

Lecker im Licht

Wie beeinflusst die Beleuchtung das
Aussehen unserer Supermarktwaren?





Seminararbeit

Thema: Lecker im Licht

Verfasserin: Carolin Mantsch

Leitfach: Mathe/Physik

Seminarkürzel: 2MPH_W

Lehrkraft: Herr Grillenbeck



Abgabe der schriftlichen Arbeit am:

[Datumsstempel Sekretariat]

Präsentation mit Prüfungsgespräch am:

____.____. 20 ____

<i>Bewertung:</i>	<i>Note</i>	<i>in Worten</i>	<i>Punkte</i>		<i>Punkte</i>
<i>Schriftliche Arbeit:</i>				x 3 =	
<i>Präsentation:</i>				x 1 =	
				<i>Gesamtpunktzahl =</i>	
				<i>Gesamtpunktzahl : 2 =</i>	
<i>Gesamtleistung:</i>				<i>Gesamtpunktzahl : 4 =</i>	

Unterschrift der Lehrkraft

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung.....	3
2. Theoretische Grundlagen der Farbwahrnehmung.....	4
2.1 Aufstellung einer theoretischen Formel.....	4
2.2 Die Farbwahrnehmung eines Gegenstandes.....	5
2.2.1 Die Reflektivität.....	6
2.2.2 Die Lichtquelle	7
2.2.3 Die spektrale Empfindlichkeit des Auges	10
3. Messungen im Supermarkt.....	11
3.1 Die Leuchtstofflampe am Obst- und Gemüseregal.....	11
3.2 Die grüne Lampe an der Fleischtheke.....	12
4. Messungen im PhotonLab.....	13
4.1 Der Tubusaufbau	14
4.2 Messungen mit einer Ulbricht-Kugel.....	15
4.3 Messungen mit einem Spektralphotometer	15
4.4 Messergebnisse	16
4.4.1 Tubusaufbau	16
4.4.2 Ulbricht-Kugel	16
4.4.3 Spektralphotometer	18
5. Anwendung der Formel und Diskussion der Messergebnisse.....	19
5.1.Zwischenergebnis 1: Vergleich mit gemessenem Reflexionsspektrum	19
5.2 Zwischenergebnis 2: Vergleich mit gemessenem Spektrum im LED-Licht	21
5.3 Endergebnis und mögliche Fehlerquellen.....	22
6. LED-Lichtmischer als Eigenbau	23
7. Fazit	25
8. Literaturverzeichnis.....	26

Lecker im Licht

Wie beeinflusst die Beleuchtung das Aussehen unserer Supermarktwaren?

1. Einleitung

Mit allen möglichen Tricks versuchen Supermärkte die Kunden zum Kauf ihrer Waren zu animieren. Höchstwahrscheinlich sind Sie selbst schon in Versuchung geraten, sich von der Quengelware an der Kasse verleiten zu lassen oder sind auf täuschende Signalfarben reingefallen. Zunehmend neue Methoden werden allerdings immer raffinierter und beeinflussen den Kunden im Unterbewusstsein. Mit Sicherheit ist noch nicht jedem bewusst, welche entscheidende Rolle die richtige Beleuchtung bei der Kaufentscheidung spielt. Das Licht wird an den Supermarkttheken gezielt eingesetzt, sodass Obst und Gemüse besonders frisch und knackig aussehen, Brot knusprig glänzt, Fleisch besonders saftig und frisch erscheint, sowie rosig schimmert. Die Sinne sollen mittels attraktiver Farben angeregt werden. Da Kunden dazu neigen, die Frische und Qualität von Produkten anhand ihrer Farbe zu beurteilen, wird eine ausgeklügelte Beleuchtung zur Manipulation und Verbesserung des Farbempfindens eingesetzt. Dies erhöht die Chance zu einem Kauf - deshalb die Titelwahl „Lecker im Licht“. Frischwaren wie Obst und Gemüse welken und reifen im Laufe der Zeit. Meine innovative Idee wäre deshalb, die LED-Lichter jederzeit genau an die Warenfarbe anpassen zu können. Tomaten, die mit der Zeit reifen, würden demnach zu Beginn stärker beleuchtet werden als die gereiften Tomaten. Schon seit längerem ist es möglich, LED¹s zu vernetzen und über das Internet zu steuern. Mit einem „ELV RGB²-Farbwechsler für LEDs RGB 300“ ausgestattet, ließe sich die Lichtfarbe genau auf die gewünschte Farbtemperatur in Kelvin einstellen. Deshalb könnten LEDs auch in Supermärkten gegebenenfalls mit einer App über Bluetooth reguliert werden oder sich sogar von selbst mit Hilfe eines TCS230 /TCS3200 Farbsensors³ in einem Regelkreis dauerhaft an die Farbe und somit Reife der Ware anpassen.

Da mich die Beleuchtung in Supermärkten fasziniert, entschied ich mich, meine W-Seminararbeit über dieses Thema zu schreiben, um die Lampenspektren aus physikalischer Sicht genauer zu verstehen. Veranschaulicht wird die Arbeit durch Versuche und Messungen, die zu Beginn im Supermarkt und später, um genauere Messwerte zu erhalten, im PhotonLab am Max-Planck-Institut für Quantenoptik durchgeführt wurden.

¹ LED: Leuchtdiode

² RGB: Rot, Grün, Blau

³ Vgl. <http://elektro.turanis.de/html/prj029/index.html> (Letzter Zugriff: 2.11.2018)

2. Theoretische Grundlagen der Farbwahrnehmung

2.1 Aufstellung einer theoretischen Formel

Um den Sinneseindruck von Farben im Auge quantifizieren zu können, müssen die Reflektivität des Versuchsobjektes, die Lichtquelle und die spektrale Empfindlichkeit des Auges wie folgt verknüpft werden:

$$\frac{R(\lambda) \text{ gemessen im tiefgestellten Sonnenlicht}}{S(\lambda)} \times \text{Spektrum der Lichtquelle} \times K(\lambda) \text{ [a.u.]}^4$$

Reflektivität des Versuchsobjekts x Beleuchtung x Augenempfindlichkeit => Sinneseindruck im Auge

$$S(\lambda) = \text{reines Sonnenlicht} \times \eta(\lambda)$$

$$R(\lambda) = \text{Reflektivität der Ware} \times \eta(\lambda)$$

$$\eta(\lambda) = \text{Empfindlichkeit des Spektrometers} = \frac{\text{Sonnenstrahlungsintensität gemessen}^5}{\text{Sonnenstrahlungsintensität Literatur}}$$

$$K(\lambda) = \text{spektrale Empfindlichkeit des Auges}$$

⁴ a.u.: arbitrary unit

⁵ Vgl. **Kapitel 5.3**

2.2 Die Farbwahrnehmung eines Gegenstandes

Von dem menschlichen Auge kann nur ein spezieller Teil des elektromagnetischen Spektrums, nämlich das Lichtspektrum wahrgenommen werden. Der Wellenlängenbereich des Lichtspektrums reicht dabei von ungefähr 380 bis 750 nm.⁶ Außerhalb dieses Wellenbereiches kann das menschliche Auge keinerlei Farb- und Helligkeitswerte wahrnehmen. „Die verschiedenen Wellenlängen des Lichts, führen zu unterschiedlichen Farbempfindungen im menschlichen Auge“⁷ (**Abb. 1**). Jeder Gegenstand absorbiert einen Teil des Lichtes. Das übrigbleibende reflektierende Licht gelangt in das Auge des Betrachters und bestimmt somit die Farbe des Gegenstandes (**Abb. 2**⁸). Der eigentliche Farbreiz wird also aus dem reflektierten Teil der Allgemeinbeleuchtung bestimmt.⁹

Wellenlänge	Farbton
380 - 436 nm	Violett
436 - 495 nm	Blau
495 - 566 nm	Grün
566 - 589 nm	Gelb
589 - 627 nm	Orange
627 - 750 nm	Rot

