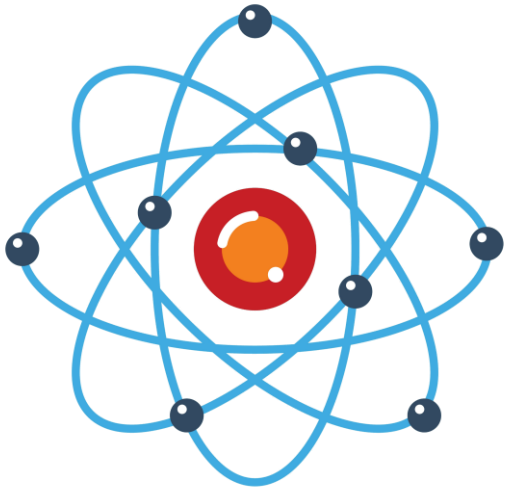
Einführung in die Quantenwelt



Dr. Michael Bennemann
B.Sc. Damian Gorihs

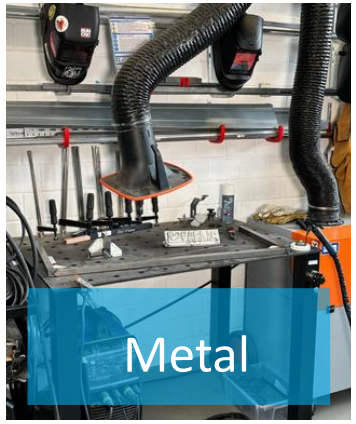
Gefördert durch:

Bundesministerium
für Forschung, Technologie
und Raumfahrt

https://qufablab.de/
https://quantumminilabs.de/

Bild von Mudassar Iqbal auf Pixabay

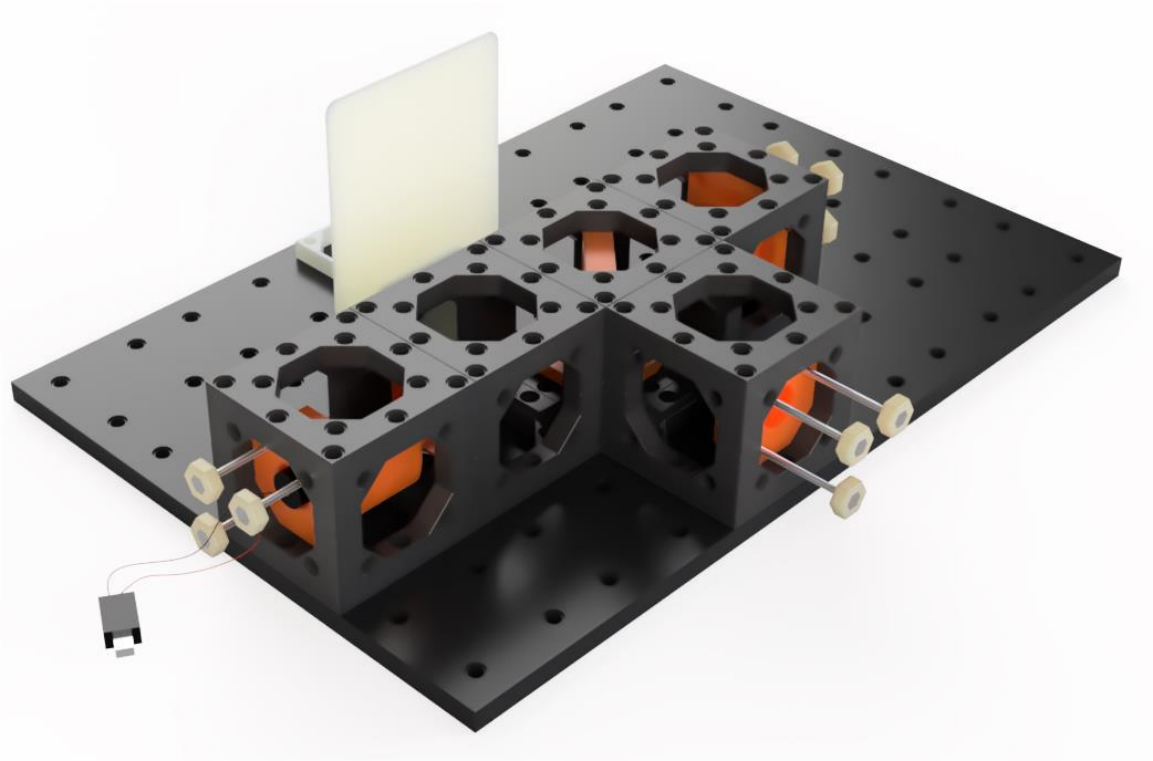
HRW - FabLab



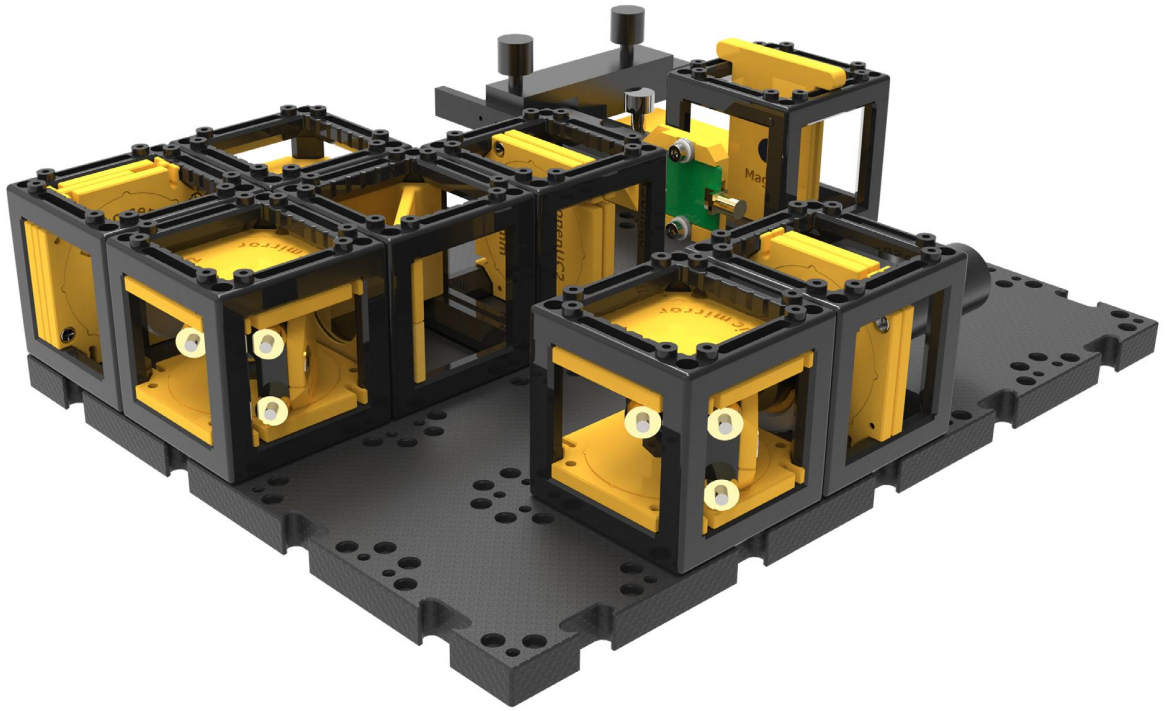
HRW-FabLab
Am Vietshof 2-4
(ehemals Kardinal Hengsbach-Straße)
46236 Bottrop
https://hrw-fablab.de/
Telefon:+49 208 88254-767
E-Mails: info@hrw-fablab.de
veranstaltung@hrw-fablab.de

offene Werkstatt (kostenlos)
mittwochs 15.30 - 19.30 Uhr
Anmeldung:
https://hrw-fablab.de/anmeldung/

QuFabLab-Kit und Quantum MiniLabs



https://qufablab.de



https://quantumminilabs.de

Dateien zum 3D-Drucken des Kits:
https://qufablab.de/wuerfelsystem

Bildungseinrichtungen in Deutschland können sich um ein kostenloses Kit bewerben: https://quantumminilabs.de/bewerbung/
Ab ca. 2027 unter https://openuc2.com/ bestellbar

QuFabLab

HOME NEWS PARTNER WÜRFELSYSTEM DIY-QUANTENEXPERIMENTE PROJEKTE DAS QUFABLAB

Start » Würfelsystem

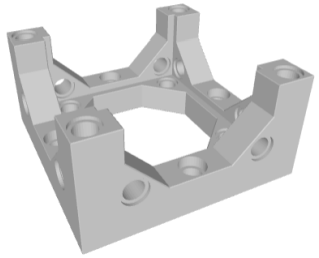
https://qufablab.de/wuerfelsystem

BEARBEITEN

QuFabLab-Würfelsystem

Im Zuge des QuFabLab-Projektes wurde ein Würfelsystem entwickelt um einfach, schnell und kostengünstig Quantenexperimente durchführen zu können. In die Würfel können alle nötigen Komponenten eingebaut werden. Die Würfel können auf einer Grundplatte, aber auch aneinander fixiert werden. Folgend finden Sie die 3D Geometrien der Würfel, der Grundplatte und weitere Geometrien um Zukaufteile wie optische Bauteile in den Würfeln zu fixieren. Neben einer interaktiven 3D Ansicht der Geometrien finden Sie nährere Informationen zu den einzelnen Geometrien und die Möglichkeit die Geometrien runterzuladen. Die 3D Geometrien werden unter der Lizenz: CC BY-NC-SA, veröffentlicht. Bei Fragen oder Anregungen schreiben Sie gerne an: michael.bennemann[at]hrw-fablab[dot]de.

Basis-Würfel

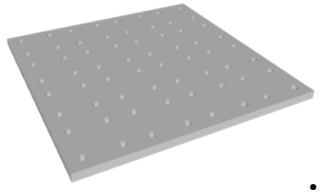


In den Basiswürfeln werden alle optischen Bauteile fixiert. Zum Zusammenbau braucht man zwei Würfelhälften und vier Lego-Verbinder mit der Bauteilnummer: 6279875. Die Lego-Verbinder werden in die vier Ecken der Würfelhälften eingefügt und dienen der Verbindung der Würfelhälften.

Download

STL herunterladen

4×4 Grundplatte



Auf der Grundplatte können die Würfel mittels vier Lego-Verbindern (Bauteilnummer: 6279875) fixiert werden.

Download

STL herunterladen

...

Quantum Minilabs

HOME NEWS ÜBER BEWERBUNG QUANTUM AKTIV QUANTUM FUTUR EDUCATION DOWNLOADS

Start » Bewerbung als Lernort

https://quantumminilabs.de/bewerbung

Was ist Bewerbung als Lernort?

Was ist Quantum Minilabs?

Die Quantum Minilabs machen Quantenphysik praktisch erlebbar – einfach, kostengünstig und mobil. Sie ermöglichen Schüler:innen und Studierenden den Zugang zu echten Experimenten mit Quantensystemen der 2. Generation – basierend auf Stickstoff-Fehlstellen-Diamanten (NV-Zentren).

Vorteile

- 3 Lernniveaus: Basis, Pro, Expert
- 8 spannende Experimente
- Kompakt & tragbar
- Für Sek II & Hochschule geeignet
- Kostenfrei im Projektzeitraum

mehr Infos zu den Minilabs

1

Was suchen wir?

Wir suchen Lernorte mit Begeisterung für zukunftsweisende Bildung

- Schulen (Sek II)
- FabLabs / Maker Spaces / ZDI-Zentren
- Hochschulen
- Museen & Bibliotheken mit Bildungsprogramm

2

Das brauchen wir von Euch

Motivationsschreiben (max. 500 Wörter)

1 2 3

Warum möchten wir ein Quantum MiniLab Kit erhalten und einsetzen? Welche Ziele verfolgen wir damit?

3

Auswahlkriterien

...

Experimente, die durchgeführt werden können

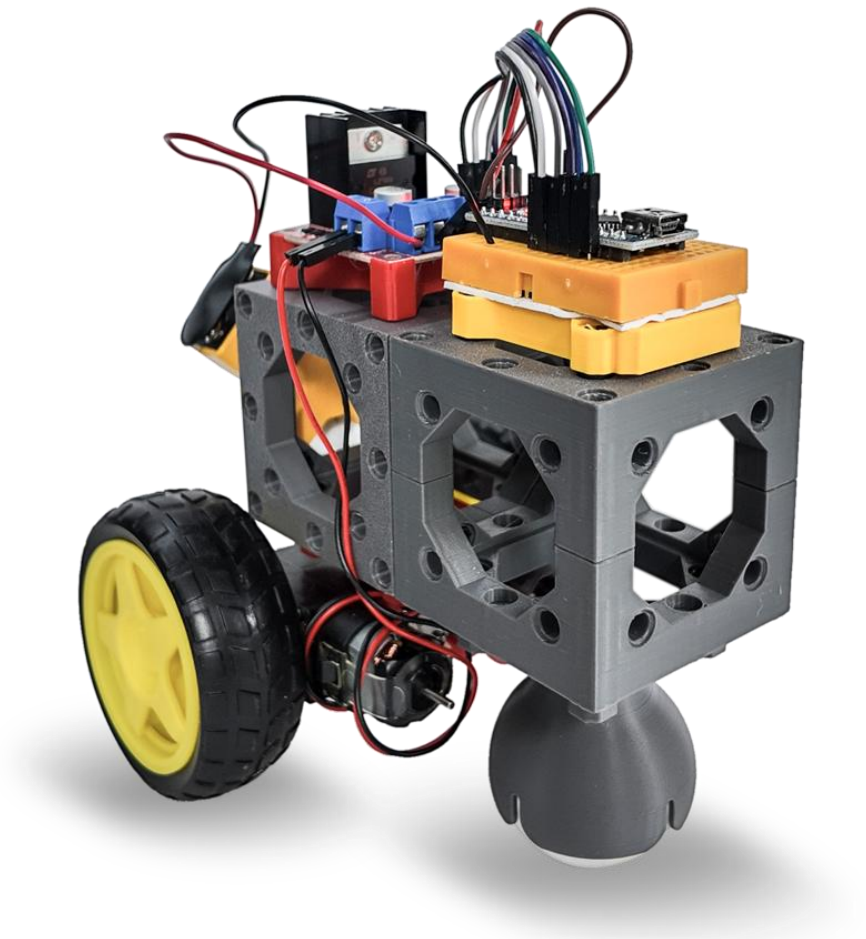
- Spektrometer aktuell nur QuFabLab-Kit
- Doppelspaltexperimente
- Demonstration der Bandlücke in LEDs aktuell nur QuFabLab-Kit
- Bestimmung des Planckschen Wirkungsquantums aktuell nur QuFabLab-Kit
- Michelson-Interferometer
- Mach-Zehnder-Interferometer
- optically detected magnetic resonance (ODMR) aktuell nur QuMiniLabs
- Quantenradierer
- BB84
- Experimente mit Polarisation

