

# Innovative Lehrmittel für den Physikunterricht

1. Atomphysik-Schülerversuch „Optische Bestimmung der spezifischen Elektronenladung  $e/m$  mittels Faraday Rotation“
2. Quantenoptik-Schülerversuch „Fluoreszenz Abklingen eines metastabilen Laserniveaus und Rubin Spektroskopie“
3. Neue LED-Optikleuchte

I. Rückmann (Bremen, WE-Heraeus Seniorprof.), R. Arndt (Berlin),  
und bei Pkt. 2: W. Luhs (Eschbach)

# Atomphysik Schülerversuch „Faraday“ „Bestimmung von $e/m$ mittels magnetfeldinduzierter Doppelbrechung in Glas“

1.



**Die Elektronen bestimmen die optischen Eigenschaften**

# Faraday-Rotation

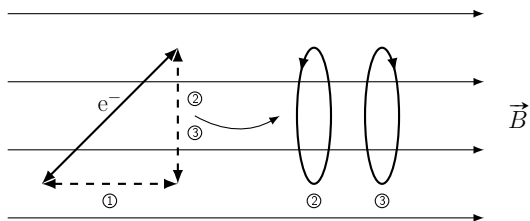
- transparentes Medium (dielektrisch, nicht magnetisch):  
Licht – Wechselwirkung mit Elektronen
- magnetfeldinduzierte Doppelbrechung (Lorentzkraft):  
Drehung der Polarisationssebene (Faraday-Rotation)

$$\theta = V \cdot B \cdot L$$

Anwendungen:

- Faraday Isolator
- Bestimmung der effektiven Masse in Halbleitern,  $e/m$  – Bestimmung

## Zeeman-Aufspaltung im Axialfeld

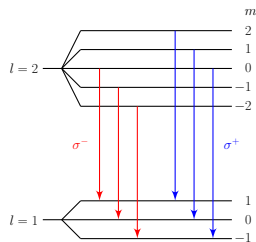
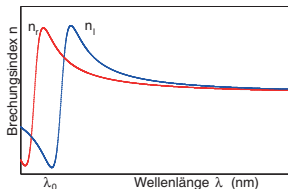
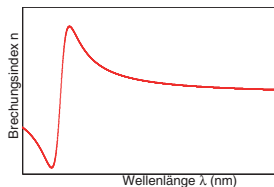


- klassische Erklärung:  
3 Ersatzelektronen,  $\omega_0$
- normaler Zeeman-Effekt

- Axialfeld:
  - 2.+3. Ersatzelektron
  - $\Delta\omega_{\text{Zeeman}} = \pm\mu_B B/\hbar$
- Frequenzunterschied  $\sigma^-$ ,  $\sigma^+$ -Emissionen

## Zeeman-Aufspaltung im Axialfeld

Glas: Alle hochenergetischen Übergänge  $\rightarrow$  Modellresonanz



$$\Delta \tilde{E} = 2\Delta\omega_{\text{Zeeman}} = \frac{e\hbar}{m_e^*} B$$

$$\Delta\lambda = -\frac{\lambda^2}{hc} \frac{e\hbar}{m_e^*} B$$

$$\Delta m = \pm 1$$

$\rightarrow$  Brechungsunterschied  $n_l$  und  $n_r$  im transparenten Bereich

# Linearpolarisation: Überlagerung von $\sigma^-$ - und $\sigma^+$ -Wellen

Drehwinkel der Polarisationssebene:

$$\theta = \frac{\omega}{2c} (n_l - n_r) L = \frac{2\pi f}{2c} (n_l - n_r) L = \frac{\pi}{\lambda} (n_l - n_r) L = \frac{\pi}{\lambda} \Delta n \frac{dn}{d\lambda} L$$

Bequerel 1897:

$$\theta = \underbrace{-\frac{1}{2} \frac{e}{m_e^* c} \lambda \frac{dn}{d\lambda}}_{\text{Verdet-Konstante}} \cdot B \cdot L$$

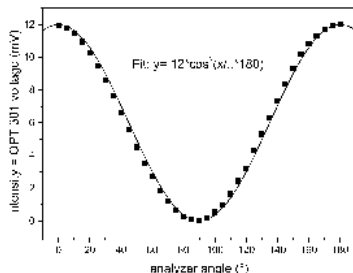
$\rightarrow m_e^*$

# Modulation des Magnetfelds

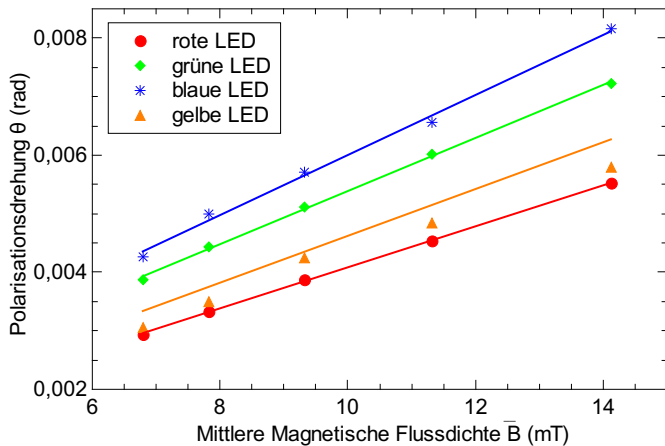
- Malus  $I = I_0 \cos^2 \varphi$  (Analysatorwinkel  $\varphi$ )
- größter Anstieg bei  $\varphi = 45^\circ$
- $I = I_0 \cos^2(45^\circ \pm \theta) = \frac{1}{2} I_0 (1 \mp 2 \cos \theta \sin \theta) \approx I_0 \left( \frac{1}{2} \mp \theta_B \right)$
- Modulationsfrequenz  $\Omega$   
 $I(t) = I_0 \left( \frac{1}{2} + \theta_B \sin \Omega t \right) = I_{DC} + I_{AC}$