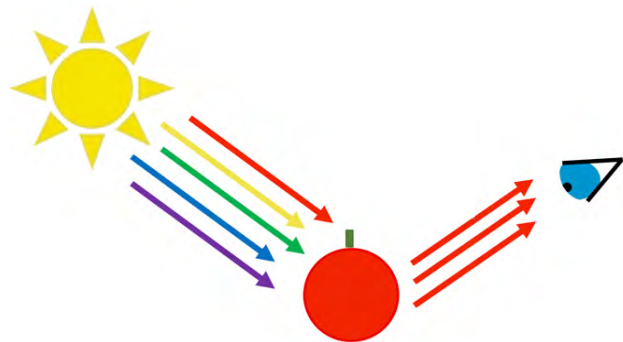


Abb. 1: Unterschiedliches Farbempfinden durch verschiedene Wellenlängen

Abb. 2: Entstehung der Farbe eines Gegenstandes

Ein wesentliches Problem unseres Farbempfindens ist dessen ausgeprägte Subjektivität. Farbe ist für uns ein allgemeiner Sinneseindruck und wird von jedem minimal anders empfunden. Deshalb richtet sich die Supermarktbeleuchtung nach dem durchschnittlichen Farbempfinden der breiten Masse. Die Ursache für das Vorkommen von verschiedenen Farbeindrücken, ist die minimal abweichende Verarbeitung der Farben im menschlichen Auge. Farbrezeptoren oder Zapfen auf der Netzhaut messen den Rot-, Grün- und Blauanteil des einfallenden Lichts. Aus diesen Informationen konstruiert das menschliche Hirn einen Farbeindruck, der durch unterschiedliche Kombinationen erzeugt werden kann. Verschieden zusammengesetzte Spektren können beim Menschen also den gleichen Farbeindruck hervorrufen. Dieses Phänomen wird als Metamerie bezeichnet.¹⁰

⁶Vgl. <https://www.leifiphysik.de/optik/elektromagnetisches-spektrum/sichtbares-licht> (Letzter Zugriff: 1.9.18)

⁷ Vgl. https://homepages.thm.de/~hg10013/Lehre/MMS/SS01_WS0102/Farbmodelle/Kapitel/Kapitel1.html (Letzter Zugriff: 11.09.2018)

⁸ Eigene Darstellung

⁹ Vgl. https://homepages.thm.de/~hg10013/Lehre/MMS/SS01_WS0102/Farbmodelle/Kapitel/Kapitel2.html (Letzter Zugriff: 11.09.2018)

¹⁰ Vgl. <http://www.allpsych.uni-giessen.de/karl/teach/Wahrnehmung/Wahr-06-farbe.pdf> (Letzter Zugriff: 1.11.18)

2.2.1 Die Reflektivität

Das Ergebnis der Reflexion hängt von der Beschaffenheit der Oberfläche ab. Man unterscheidet zwischen direkter und diffuser Reflexion. Ist die Oberfläche sehr glatt, so gilt Einfallswinkel gleich Ausfallswinkel und man spricht von einer direkten Reflexion, einer Spiegelung¹¹ (**Abb. 3**¹²). Ist die Oberfläche allerdings rau, dann wird das einfallende Licht in verschiedene Richtungen gestreut und man spricht von diffuser Reflexion¹³ (**Abb. 4**¹⁴). Folglich ist die Reflexion einer Tomate weniger diffus als von beispielsweise Fleisch, da Fleisch im Vergleich zu einer Tomate eine rauere Oberfläche hat.

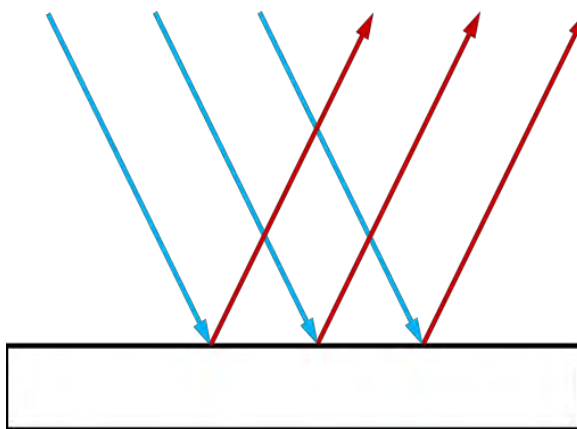


Abb. 3:
Glatte Oberfläche: direkte Reflexion

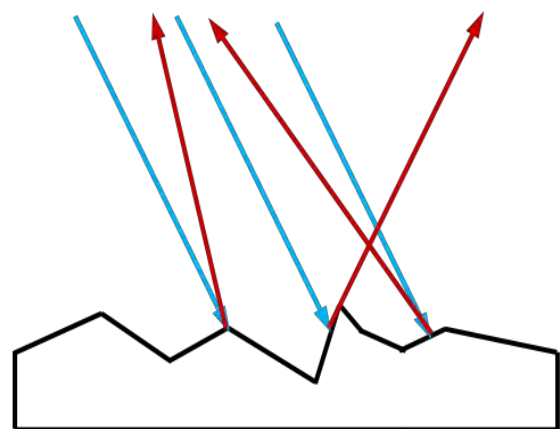


Abb. 4:
Rauhe Oberfläche: diffuse Reflexion

¹¹ Vgl. <https://www.grund-wissen.de/physik/optik/lichtreflexion.html> (Letzter Zugriff: 1.11.2018)

¹² Eigene Darstellung

¹³ Vgl. <https://micro.magnet.fsu.edu/primer/java/reflection/specular/index.html> (Letzter Zugriff: 1.11.2018)

¹⁴ Eigene Darstellung

2.2.2 Die Lichtquelle

Unterschiedliche Lichtquellen strahlen unterschiedliche Wellenlängen ab. Als weiß wird das Sonnenlicht betrachtet, welches das ganze Spektrum beinhaltet.¹⁵ Wird eine rote Tomate mit rotem und grünem Licht angestrahlt, so reflektiert diese hauptsächlich die roten Wellenlängen und absorbiert die grünen Wellenlängen (**Abb. 5**). Wird die gleiche rote Tomate nur mit grünem Licht beleuchtet, wirkt diese für uns dunkelgrün, da sie die grünen Wellenlängen komplett absorbiert (**Abb. 6**) und keine roten Wellenlängen reflektieren kann. Die Farbe von Objekten ist demzufolge immer von dem Umgebungslicht abhängig.

Die Farbtemperatur wird in Kelvin angegeben¹⁶. Je niedriger der Kelvin-Wert, desto roter das Licht und je höher der Kelvin-Wert, um so blauer das Licht.

Die Farbwiedergabe wird in RA angegeben, gefolgt von der Prozentzahl der Farbwiedergabe gemessen an natürlichem Tageslicht. „Hochwertige LEDs erzeugen Farbwiedergaben von RA80 oder sogar RA90, was einer sehr natürlichen Farbwiedergabe entspricht. Werte unterhalb RA80 sollte man [deshalb] im Laden vermeiden.“¹⁷

Die Beleuchtung im Supermarkt ist unter anderem eine Kostenfrage, denn eine permanente Beleuchtung ist nicht gerade günstig. Da LED-Leuchtmittel sehr energiesparend und somit kostengünstig sind, ersetzen Supermärkte die herkömmlichen Leuchtstofflampen immer mehr mit LEDs. Die bisher oft verwendete Leuchtstofflampe enthält in der Regel Quecksilberdampf als leuchtendes Medium. Nach der Zündung werden die Quecksilberatome durch Elektronenstöße angeregt und emittieren ultraviolettes Licht der Wellenlänge 254 nm. Auf der Innenwand der Leuchtstoffröhre ist eine Leuchtstoffschicht angebracht, die die UV-Strahlung in sichtbares Licht umwandelt.¹⁸

In den letzten Jahren war der Anschaffungspreis qualitativ hochwertiger LEDs zu hoch, um die Supermärkte weitgehend auszustatten. Der Preis sinkt jedoch kontinuierlich und ist auf Grund der langen Lebensdauer durchaus rentabel geworden. Außerdem weisen LEDs eine große Helligkeit durch mehr Lumen pro Watt auf und geben ein breites Farbspektrum mit einer schon erwähnten sehr guten Farbwiedergabe von bis zu RA90 wieder.

¹⁵ Vgl. https://lehrerfortbildung-bw.de/st_digital/medienkompetenz/gestaltung-farbe/physik/subtrakt/sub-lich/ (Letzter Zugriff: 28.08.2018)

¹⁶ Vgl. <https://www.energie-umwelt.ch/haus/beleuchtung-und-batterien/gluehbirnen-und-lampen/1135> (Letzter Zugriff: 29.08.2018)

¹⁷ <https://www.lampenwelt.de/blog/innenbeleuchtung/beleuchtung-supermarkt.html> (Letzter Zugriff: 30.08.2018)

¹⁸ Vgl. <https://www.spektrum.de/lexikon/physik/leuchtstoffroehre/8980> (Letzter Zugriff: 1.11.2018)



Abb. 5: Beleuchtung einer Tomate mit rotem und grünem Licht



Abb. 6: Beleuchtung einer Tomate mit grünem Licht

Ein weiterer Pluspunkt ist, dass das Spektrum (**Abb. 7**) der LEDs keine UV- und Infrarotstrahlung beinhalten, die sich negativ auf die Frische und Qualität der Waren ausüben kann.¹⁹ Dieses Spektrum in **Abb. 7** wurde an einer roten LED Röhre über dem Salamiregal im Supermarkt EDEKA gemessen (**Abb. 8**).