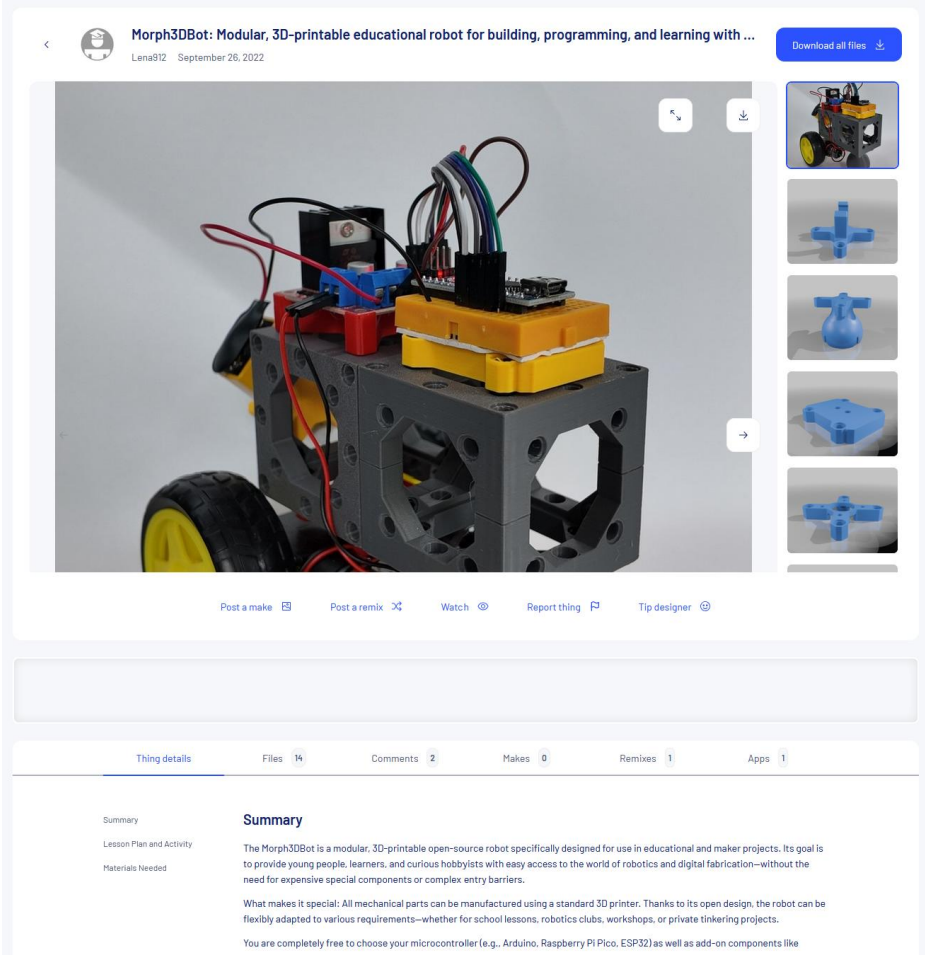
Experimente, die durchgeführt werden können

- Spektrometer — aktuell nur QuFabLab-Kit
- Doppelspaltexperimente
- Demonstration der Bandlücke in LEDs — aktuell nur QuFabLab-Kit
- Bestimmung des Planckschen Wirkungsquantums — aktuell nur QuFabLab-Kit
- Michelson-Interferometer
- Mach-Zehnder-Interferometer
- optically detected magnetic resonance (ODMR) — aktuell nur QuMiniLabs
- Quantenradierer
- BB84
- Experimente mit Polarisation

Nachfolger unseres Morph3DBot-Systems

https://morph3dbot.de

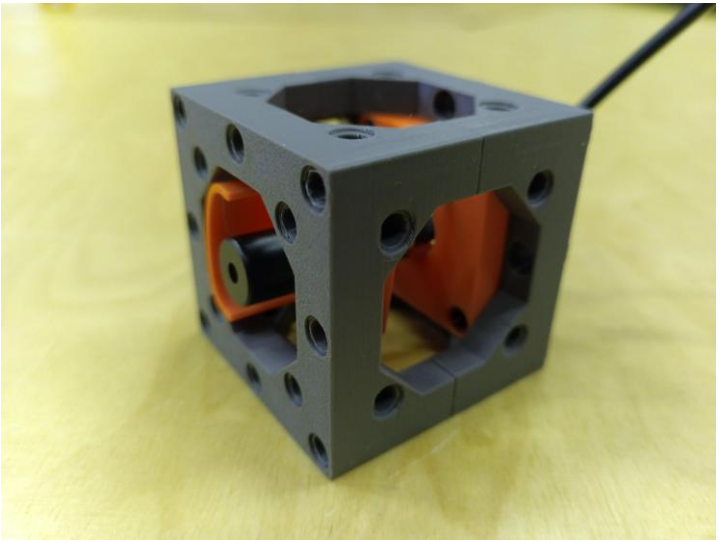




https://www.thingiverse.com/thing:5533052

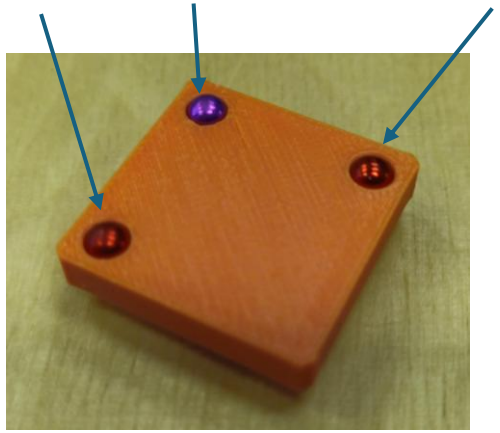
Lasersicherheit

Achtung: Laser Klasse II



- nicht in den Laser schauen
- den Laser nur mit Strom versorgen, wenn er sich im Versuchsaufbau befindet
- nur von oben und nicht von der Seite auf den Versuchsaufbau schauen
- den Laser nicht auf Personen oder Tiere ausrichten
- den Laser nicht ungewollt auf reflektierende Objekte ausrichten
- Uhren, Ringe und Armbänder ablegen
- Handys nicht in den Strahlengang des Lasers halten
- bevor Sie den Laser einschalten überlegen Sie, wo der Laser entlang gehen wird und ob sich in seinem Pfad Personen, Tiere oder reflektierende Objekte befinden
- bevor neue Objekte in den Strahl des Lasers eingebracht werden den Laser ausschalten
- den Laser nicht auseinander nehmen

starke Magnete



- Informieren Sie uns bitte, wenn Sie einen Herzschrittmacher oder ein Cochleaimplantat tragen.
- Handys, Tablets, Computer, EC-Karten etc. können durch starke Magnete beschädigt werden -> bringen Sie diese Dinge nicht in die Nähe des Versuchsaufbaus.
- Geben Sie uns bitte bescheid, wenn sich ein Magnet lösen sollte.

Was sind Quanten?

Alles besteht aus Quanten!

Sie sind die **kleinsten bekannten Einheiten von Materie und Energie.**

Das bedeutet:

wenn man immer weiter an etwas heranzoomt findet man am Ende immer Quanten.

Bild von Lumina Obscura auf Pixabay

Beispiele für Quanten sind: Elektronen, Quarks und Photonen

- **Elektronen** sind die negativ geladenen Elementarteilchen

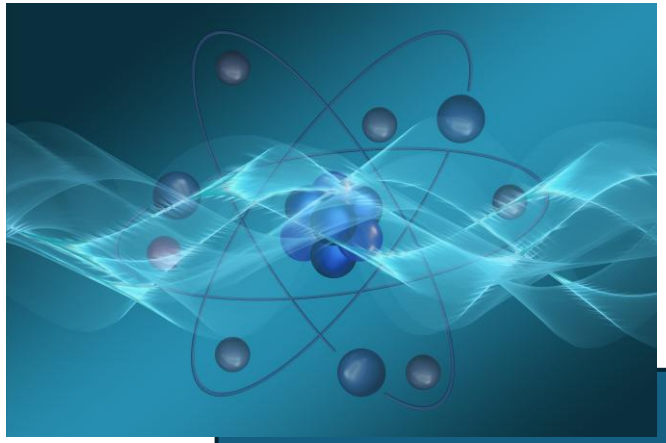


Bild von Gerd Altmann auf Pixabay

- die subatomaren Teilchen Protonen und Neutronen sind aus **Quarks** aufgebaut

Wissenschafts-Fernsehmagazin: Quarks und Co

Bild von myshoun auf Pixabay

- Licht besteht aus **Photonen**

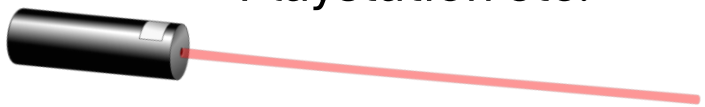
Atome bestehen aus Elektronen, Protonen und Neutronen → Atome bestehen aus Quanten

Warum ist Quantenphysik relevant?

ohne Quantenphysik kein...

Transistor =
Computer =
Smartphone

Bild von Clker-Free-Vector-Images auf Pixabay

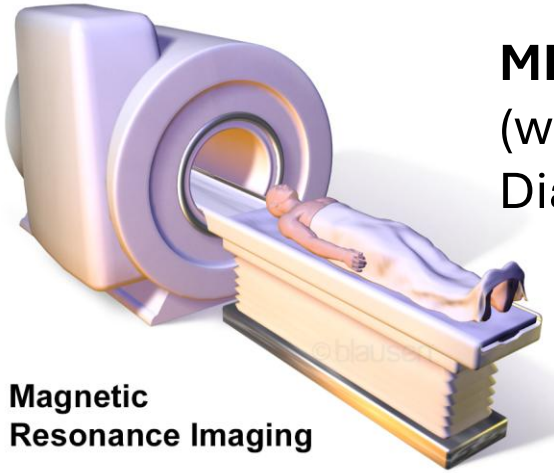


Laser =
DVD-Laufwerk =
Playstation etc.

Bild von OpenClipart-Vectors auf Pixabay

Led =
wie in
Fernsehern,
Smartphones
etc.

Bild von OpenClipart-Vectors auf Pixabay



MRT
(wichtige medizinische
Diagnostik)

Blausen Medical Communications, Inc., CC BY 3.0 <https://creativecommons.org/licenses/by/3.0>, via Wikimedia Commons

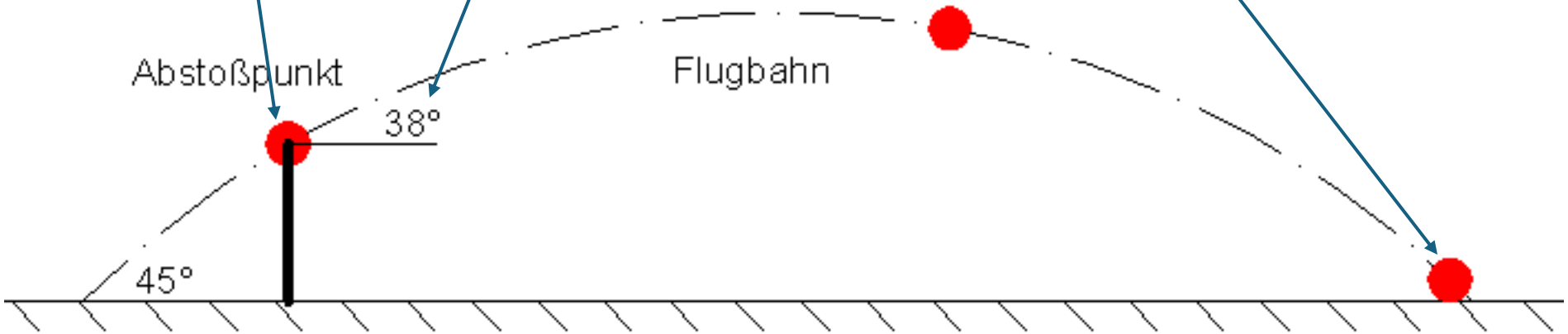
Atomuhr =
Navigation über GPS

Benutzer:Brunswyk, CC BY-SA 3.0 DE <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/de/deed.en>, via Wikimedia Commons

Worin liegen die Unterschiede zwischen der Quantenphysik und der klassischen Physik?

klassische Physik

- Wirft man einen Ball und kennt den ***Abwurfwinkel***, die ***Startgeschwindigkeit*** und die ***Masse*** des Balles, so lässt sich die ***Position*** und ***Geschwindigkeit***, sowie der ***Auftreffpunkt*** des Balles **präzise vorhersagen**.



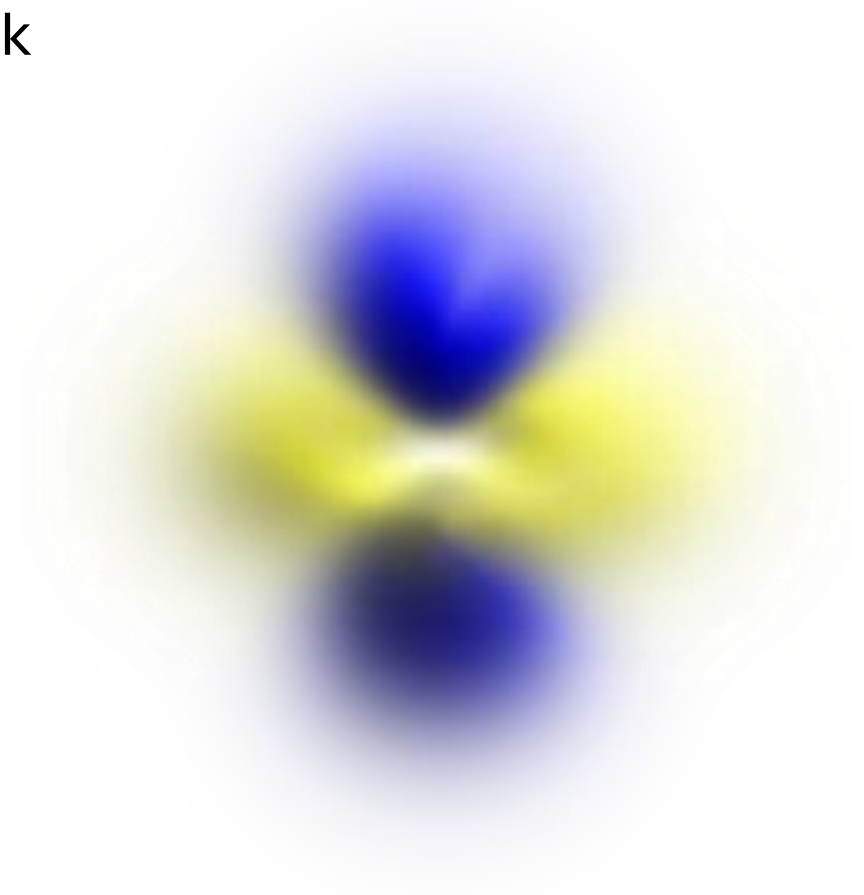
Robert Kropf (https://commons.wikimedia.org/wiki/File:KugelFlug.png), „KugelFlug“, https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/legalcode

Worin liegen die Unterschiede zwischen der Quantenphysik und der klassischen Physik?

Quantenphysik

- In der Quantenmechanik ist es **nicht möglich** die Bewegung und den Ort quantenmechanischer Objekte **präzise vorherzusagen**.

- Für Elektronen eines Atomkerns können lediglich **Aufenhaltswahrscheinlichkeiten** angegeben werden. In der Abbildung rechts werden die Aufenhaltswahrscheinlichkeiten von Elektronen durch die Stärke der Farbe wiedergegeben. Die Bereiche, in denen sich Elektronen aufhalten nennt man Orbitale.



Beispiel für ein Orbital

Geek3, CC BY-SA 4.0 <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0>, via Wikimedia Commons

Quanten haben bestimmte Eigenschaften

Quanten...

- ... haben meist sowohl Teilchen- als auch Welleneigenschaften.

  dies bezeichnet man als **Welle-Teilchen-Dualismus**.

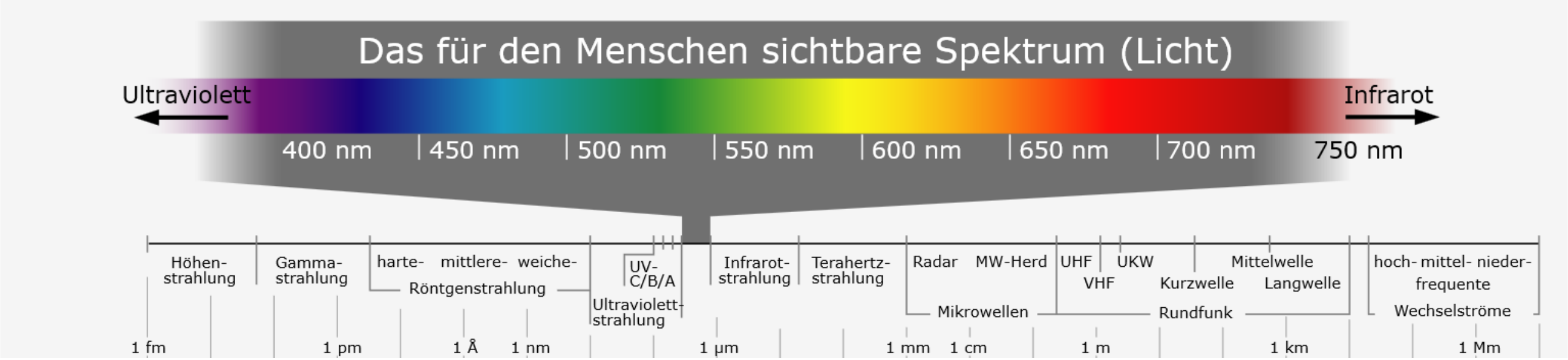
- ... sind unteilbar.
- ... haben einen Spin.
- ... können Superpositionen aufweisen.
- ... können miteinander verschränkt sein.