$$\theta_B = \frac{I_{SS}}{4I_{DC}}$$

- spektrale Funktionen heben sich auf

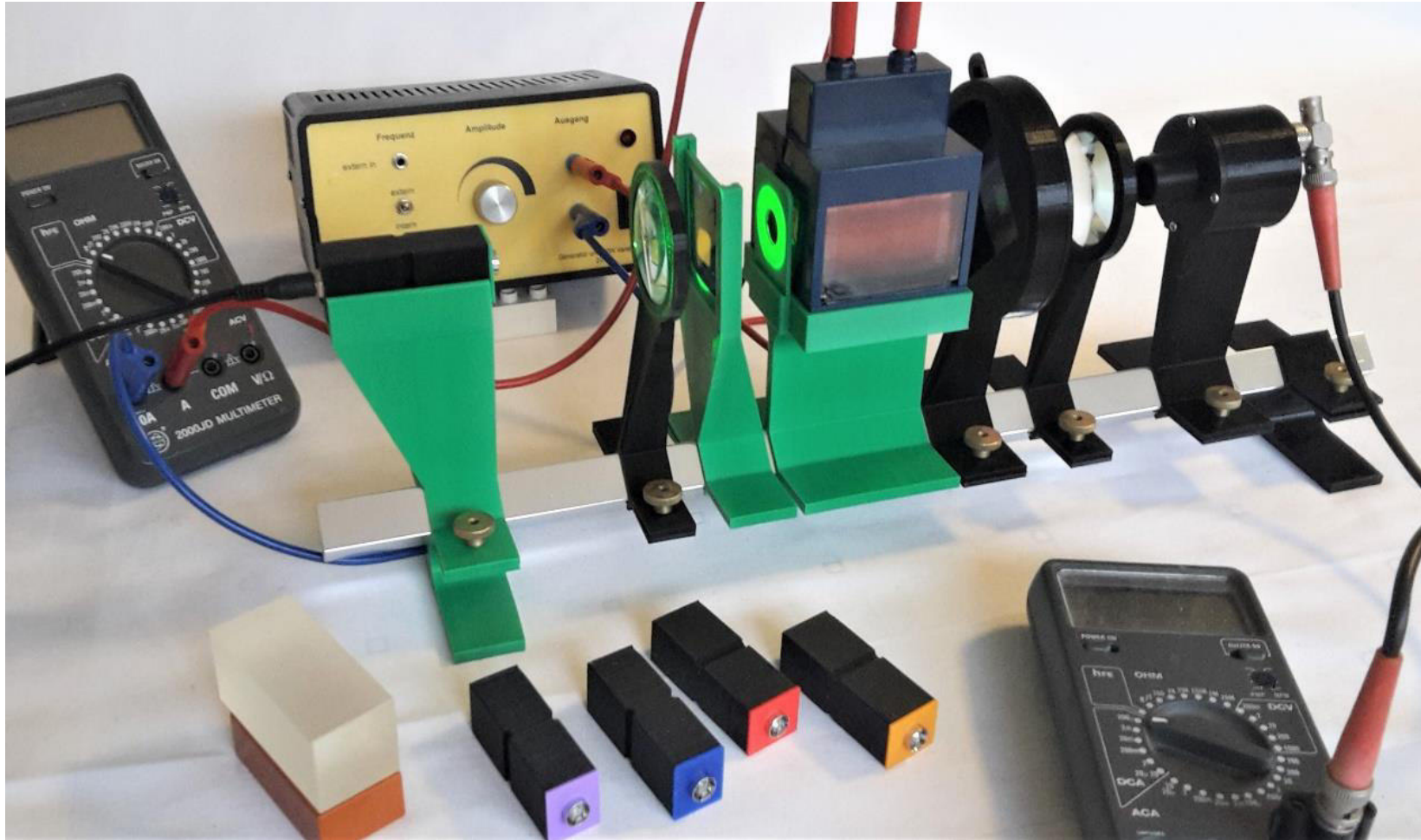


$$\text{Drehwinkel } \theta(B, \lambda) = V(\lambda) \cdot B \cdot L$$





# Schüler-Versuch: Optische Messung der spezifischen Elektronenladung mittels Faraday Rotation und Demo-Versuch „free space information transfer via laser“ mittels Polarisationsmodulation



$$V = -\frac{1}{2} \frac{e}{m} \frac{1}{c} \lambda \frac{dn}{d\lambda}$$

# „Faraday-Rotation im Praktikum“ kann noch mehr



- Ergänzungsbaukästen (nur Faraday Teile / Grundausstattung nötig )
- **effektive Oszillatormasse** der Elektronen
- **Lage der Modellresonanz** (über Sellmeier Auftragung)
- **Dichte der Dispersionselektronen**
- **Free Space Information Transfer** via Laserbeam (z.B. Musik)
- Herleitung Verdet-Konstante aus Schwingungsgleichung mit  **$E$** - und  **$B$** -Feld

# Lerninhalte (1)

- axiales Magnetfeld in einer Spule
- malussches Gesetz,  $B = 0$ 
  - Kontraste, Polarisationsverhältnisse
  - Spannungsdoppelbrechung in Glas
- Spektren von Leuchtdioden
- Modulationsverfahren zur Messung kleiner Größen
- Messung mit Oszilloskop
- Musikübertragung mittels Polarisationsmodulation