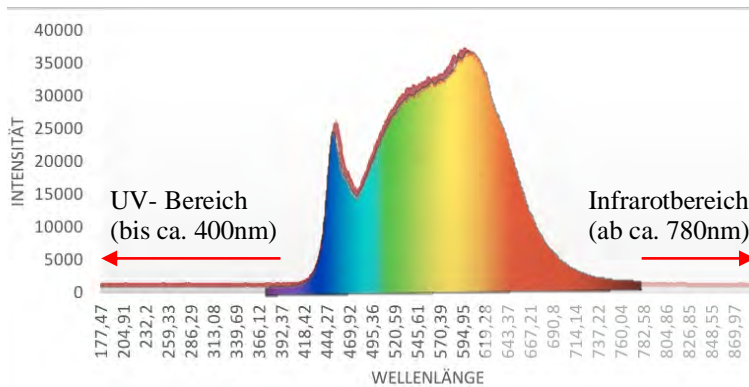


Abb. 7: LED Spektrum

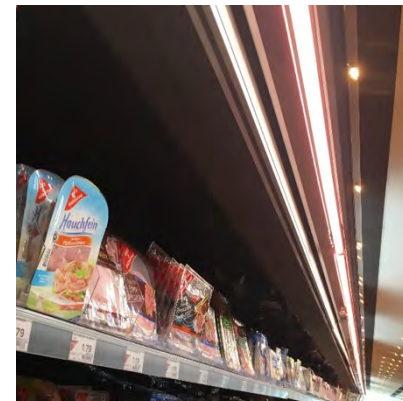


Abb. 8: LED Röhre bei einem Supermarktregal

Eine vielversprechende Technologie sind auch die sogenannten OLEDs (Organische Leuchtdioden), die heutzutage vor allem für Fernsehbildschirme und Smartphone Displays genutzt werden.²⁰ Diese sind noch energieeffizienter als LEDs, extrem dünn und kostengünstiger in der Produktion. Allerdings ist der Anschaffungspreis der OLEDs bis jetzt relativ hoch und die Lebensdauer ist derzeit noch geringer als die der LEDs.²¹ Doch meiner Meinung nach, ist es projizierend in die Zukunft durchaus denkbar, dass OLEDs die interessantere Alternative und der bessere Ersatz zu LEDs sein werden und auch im Rahmen der Supermarktbeleuchtung ein Schritt nach vorne sind.

¹⁹ Vgl. <https://www.lampenwelt.de/blog/innenbeleuchtung/beleuchtung-supermarkt.html> (Letzter Zugriff: 1.11.2018)

²⁰ Vgl. <http://www.faz.net/aktuell/stil/drinnen-draussen/schoenes-licht-durch-led-ist-kein-ding-der-unmoeglichkeit-mehr-13862334-p2.html> (Letzter Zugriff: 25.10.2018)

²¹ Vgl. <https://www.lampe.de/magazin/oled-eine-neue-lichttechnologie/> (Letzter Zugriff: 25.10.2018)

2.2.3 Die spektrale Empfindlichkeit des Auges

Unser Auge ist nicht überall im Bereich des Lichtspektrums gleich empfindlich.²² Laut der V-Lambda Kurve (**Abb. 9**²³) reagieren unsere Augen am stärksten auf mittel-welliges Licht (Grün), weniger stark auf langwelliges Licht (Rot) und am wenigsten auf kurzwelliges Licht (Blau). Bei Wellenlängen am Rand des Lichtspektrums ist also eine höhere Strahlungsintensität nötig, um dieselbe Helligkeitsempfindung zu bewirken, als bei Wellenlängen in der Mitte des Lichtspektrums. Es wird vermutet, dass die starke Empfindlichkeit im grünen Bereich mit dem vielen Grün in der Natur zusammenhängt.²⁴ „Die Empfindlichkeit des Auges bei der Wellenlänge λ wird beschrieben durch das spektrale photometrische Strahlungsäquivalent $K(\lambda)$ “²⁵.



Abb. 9: V-Lambda Kurve

²² Vgl. https://homepages.thm.de/~hg10013/Lehre/MMS/SS01_WS0102/Farbmodelle/Kapitel/Kapitel2.html (Letzter Zugriff: 25.10.2018)

²³ <https://www.waveformlighting.com/tech/luminosity-curve-data-csv-excel-format> (Letzter Zugriff: 1.11.18)

²⁴ Vgl. Optische Phänomene in Natur & Alltag, Tobias Haist (2009), S.68 (Letzter Zugriff: 20.05.2018)

²⁵ Vgl. <https://de.wikipedia.org/wiki/V-Lambda-Kurve> (Letzter Zugriff: 20.05.2018)

3. Messungen im Supermarkt

Um genauere Informationen über die Beleuchtung von Supermarktlampen in Erfahrung zu bringen, wurden mehrere Lichtspektren in den Supermärkten „EDEKA“ und „Basic“ in Rosenheim mit Hilfe eines Spektrometers USB 2000 der Firma Ocean Optics gemessen. Dieses stellte mir das PhotonLab am Max-Planck-Institut für Quantenoptik zur Verfügung. Das Spektrometer wurde an einen Laptop angeschlossen, der die Spektren entweder mit dem Programm Ocean View oder Spectra Suite wiedergab. Das Ziel dieser Messungen war, für einen späteren, selbstgebauten LED-Lichtmischer optimal zu verstehen, wie die Beleuchtung an die Warenfarbe genau angepasst wird.

3.1 Die Leuchtstofflampe am Obst- und Gemüseregal

Ziemlich schnell fiel mir im „Basic Bio-Markt“ eine rote Leuchtstofflampe (**Abb. 10**) auf. Diese wurde auf ein Regal, gefüllt mit roten Produkten, wie unter anderem Erdbeeren oder Paprika, gerichtet. Daneben strahlte eine gelb/grüne Leuchtstofflampe (**Abb. 11**) auf ein Regal gefüllt mit Mais und Basilikumpflanzen.

Erklärung: Die eigentliche Produktfarbe wird durch die Beleuchtung verstärkt, damit die Warenfarbe möglichst attraktiv und appetitlich für den Käufer erscheint. Die Lampen werden also entsprechend der Produktfarbe, mit dem passenden Farbton und der geeigneten Farbtemperatur, individuell angepasst. Demnach ist es möglich, dass eine noch unreife Tomate im Supermarkt nur auf Grund der Beleuchtung rot und reif wirkt und trotzdem gekauft wird.

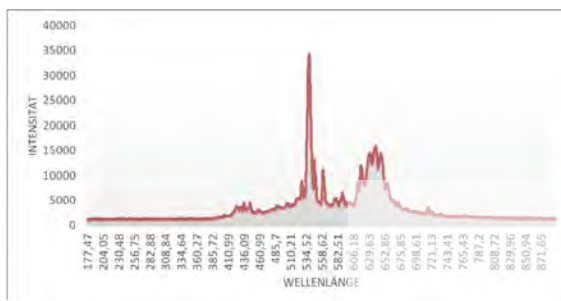


Abb. 10:
Spektrum der roten Leuchtstofflampe

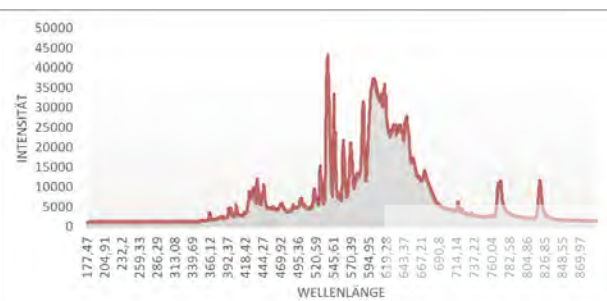


Abb. 11:
Spektrum der gelb/grünen Leuchtstofflampe

3.2 Die grüne Lampe an der Fleischtheke

Auf Grund der roten Fleischfarbe ist auch, wie in **Kapitel 3.1**, eine rote Lampenfarbe über der Fleischtheke zu erwarten. Bei einem Blick auf die Beleuchtung über der Fleischtheke im Supermarkt EDEKA, führte deshalb eine grüne Lampenfarbe (**Abb. 12**) zu Verwunderung. Für eine genauere Untersuchung dieser grünen Beleuchtung, wurde auch dieses Farbspektrum mit einem Spektrometer gemessen.