Aber:

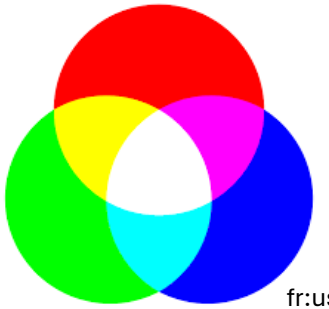
je mehr Quanten an einem Ort sind, desto weniger der Quanteneigenschaften zeigen sie.
Dies liegt an Wechselwirkungen der Quanten untereinander.

Lichtspektrum - alles Photonen! - also Quanten

In unseren Quantenworkshop beschäftigen wir uns hauptsächlich mit Photonen



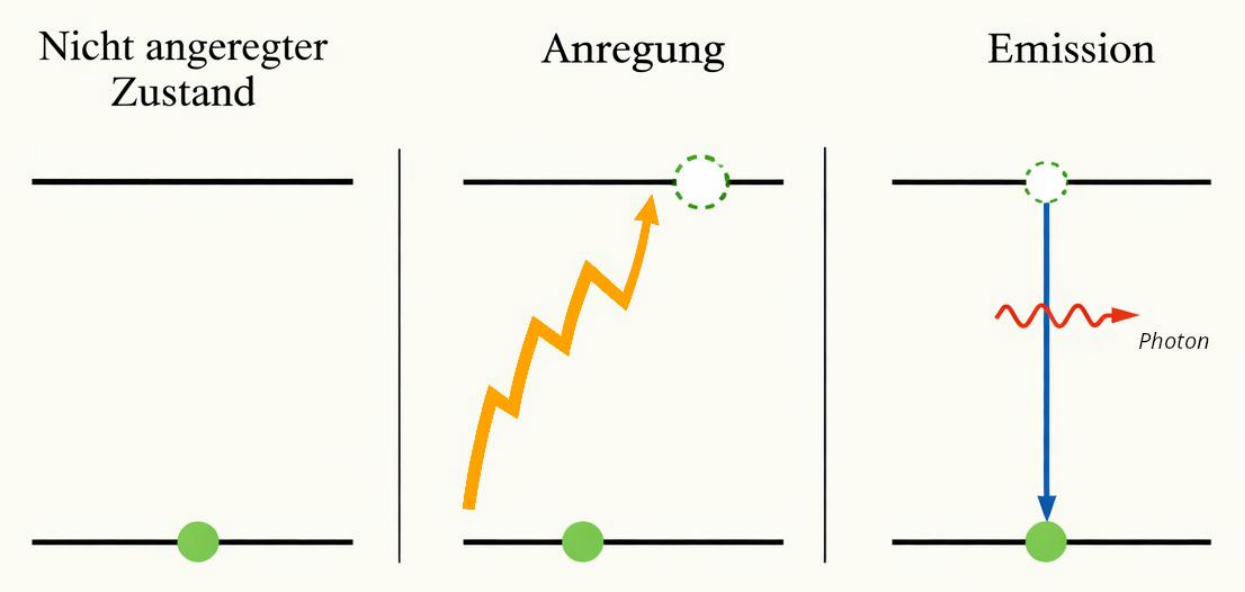
Horst Frank / Phrood / Anony, CC BY-SA 3.0 <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>, via Wikimedia Commons



Wenn man rotes, grünes und blaues Licht mischt, erscheint es uns weiß.

fr:user:Quark67, CC BY-SA 3.0 <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0>, via Wikimedia Commons

Woher kommen Photonen?



Geändert nach: Benutzer:(Automatisierte Konvertierung),Benutzer:DrBob, CC BY-SA 3.0 <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>, via Wikimedia Commons

Bei der Anregung eines Elektrons springt das Elektron (in der Regel) von einem Orbital mit niedrigem Energielevel in eines mit einem höheren Energielevel.

Elektronen können u.a. angeregt werden durch:

- Wärme
- Elektrizität
- Licht

werden sie angeregt, springen sie von einem Zustand mit geringer Energie in einen Zustand höherer Energie.

Dies wird als **Quantensprung** bezeichnet.

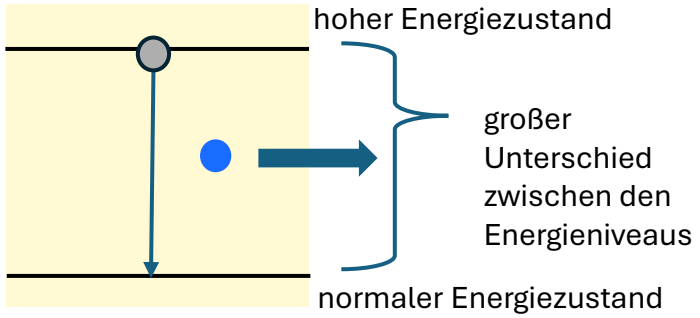
Wenn die Elektronen zurück in den Zustand mit dem normalen Energieniveau fallen, wird die überschüssige Energie in Form eines **Lichtquants (Photon)** abgegeben.

Feuer - Photonen aufgrund der Anregung von Elektronen durch Wärme

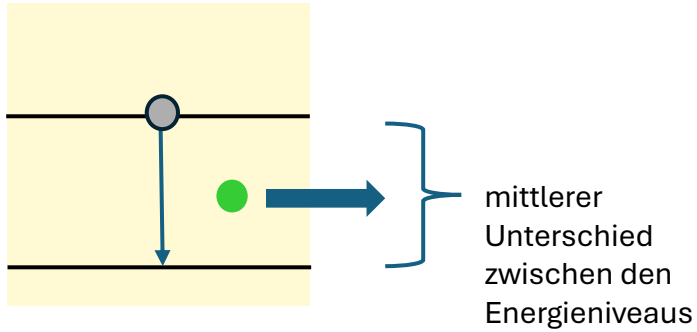
Foto von Gaming Iconic: https://www.pexels.com/de-de/foto/lagerfeuer-in-der-nacht-19208779/

Flammenfärbung - Photonen aufgrund der Anregung von Elektronen durch Wärme

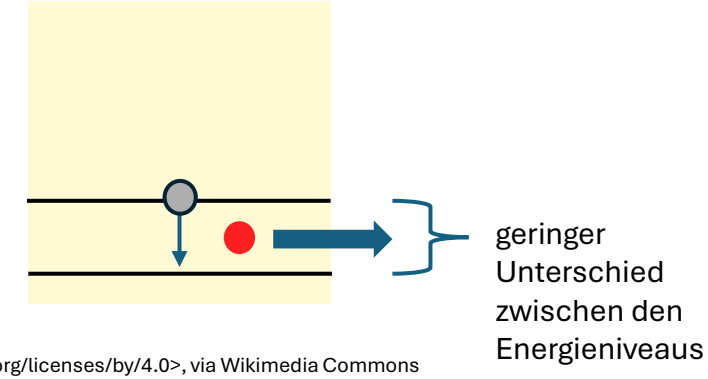
Antimon



Kupfer



Lithium



S k y r, CC BY 4.0 <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>, via Wikimedia Commons

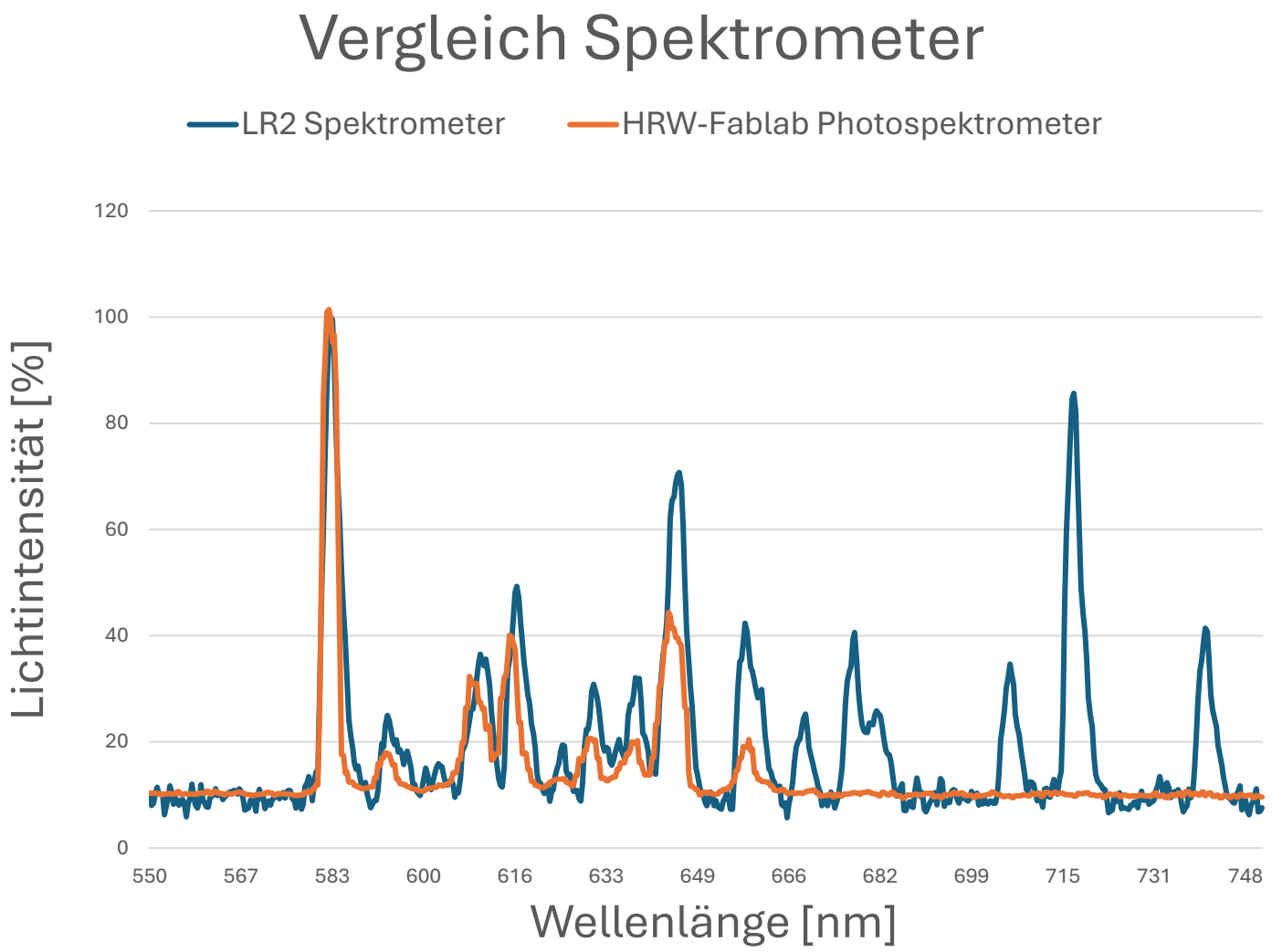
Verschiedene Atome weisen unterschiedlich große Abstände zwischen den Energieniveaus auf, in denen sich Elektronen aufhalten können.

Wenn Elektronen in den normalen Energiezustand fallen, geben sie Photonen ab.

Je größer der Abstand, desto kürzer die Wellenlänge des Photons.

Dieses Phänomen kann zur Identifizierung von Atomen verwendet werden.

Vergleich Neon-Spektren



Spektrum einer Neon-Kalibrierungslampe

gemessen mit:

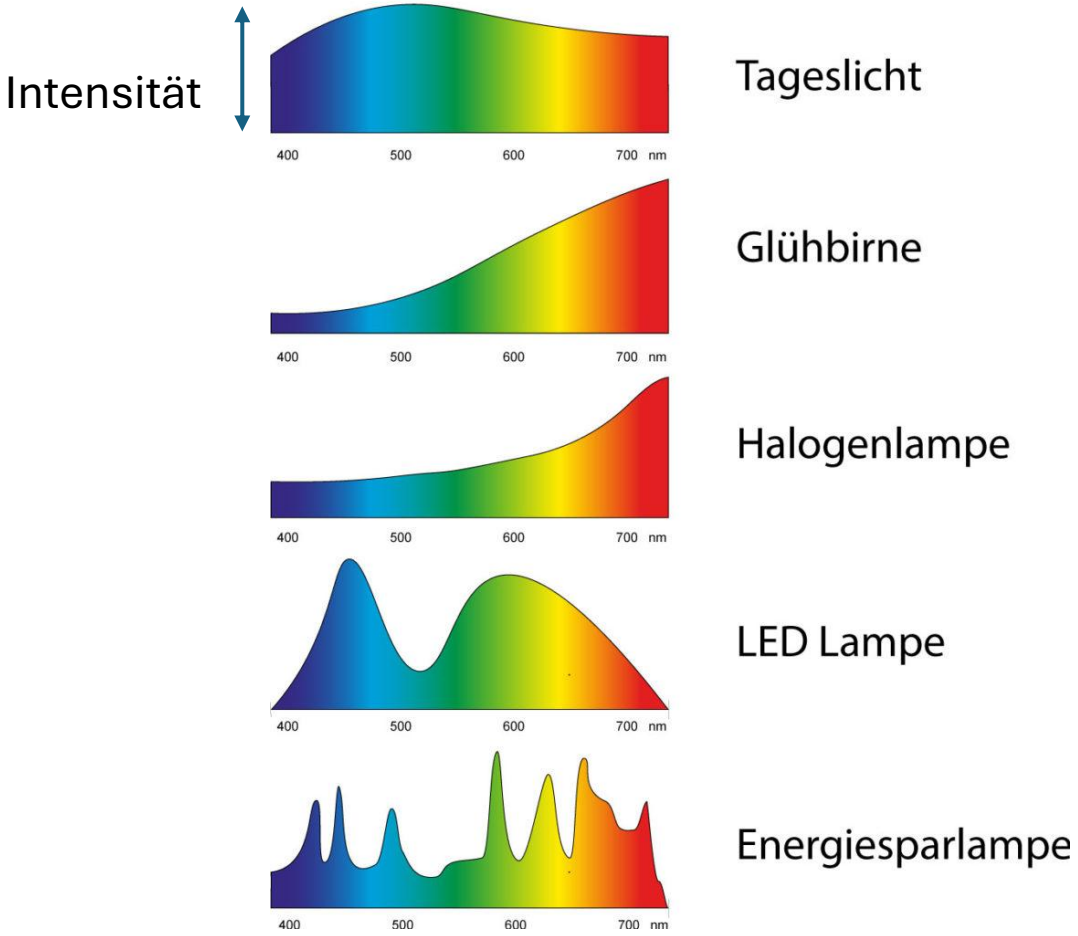
LR2 Spektrometer (1867€)

unserem HRW-Photospektrometer (~ 25€)

unser low-cost Spektrometer zeigt fast alle Peaks, die auch ein hochpreisiges Spektrometer zeigt.