# Lerninhalte (2)

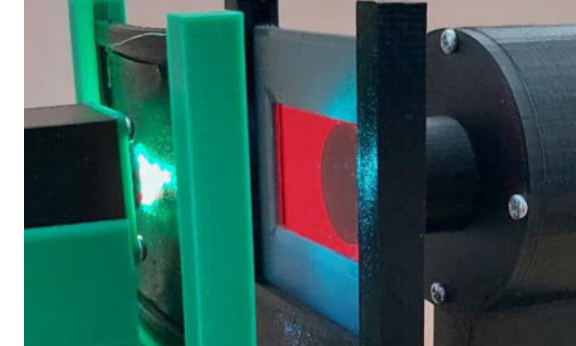
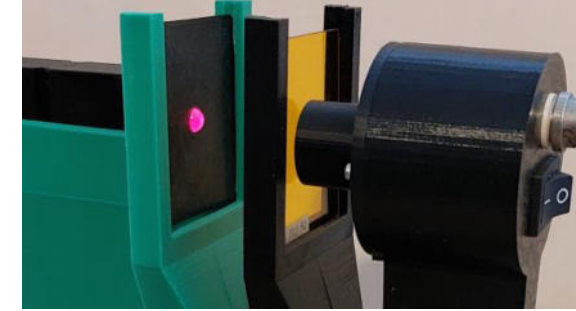
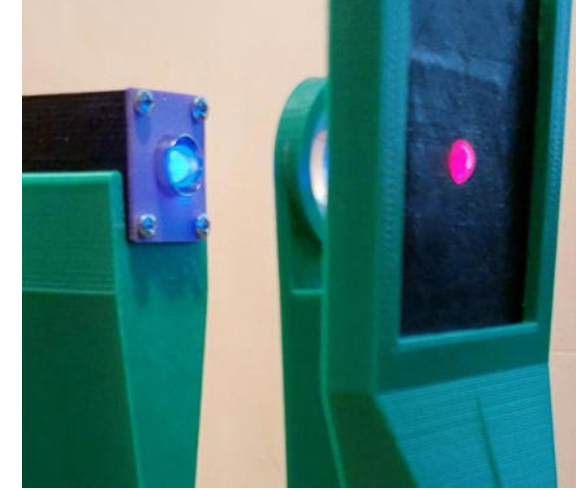
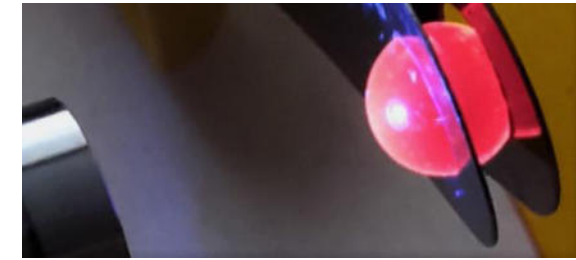
- Zeeman-Effekt im Axialfeld, Faraday-Rotation
- Verdetkonstante  $V(\lambda)$
- Modellresonanz, Oszillatormodell, dielektrische Funktion
- Dispersion  $n(\lambda)$ ,  $dn/d\lambda$ , Sellmeier-Gleichung
- effektive Oszillatormasse bzw.  $e/m$  – Bestimmung
- Bestimmung der Zahl der Dispersionselektronen/Atom

2.

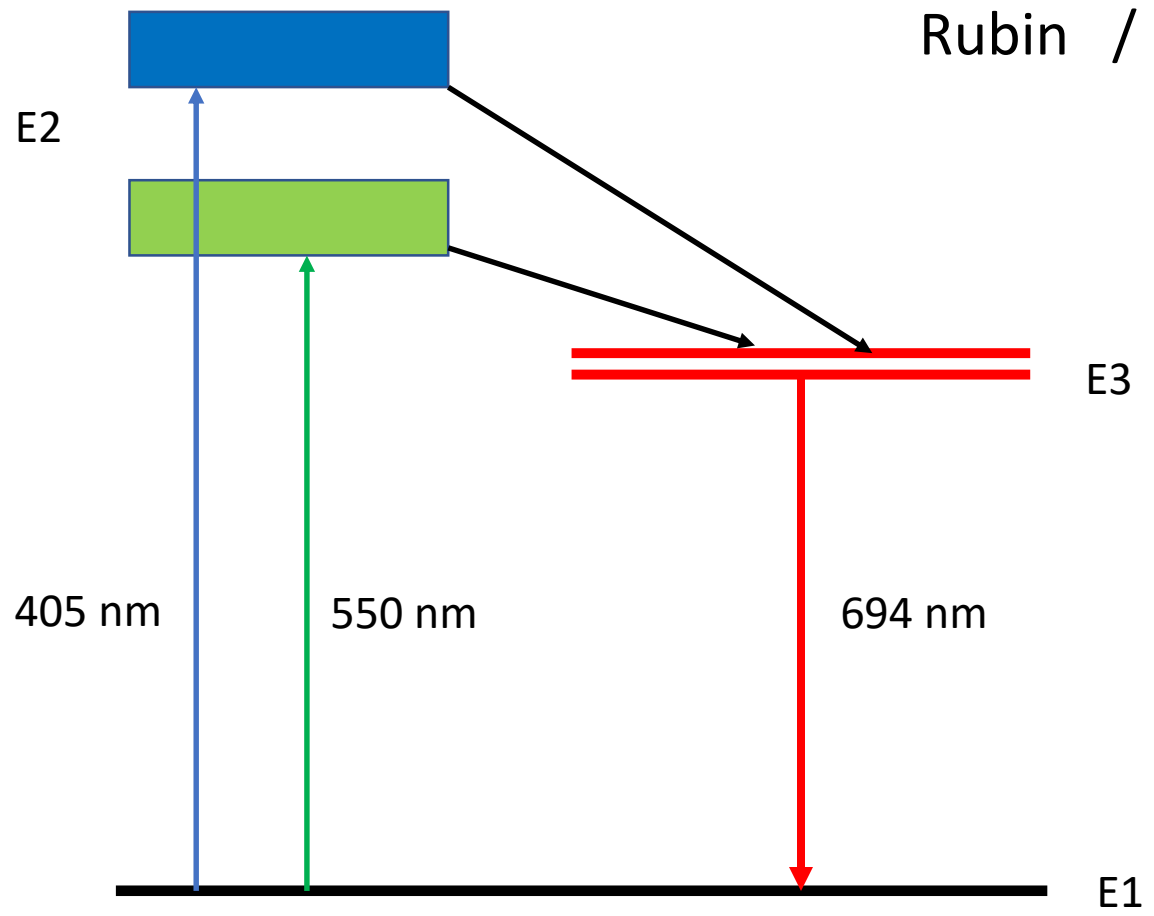
## Quantenoptik Schülerversuch „Rubin“ (Grundversuch)

„Fluoreszenz Abklingen eines metastabilen  
Laserniveaus und Rubin Spektroskopie“

# 61 Jahre Laser ... und in der Schule?



Rubin /  $\text{Cr}^{3+} : \text{Al}_2\text{O}_3$



3 bis 3,5 ms Abklingzeit >> **Schuloszilloskop !**

# „Verortung“ im Lehrplan ....

Beispiele aus zwei **Basiskonzepten**: Energie und Wechselwirkung mit den **Inhaltsfeldern**:

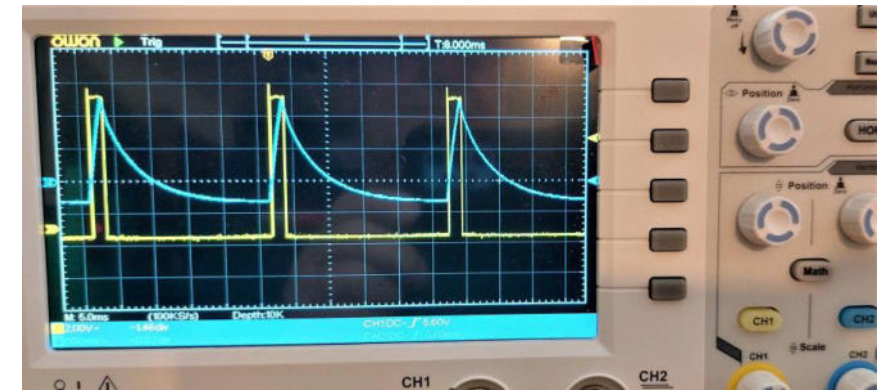
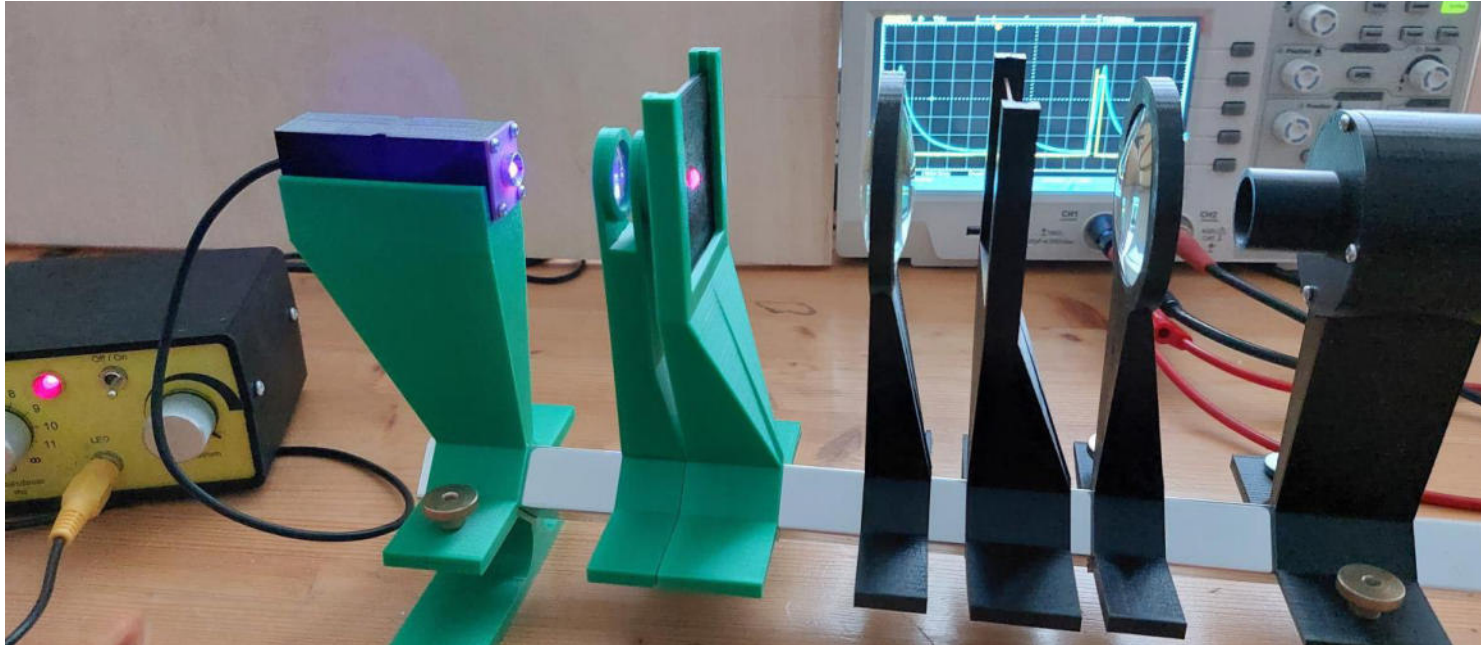
**Struktur der Materie** (Energiequantelung in der Atomhülle und Spektren em-Strahlung,...) / **Elektrik** (Auf- und Entladen eines Kondensators) / **Quantenphysik**: Lichtquanten, quantenhafte Emission und Absorption; Detektoren ...

**Laser**: aktives Medium (Besetzungsinversion!), Pumpe, Resonator  
(im Abitur bisher: He-Ne- / Ar-Ion- / CO<sub>2</sub>-Laser)

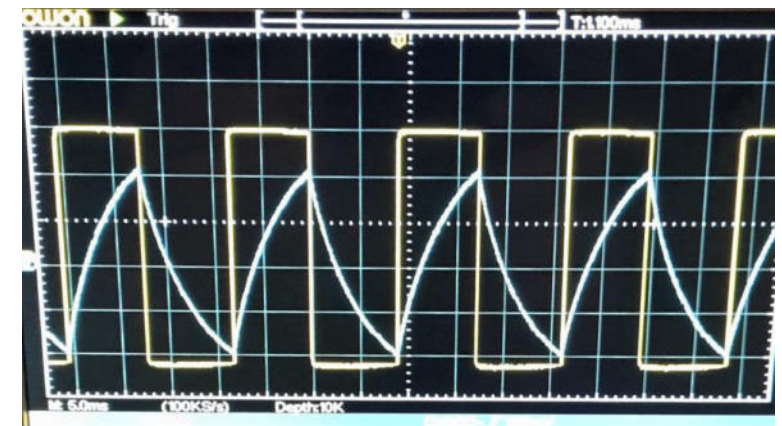
... und experimentell ?