Abb. 12: Grüne Beleuchtung an der Fleischtheke

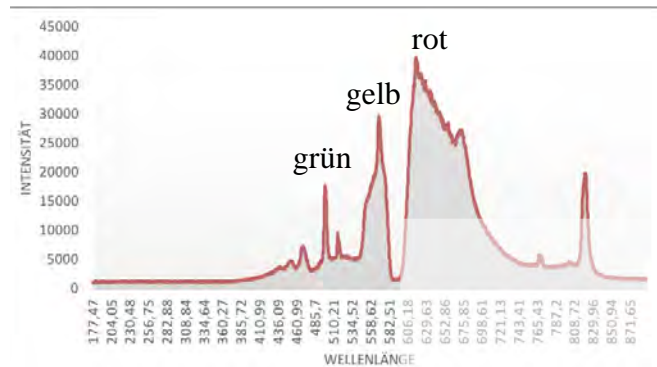


Abb. 13: Spektrum der grünen Beleuchtung an der Fleischtheke

Erklärung: Beim Betrachten des Farbspektrums (**Abb. 13**), schlägt nicht das Licht der grünen Wellenlänge, sondern dass der Roten und Gelben besonders aus. Die Rotanteile im Lichtspektrum werden reflektiert und lassen das Fleisch somit frischer erscheinen. Das grüne Licht wird von dem roten Fleisch absorbiert und lässt es damit dunkelroter und satter wirken. Es kann also eine farbige Beleuchtung (hier: grün) eingesetzt werden, um deren komplementäre Farbe (hier: rot) zu verdunkeln.²⁶ „Je zwei farbige Lichtstrahlen, die sich zu Weiß mischen lassen, heißen Komplementärfarben“²⁷ und stehen sich im Farbkreis gegenüber (**Abb. 14**). Obwohl die Intensität der roten Wellenlängen höher ist, erscheint die Lampe grün. Dies wird mit der spektralen Empfindlichkeit unseres Auges begründet (vgl. **Kapitel 3.1.1**).

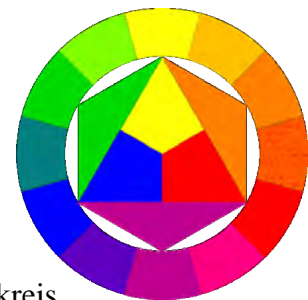


Abb. 14: Farbkreis

²⁶ Vgl. https://lehrerfortbildung-bw.de/st_digital/medienkompetenz/gestaltung-farbe/kontrast/komp-kon/ (Letzter Zugriff: 1.09.2018)

²⁷ Prof. Dr. Eugene Hecht: OPTIK, S.226f

4. Messungen im PhotonLab

Um genauere Messwerte zu erhalten, wurden die Supermarktspektren im PhotonLab mit einem LED-Lichtmischer (Abb. 15) und einer Streuscheibe annähernd nachgestellt, dies ist auf Grund des in Kapitel 2.2 erläuterten Phänomen der Metamerie möglich. Mit dem LED-Lichtmischer kann die Intensität der drei Grundfarben²⁸ Rot, Blau und Grün von Stufe 0-10 variiert werden und begründet mit der additiven Farbmischung²⁹ zu weiteren Farben zusammengemischt werden. Um die Stufen des Lichtmessers genau zu definieren, wurde die maximale Intensität der drei Grundfarben für jede Stufe 0-10 mit Hilfe des Luxmeters „DT1301 Light Meter CEM“ ermittelt (Abb. 16).

Die Reflexionsspektren verschiedenster Versuchsobjekte wurden mit drei verschiedenen Versuchsaufbauten gemessen, deren Versuchsabläufe in folgenden Kapiteln genauer erläutert werden. Der Ablauf dieser Messungen erfolgte meist gleich: Zuerst wurde das Spektrum der Lichtquelle und danach das Reflexionsspektrum des Versuchsobjektes mit derselben Lichtquelle gemessen. Als Lichtquelle wurden das Sonnenlicht, sowie die mit dem LED-Lichtmischer nachgestellten Supermarktspektren verwendet. Alle Spektren dazu werden in Kapitel 4.4 veranschaulicht.



Abb. 15: LED-Lichtmischer

	A	B	C	D
1	Stufen	LED blau	LED rot	LED grün
2				
3	0	0	0	0
4	1	174	374	810
5	2	388	875	1712
6	3	617	1380	2550
7	4	823	1970	3280
8	5	1004	2500	3970
9	6	1200	3040	4610
10	7	1399	3130	5200
11	8	1570	3140	5750
12	9	1764	3150	6220
13	10	1920	3280	6630

Abb. 16:

Messen der max. Intensität des Lichtmischers von Stufe 0-10 [in Lux]

²⁸ Prof. Dr. Eugene Hecht: OPTIK, S.

²⁹ Prof. Dr. Eugene Hecht: OPTIK, S.229

4.1 Der Tubusaufbau

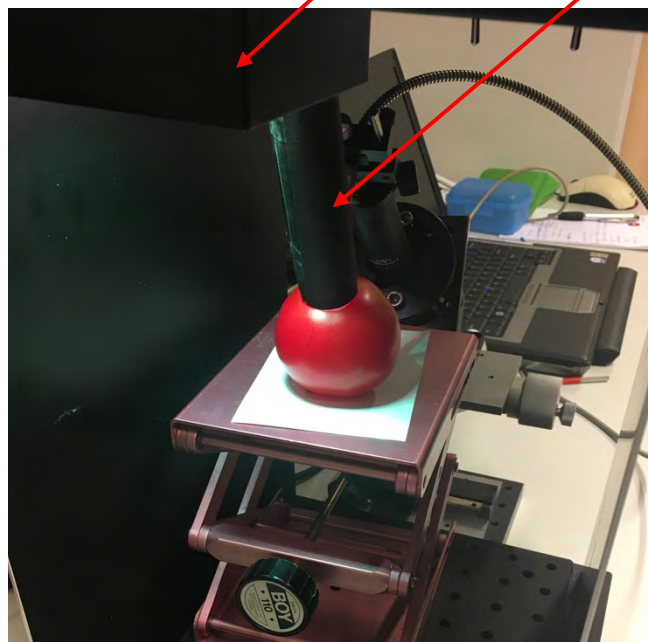
Anfangs wurden die Reflexionsspektren der Versuchsobjekte immer unter denselben Bedingungen (45° Winkel, Abstand zur Lampe) in einem dunklen Kasten gemessen (**Abb. 17**). Später entwickelte sich daraus die Methode des Tubusaufbau, da dabei eine geringere Anzahl an fremden Lichteinflüssen in das Spektrometer fällt. Bei diesem Versuchsaufbau wird das Röhrchen auf das Versuchsobjekt gerichtet (**Abb. 18/18/20**), wobei die Lichtquelle von oben in das Röhrchen einfällt. Eingebaut in diese kleine schwarze Röhre, misst das Spektrometer das Reflexionsspektrum. **Abb. 18** ist ein Beispiel für den Tubusaufbau mit dem Sonnenlicht als Lichtquelle und **Abb. 19/20** mit dem LED-Lichtmischer als Lichtquelle.



Abb. 17:
Messungen im dunklen Kasten



Abb. 18: Tubusaufbau im Sonnenlicht



Spektrometer LED-Lichtmischer Tubus

Abb. 19/20: Tubusaufbau mit LED-Lichtmischer

4.2 Messungen mit einer Ulbricht-Kugel

Nach dem Messen des Spektrums des Sonnenlichts auf weißem Papier, wurden die Reflexionsspektren im Sonnenlicht an unterschiedlichen Versuchsobjekten (**Abb. 21**) mit einer Ulbricht-Kugel (**Abb. 22/23/24**) überprüft. Mit dieser Kugel kann das Reflexionsspektrum der Ware, die mit einer bestimmten Lichtquelle angestrahlt wird, analysiert werden. Der Vorteil einer Ulbricht-Kugel ist, dass das Spektrum nicht durch andere Lichtquellen beeinflusst und verfälscht wird, da sie „lichtdicht“ ist. Der Nachteil dieser Messmethode ist allerdings eine zu hohe Streustrahlung, die auf die Glasfaser fällt. Deshalb wird das Spektrum von der Lampe und nicht von der Ware reflektiert und kann das Ergebnis somit verfälschen.