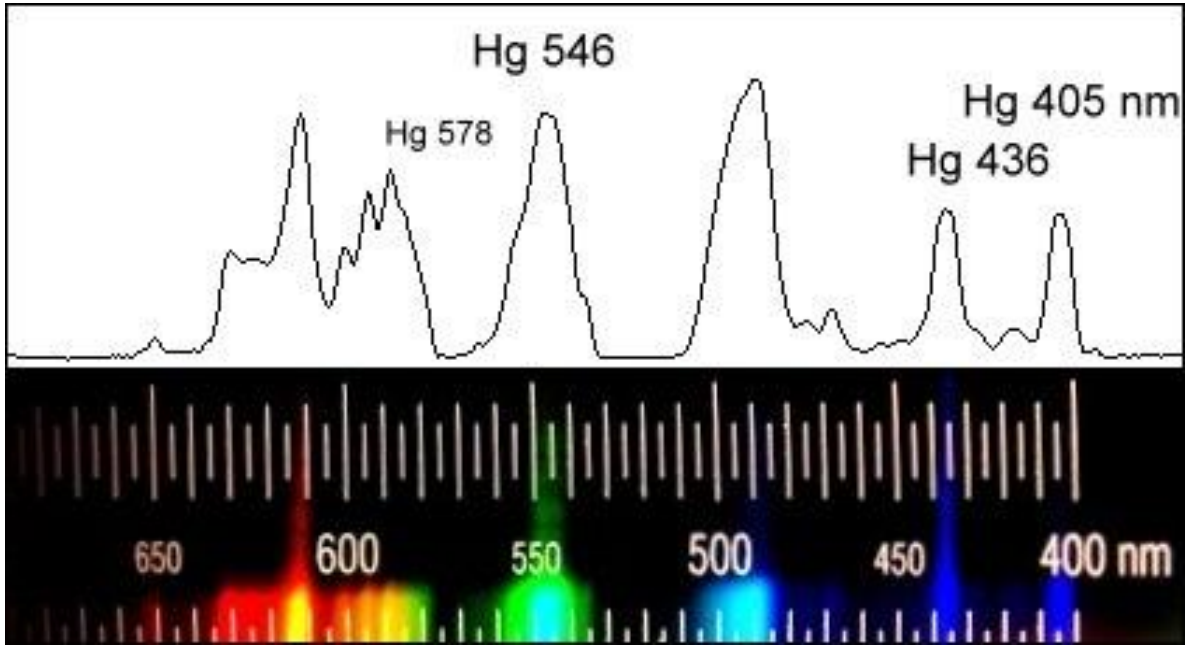
die in unserem Spektrometer genutzte Kamera kann nur Wellenlängen bis 660nm detektieren

Spektralanalyse



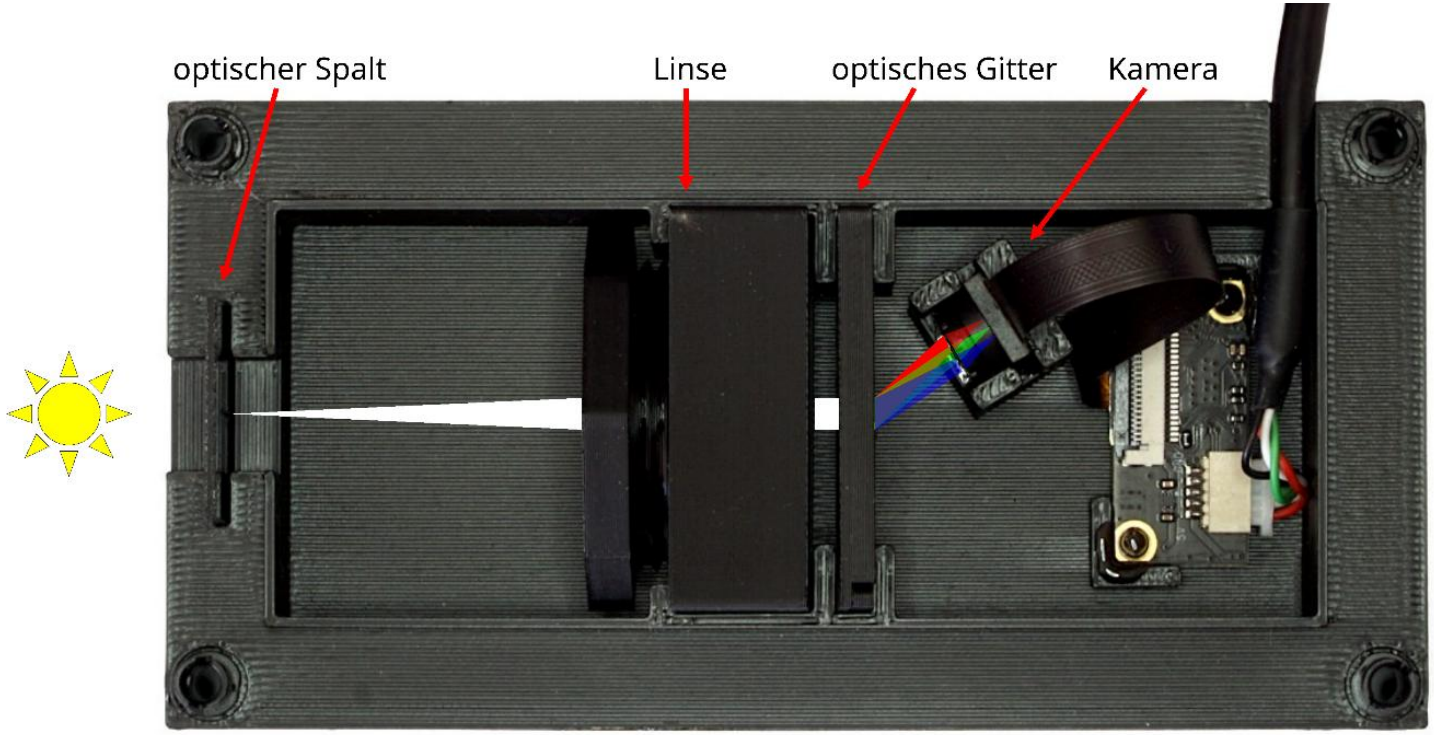
https://emv-plus.com/aktuelles/leuchtmittelvergleich-im-gesundheitscheck/

„Weißes Licht“ aus verschiedenen Quellen weist unterschiedliche Spektren auf – man kann das Spektrum mit einem Spektrometer analysieren.



Anton, CC BY-SA 3.0 <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>, via Wikimedia Commons

Aufbau unseres low-cost Spektrometers

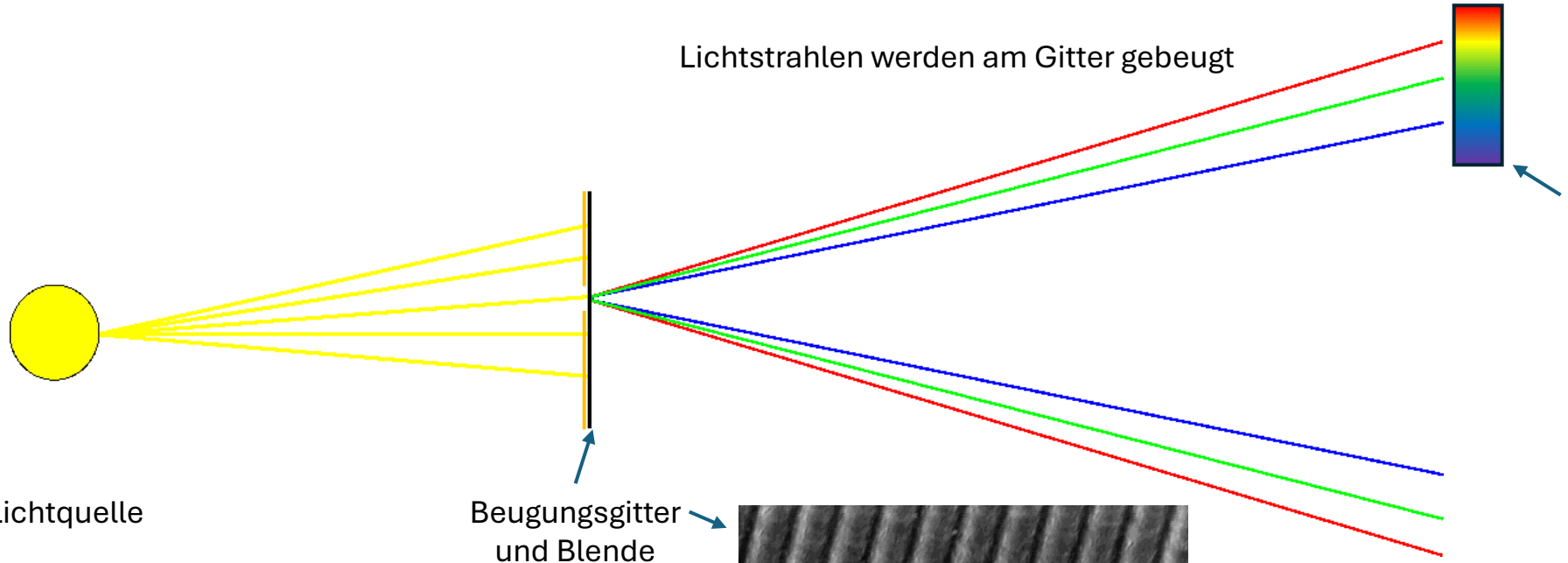


Mit einem Spektrometer kann man untersuchen, welche Wellenlängen im Licht verschiedener Lichtquellen enthalten sind. Außerdem kann man feststellen, ob sich bestimmte Atome in der Lichtquelle befinden.

Experiment 1

richte das Spektrometer auf unterschiedliche Lichtquellen (Glühbirnchen, Led-Lämpchen, wenn verfügbar: Energiesparlampen, Handydisplay, Sonne).

Beugung am Gitter



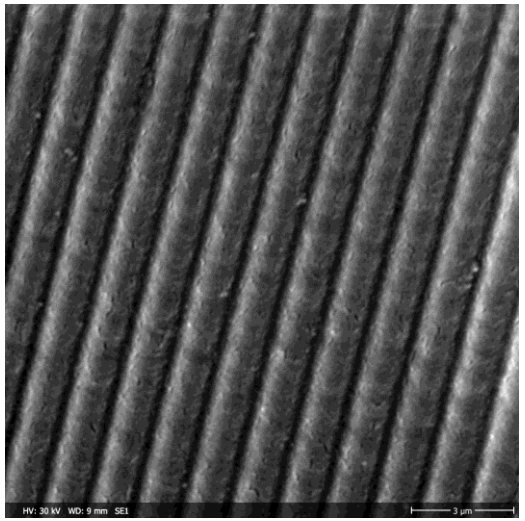
je größer die Wellenlänge, desto stärker wird der Lichtstrahl gebeugt

Spektrum:
das Licht wurde in seine einzelnen Wellenlängen aufgetrennt

Experiment 1

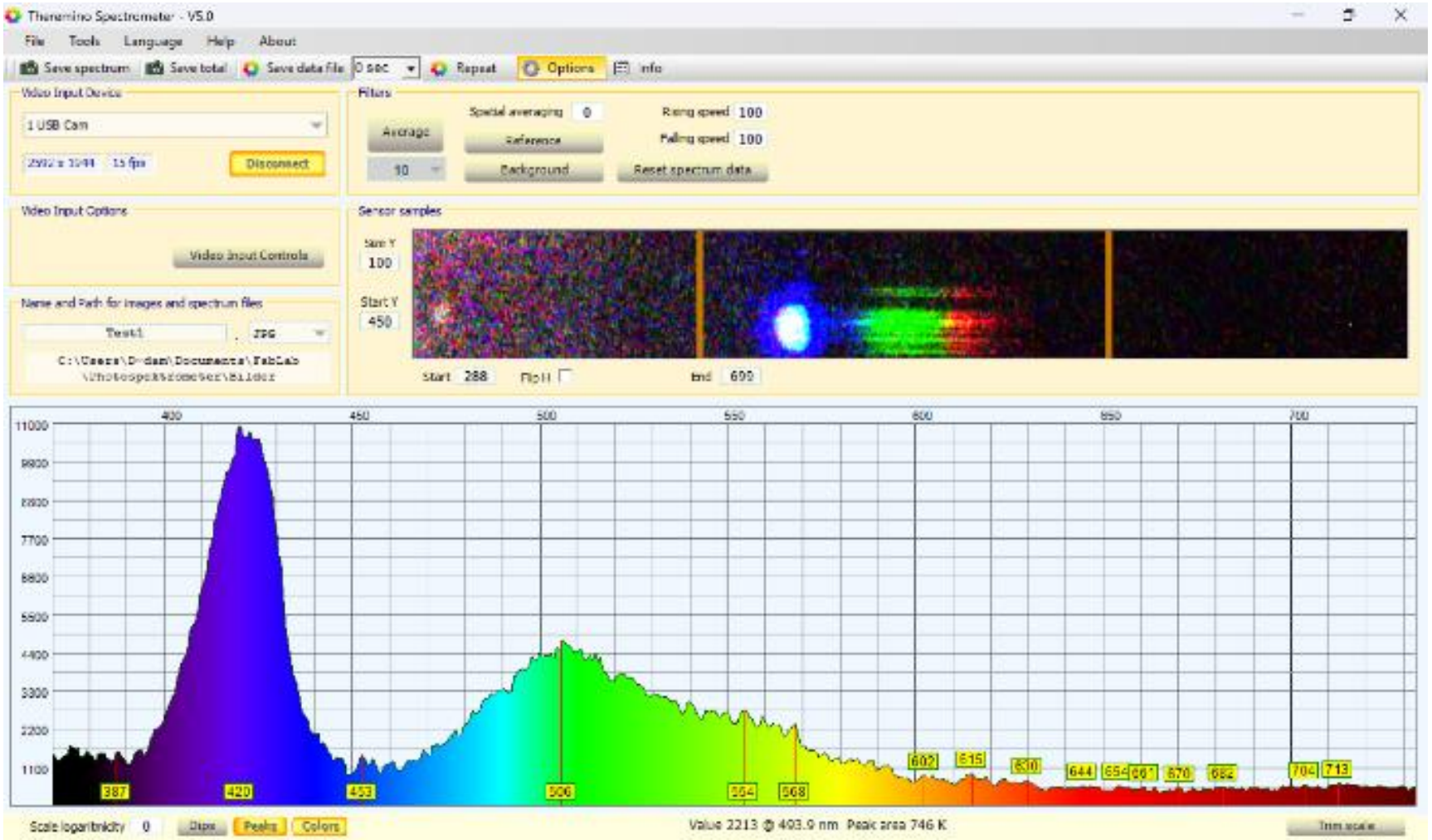
Halte die Beugungsfolie ins Licht und kippe sie in alle Richtungen.

-> Beugungsgitter zerlegen Licht in seine Wellenlängen



REM-Aufnahme des Beugungsgitters
Abstand zwischen den Rillen: 1000 nm

Software:ThereminoSpektrometer



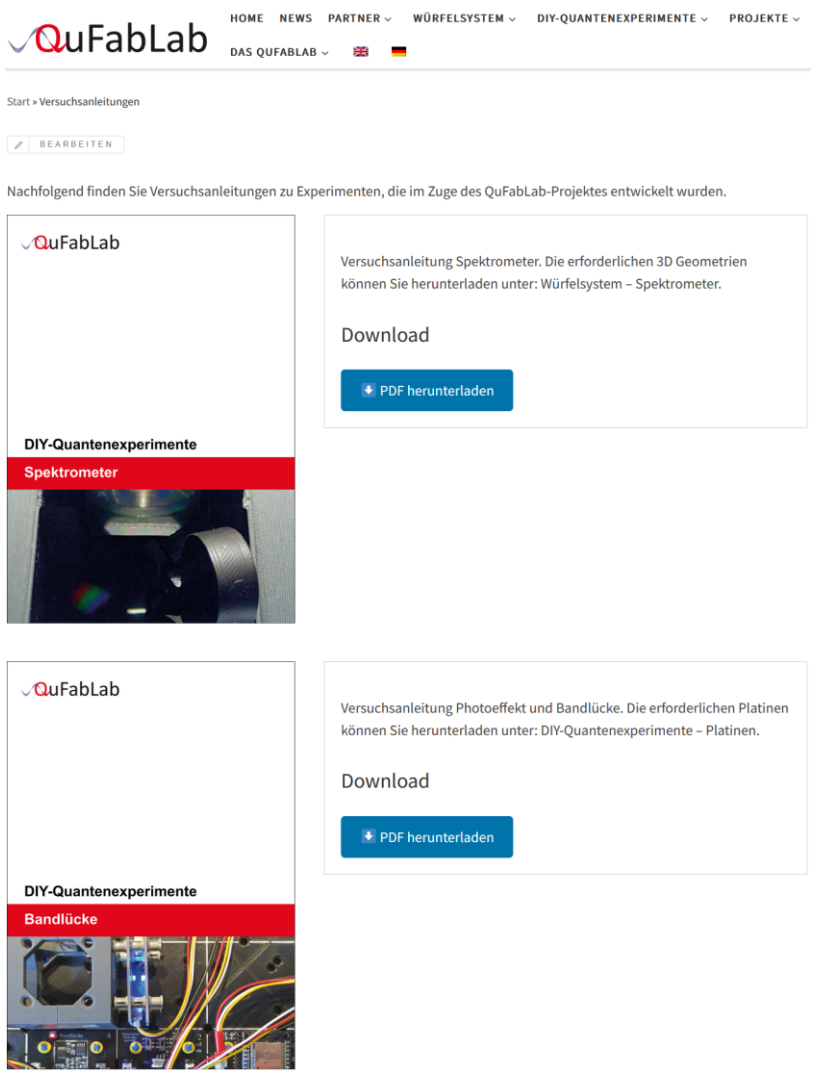
https://www.theremino.com/de/downloads/automation