# Messung des An- und Abklingens der Rubin-Fluoreszenz

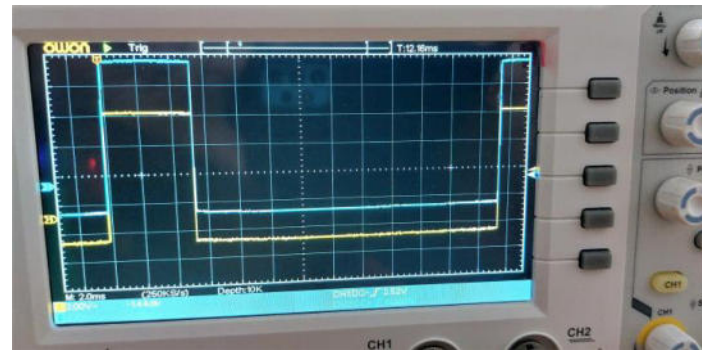


- Rechteck 40 Hz, Tastverhältnis einstellbar (2 ms bis 13 ms Pulslänge) ,
- Anregung mit gepulsten LEDs:  
UV (405 nm ) & Grün (530 nm)





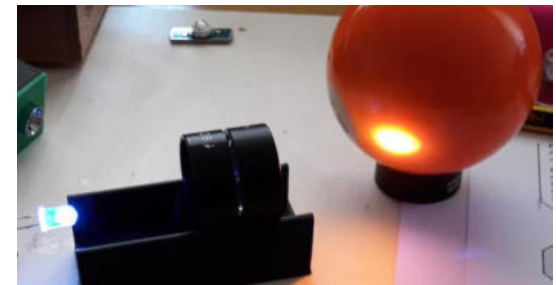
# Fluoreszenz in anderen Stoffen ist viel...viel schneller



Für unseren  
Anregungspuls:  
>> instantane  
Antwort

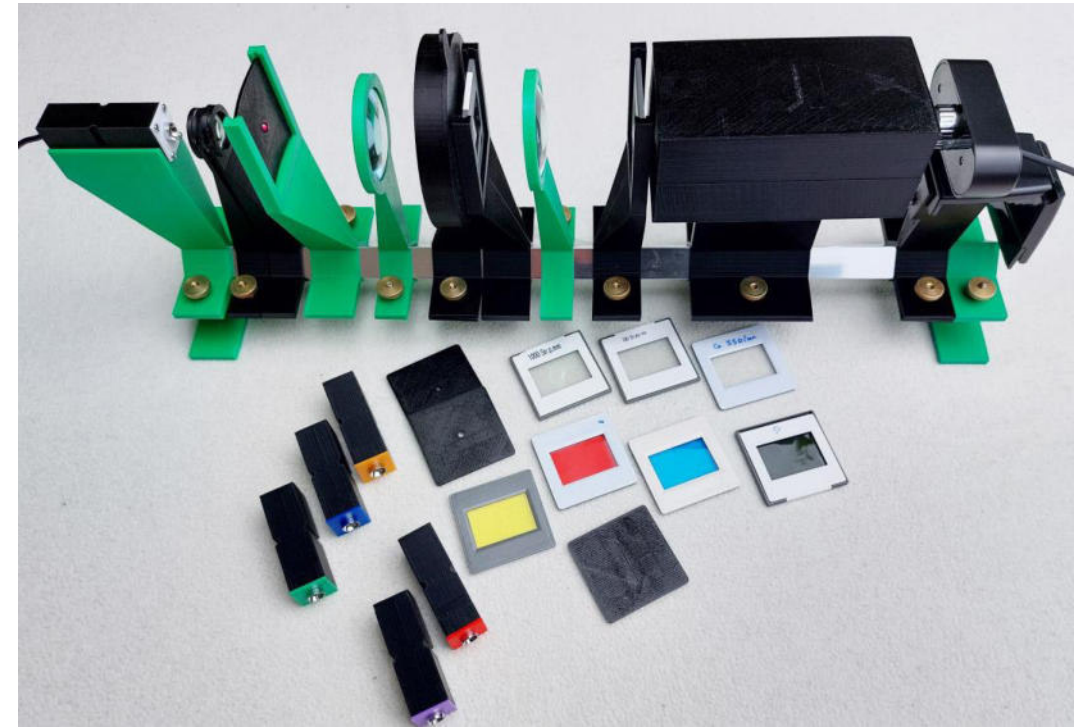
Zum Vergleich: z.B. Fluoreszenz von gefärbtem Acrylglas  
(Lebensdauer des S1 Niveaus von Farbstoffen ca. 10 ns)

...oder Billardkugel im UV



# Spektroskopie-Aufbau

- Spektrum der weißen LED (300 /mm und 500 /mm)
- Einfluss von Farbfiltern und Farbmischung
- Messung Rubin-Transmission  
>> UV- und grüne Absorptionsbanden
- Beobachtung Rubin-Fluoreszenz und Anregungsstrahlung  
>> Rubin Emissions-Wellenlänge



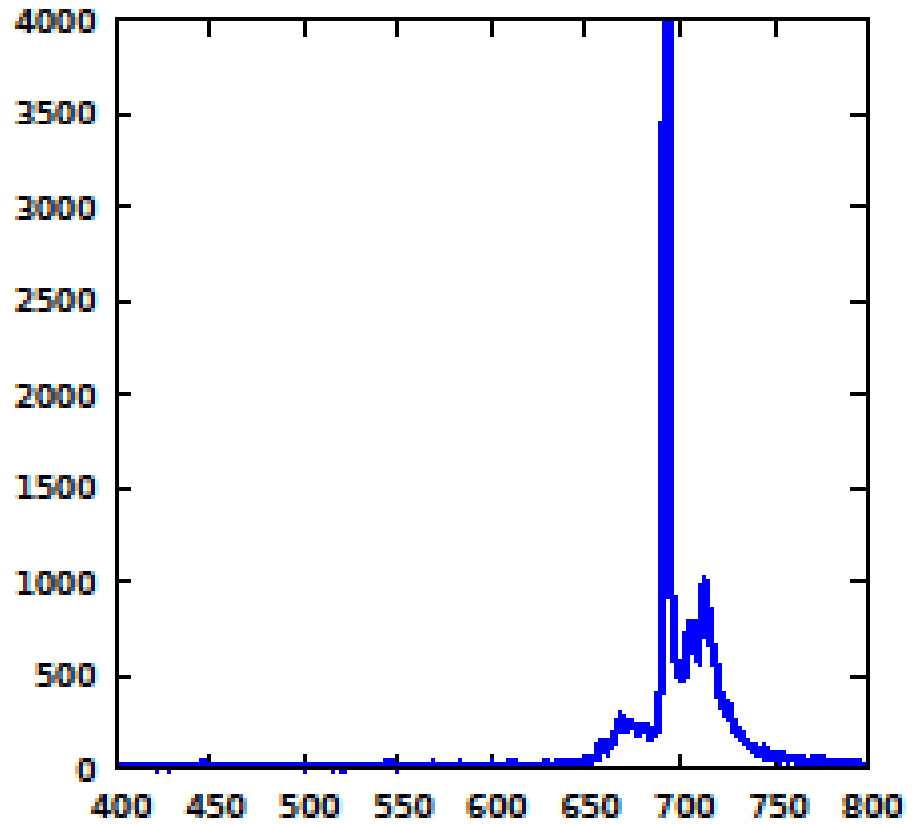
# Gesamtversuch: Rubin - Fluoreszenz und Spektroskopie