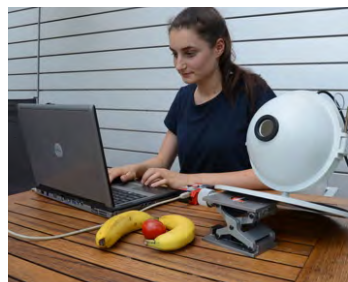


Abb. 21: Versuchsobjekte **Abb. 22/23:** Versuchsaufbau **Abb. 24:** Ulbricht-Kugel

4.3 Messungen mit einem Spektralphotometer

Mit einem tragbaren Spektralphotometer (**Abb. 25/26/27**) von Herrn Dr. Kratzer der Firma X-RiteColor wurden die Reflexionsspektren von einer Banane, Käse, Tomate, Schinken, und dunklem Schinken gemessen. Im Unterschied zu den beiden vorigen Versuchen, wurde die Lichtquelle dieser Spektren bereits rausgerechnet. Die Reflexionswerte der jeweiligen Wellenlängen wurden in Microsoft Excel übertragen und mit einem Graphen veranschaulicht.



Abb. 25/26/27: tragbares Spektralphotometer

4.4 Messergebnisse

Die diffuse Reflexion (vgl. **Kapitel 2.2.1**) bei Reflexionsspektren von beispielsweise Fleisch hatten auf meine Messungen keine negativen Auswirkungen. Zudem wurde getestet, ob die Reflexion von Produkten winkelunabhängig ist. Dafür wurde das Spektrometer in unterschiedlichen Winkeln an die Versuchsobjekte gehalten. Das Ergebnis war jedoch nur die Veränderung der Intensität des Spektrums und nicht die Relation der Wellenlängen. Folglich ist das Messen des Reflexionsspektrums winkelunabhängig.

4.4.1 Tubusaufbau



Abb. 28: Spektrum des LED-Lichtmischers auf den Stufen 10-Rot/6-Grün/0-Blau

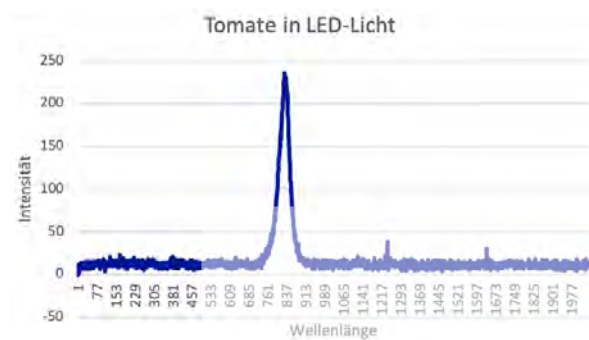


Abb. 29: Reflexionsspektrum der Tomate im LED Spektrum von **Abb.28**



Abb. 30: Spektrum des Sonnenlichts

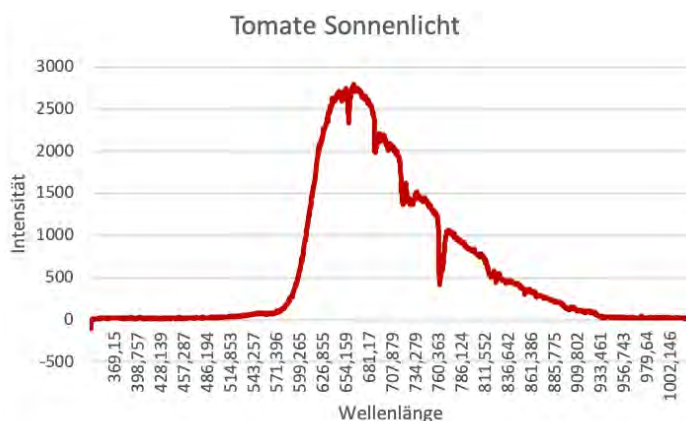


Abb. 31: Reflexionsspektrum der Tomate im Sonnenlicht

4.4.2 Ulbricht-Kugel

Die mit verschiedenen Methoden gemessenen Spektren des Sonnenlichts in **Abb. 30** und **Abb. 32** und das der Tomate in **Abb. 31** und **Abb. 36** sind im Rahmen minimaler Unterschiede identisch. Dies bestätigt, dass das Messen der Reflexionsspektren mit beiden Messmethoden erfolgreich war. Um statistische Schwankungen (**Abb. 33**) zu minimieren, können Spektren mit Hilfe von folgenden Einstellungen geglättet werden: Erhöhungen der „Integration Time“, der „Scans to Average“ und der „Boxcar Width“. Ein Nachteil dieser Glättung (**Abb. 34**) ist, dass Informationen verloren gehen.



Abb. 32: Spektrum des Sonnenlichts



Abb. 33: Statistische Schwankungen



Abb. 34: Geglättete Spektren

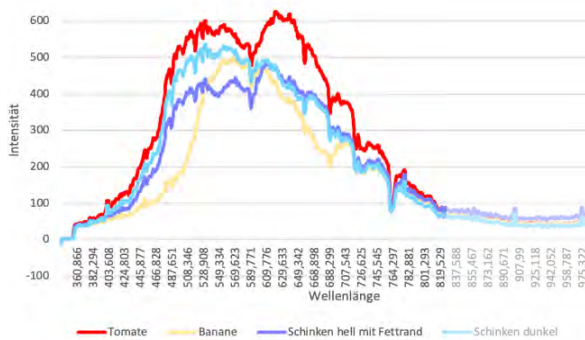
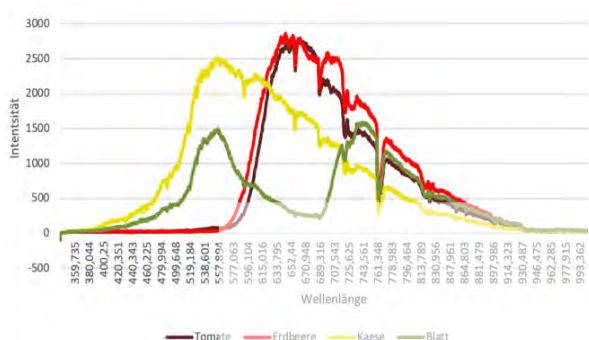


Abb. 35/36: Weitere Reflexionsspektren von verschiedenen Versuchsobjekten im Sonnenlicht



5. Anwendung der Formel und Diskussion der Messergebnisse

Die aufgestellte theoretische Formel (**vgl. Kapitel 2.1**) wird nun an dem Beispiel einer Tomate angewendet. Dividiert man das Reflexionsspektrum der Tomate im Sonnenlicht durch das Spektrum des reinen Sonnenlichts und multipliziert dies mit dem Spektrum einer LED-Lichtquelle und der spektralen Empfindlichkeit des Auges, sollte man demnach das Spektrum erhalten, wie man die Tomate im Supermarkt mit einer LED-Beleuchtung wirklich sieht. Um diese Überlegung zu überprüfen wurden die Ergebnisse der Messungen (**vgl. Kapitel 4.4**) in folgende Formel eingesetzt und in drei Schritten mit Hilfe von Microsoft Excel berechnet.

$$\frac{\text{Reflexionsspektrum der Tomate im Sonnenlicht}}{\text{Spektrum Sonnenlicht (gemessen)}} \times \text{LED Spektrum} \times K(\lambda) \Rightarrow \text{Sinneseindruck}$$

1. Reflektivität des Versuchsobjekts x 2. Beleuchtung x 3. Augenempfindlichkeit

5.1. Zwischenergebnis 1: Vergleich mit gemessenem Reflexionsspektrum

$$\frac{\text{Reflexionsspektrum der Tomate im Sonnenlicht}}{\text{Einfallendes Spektrum (ohne Tomate)}} \Rightarrow \text{Reflektivität der Tomate [a. u.]}$$

Das Spektrum dieser Formel (**Abb. 44**) ist die reine Reflektivität der Tomate, unabhängig von einer Lichtquelle. Die Intensitäten können leicht schwanken und deshalb können keine absoluten Messwerte angegeben werden, sondern nur in arbitrary unit.

Dieses selbst berechnete Reflexionsspektrum kann mit dem Messergebnis der Tomate des Spektralphotometers (**Abb. 45**) verglichen werden:

Der in **Abb. 44** markierte Ausschnitt, entspricht ungefähr dem in **Abb. 45**. Die Reflexionskurve in **Abb. 45** fängt allerdings schon in einem kleineren Wellenlängenbereich an zu steigen, was an den verschiedenen Rottönen der unterschiedlich gemessenen Tomaten liegen könnte.