Um die Software zu kalibrieren, gehen Sie zu Werkzeuge - Trimmpunkte - und wählen Sie die verfügbaren Wellenlängen aus:

436 nm (blau) und 546 (grün) oder 692 (rot)

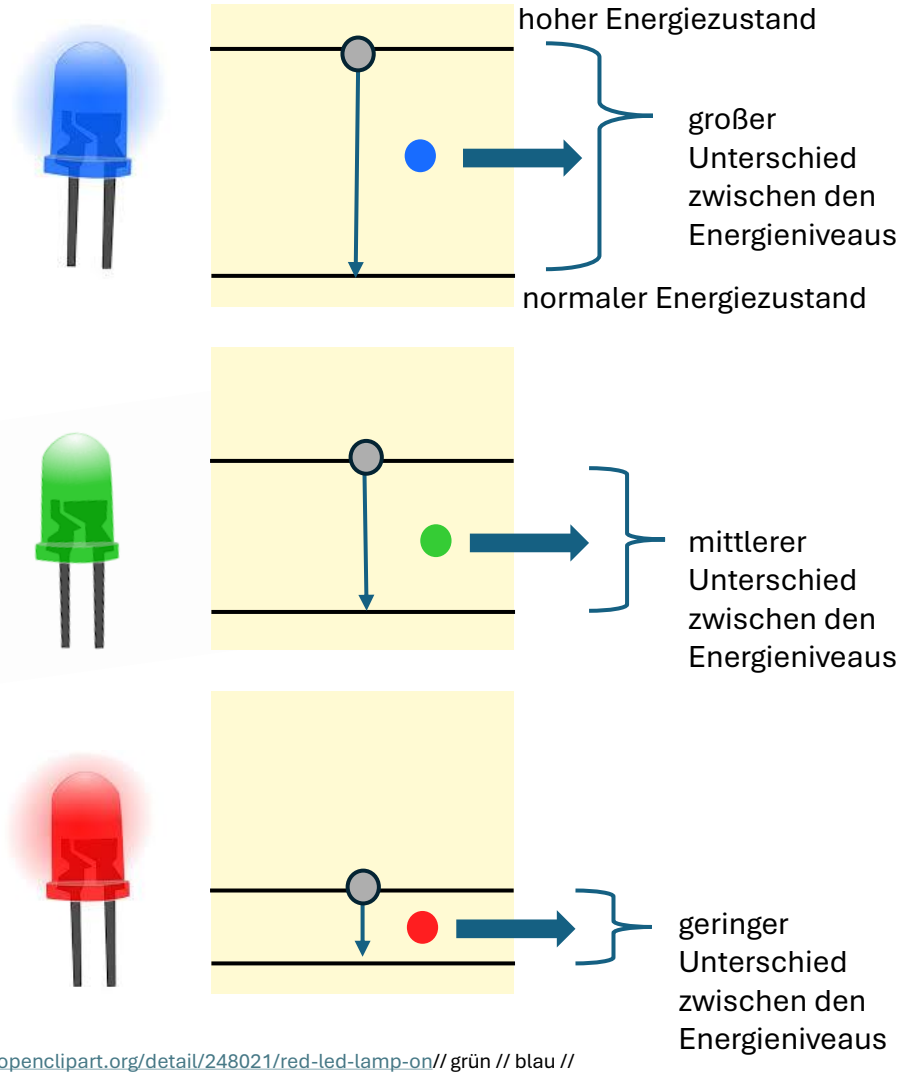
bewegen Sie die Schieberegler auf die entsprechenden Wellenlängen.

Anleitungen zu allen Experimenten



...

Leds- Photonen aufgrund der Anregung von Elektronen durch Strom



https://openclipart.org/detail/248021/red-led-lamp-on// grün // blau //

LEDs enthalten Halbleiter mit einer genau definierten chemischen Zusammensetzung.

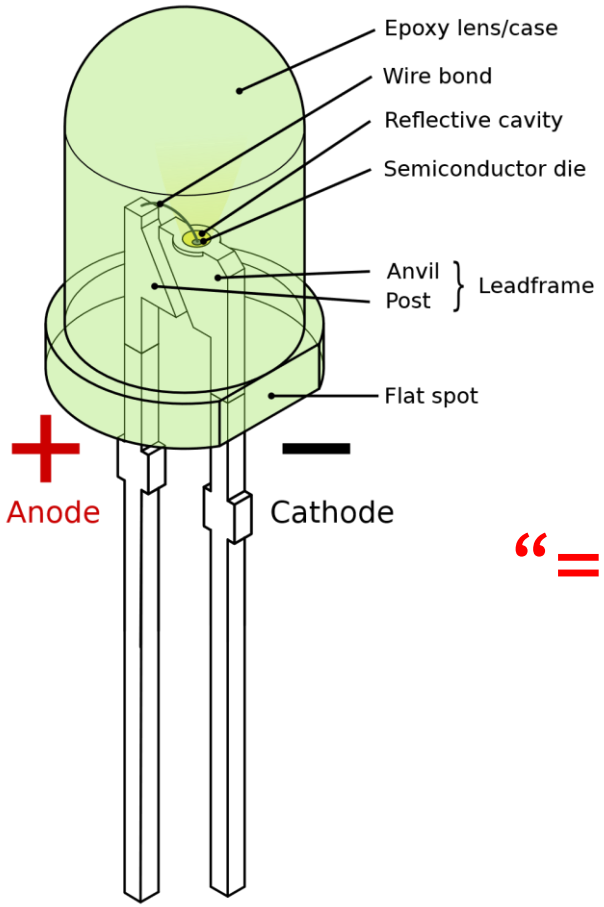
Die Elektronen im Halbleiter werden durch Strom angeregt und springen in einen höheren Energiezustand.

Wenn die Elektronen zurückspringen, werden Photonen emittiert.

Die Wellenlänge des emittierten Photons hängt von der chemischen Zusammensetzung des Halbleitermaterials ab.

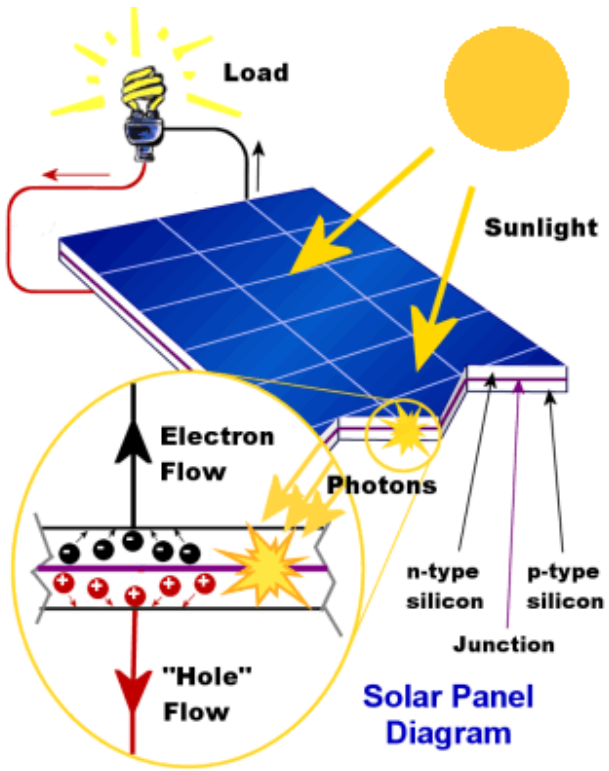
Je größer der Unterschied zwischen den Energieniveaus ist, desto kürzer ist die Wellenlänge.

Photoelektrischer Effekt



Mrubli, CC BY-SA 4.0
https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0
über Wikimedia Commons

"="



Tssenthi, CC BY-SA 4.0
<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0>,
über Wikimedia Commons

- Der Prozess der Erzeugung von Photonen in LEDs durch Anregung mit Strom **kann umgekehrt werden**.
- Die Bestrahlung mit Photonen kann also in LEDs Strom erzeugen.
- Dies ist der gleiche Prozess wie bei Solarzellen und wird als **photoelektrischer Effekt**.
- Aber die Energie = Wellenlänge des einfallenden Lichts **muss hoch genug sein** um ein Elektron aus dem (Halb-)Leiter zu drücken.

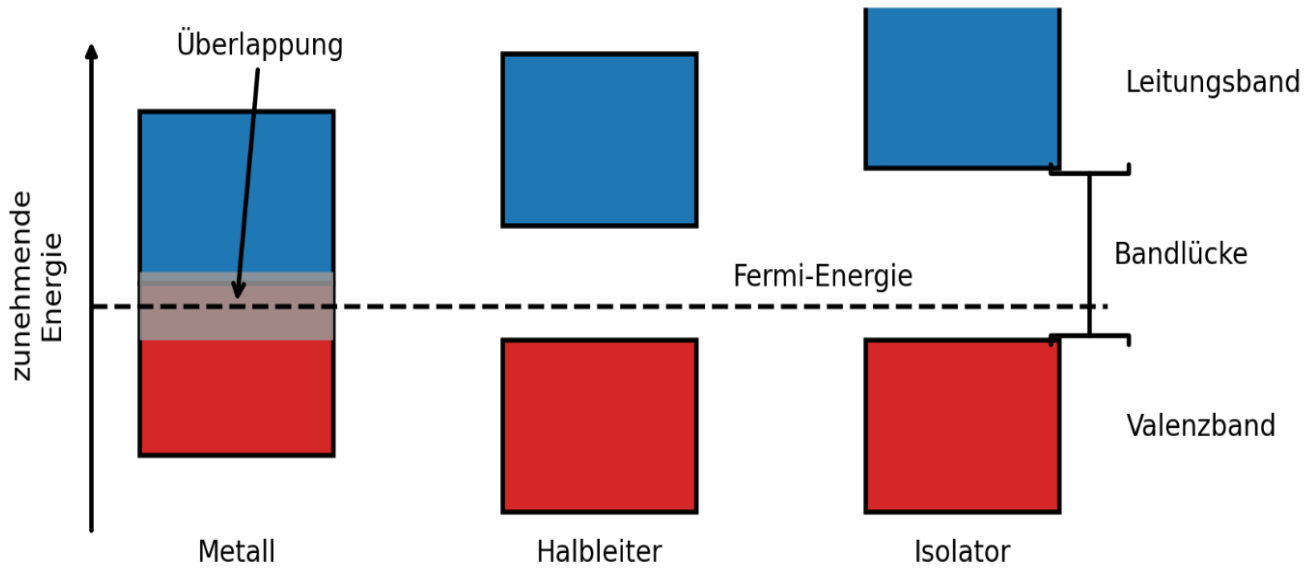
<u>Wichtige Erkenntnisse von Albert Einstein (1905):</u>

Licht besteht aus Energiepaketen (Photonen).

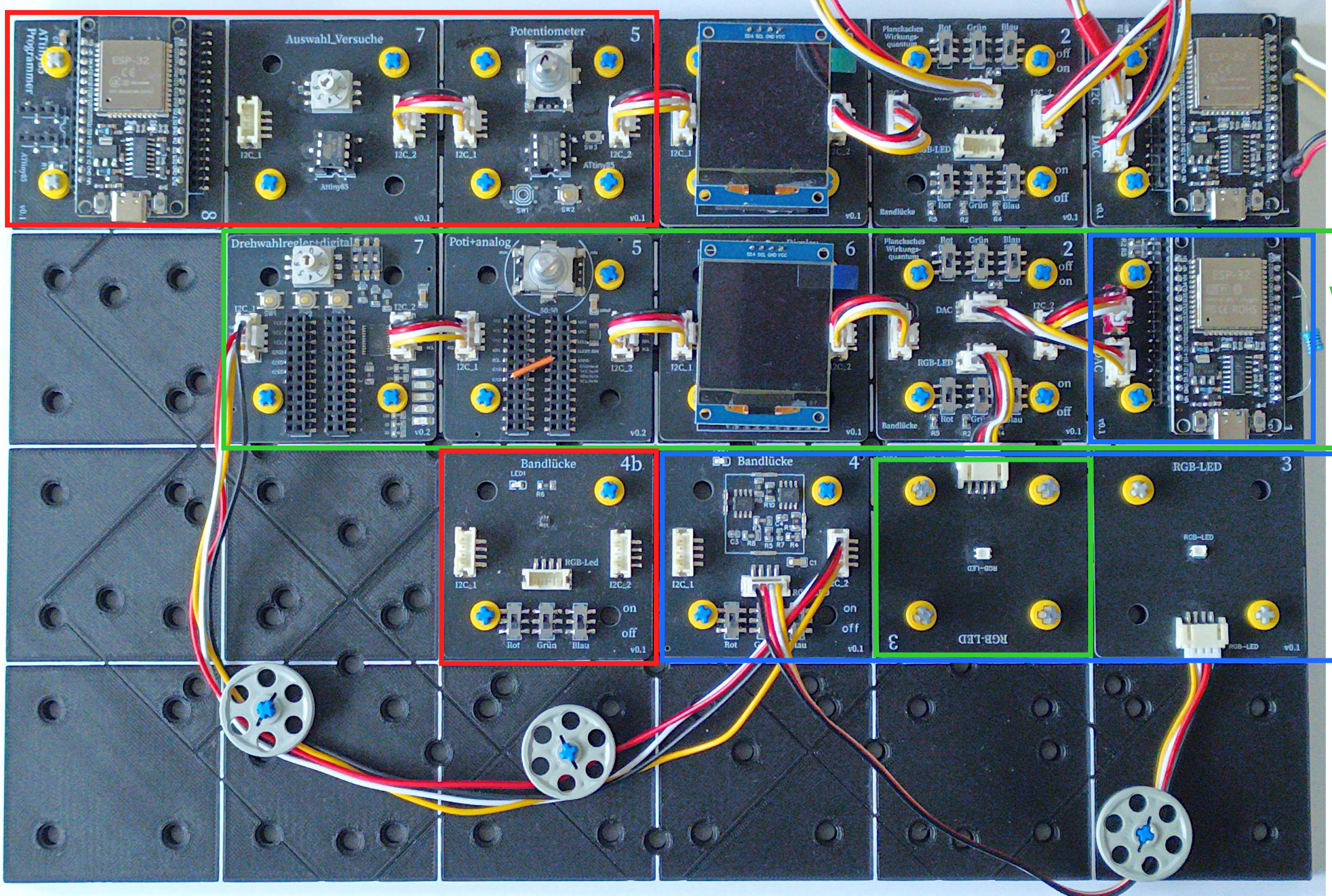
Nur die Energie pro Photon zählt, nicht die Anzahl der Photonen.

Dies war der entscheidende Beweis für die Teilchennatur des Lichts → und eine Grundlage der Quantenphysik.