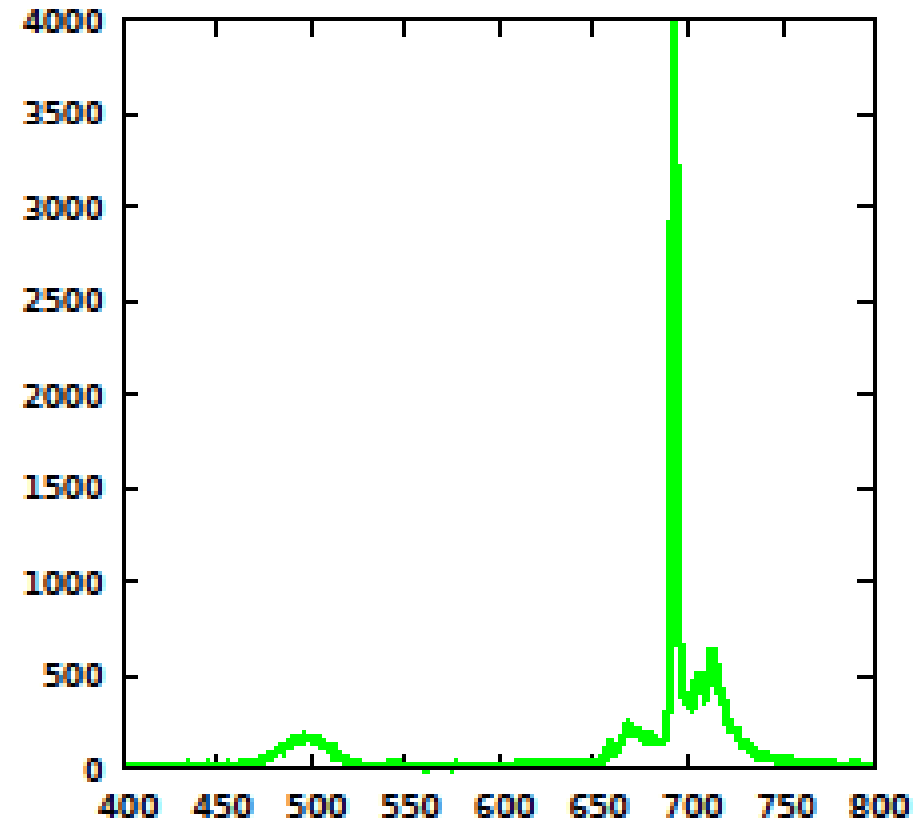
2 Aufbauten – schneller Umbau !



# Rubin-Lumineszenz bei Anregung mit 405 nm und mit 530 nm



Intensität  
(willk. Einh.)