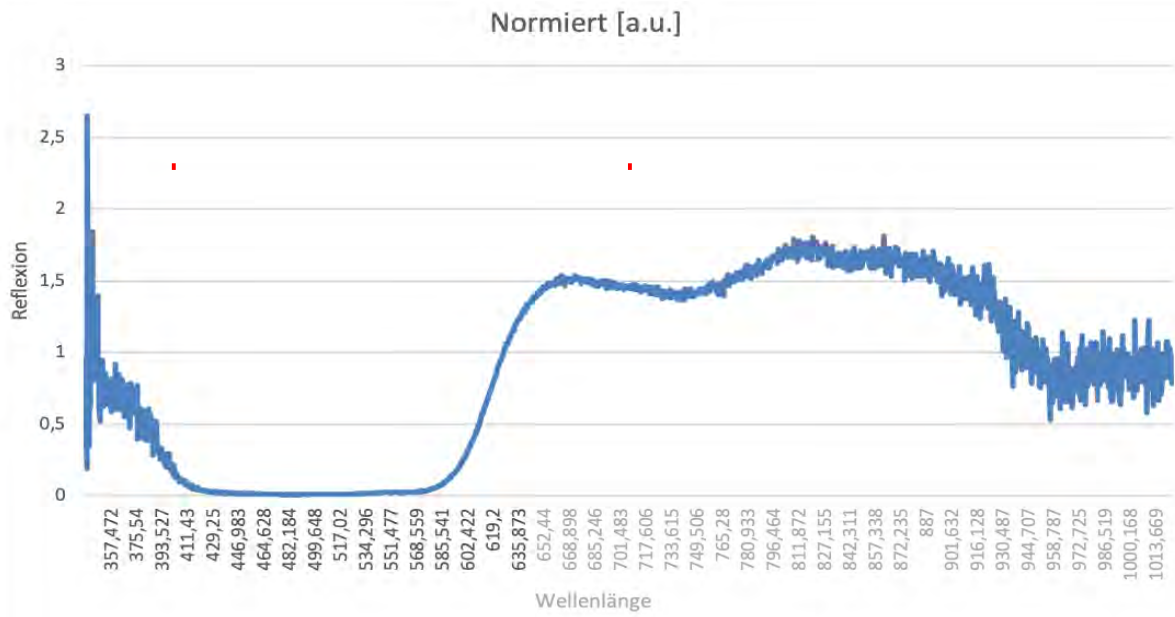


Abb. 44: Reflexionsspektrum der Tomate, berechnet mit der obenstehenden Formel

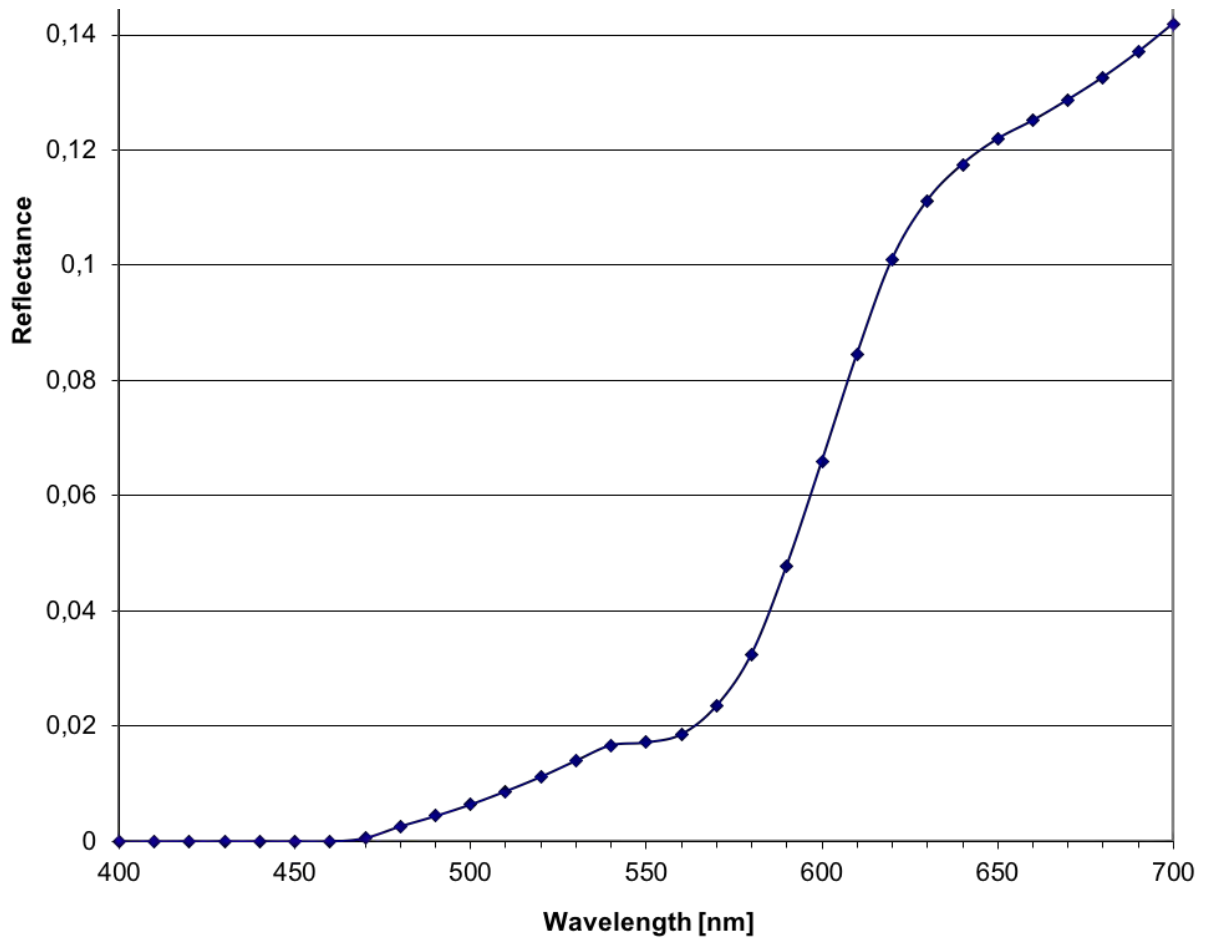


Abb. 45: Reflexionsspektrum der Tomate, gemessen mit dem Spektralphotometer

5.2 Zwischenergebnis 2: Vergleich mit gemessenem Spektrum im LED-Licht

$$\frac{\text{Reflexionsspektrum der Tomate im Sonnenlicht}}{\text{Spektrum Sonnenlicht (gemessen)}} \times \text{LED Spektrum} \Rightarrow \text{Tomate im LED - Licht}$$

Nun wird das Zwischenergebnis aus **Kapitel 5.1** mit der LED-Lichtquelle multipliziert. Als LED Lichtquelle wurde der LED-Lichtmischer auf die Stufen 10-Rot/6-Grün/0-Blau gestellt, was ein rot/grünes Spektrum (**Kapitel 4.4.1, Abb. 28**) ergibt und ein ähnliches Farbpfinden wie das, der Beleuchtung im Supermarkt an der Fleischtheke hervorruft.

Das Zwischenergebnis 2 der obenstehenden Formel (**Abb. 46**) sollte möglichst ähnlich zu dem, mit dem Tubusaufbau gemessenen Reflexionsspektrum der Tomate im LED-Licht (**Abb. 47; vgl. Kapitel 4.4.1, Abb. 29**) sein. Das Ergebnis kann mittels der zugehörigen Graphen verglichen werden:



Abb. 46: Ergebnis der Formel als Zwischenergebnis 2 mit der Intensität in arbitrary unit

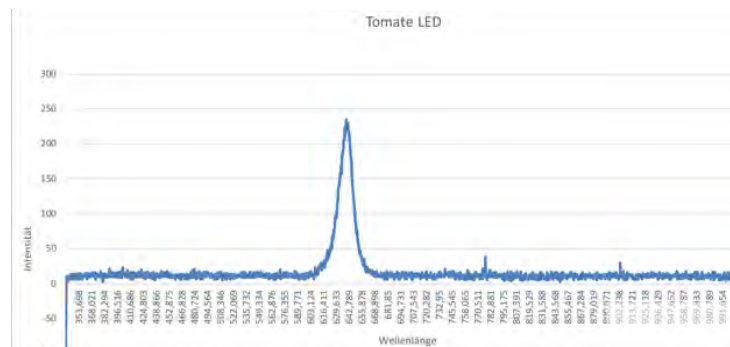


Abb. 47: gemessenes Reflexionsspektrum der Tomate im LED-Licht

Die Spektren in **Abb. 46** und **Abb. 47** sind sich sehr ähnlich. Dies bestätigt, dass die Formel im Rahmen kleiner Fehlerquellen durchführbar ist. Denn es kommen kleine Abweichungen vor, wie beispielsweise das im Vergleich zu **Abb. 46** Vorkommen von einer höheren Intensität und der Glättung der statistischen Schwankungen. Mögliche Fehlerquellen hierfür wäre die fehlende Berechnung der Empfindlichkeit des Spektrometers und die verschiedenen Intensitätsraten der berechneten Spektren.