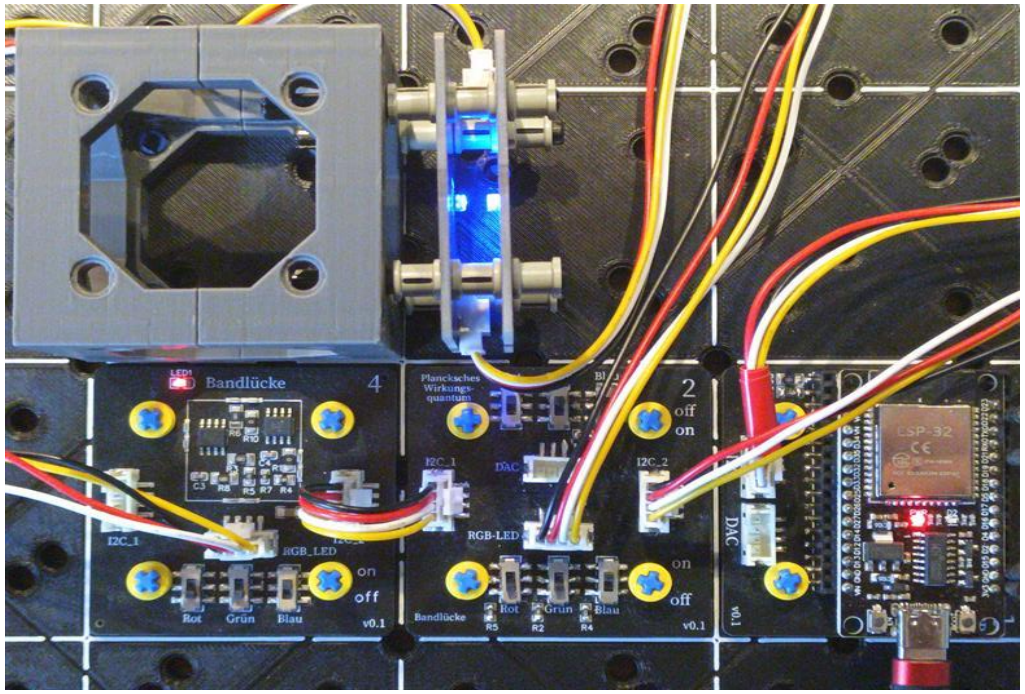
Bandlücke



- Bei Halbleitern wie in LEDs ist das Leitungsband und das Valenzband voneinander getrennt.
- Den Abstand nennt man Bandlücke.
- Um ein Elektron über eine große Bandlücke zu befördern ist viel Energie nötig –> blaues Licht.
- Für die Überbrückung einer kleinen Bandlücke reicht weniger Energie –> rotes Licht.


Auswahl_Versuche
Potentiometer
Drehwahlregler+digital
Poti+analog
Planckssches Wirkungsquantum
Bandlücke
RGB-LED
Alternative Platinen
Plancksches Wirkungsquantum
Bandlücke

Bandlücke



		“Solarzellen”-LED		
		rot	grün	blau
Lichtquellen-LED	rot	?	?	?
	grün	?	?	?
	blau	?	?	?

Versuch 2

Platzieren Sie die beiden Platinen mit RGB-LEDs so übereinander, dass die LEDs sich gegenüberstehen und die Kabelanschlüsse nicht übereinander liegen.

Wir verwenden die RGB-LED an Platine 2, um Licht verschiedener Wellenlängen zu erzeugen. Die RGB-LED an der Platin 4 nutzen wir als "Solarzelle". Wenn in der "Solarzelle" Strom erzeugt wird, wird dieser über eine Verstärker-schaltung verstärkt und lässt eine rote LED oben auf der linken Platine aufleuchten.

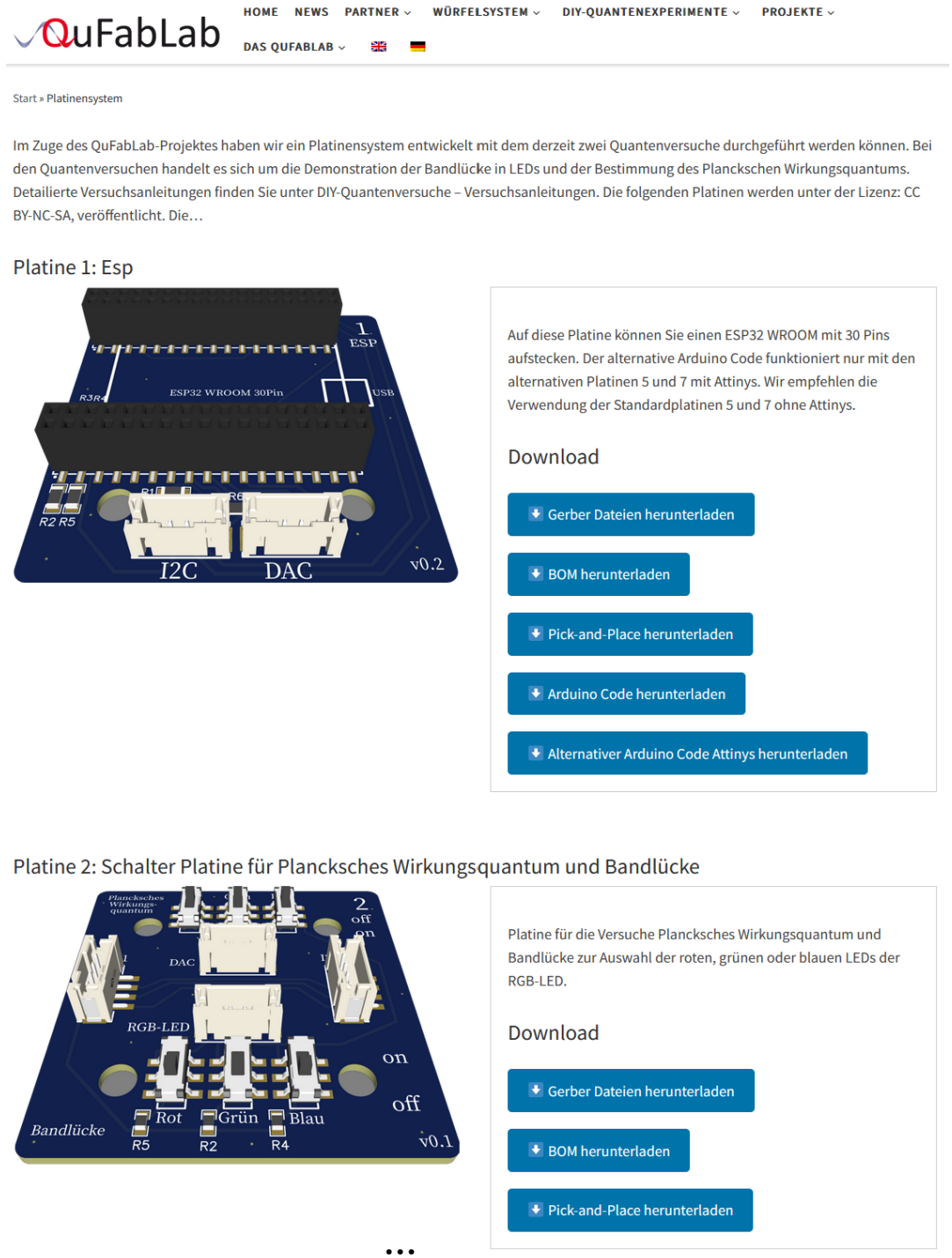
- Verbinden Sie den USB-Anschluss des ESPs mit einem Netzteil (Laptop- oder Smartphone-Ladegerät).
- Schalten Sie eine LED-Farbe der RGB-LED auf der mittleren Platine ein.
- Schalten Sie nacheinander die Kanäle R, G und B auf der rechten Platine ein.

<-Bei welcher Kombination leuchtet die rote LED an der Oberseite der zweiten Platine?

Sie sollten zu folgendem Schluss gekommen sein:

		“Solarzellen”-LED		
		rot	grün	blau
Lichtquellen-LED	rot	Anzeige-LED leuchtet		
	grün	Anzeige-LED leuchtet	Anzeige-LED leuchtet	
	blau	Anzeige-LED leuchtet	Anzeige-LED leuchtet	Anzeige-LED leuchtet

Platinen für das QuFabLab-Kit



…

Auf https://qufablab.de/platinensystem finden Sie zahlreiche Platinen, mit denen Sie Quantenexperimente durchführen können.

Unser Platinen-System ist aber auch dafür geeignet günstig, schnell und unkompliziert allerlei Elektronikaufbauten zu realisieren.

Auf der Website finden Sie alle notwendigen Dateien, um die Platinen selber bei JlcPcb zu bestellen.

Die Platinen kosten ~4-8 € inkl. Versand und Steuern.

Fluoreszenz - Photonen aufgrund der Anregung von Elektronen durch Licht

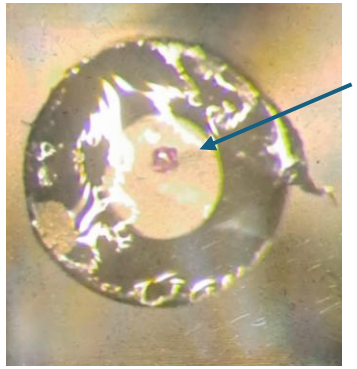
MaximBilovitskiy, CC BY-SA 4.0
<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0>,
über Wikimedia Commons

Chinin macht Tonic Water bitter

Vitamin B2 (Riboflavin) zeigt auch eine Fluoreszenz unter UV-Licht

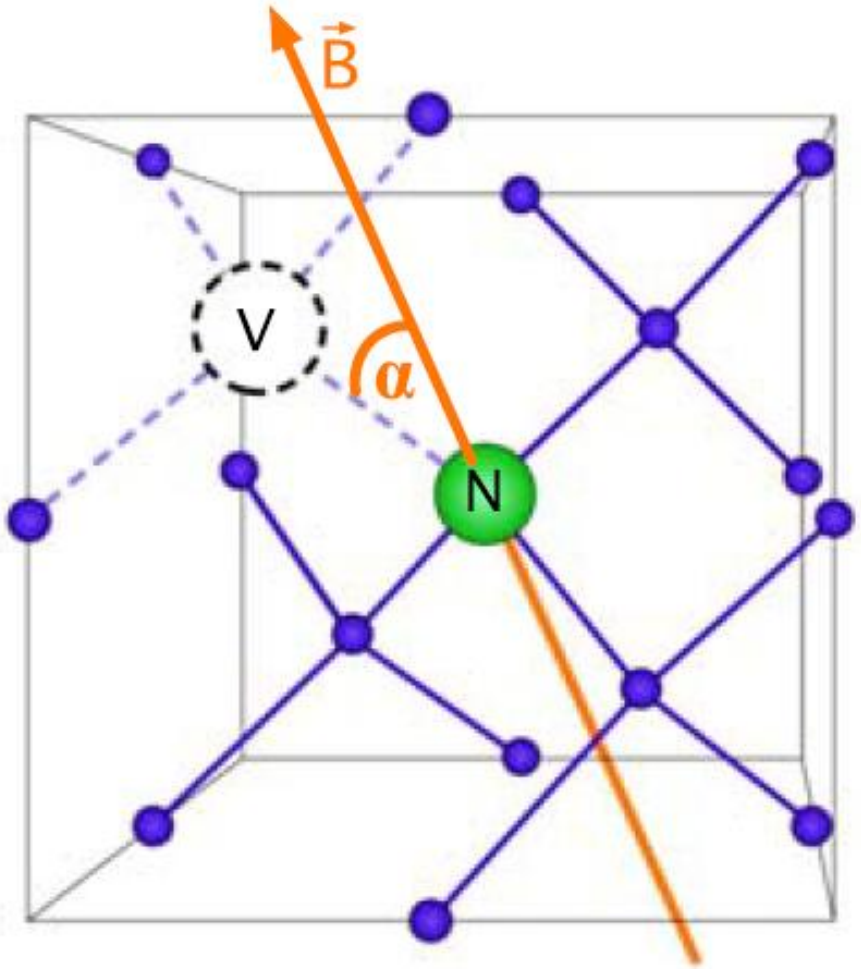
https://www.flickr.com/photos/28617364@N04/32792346483

und Diamanten mit einem NV-Zentrum:



Diese Diamanten leuchten rot, wenn man sie mit grünem Licht anstrahlt.

NV-Zentren in Diamanten

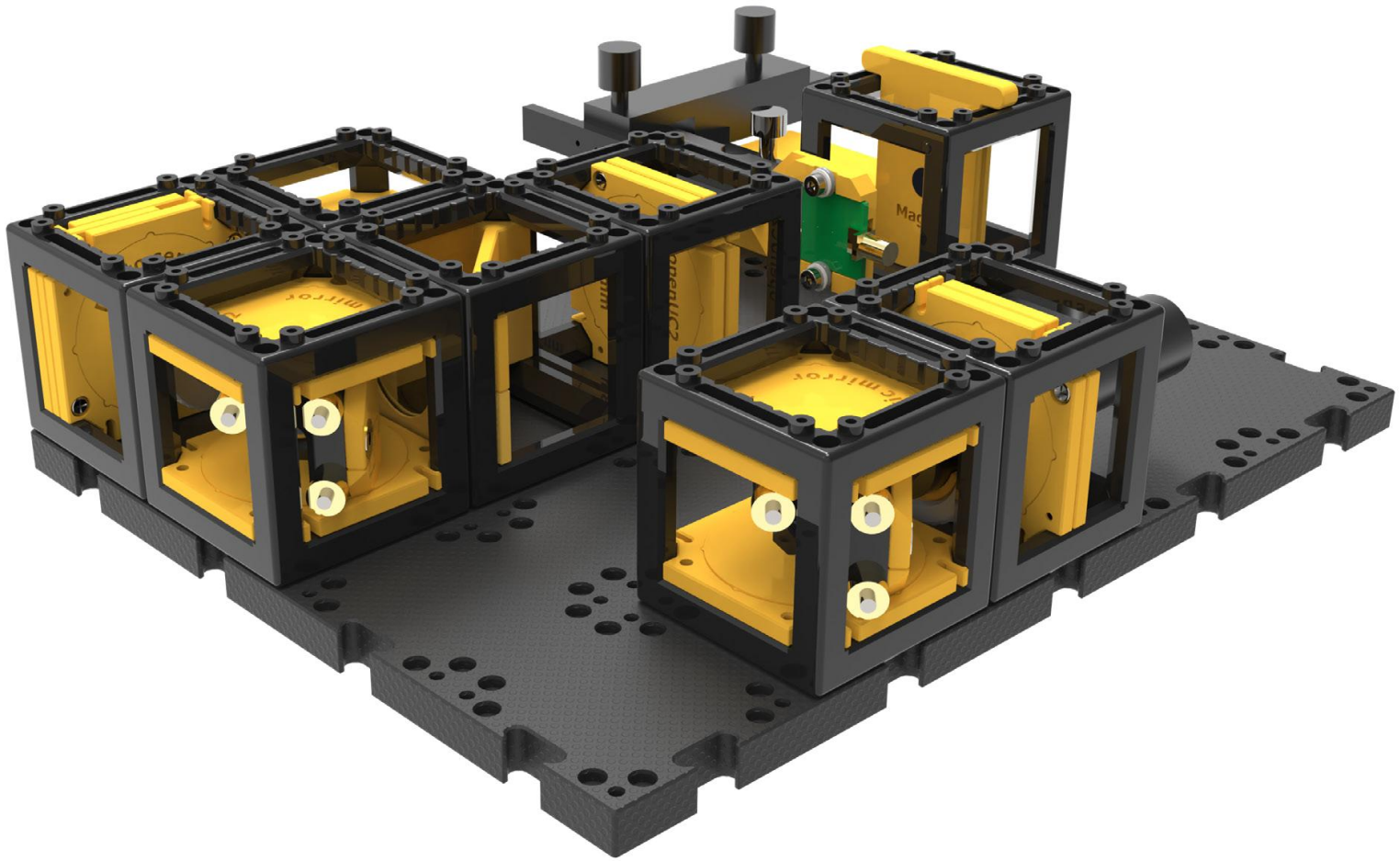


In einem Diamanten ist ein Kohlenstoffatom durch ein Stickstoffatom (N) ersetzt und ein Nachbaratom fehlt (V).

in einigen Quantencomputern werden Diamanten mit NV-Zentren als einzelne Qubits verwendet.

Stegeman, Jan & Peters et al (2023). Modularer, kostengünstiger 3D-gedruckter Aufbau für Experimente mit NVZentrenin Diamant. Europäische Zeitschrift für Physik. 44. 10.1088/1361-6404/acbe7c.