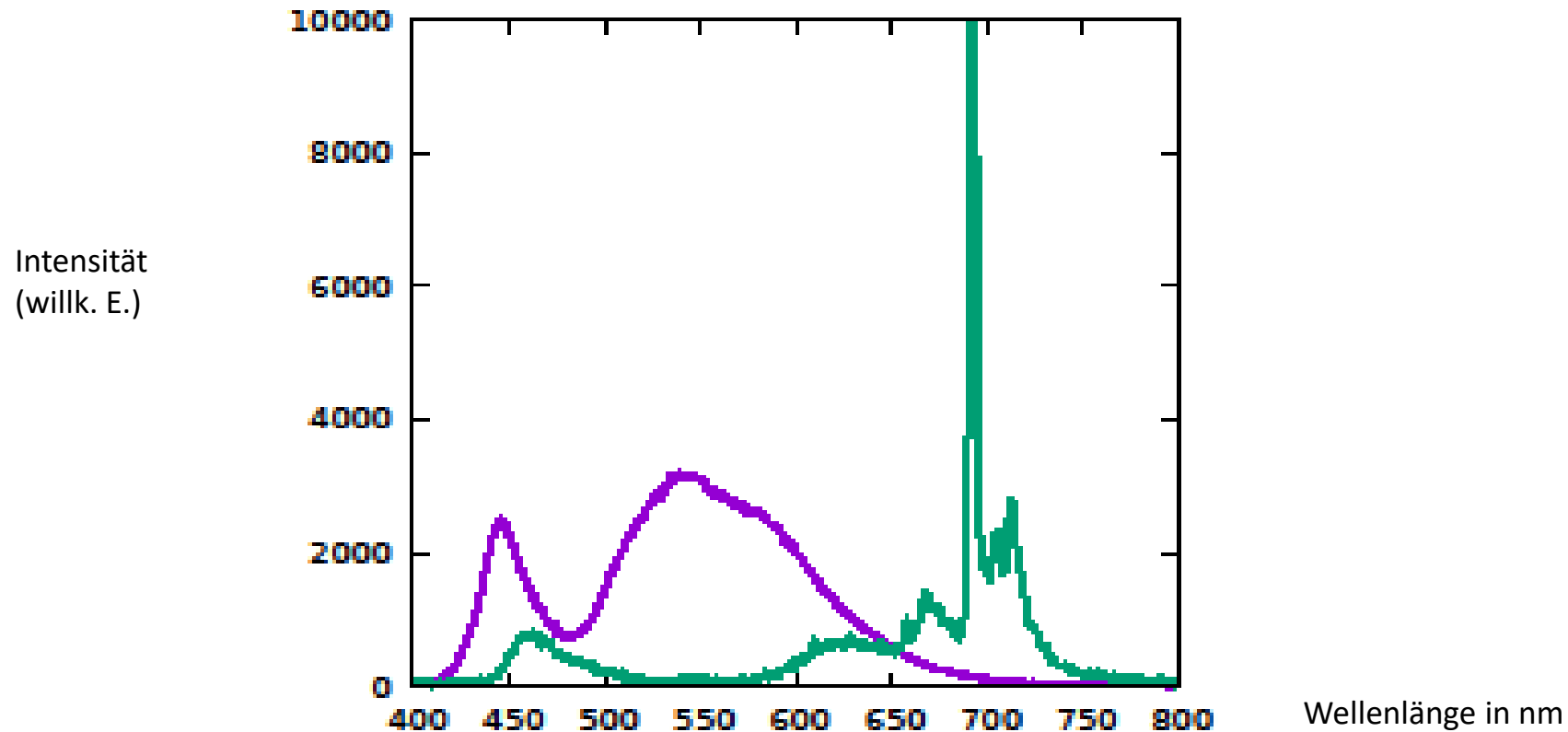


Wellenlänge in nm



# Zur Demonstration der Rubin-Absorption

Spektrum einer weißen LED **ohne** (lila Kurve) und **mit Rubin** im Strahlengang (grüne Kurve)



- Rubin-Absorptionsbanden um 420 nm und um 550 nm
- Lumineszenz bei 694 nm

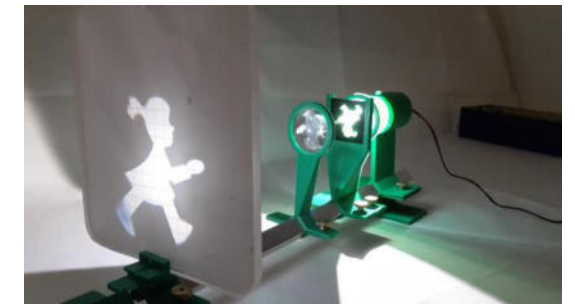
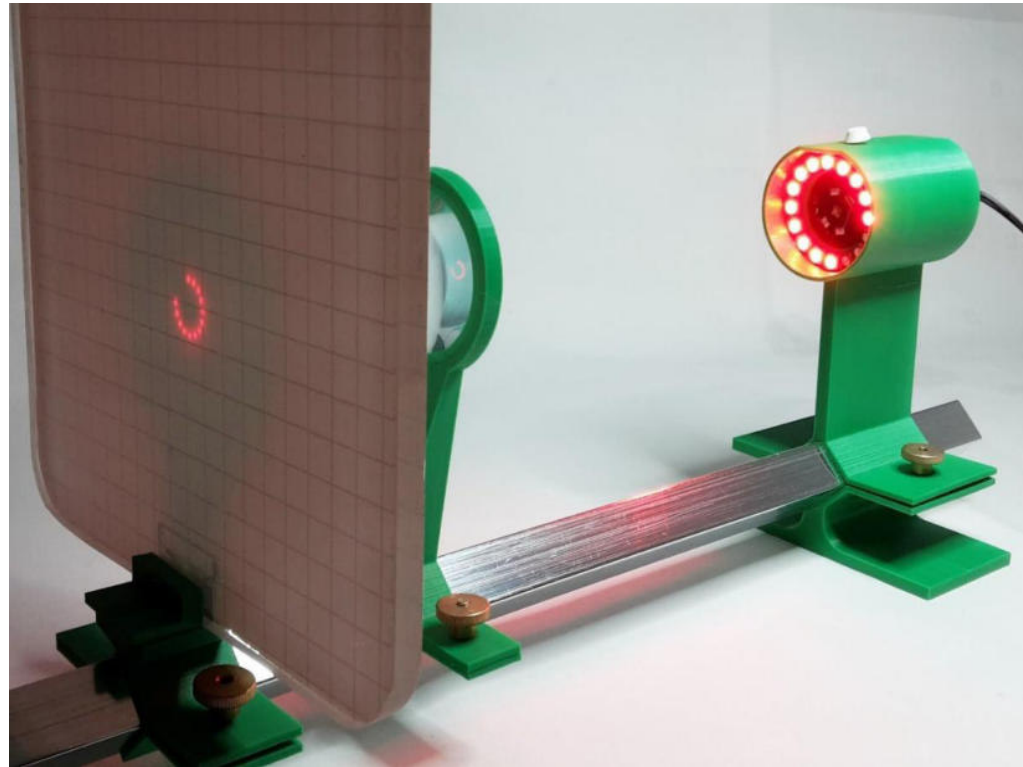
# Lerninhalte beim Rubin-Grundversuch

- Optische Justage, Linsenformel, 1:1 und verkleinerte Abbildung, Brennweiten, Fokussierung,
- Pulsförmige Anregung, Rechteckpuls, Tastverhältnis,
- Messungen mit einem Standard Zwei-Kanal Oszilloskop,
- exponentielles An- und Abklingen, Zeitkonstante, Halbwertszeit,
- Drei-Niveauschema, Voraussetzung für ein Lasermaterial,
- Lebensdauern, Übergangsraten, Absorptionsbanden des Rubins,
- Absorption und Fluoreszenz, metastabiles Laserniveau als Voraussetzung für Besetzungsinversion,
- Spontane Emission und Absorption, Einstein-Koeffizienten,
- Spektrometer, Spektren, optische Filter, Farbzerlegung und Farbmischung,

3.

# LED-Optikleuchte

- nutzbar als selbstleuchtender Gegenstand
- unsymmetrisch
- umschaltbar (Ring: R, G, B, weiß & Punktquelle)



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit !

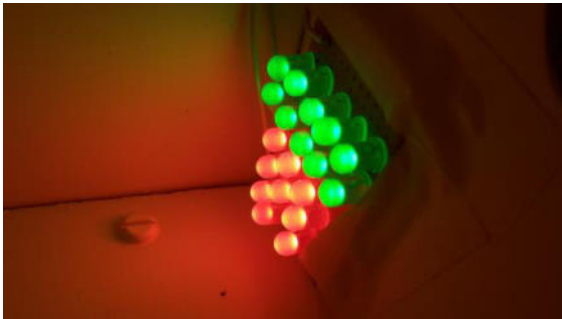
<https://lehrmittel-musterbau.de>



# Haus-, Garten- oder Schulversuche zum Nachmachen

Hier wird regelmäßig ein spannender, aber einfach zu realisierender Versuch eingestellt.

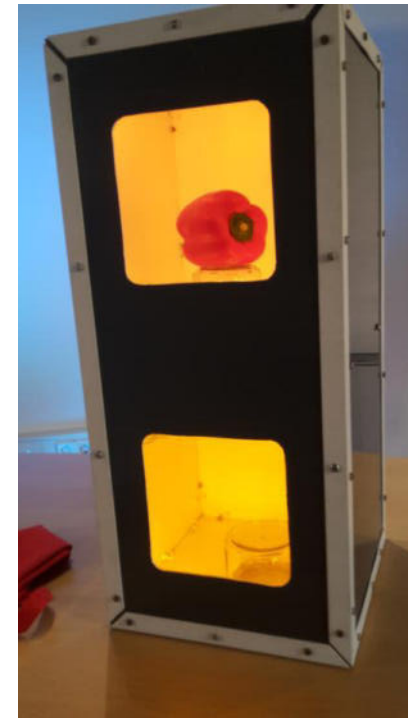
Heute: **Farbeffekte** (rotes Auto unter gelber (Na-Dampf-)Straßenlaterne / der Farbeindruck hängt von der Beleuchtung ab, z.B. im Kaufhaus / die Farbmischung findet im Auge statt / der Effekt wird u.a. im Supermarkt an Fleisch- und Gemüsetheke genutzt,...)



**Oberes gelbes Fach** wird beleuchtet mit roten und grünen LEDs. Hier kann die Paprikaschote Rot reflektieren und sieht toll aus.

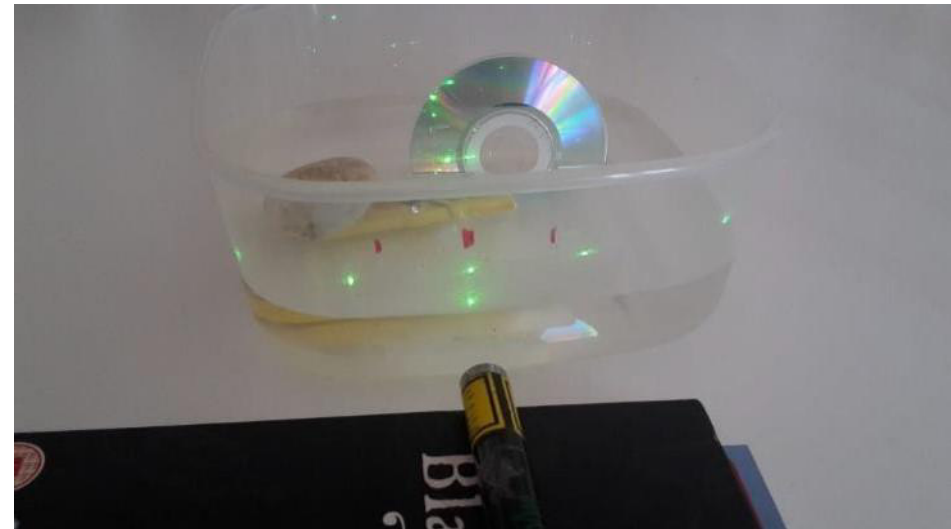


**Unteres gelbes Fach** wird beleuchtet mit gelben LEDs. Dieselbe Paprikaschote kann kein rotes Licht reflektieren und sieht alt aus.



## Sichtbarer Spektralbereich unter Wasser

**Wellenbild** (Beugung und Interferenz  $\gg$  Wellenlänge) und **Teilchenbild** (*Detektor misst  $E=hf$ , Anregung von Elektronen im Detektor*)



Frequenz ist konstant, Wellenlänge: aus **532 nm** wird **391 nm** unter Wasser  
 $\gg$  Bestimmung Brechzahl

## Grün bleibt grün – auch unter Wasser

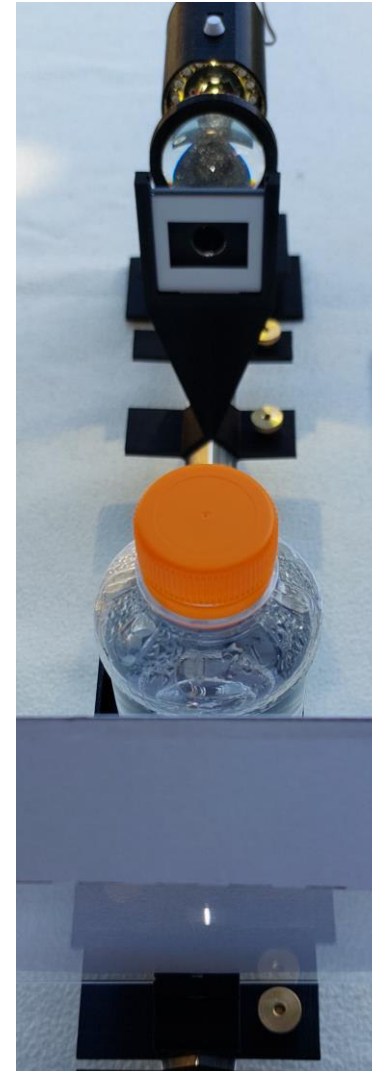


Illustration: Patrick W. Bohlen-März



Illustration: Patrick W. Bohlen-März

# Grillanzünder mit Löschwasser / Brechzahlbestimmung von Flüssigkeiten



Eine Aufgabe aus dem  
eduRA-Optik-Baukasten