5.3 Endergebnis und mögliche Fehlerquellen

$\frac{\text{Reflexionsspektrum der Tomate im Sonnenlicht}}{\text{Spektrum Sonnenlicht (gemessen)}} \times \text{LED Spektrum} \times K(\lambda) \Rightarrow \text{Sinneseindruck}$

Zum Schluss wird das Zwischenergebnis 2 mit der spektralen Empfindlichkeitskurve (**vgl. Kapitel 2.2.3**) multipliziert:

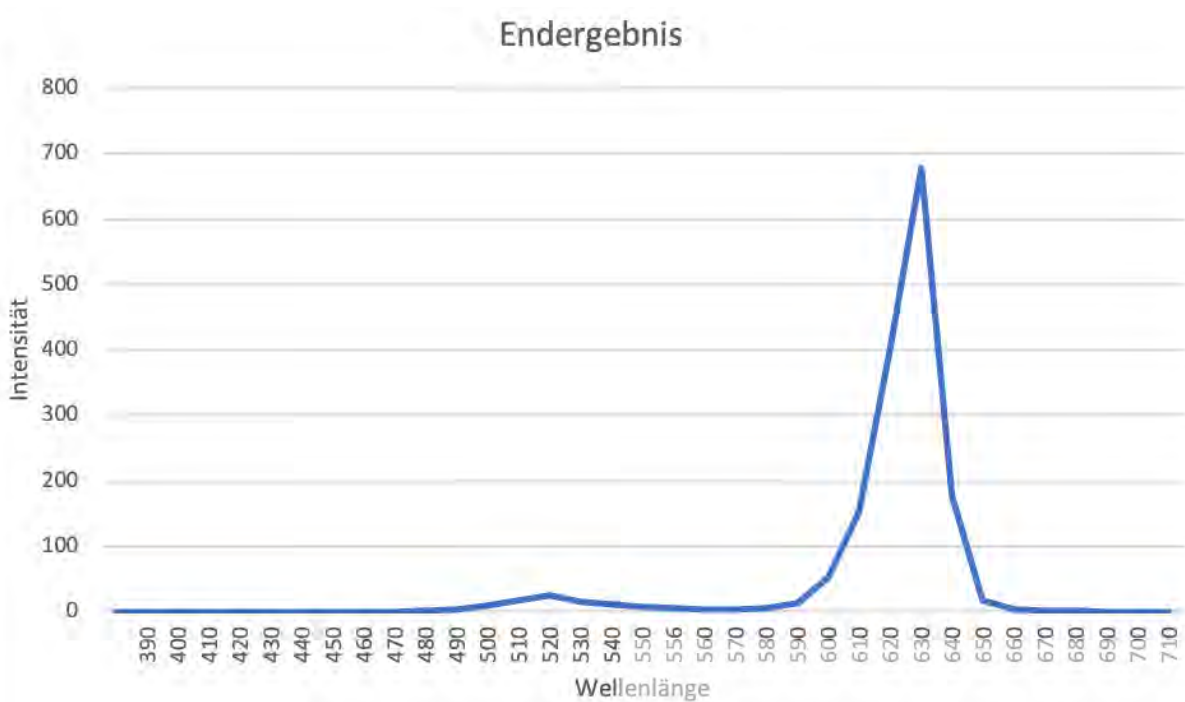


Abb. 48: Endergebnis: Sinneseindruck im Auge

Dieses Spektrum (**Abb. 48**) veranschaulicht den Sinneseindruck im Auge, also wie wir die beleuchtete Tomate in Wirklichkeit wahrnehmen. Ein Fehler im Endergebnis bleibt jedoch bestehen, denn die berechneten Spektren besitzen unterschiedliche Intensitäten und sind alle in arbitrary unit. Eine weitere Fehlerquelle ist außerdem das thermische Rauschen des Spektrometers. Bei einer Integrationszeit von 100ms und einer maximalen Intensität von 8600, liegt das Rauschen bei ca. 150 Counts. Der Fehler ist bei einer kleineren Zählrate größer, ist aber im Vergleich zu dem statistischen Fehler nur geringfügig entscheidend. Folglich sind keine absoluten Messungen möglich, sie sind alle in arbitrary unit.

Außerdem arbeitet der Sensor im Spektrometer nicht für alle Wellenlängen gleich gut. Vor allem rote Wellenlängen werden weniger gut detektiert. Dies wird mit dem Vergleich, von dem berechneten Spektrum³⁰ der Empfindlichkeit des Spektrometers (**Abb. 49**) und dem mit diesem Spektrometer gemessenen Spektrum des Sonnenlichts (**Kapitel 4.4.2, Abb. 32**), veranschaulicht. Dadurch wird deutlich, dass das Spektrometer im roten Bereich weniger Intensität misst, als tatsächlich vorhanden ist.



Abb. 49: Empfindlichkeit des Spektrometers

³⁰ Vgl. **Kapitel 2.1:**

$$\eta(\lambda) = \text{Empfindlichkeit des Spektrometers} = \frac{\text{Sonnenstrahlungsintensität gemessen}}{\text{Sonnenstrahlungsintensität Literatur}}$$

6. LED-Lichtmischer als Eigenbau

Mein Ziel war, den in **Kapitel 4** abgebildeten LED-Lichtmischer nachzubauen, damit sich daraus ein, wie in **Kapitel 1** beschriebener, auf den Reifegrad der Frischwaren, regelbarer Lichtmischer entwickeln kann. Für die Nachkonstruktion wurden zu Beginn von den Grundfarben jeweils drei LED-Dioden der gleichen Farbe nebeneinander zusammengelötet (**Abb. 50**). Durch Heißluft wurden diese mit einer Kunststoffummantelung umhüllt und jeweils mit einem Potentiometer (**Abb. 51**) verbunden, der Anhand einer Montageanweisung zusammengebaut wurde. Durch die Potentiometer kann die Intensität der Lichtstärke von Stufe 0-10 verändert, aber nicht komplett ausgeschaltet werden. Um den Stromkreislauf zu schließen, wurden zum Schluss die Minus- und Plus-Kabel mit dem AC/DC Adapter verbunden. Anschließend wurde die maximale Intensität der drei Grundfarben für jede Stufe 0-10 (**Abb. 52**), mit Hilfe des Messgerätes „DT1301 Light Meter CEM“ (**Abb. 53**), ermittelt. Bei dieser Messung wurde analysiert, auf welche Stufe jedes Potentiometer gestellt werden muss, um alle drei LED Farben in derselben Intensität zu erhalten. Der Erfolg des Versuches bestätigte sich, als die drei Grundfarben (mit Blau auf Stufe 10, Rot auf Stufe 9,4, Grün auf Stufe 9,6) auf eine Stelle geleuchtet wurden und zusammen die Farbe Weiß ergaben (**Abb. 52**).

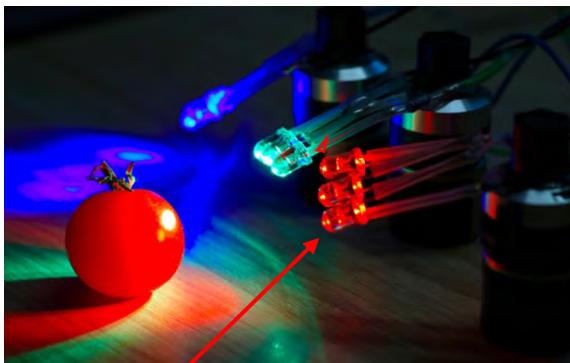


Abb. 50: LED-Dioden

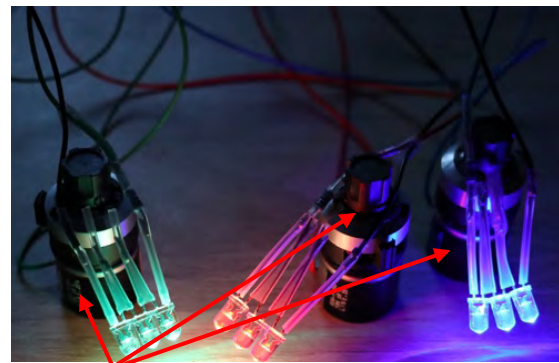


Abb. 51: Potentiometer

1	Maximale Int LED blau	LED rot	LED grün	
2	0	327	356	503
3	1	337	397	557
4	2	379	435	597
5	3	425	523	627
6	4	477	578	740
7	5	542	681	803
8	6	652	844	977
9	7	789	1034	1178
10	8	1010	1419	1486
11	9	1294	2130	2050
12	9,5	1730	2840	2600
13	10	2250	4180	3510
14				
15	weiß	10	9,4	9,6

Abb. 52: Messen der max. Intensität von Stufe 0-10 [in Lux]; Einstellungs-werte für die Farbe weiß



Abb. 53: DT1301 Light Meter CEM

7. Fazit

In dieser Arbeit wurde unter anderem gezeigt, wie ein Reflexionsspektrum entsteht und dass dieses mit verschiedenen Methoden gemessen werden kann. Außerdem wurde mit einer theoretischen Formel veranschaulicht, wie der Sinneseindruck im Auge entsteht und an einem Rechenbeispiel verdeutlicht, dass diese Formel im Rahmen kleiner Fehlerquellen ausführbar ist. Für die Teilnahme bei Jugendforscht, plane ich nun in den Stromkreis des selbstgebauten LED-Lichtmischers einen TCS230 /TCS3200 Farbsensor einzubauen, damit sich dieser in einem Regelkreis dauerhaft an die Farbe und somit Reife der Ware anpasst. Den Bauplan dafür und die Unterstützung eines Elektrikers wurden mir schon zugesichert. Dieser Prototyp wäre mit Sicherheit eine interessante Entwicklung für eine noch bessere Supermarktbeleuchtung. Außerdem gibt es im App-Store bereits eine App namens ColorMeter RGB, die mit Hilfe der Handykamera Farbenwerte identifiziert und die RGB Mischanteile genau bestimmt. Diese App könnte für Supermärkte weiterentwickelt werden und damit die LED Beleuchtung extern viel einfacher steuern.

Ich hoffe, dass Sie bei Ihren nächsten Supermarktbesuchen bewusst auf die unterschiedlichen Beleuchtungen achten und es Ihnen mit dem Durchlesen dieser Arbeit verständlich wurde, welche bedeutende Rolle die Produktbeleuchtung in unserem Alltag spielt. Denn nicht nur in Supermärkten, sondern auch in Kleidergeschäften, vor allem in Umkleidekabinen, wird Wert auf die richtige Beleuchtung gelegt. Das Ergebnis ist somit ein positiveres Gesamtbild und beeinflusst den Konsumenten im Unterbewusstsein zur Kaufentscheidung. Das Ziel von Supermärkten, Kleidergeschäften und weiteren Läden ist demnach immer die Steigerung des Ladenumsatzes. Ein wirtschaftlicher Effekt, der aus Sicht des Betreibers durchaus nachvollziehbar ist.

Insgesamt hat mir das Verfassen dieser Seminararbeit sehr viel Freude bereitet. Die zahlreichen Besuche zum PhotonLab nach Garching haben sich auf jeden Fall gelohnt, denn dort habe ich nicht nur im Bereich Licht viel dazu lernen dürfen. Deshalb vor allem herzlichen Dank an Frau Dr. Stähler-Schöpf, die dieses Projekt ermöglichte, indem sie mich im PhotonLab begleitete, zahlreiche Fragen beantwortete und die notwendigen Messgeräte zur Verfügung stellte. Lieben Dank auch an Herr Dr. Kratzer, der mir bei sich zu Hause das tragbare Spektralphotometer zur Verfügung stellte.

8. Literaturverzeichnis

Bücher

Prof. Dr. Eugene Hecht (2014): OPTIK, 6. Auflage, De Gruyter

Tobias Haist (2009): Optische Phänomene in Natur & Alltag
<https://www.optipina.de/index2.html> (Stand: Nov. 2018)

Internetquellen

Christian Grieger (2018): Elektronik Projekte, Farberkennung mit dem TCS230/TCS3200-Sensor
<http://elektro.turanis.de/html/prj029/index.html> (Stand: Nov. 2018)

Joachim Herz Stiftung (2014): Elektromagnetisches Spektrum
<https://www.leifiphysik.de/optik/elektromagnetisches-spektrum/sichtbares-licht> (Stand Nov. 2018)

Justus-Liebig-Universität Gießen (2018): Farbwahrnehmung
<http://www.allpsych.uni-giessen.de/karl/teach/Wahrnehmung/Wahr-06-farbe.pdf> (Stand Nov. 2018)

Viktor Bulova (2002): Lichtmodelle
https://homepages.thm.de/~hg10013/Lehre/MMS/SS01_WS0102/Farbmodelle/index.html (Stand Nov. 2018)

Natascha Mörs, iXtenso (2.06.2016): Beleuchtung im Supermarkt: Gute Zeiten für den Ladenbau
<https://ixtenso.com/de/story/30685-beleuchtung-im-supermarkt-gute-zeiten-fuer-den-ladenbau.html> (Stand Nov. 2018)

Landesakademie für Fortbildung und Personalentwicklung an Schulen (24.05.2018):
Gestaltungskompetenz: Farbe; Subtraktive Farbmischung & Komplementär-Kontrast
https://lehrerfortbildung-bw.de/st_digital/medienkompetenz/gestaltung-farbe/index.html (Stand Nov. 2018)

Kai Krzyzelewski, Lampenwelt GmbH (2018): Beleuchtung im Supermarkt & Co.: Was steckt dahinter?
<https://www.lampenwelt.de/blog/innenbeleuchtung/beleuchtung-supermarkt.html> (Stand Nov. 2018)

Derek Christie, Nicolas Derungs, Frédéric Pont (2017): Glühbirnen & Lampen, Farbtemperatur
<https://www.energie-umwelt.ch/haus/beleuchtung-und-batterien/gluehbirnen-und-lampen/> (Stand Nov. 2018)

Mortimer Abramowitz, Matthew J. Parry-Hill (10.09.2018): Specular and Diffuse Reflection
<https://micro.magnet.fsu.edu/primer/java/reflection/specular/index.html> (Stand: Nov. 2018)

Bernhard Grotz (4.01.2018): Reflexion von Licht
<https://www.grund-wissen.de/physik/optik/lichtreflexion.html> (Stand: Nov. 2018)

Wikipedia (24.10.2018): V-Lambda-Kurve
<https://de.wikipedia.org/wiki/V-Lambda-Kurve> (Stand: Nov. 2018)

Waveform Lighting (2018): luminosity curve data <https://www.waveformlighting.com/tech/luminosity-curve-data-csv-excel-format> (Stand: Nov. 2018)

Frankfurter Allgemeine, Florian Siebeck (24.10.2015): LED-Leuchten, Das neue Licht
<http://www.faz.net/aktuell/stil/drinnen-draussen/schoenes-licht-durch-led-ist-kein-ding-der-unmoeglichkeit-mehr-13862334-p2.html> (Stand: Nov. 2018)

Hofstein GmbH (2018): OLED-eine neue Lichttechnologie
<https://www.lampe.de/magazin/oled-eine-neue-lichttechnologie/> (Stand: Nov. 2018)

Ignaz-Günther-Gymnasium



Seminararbeit

Erklärung der eigenständigen Erstellung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel verwendet habe.

Insbesondere versichere ich, dass ich alle wörtlichen und sinngemäßen Übernahmen aus anderen Werken als solche kenntlich gemacht habe.

Ort, Datum

Unterschrift des Verfassers/der Verfasserin

Urkunde

Im Rahmen des

**Wilhelm und Else Heraeus-Förderprogramms
der Deutschen Physikalischen Gesellschaft e.V.
zur wissenschaftlichen Kommunikation von
Nachwuchsphysikerinnen und -physikern**

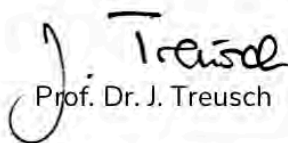
erhielt

Carolin Mantsch

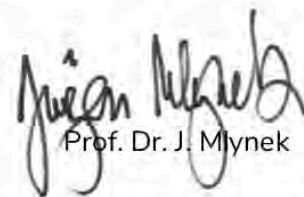
einen Förderbeitrag für die erfolgreiche Teilnahme
an der 22. Deutschen Physikerinnentagung 2018 in Oldenburg.

Hanau, im Oktober 2018

Der Vorstand


Prof. Dr. J. Treusch


Ursula Heraeus


Prof. Dr. J. Mlynek

Die WE-Heraeus-Stiftung befasst sich satzungsgemäß mit der Förderung der Forschung und Ausbildung auf dem Gebiet der Naturwissenschaften, insbesondere der Physik. Sie wurde von den Eheleuten Dr. Wilhelm Heinrich Heraeus und Else Heraeus errichtet und arbeitet eng mit der Deutschen Physikalischen Gesellschaft zusammen.

**WILHELM UND ELSE
HERAEUS-STIFTUNG**