OMDR: Optisch Entdeckt Magnetisch Resonanz

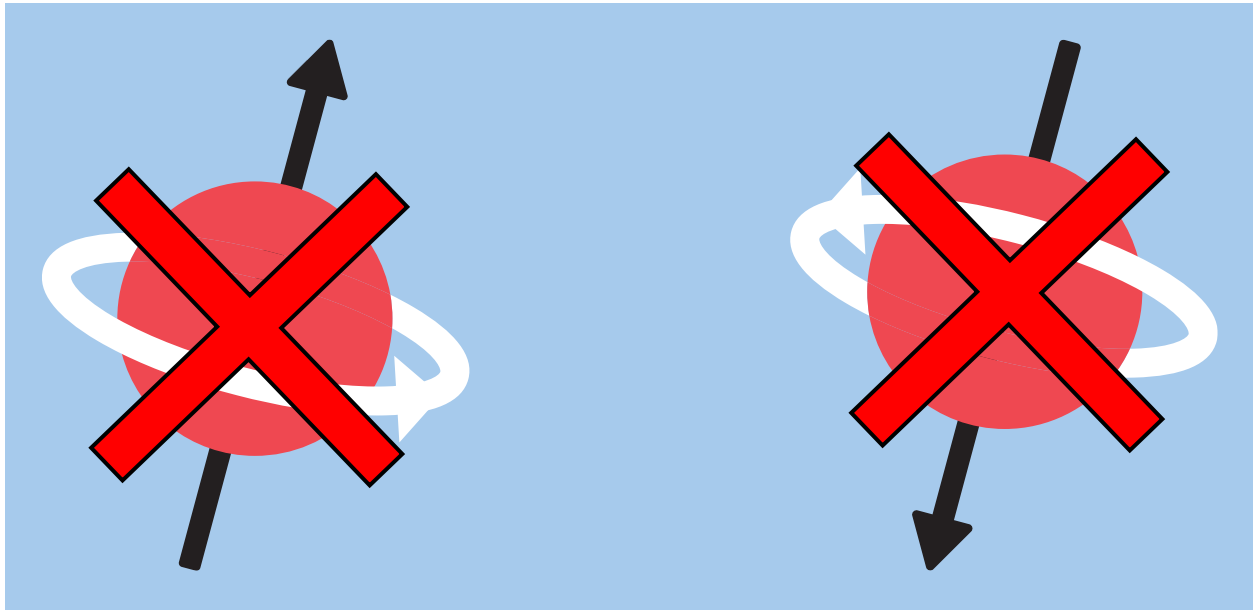


Mit diesem Mess-Prinzip können sehr kleine Magnetfelder messen.

zum Beispiel das Magnetfeld des menschlichen Herzens oder des Gehirns!

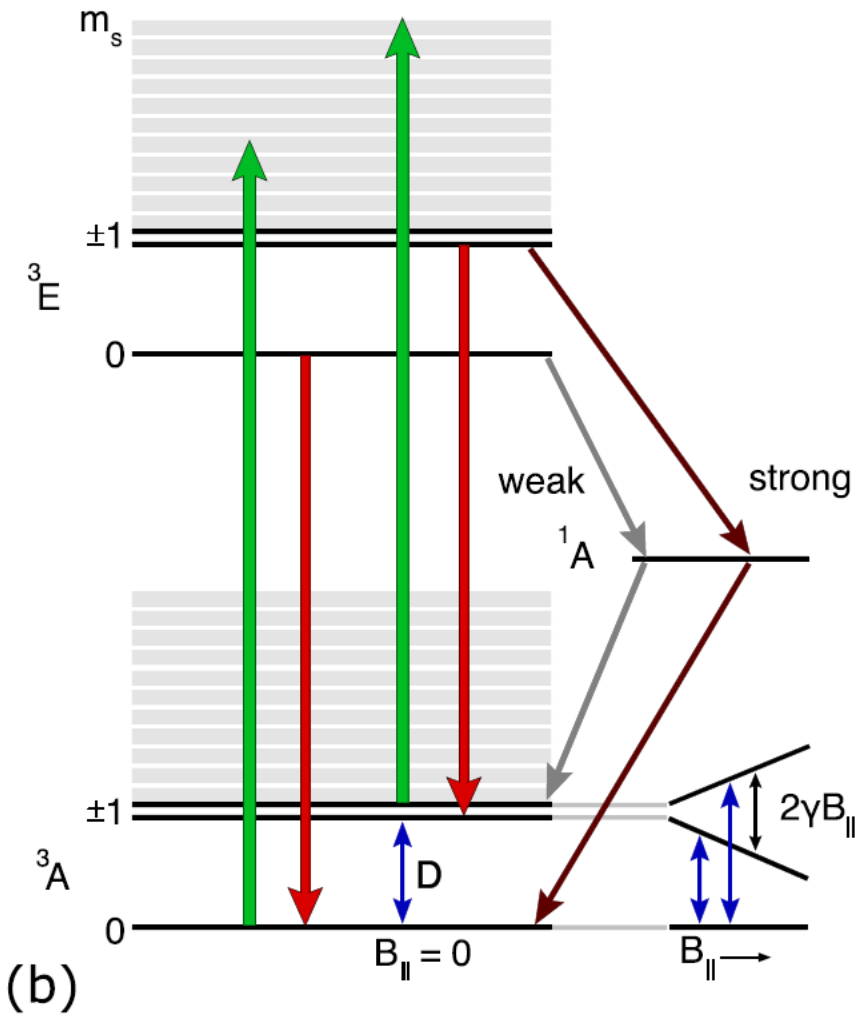
unsere Einrichtung ist für Ausbildungszwecke bestimmt und verfügt nicht über diese Möglichkeit.

Was ist Spin?



- In klassischen Analogien wird der Spin oft als die Eigendrehung eines Quantenteilchens beschrieben.
- Die Realität ist jedoch etwas komplizierter, denn **Quanten rotieren nicht**.
- Sie ist **eine Eigenschaft von Quantenobjekten** neben der Masse und der elektrischen Ladung, die zu ihrer Beschreibung verwendet wird.
- Aber dieser Spin hat Parallelen zur Eigenrotation, wie etwa die Induktion eines Magnetfeldes.
- Was genau Spin ist, wird noch erforscht.
- **Ein Spin kann -1, 0 und +1 sein.**
- **Der Spin wird häufig zur Speicherung von Informationen in Quantencomputern verwendet.**

Wie funktioniert ODMR?



Durch Bestrahlung der NV-Zentren des Diamanten mit grünem Licht wird ein Elektron vom Grundzustand in den angeregten Zustand versetzt, wobei sein Spin erhalten bleibt.

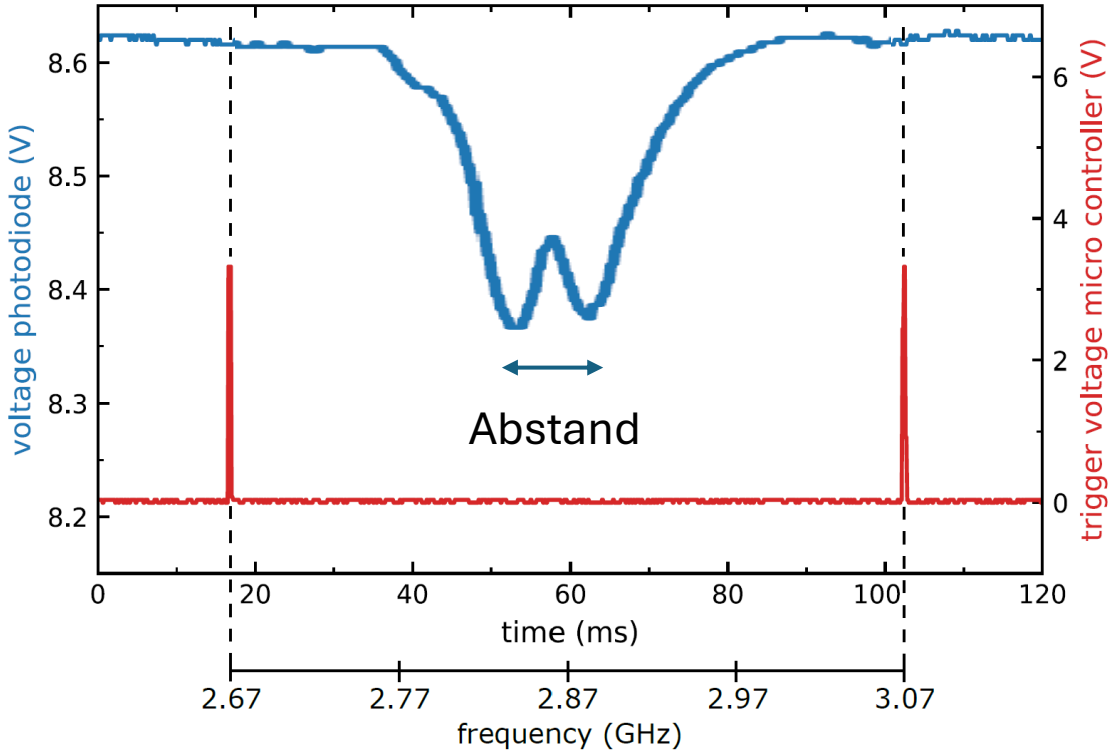
Dieser angeregte Zustand zerfällt unter Aussendung von rotem Licht (650-750 nm) oder infrarotem Licht (1042 nm).

Die Elektronen mit Spins ms= +1 / -1 zerfallen stärker durch Emission von **Infrarotlicht**.

Infolgedessen verringern die Elektronen, die durch diesen Kanal fallen, die Intensität der roten Fluoreszenz.

Stegeman, Jan & Peters et al (2023). Modularer, kostengünstiger 3D-gedruckter Aufbau für Experimente mit NV Zentren in Diamant. Europäische Zeitschrift für Physik. 44. 10.1088/1361-6404/acbe7c.

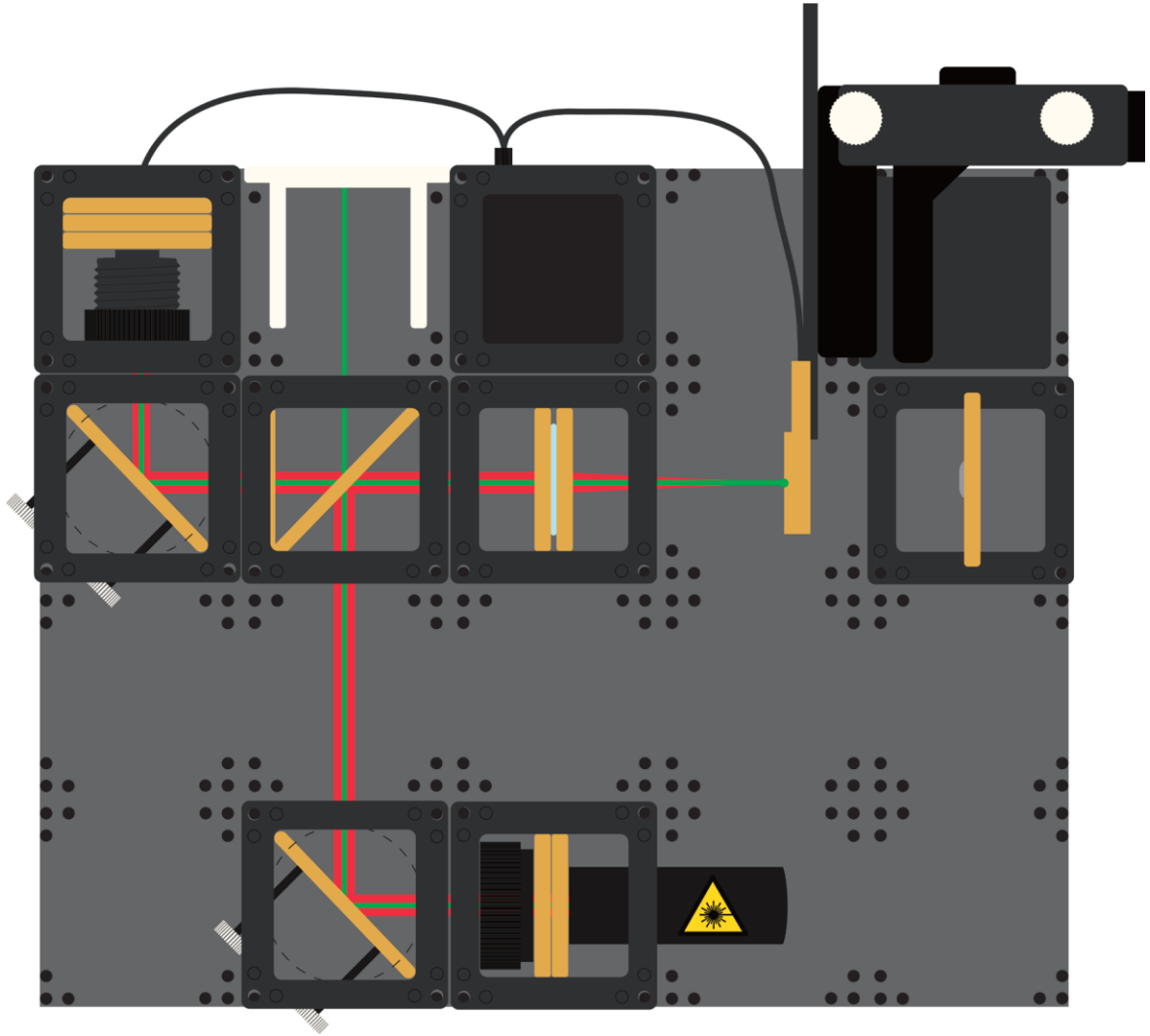
Wie funktioniert ODMR?

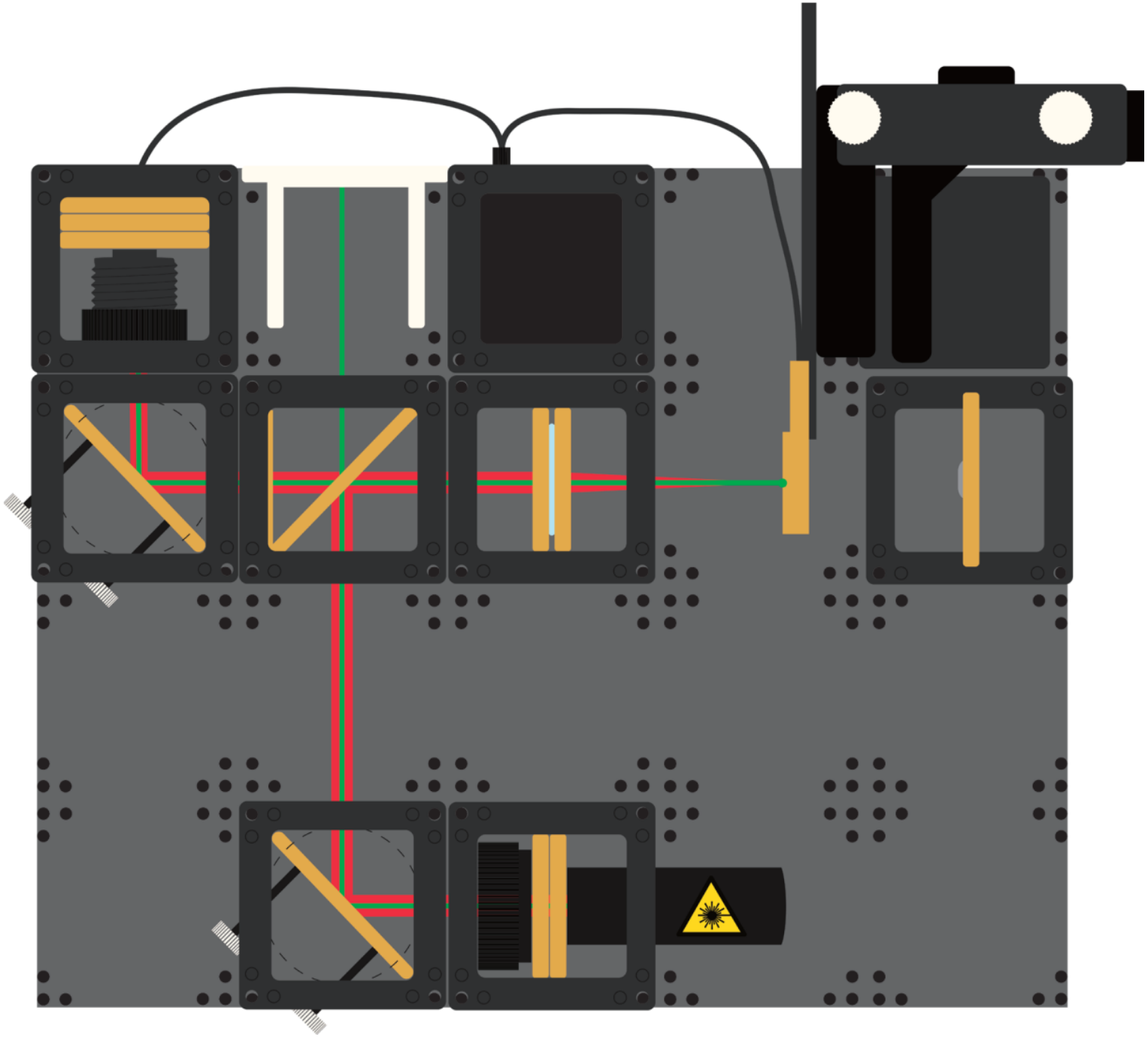


- Mit einer Mikrowellenstrahlung, die die Resonanzfrequenz des NV-Zentrum hat, können Sie die Spins ändern von ms= 0 zu ms= +1 / -1
- der Diamant wird mit Mikrowellenstrahlung mit Frequenzen von 2,67 bis 3,07 GHz bestrahlt
- bei zwei bestimmten Frequenzen ist die rote Fluoreszenz geringer
- **Ein externes Magnetfeld** verschiebt die <u>Frequenz, bei der die NV-Zentren in Resonanz sind (Zeemanneffekt).</u>
- je breiter der Abstand zwischen den Einbrüchen der Fluoreszenzintensität ist, desto stärker ist das Magnetfeld

Stegeman, Jan & Peters et al (2023). Modularer, kostengünstiger 3D-gedruckter Aufbau für Experimente mit NVZentrenin Diamant. Europäische Zeitschrift für Physik. 44. 10.1088/1361-6404/acbe7c.

