+R.$$

Aus der Umstellung der letzten Beziehungen $Y=W-B; M=W-G$ und $C=W-R$

kann abgelesen werden, dass dem Gelb, dem Magenta und dem Cyan eine der Grundfarben zum Weiß fehlt.

3.3. Zwei gleichwertige Wege zu den Spektren überlagerten Lichts

Es ist gleichwertig, ob zunächst die Spalt- und Stegspektren getrennt erzeugt und dann zum Gesamtspektrum überlagert werden (rote Pfeile in Abb.11) oder sofort das Spektrum des überlagerten Lichts erzeugt wird (cyanfarbene Pfeile). Dies ergibt sich zwingend aus den Gesetzmäßigkeiten der additiven Farbmischung. Gleichzeitig zeigt dies einen Weg auf, nur mit einem Geradsichtprisma Spektren überlagerten Lichts zu erzeugen.

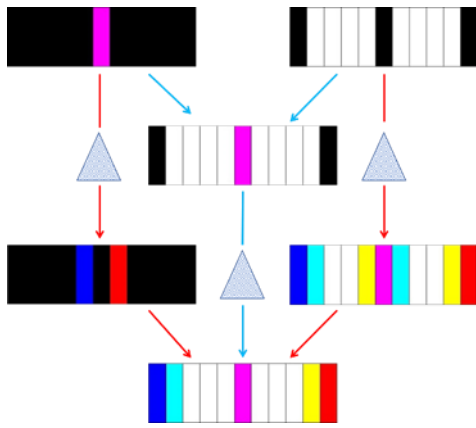


Abb. 11: Zwei gleichwertige Wege zu den Spektren überlagerten Lichts

4. Zusammenspiel von Experiment und RGB-Modell

Nachdem die Arbeitsmittel bereitgestellt sind, sollen nun die oben vorgestellten Farbfelder hinterfragt werden. Dazu bringen die folgenden Abbildungen auf der linken Seite die experimentellen Ergebnisse und rechts die mit dem Modell gewonnenen Farbfelder. Dabei wird stets das Gesamtfarbfeld in das Spalt- und das Steglicht unterteilt, die entsprechenden Teilspektren erzeugt und zum Gesamtspektrum überlagert.

Beim Weiß-Magenta-Feld (s. Abb.12) zerlegt das Prisma das weiße Licht natürlich in seine Bestandteile. Die magentafarbene Umgebung bringt jedoch durch ihre Zerlegung den Rot- und Blauanteil ins Zentrum zurück, der dort verloren gegangen war.

Im vertauschten Farbfeld zerlegt das Prisma das magentafarbene Spaltlicht. Die zerlegte weiße Umgebung bringt aber genau diese Anteile ins Zentrum zurück (s. Abb.13).

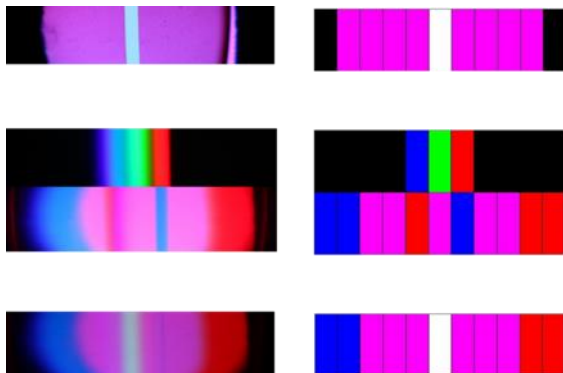


Abb. 12: Weiß-Magenta-Feld
(links: Experiment; rechts: Modell)

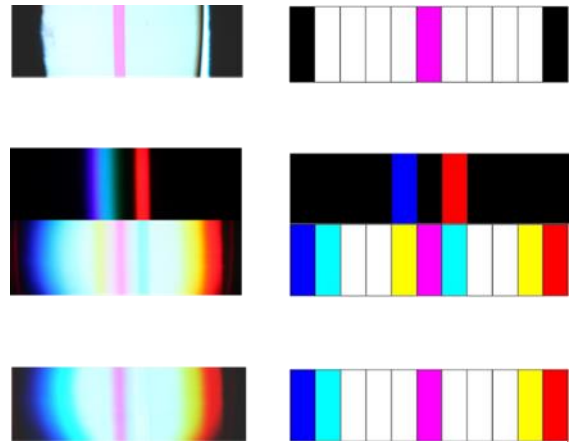


Abb. 13: Magenta-Weiß-Feld
(links: Experiment; rechts: Modell)

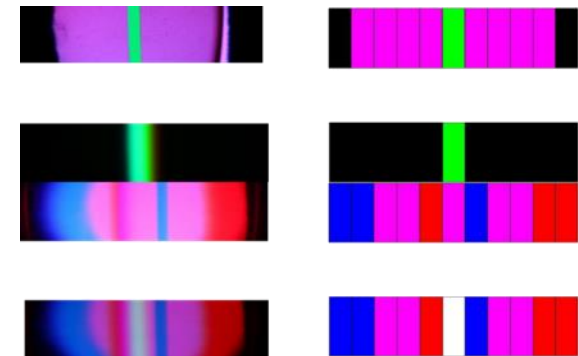


Abb. 14: Grün-Magenta-Feld
(links: Experiment; rechts: Modell)

Beim Grün-Magenta-Feld (s. Abb. 14) wird das zentrale Grün nicht verschoben, da das Geradsichtprisma genau darauf optimiert ist. Die zerlegte magentafarbene Umgebung liefert den roten und blauen Anteil zum resultierenden Weiß. Im umgekehrten Farbfeld (s. Abb. 15) wird das magentafarbene Spaltlicht wie gewohnt zerlegt. Vom grünen Umfeld gelangt kein Licht ins Zentrum, weshalb dieses schwarz bleibt.

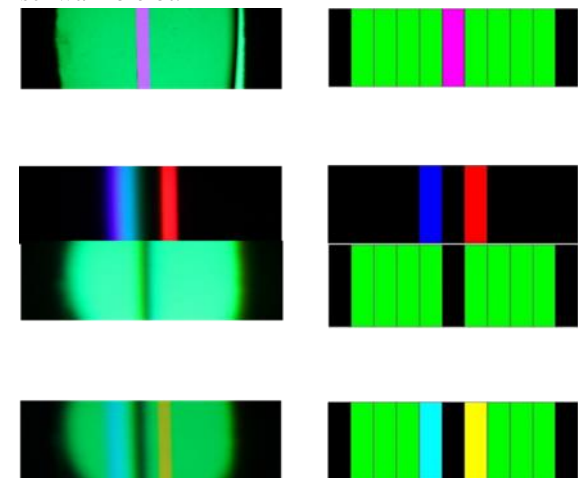


Abb. 15: Magenta-Grün-Feld
(links: Experiment; rechts: Modell)

Dieses Vorgehen zeigt auf, dass weißes und magentafarbenes Licht stets entsprechend den Gesetzmäßigkeiten der Newtonschen Optik zerlegt wird. Dies gilt unabhängig davon, welche farbliche Umgebung gewählt wird. Allerdings kann deren geschickte Wahl eine andere Tatsache vortäuschen.

Weitere Argumente dafür, dass das zentrale Magenta im Magenta-Weiß-Originalfeld und im Gesamtspektrum unterschiedlichen Ursprungs sind, liefern Variationen der Intensität und der Farbzusammensetzung [10,11]. So bleibt trotz gedämpfter Intensität des einfallenden magentafarbenen Spaltlichts im Spektrum das strahlende Magenta erhalten.

Analog zu den vorgestellten Beispielen ergeben sich alle weiteren Spektren überlagerter Spalt-Steg-Lichter ebenfalls aus den elementaren Gesetzmäßigkeiten der Newtonschen Optik, mögen auch die erzeugten Farbfelder zunächst überraschen. Stets bleibt die Aufspaltung der Lichtanteile im Spaltspektrum die Basis der Gesamtspektren [12].

5. Schlussbemerkungen

Mit den verwendeten RGB-LED-Leuchten gelingt es, Spalt- und Stegblenden homogen auszuleuchten und die Farbe des zentralen Bereichs (Spaltblende) und seines Umfeldes (Stegblende) unabhängig voneinander zu wählen. Dadurch ist es möglich, alle denkbaren Kombinationen der drei Grundfarben (Rot, Grün, Blau) und ihrer paarweisen Überlagerung (Gelb, Magenta, Cyan) nebst Weiß und Schwarz zu erzeugen. Das einfache RGB-Modell, das die prismatische Ablenkung der drei Grundfarben mit den Gesetzmäßigkeiten der additiven Farbmischung verknüpft, unterstützt die experimentellen Untersuchungen.

Durch den parallelen Einsatz von Modell und Experiment gelingt es, auch zunächst ungewöhnliche Spektren speziell kombinierter Farbfelder eindeutig zu erkennen und ihre Entstehung zu erklären. Bei allen Untersuchungen wurde Magenta stets durch das Prisma in Rot und Blau zerlegt, auch wenn die Spektren zunächst einen anderen Eindruck erwecken. Auch behalten die Spektralfarben Rot, Grün und Blau unabhängig vom Umfeld ihr gewohntes Verhalten. Allerdings überlagern sie sich mit den durch das Prisma verschobenen Anteilen des Umfeldes zum Gesamteindruck. Bei den Untersuchungen hat es sich bewährt, die Farbfelder in Spalt- und Stegbereiche aufzuteilen, die Teilspektren zu erzeugen und darauf aufbauend das Gesamtspektrum zu bewerten.

Die Betrachtungen lassen sich auf das Licht beliebiger Lichtquellen erweitern. Stets gibt das Spaltspektrum die zu betrachtenden Lichtanteile, ihre Intensität und ihre Position im Spektrum vor [11].

6. Literatur

- [1] Goethe, Johann Wolfgang (1810), Zur Farbenlehre, Tübingen: Cotta.
- [2] Goethe, Johann Wolfgang (2003), Farbenlehre, Bd. 1-5, ungekürzte Ausgabe, Einleitung und Erläuterungen von Rudolf Steiner, Stuttgart: Verlag Freies Geistesleben.
- [3] Newton, Isaac (1704); Opticks: Or, a Treatise of the Reflexions, Refractions, Inflexions and Colours of Light, London: Smith and Walford.
- [4] Goethe, Johann Wolfgang (1994), Die Tafeln zur Farbenlehre und deren Erklärung, Frankfurt am Main und Leipzig: Insel-Verlag.
- [5] Matthaei, Rupprecht (1971), Goethes Farbenlehre, Ravensburg: Otto Maier Verlag.
- [6] Buchwald, Ewald (1957), Fünf Kapitel Farbenlehre, Mosbach/Baden: Physik-Verlag.
- [7] Rang, Matthias; Passon, Oliver; Grebe-Ellis, Johannes (2017): Optische Komplementarität. In: Physik Journal (16), März 2017, S. 43 – 49.
- [8] Rang, Matthias; Grebe-Ellis, Johannes (2009): Komplementäre Spektren – Experimente mit einer Spiegel-Spalt-Blende. In: MNU (Mathematisch Naturwissenschaftlicher Unterricht) 62, 4/2009, S. 227 – 231.
- [9] Nussbaumer, Ingo (2008): Zur Farbenlehre. Entdeckung der unordentlichen Spektren, Wien: Edition Splitter.
- [10] Hanisch, Christian; Oehme, Wolfgang; Ziese, Michael (2020): Newton's Green and Goethe's Purple - Color Experiments with LEDs, In: The Physics Teacher (eingereicht).
- [11] Hanisch, Christian; Oehme, Wolfgang; Ziese, Michael (2020): Experimente mit Leuchtdioden und einfaches RGB-Modell, In: PhyDid A, Didaktik der Physik (eingereicht).
- [12] Interaktiver Vergleich von Modell und Experiment auf der Homepage des Physikalischen Grundpraktikums, Fakultät für Physik und Geowissenschaften, Universität Leipzig. URL: <https://home.uni-leipzig.de/prakphys/index.php?content=Farbenlehre&lang=de&ref=d>

(Stand: 5/2020).