ODMR-Versuchsaufbau





Bedienung über den Browser

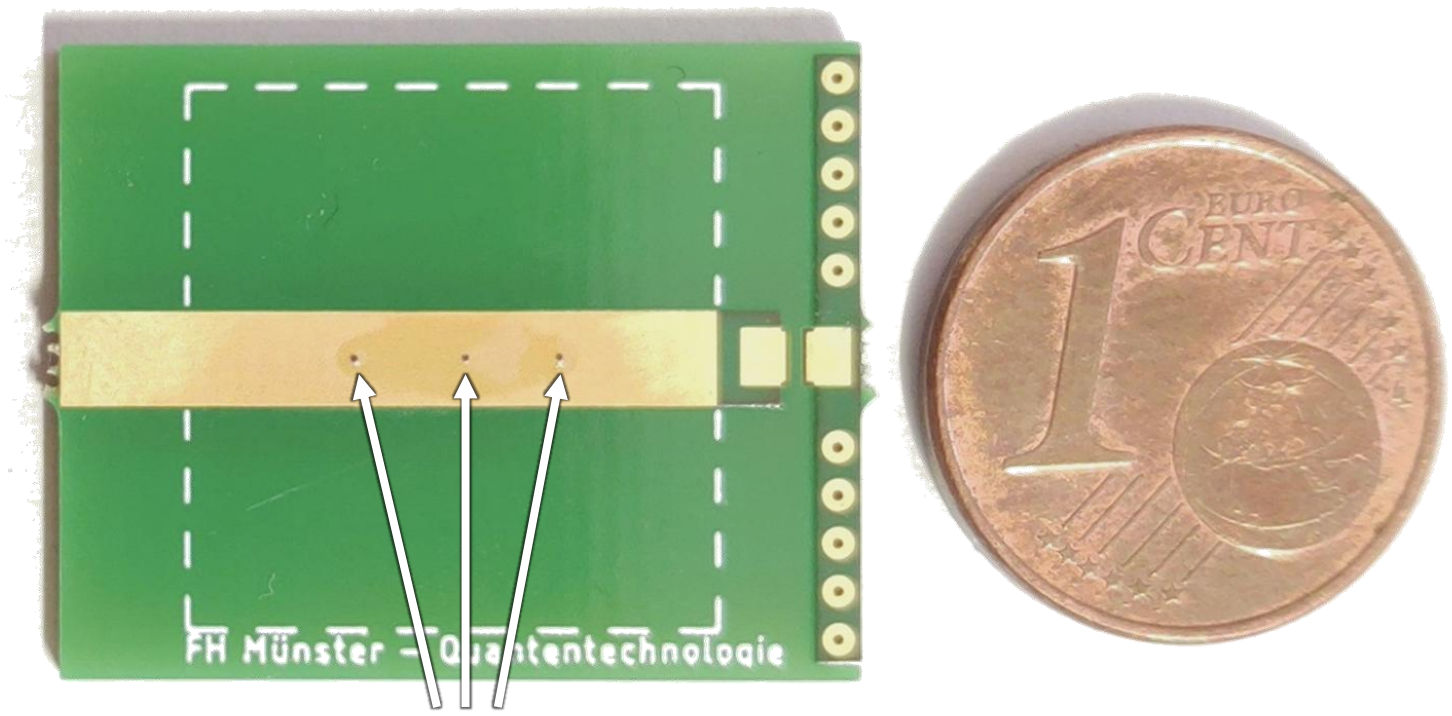
Unser ODMR-Experiment wird von einem Mikrocontroller gesteuert.

Diese stellt eine Website bereit.

Um auf die Website zuzugreifen, verbinden Sie sich mit dem Wi-Fi des Mikrocontrollers: ODMR_47A50

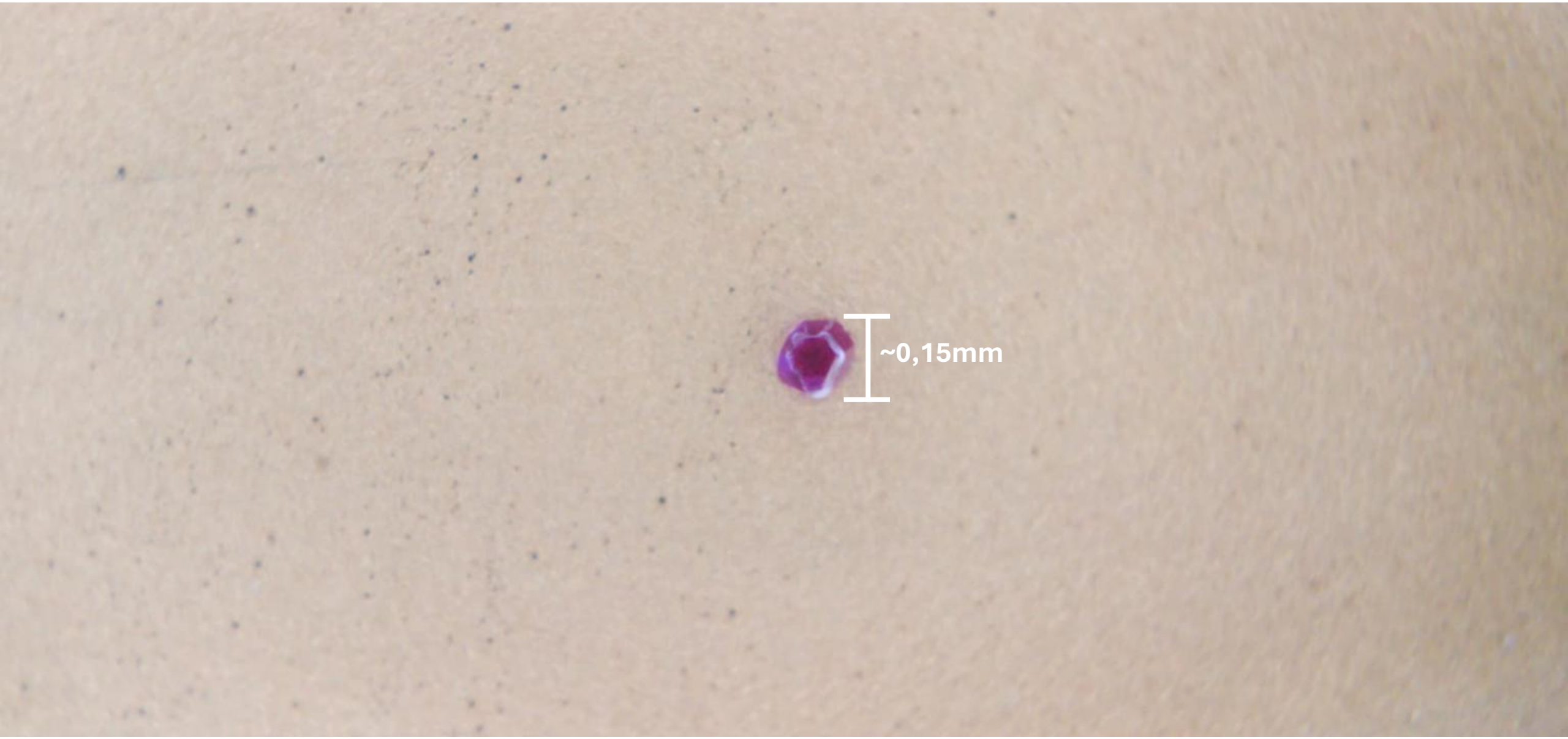
und geben Sie die folgende URL in einen Browser ein: 192.168.4.1.

Stripline mit Diamanten

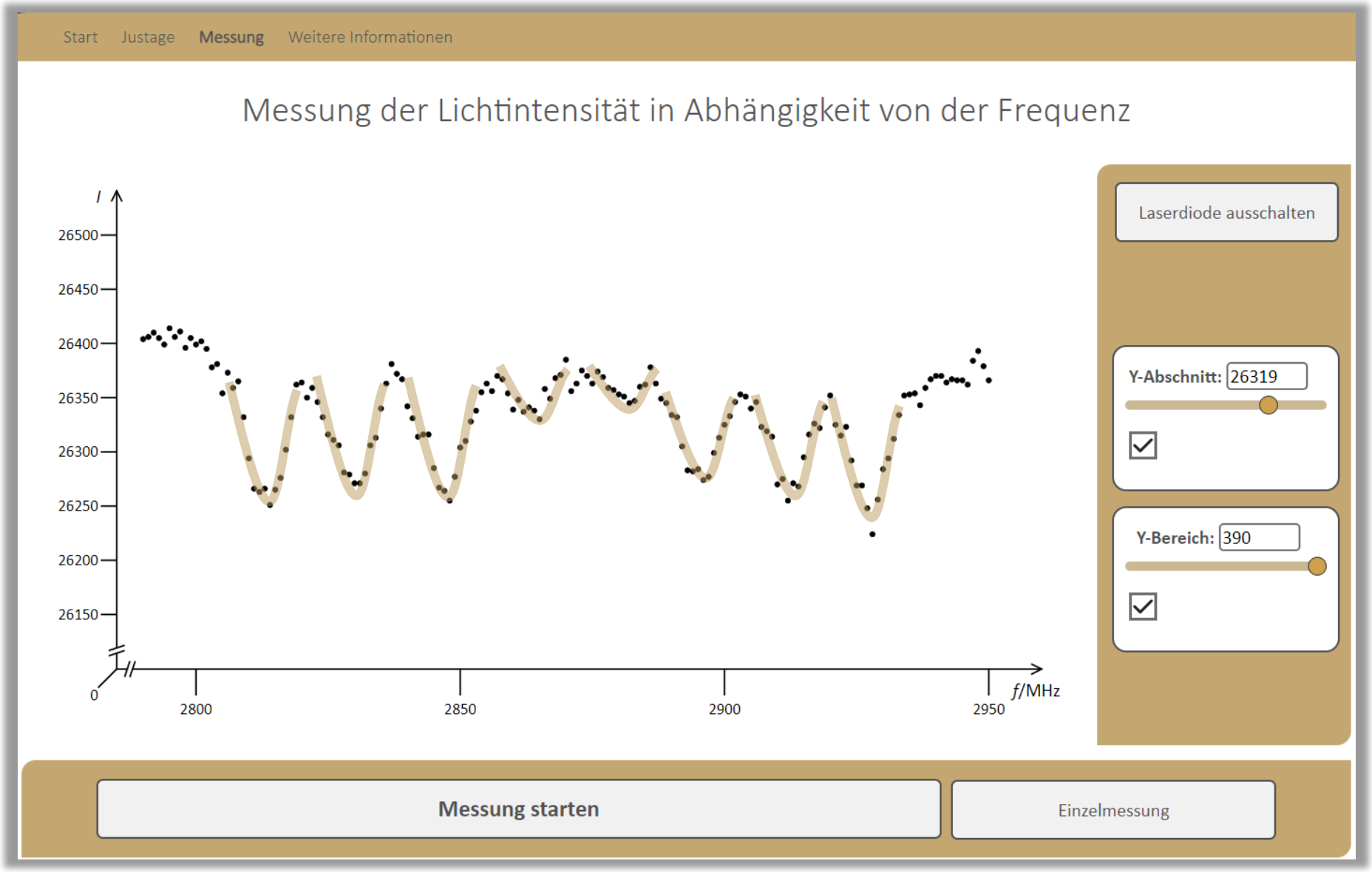


Mikro-Diamanten mit NV-Zentren

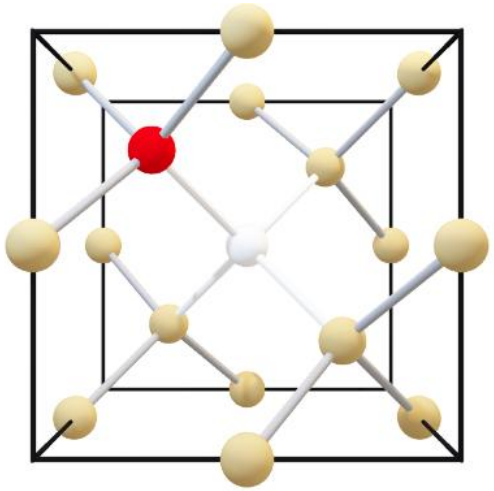
Micro-Diamanten

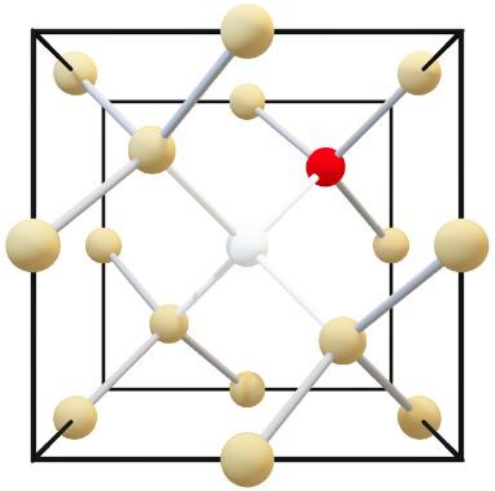


ODMR-Messung mit starkem Magnetfeld

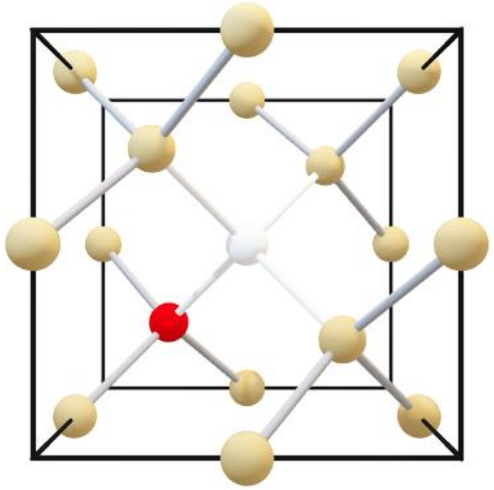


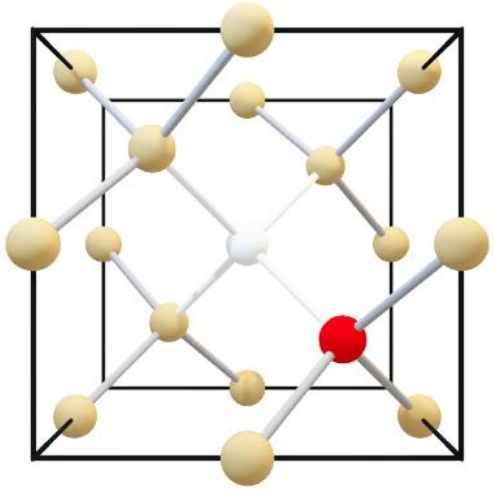
Ausrichtungen der NV-Achse in den Diamanten





- Splitting nach Magnetfeld: *Zeemann-Effekt*
- optischer Magnetfeldsensor
- moderne Anwendung der Quantenphysik





Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit