

# Erkenntniswege der Physik

## Kompetenzentwicklung und Erkenntnisgewinnung in der Sekundarstufe II

Hans-Otto Carmesin, 28.4.2026

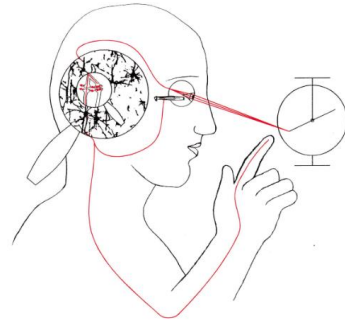
Gymnasium Athenaeum, Studienseminar Stade, Universität Bremen, Universum Physik

Webinar 2026

**Cornelsen**

# 1. Einleitung

Wozu und wie gewinnen wir physikalische Erkenntnisse reflektiert und bewusst?



- Wir Menschen erkunden die Natur. Erst mit Spielzeug, später mit Versuchen oder Expeditionen. Stets gewinnen wir physikalische Regeln und Kompetenzen mit Wegen physikalischer Erkenntnisgewinnung.
  - Auf dieser angeborenen **Kompetenz zur Erkundung** bauen wir auf und professionalisieren diese.
  - Dazu verwenden wir **lernwirksame und erprobte** Unterrichtskonzepte [1].
  - Dabei nutzen wir die **prozessbezogenen Kompetenzen zu Erkenntniswegen** des Kerncurriculums Physik [2].
  - Auch nutzen wir die drei grundlegenden **Methoden der Erkenntnisgewinnung** aus Didaktik und Erkenntnistheorie [3-5]: induktive Methode, hypothetisch deduktive Methode sowie Paradigmenwechsel.
  - Wir verdeutlichen Erkenntnisgewinnung als **Schlüsselkompetenz**, besonders in Zeiten rapider Veränderungen.
  - Wir zeigen, wie Erkenntnisgewinnungskompetenz **aus kognitiv anregenden Lernprozessen erwächst**.

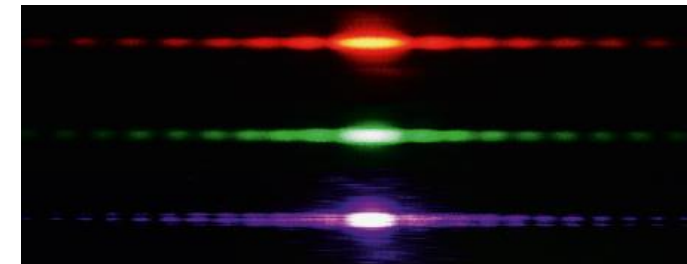
[1] Hattie, J. (2009): Visible Learning. Taylor and Francis Ltd, London.

[2] Bresser, K. u. a. (2022): KC Physik Niedersachsen S2. Unidruck Hannover.

[3] Kircher, E. u. a. (2002): Physikdidaktik. Berlin: Springer.

[4] Niiniluoto, I. u. a. (2004): Handbook of Epistemology. Dordrecht: Springer.

[5] Carmesin, H.-O. u. a. (2026): Universum Physik Niedersachsen 5/6. Berlin: Cornelsen.



## 2. Reise als Weg zu physikalischer Erkenntnis

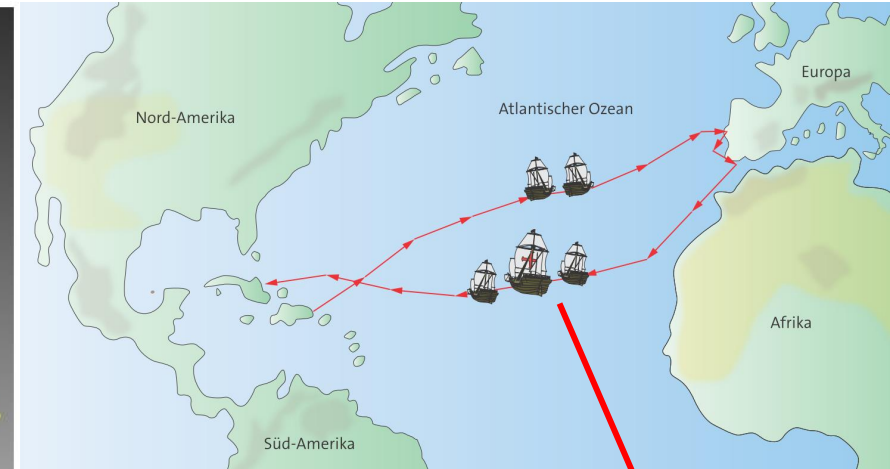
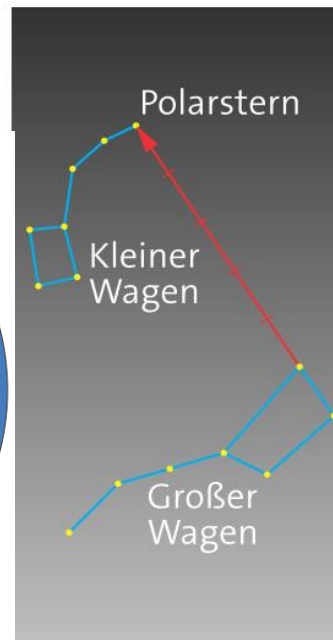
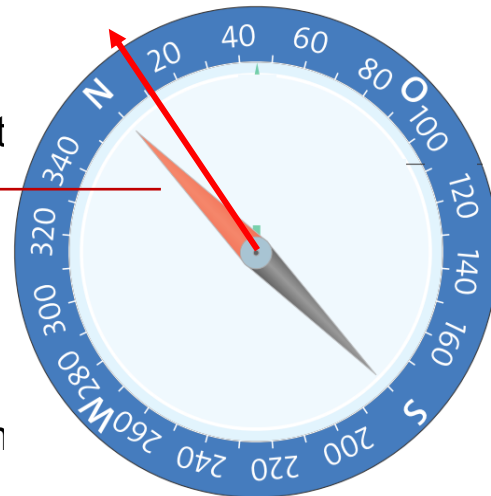
- Es gibt **Lernvoraussetzungen** aus der S1:
- **Kontext [1]**: 1492 brach Kolumbus mit drei Schiffen auf, um einen Seeweg nach Indien zu finden (vor Qualifikationsphase, QP [2]).
- **Hypothese [1] und Messgerät**: Ein Kompass sollte den **Weg weisen**, indem die Kompassnadel nach Norden zeigt.
- **Vernetzt mit Vorwissen**, sehr lernwirksam [1]



2 Wenn du einen Stabmagneten an einen Faden hängst, dann weist er in Nord-Süd-Richtung.

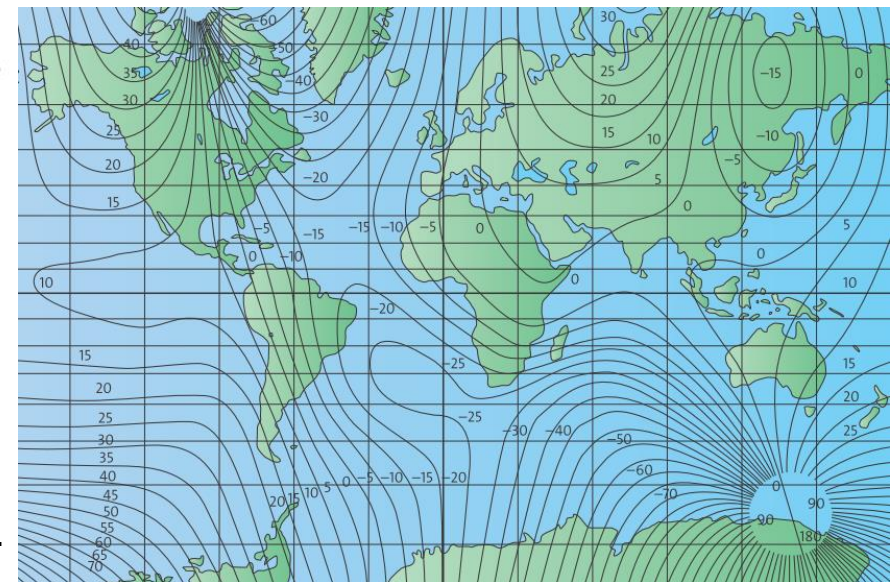
## 2. Reise als Weg zu physikalischer Erkenntnis

- **Folgerung/Deduktion:** Die Kompassnadel zeigt auch im Atlantik nach Norden.
- **Überprüfungsversuch [1]:** Der Polarstern liegt in **nördliche** Richtung, Kompassnadel: NNW.
- **Hypothese ist widerlegt/falsifiziert**
- **hypothetisch deduktive Methode der Erkenntnisgewinnung [2].**
- **Beurteilter Gültigkeitsbereich [2] (vor QP):** Die Kompassnadel weist ungefähr nach Norden
- Abweichung heißt **Missweisung**.
- **Messunsicherheit abschätzen [2] (vor QP):** Digitales Planetarium (Stellarium): Der **Polarstern** liegt bei  $89^{\circ}20'$  (Bogenminuten), also  $40' = \frac{40^0}{60} = 0,67^{\circ}$  entfernt vom Himmelsnordpol. **Systematische Fehler**  $0,67^{\circ}$ .
- **Ablesefehler**  $\frac{1}{2}$  Skalenteil:  $5^{\circ}$ . **Summe**  $5,67^{\circ}$ .
- **Informationsgewinnung Experiment [2]:**  
Karte der Missweisung:
- **Europa:**  $0 \pm 5^{\circ} \rightarrow$  kaum messbar
- Entdeckung im **Atlantik:**  $-5,625^{\circ}$
- Mitten im **Atlantik:**  $-15^{\circ}$  oder mehr: messbar



Bortagebuch, 13.9. 1492: „... An dem Tag, bei Einbruch der Nacht, zeigte die Kompassnadel einen halben Punkt ( $5,625^{\circ}$ ) Richtung Nordwest. Am Morgen zeigte sie etwas weiter Richtung Nordwest.“

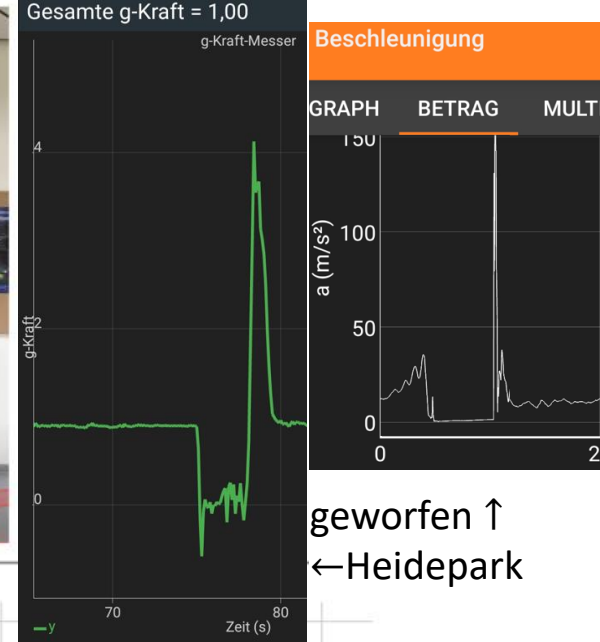
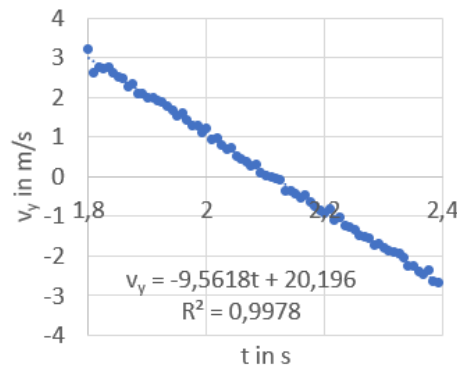
7 Wenn du die Hinterachse um den Faktor 6 verlängerst, dann gelangst du zum Polarstern.



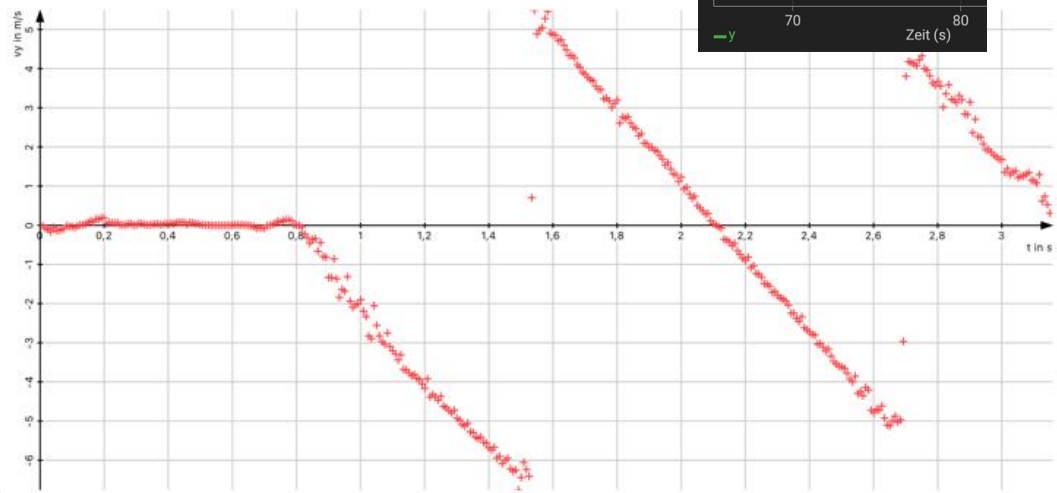
Der **Himmelsnordpol** ist über dem geografischen Nordpol, auf der Erdachse.

## 2. Reise zum Heidepark als Weg zu physikalischer Erkenntnis

- **Forschungsfrage:** Wie schnell fällt man beim Freifallturm auf 39 m (Betreiber) Fallstrecke?
- **Modellversuch [2]:**
  - Messung mit Slow Motion Video (120 fps), Videoanalyse Viana und Tabellenkalkulation:  
 $v = a \cdot t$  mit  $a = -9,562 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$
  - Literaturwert  $|a| = 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} := g$  Ortsfaktor
- **Messunsicherheit [2]**
  - Abweichung von Lit.  $|\frac{|a|-g}{g}| = 2,5 \%$
  - Korrelationskoeffizient:  $R = \sqrt{R^2} = 0,9989 \approx 1$ . Das bestätigt die lineare Abnahme der Geschwindigkeit und daher die Konstanz der Beschleunigung.
- **Versuch** Beschleunigungssensor im Smartphone misst Falldauer  $t_{Fall} = 2,9 \text{ s}$ 
  - $v = g \cdot t = 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 2,9 \text{ s} = 28,45 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 102,4 \frac{\text{km}}{\text{h}}$
  - Betreiberangabe:  $v = 98,3 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ ,  
 $\frac{\Delta v}{v} = 4,2\%$  passt gut



geworfen ↑  
←Heidepark



**Selbstkompetenzerfahrung** mit Kopf und Sinnen: Vier Darstellungsebenen von Wissen und Erkenntnis: Wahrnehmung (Schwereelosigkeit, Gleichgewichtssinn, Innenohr), enaktiv (analog und digital), ikonisch, symbolisch.

[6] Carmesin, H.-O.; Emse, A.; Konrad, U.; Pröhl, I. K.; Becker, C. (2021): Universu

## 2. Flugreise als Weg zu physikalischer Erkenntnis

- **Forschungsfrage:** Reicht die Startbahn [6]

- Schubkraft:  $F = 600\,000\text{ N}$
- Startmasse:  $m = 240\,000\text{ kg}$
- Nötige Startgeschwindigkeit:  $v = 300\frac{\text{km}}{\text{s}}$
- Startbahn in Gibraltar:  $L = 1777\text{ m}$

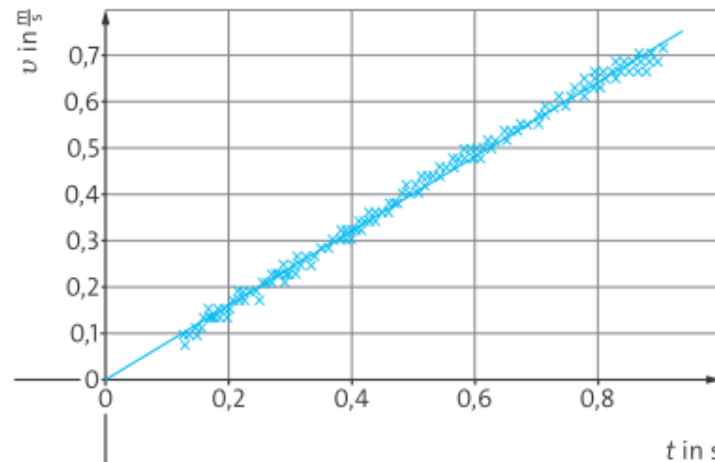
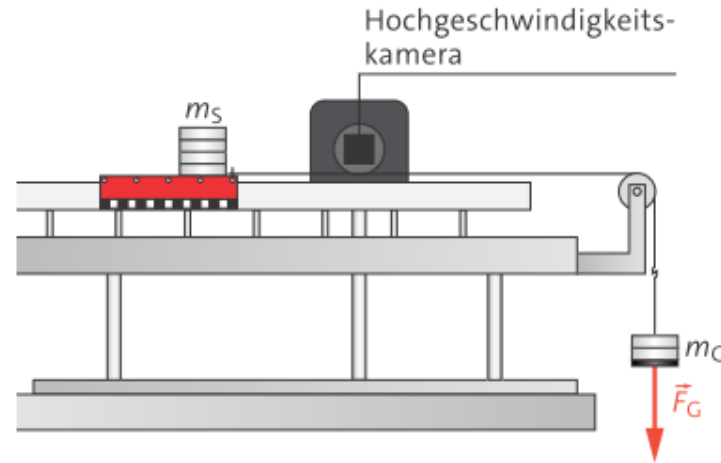
- **Modellversuch [2]:**

- Messung mit Slow Motion Video (240 fps),  $v \propto t \rightarrow a$  konstant
- Versuchsreihe: mit  $a \propto F$ ;  $a \propto \frac{1}{m}$
- Folgerung:  $a \propto \frac{F}{m} \propto F = k \cdot m \cdot a$
- Auswertung  $F = m \cdot a$  mit  $1\text{ N} = 1\frac{\text{kg}\cdot\text{m}}{\text{s}^2}$
- **Grundgleichung der Mechanik** durch **induktive Methode der Erkenntnisgewinnung:** Verallgemeinerung von Messungen

- **Problemlösung [2]**

- $a = \frac{F}{m} = 2,5\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$
- $v = \frac{300\text{ m}}{3,6\text{ s}} = 83,3\frac{\text{m}}{\text{s}}$
- $t = \frac{v}{a} = 33,3\text{ s}$
- $s = \frac{1}{2}at^2 = 1386\text{ m}$ . Das genügt.

- **Noch unklar: Gültigkeitsbereich [2] =?**



**Hypothese:**  $F = m \cdot a$  gelte im beschleunigten Koordinatensystem

**Folgerung/Deduktion:**  $F = m \cdot a$  gilt im Karussell

**Versuch:** Gondeln werden trotz  $F_{radial} = 0$  nach außen beschleunigt

Hypothese widerlegt. **Gültigkeitsbereich [2] (vor QP):** der **Grundgleichung der Mechanik gilt in Inertialsystemen.**

**Versuche können Hypothesen widerlegen, aber nicht beweisen [2].**



Oder **Perspektivwechsel** ins rotierende System mit Zentrifugalkraft/Trägheitskraft



## 2. Zeitreise als Weg zu physikalischer Erkenntnis



- **Weltraumfrage:** Bleibt ein Zwilling auf Reisen jünger als der andere? [7]:
- **Versuche [7]:** Lichtgeschwindigkeit im Vakuum  $c$  ist unabhängig von Lichtquelle.
- **Modellvorstellung als Hilfsmittel zur Problemlösung [2]**

- Laser Entfernungsmesser in einer Lichtuhr

- Pythagoras:  $(c \cdot \Delta t_l)^2 = (c \cdot \Delta t_p)^2 + (v \cdot \Delta t_l)^2$

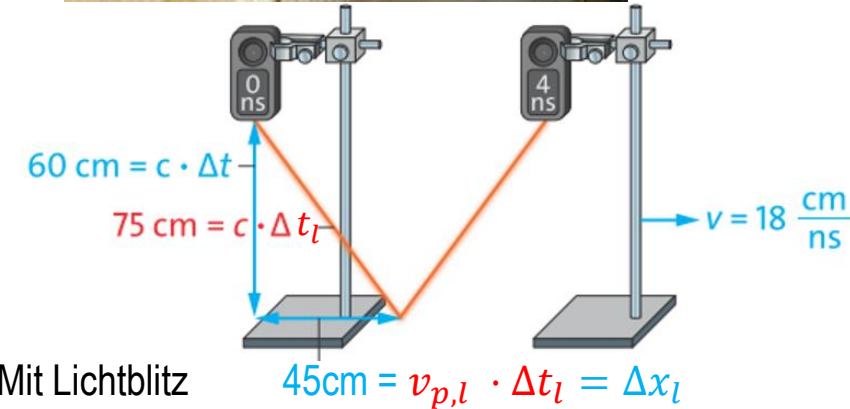
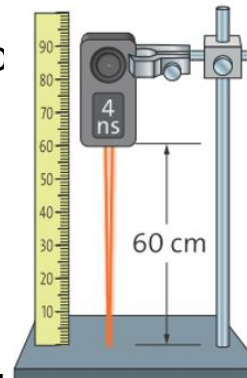
- Daher:  $\Delta t_p = \Delta t_l \cdot \sqrt{1 - \frac{v_{p,l}^2}{c^2}}$  ,  $v_{p,l}$  ist  $v$  des Piloten relativ zum Labc

- Gl. für **kinematische Zeitdilatation (GKZ)** [8,9]

- **Ergebnis:** Laboruhr zeigt mehr Zeit:  $\Delta t_l = \Delta t_p \cdot \gamma$  ; Lorentz-Faktor:  $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$

- Die Zwillinge Nele und Deike feiern ihren 15. Geburtstag. Nele verreist für  $\Delta t_p = 6a$  mit einer Geschwindigkeit  $v$ . Deike bleibt bei der Erde bei unwesentlicher Gravitation. Bei der Rückkehr soll Deike schon  $\Delta t_l = 10a$  gealtert sein. Wie groß muss dazu  $v$  sein?

- **Lösung:** GKZ |:  $\Delta t_l \mid \uparrow 2 \rightarrow \left(\frac{\Delta t_p}{\Delta t_l}\right)^2 = 1 - \frac{v^2}{c^2} = 0.36 \rightarrow v = 0.8 \cdot c$



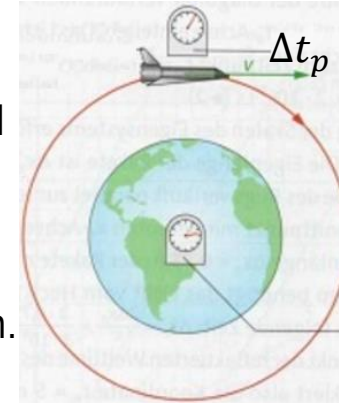
[7] Burisch, C., Carmesin, H.-O., Emse, A., Kienle, R., Konrad, U., Küblbeck, J., Pardall, C.-J., Piehler, M., Pröhl, I. K., Schäfer, J., Wienbruch, U. und Wilhelm, S. (2025): Universum Physik, Gesamtband Ausgabe B, Berlin: Cornelsen.

[8] Die gravitative Zeitdilatation kann in der Raumfahrt separat behandelt werden, siehe [7].

[9] Einstein, A. (1905): Zur Elektrodynamik bewegter Körper. Annalen der Physik, 17, S. 891-921.

## 2. Zeitreise als Weg zu physikalischer Erkenntnis

- **Zwillingsparadoxon [10]**: Deike bewegt sich relativ zu Nele. Daher könnte Deike aufgrund der **hypothetischen Relativität [11]** sagen, sie sei bei der Rückkehr jünger als Nele.
  - **Folgerung/Deduktion**: Koordinatensystem von Nele und Deike wären austauschbar.
  - Nele wäre jünger und älter als Deike (paradox, auch ohne Versuch falsifiziert) .
  - **Überprüfungsversuch [12]**: Messerschmid reiste im Spaceshuttle auf der D1 Mission.
  - **Messung**:  $\delta t_{\text{kin,obs}} = -1.75 \mu\text{s} \rightarrow$  Die reisende Nele ist jünger als Deike.
  - Die Hypothese der Relativität ist **falsifiziert**.
- **Bedeutung der hypothetischen Relativität als idealisierte Modellvorstellung [2]**:
  - Z. B.: **Modell idealer Gase** ergibt **universelles Gasgesetz**  $p \cdot V = N \cdot k_B \cdot T$ , hat keine Kräfte, und sagt **Gase ohne Phasenübergang** vorher. Das Modell ist **falsifiziert, aber gut**.
  - Relativität ist ebenso eine Idealisierung [13], sie ergibt eine Zeitdilatation, benennt aber **keinen realistischen Gültigkeitsbereich [2]**.
  - Die IAU [14] nennt **realistische Gültigkeitsbereiche, Adäquate Koordinatensysteme [15]**,
  - das **Geocentric Celestial Reference System (GCRS)** für erdnahe Raumfahrt,
  - das **Barycentric Celestial Reference System (BCRS)** für Raumfahrt im Planetensystem.
- **Selbstkompetenzerfahrung zur Nutzung von Idealisierung kombiniert mit realisiertem Gültigkeitsbereich.**



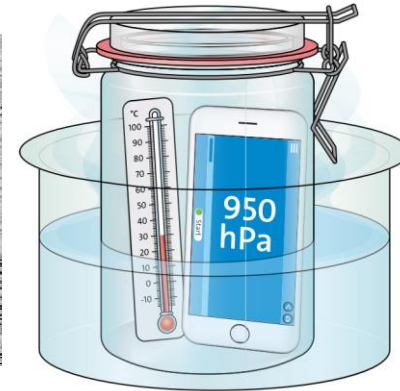
$$\Delta t_p = T \cdot \gamma^{-1} \text{ (Wirkung)}$$

$$v = 7429 \frac{\text{m}}{\text{s}}; \text{ Umlaufdauer } T = 5710 \text{ s} = \Delta t$$

$$\delta t_{\text{kin}} := \Delta t_p - \Delta t_l = T \cdot (\gamma^{-1} - 1)$$

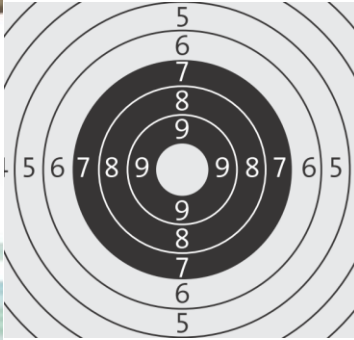
kinematische Zeitdifferenz

Messung im Labor  $\Delta t_l$

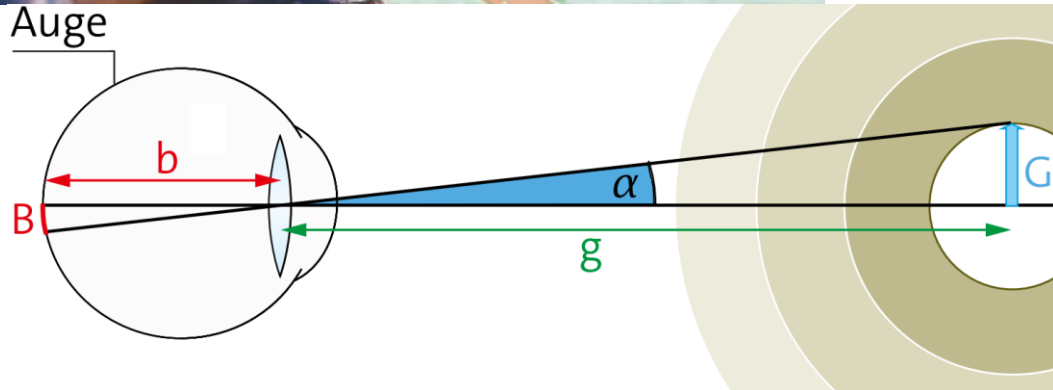


- [10] Langevin, P. (1911): L'évolution de l'espace et du temps. In: Atti del IV Congresso Internazionale di Filosofia, Vol. 1, pp. 193-214.
- [11] Relativität wurde **postuliert** im „[A] Relativitätsprinzip“ (Gleichförmig zueinander bewegte Systeme seien äquivalent, s. Einstein 1905), und im „[B] Prinzip der Kovarianz“ („Es bleibt daher nichts anderes übrig, als alle Koordinatensysteme als für die Naturbeschreibung prinzipiell gleichberechtigt anzusehen“, s. Einstein 1916). Einstein, A. (1916): Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie. Annalen der Physik, 49, S. 769-822.
- [12] Starker, S., Nau, H., Hammesfahr, J. (1985): The Shuttle Experiment Navex Completed on Spacelab Mission D1. Proc. of the 17<sup>th</sup> Precise Time and Time Interval Application and Planning Meeting, Washington DC, Dec. 1985, pp 405-412.
- [13] Song et al. (2002): Idealization in Physics: Its types, roles and implications to physics learning. In: Physics Teacher Education Beyond 2000. Amsterdam: Elsevier.
- [14] Soffel, M. et al. (2003): The IAU 2000 Resolutions for Astrometry, Celestial Mechanics, and Metrology in the relativistic Framework: Explanatory Supplement. The Astronomical Journal, 126, pp 2687-2706. IAU: International Astronomical Union.
- [15] Carmesin, H.-O. (2025): Construction of a Physically Adequate Coordinate System . Journal of Geosciences, Earth and Planetary Systems, 1(1), pages 1-12.

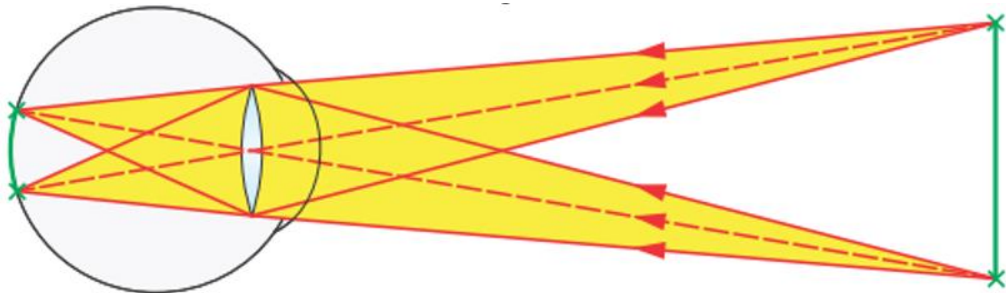
### 3. Wie genau können wir sehen?



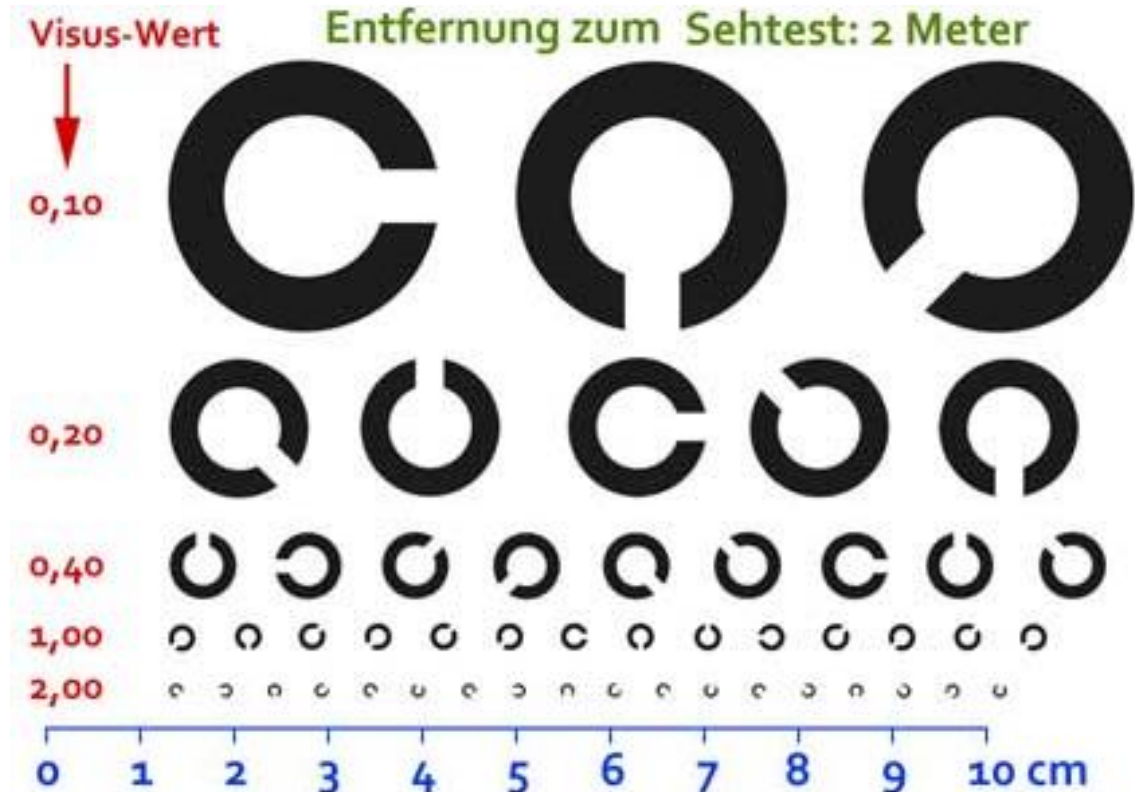
- Kontext [1]: Sehen mit bloßem Auge
- **Sportfrage:** Kann sie  $G = 2,5 \text{ mm}$  in  $g = 50 \text{ m}$  scharf sehen?
  - **Sehwinkel:**  $\tan \alpha = \frac{r}{g} = \frac{G}{g} = \frac{B}{b} = \frac{2,5 \text{ mm}}{50 \text{ m}} = 5 \cdot 10^{-4}$
  - Ring:  $2\alpha = 0,0057^\circ = 0,342'$
  - normalsichtig:  $2\alpha = 1' = \frac{1^\circ}{60} \hat{=} \text{Visus } V = 1$
  - Normalsichtige sehen das Zentrum beim Sportschießen nicht scharf.
  - $V = \frac{1'}{2\alpha} \rightarrow$  **Sehtest motiviert: vier Darstellungsebenen, s. o.**
  - **Biophysik:** Gibt es physikalische Grenze für Sehschärfe,  $V_{max}$ ?



**Modell [2]** Kamera/Lochkamera: Lichtbündel erzeugen Bildpunkte



**Biophysik-Frage:** Wie genau trifft Licht ins Auge?

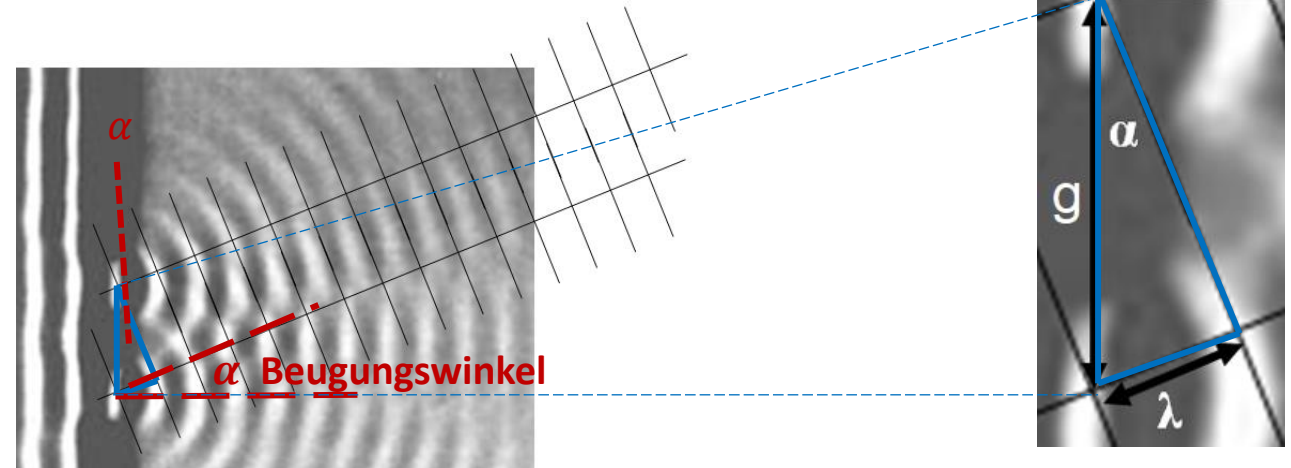
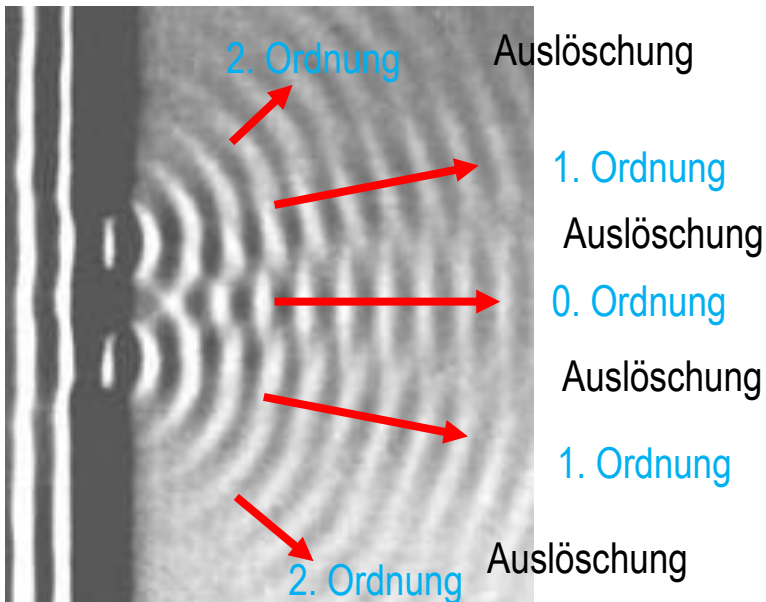


### 3. Wie genau trifft Licht ins Auge?

- **Transferfrage:** Warum entstehen im Wasser Wellenbündel wie Lichtbündel [7]?
- Versuch zum Initiieren von Idee/Hypothese [2]:
  - Wellenerregende Beine entsprechen Doppelspalt
  - Überprüfungsversuch und deduzierte/gefolgte Berechnung
- **Überlagerung** von Wellen gleicher Frequenz  $f = \frac{c}{\lambda}$  heißt **Interferenz**.
- **Beugungswinkel**  $\alpha$  via Dreieck  $\sin(\alpha) = \frac{n \cdot \lambda}{g}$  mit **Wellenlänge**  $\lambda$  und **Beugungsordnung**  $n$
- **Messung:**  $g = 3\lambda$ ;  $\alpha_1 = 21^\circ$  und  $\alpha_2 = 43^\circ$ ; **Berechnung:**  $\alpha_1 = 19,5^\circ$  und  $\alpha_2 = 41,8^\circ \rightarrow$  **Evidenz**
- Ergebnis durch **hypothetisch deduktive Methode** [3-5]: Wellenbündel können **gefolgert** werden aus der **linearen Superposition** (Überlagerung) von **Elementarwellen**.
- **Anwendung des Transfers:** Erzeugt Licht Beugungsmaxima?



#### Beugungsmaxima



**Konstruktive Interferenz** entsteht durch Überlagerung von Wellenbergen. Im Nahfeld entsteht ein Muster aus **Elementarwellen**. Im Fernfeld entstehen **strahlenförmige Wellenbündel**.

### 3. Wie genau trifft Licht ins Auge?



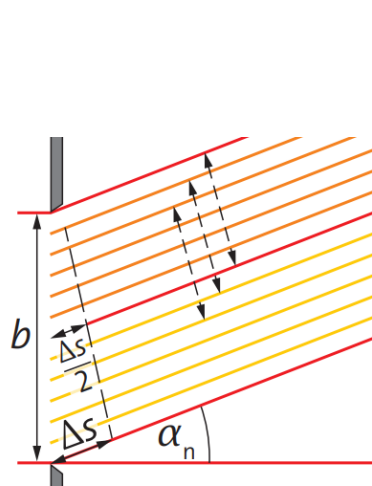
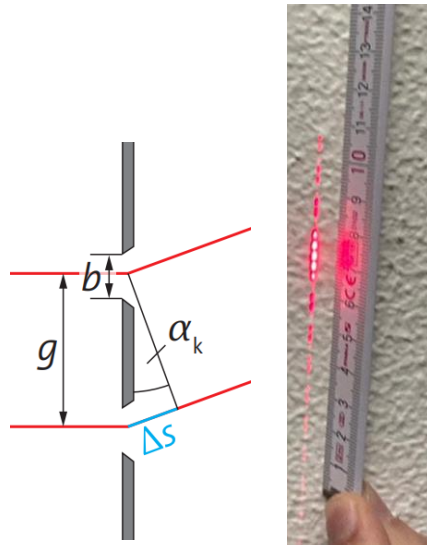
- **Transferfrage:** Erzeugt Licht Beugungsmaxima [7]?
- **Versuch** mit Licht ebenso wie mit Wasser
- **Doppelspalt:** Beugungswinkel:  $\sin(\alpha_n) = \frac{\Delta s}{g} = \frac{n \cdot \lambda}{g}$
- **Einhüllende** durch Beugung am **Einzelspalt:**  $\sin(\alpha_{n,min}) = \frac{\Delta s}{b} = \frac{n \cdot \lambda}{b}$  mit Spaltbreite  $b$
- **Ergebnis:** Nach **hypothetisch deduktiver Methode** [3-5] kann die Beugung von Licht **gefolgert** werden aus einer **Welleneigenschaft von Licht**.
- **Selbstkompetenzerfahrung** durch Erkenntnisweg des intelligenten **Transfers** mit erreichtem Ziel des **Paradigmenwechsels** von geradliniger Lichtausbreitung zur Welleneigenschaft von Licht.

$\lambda = 630 \text{ nm}$

Beugung am Doppelspalt

Vergleich ↓  
Einhüllende

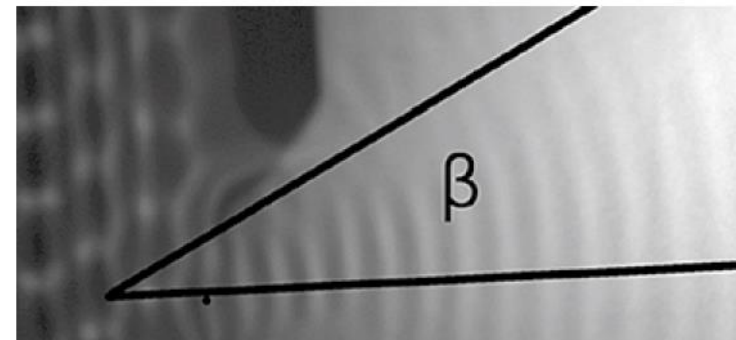
Beugung am Einzelspalt



Destruktive Interferenz an einem Spalt

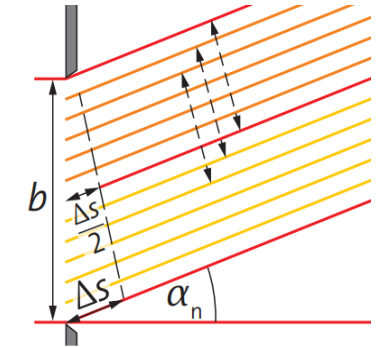
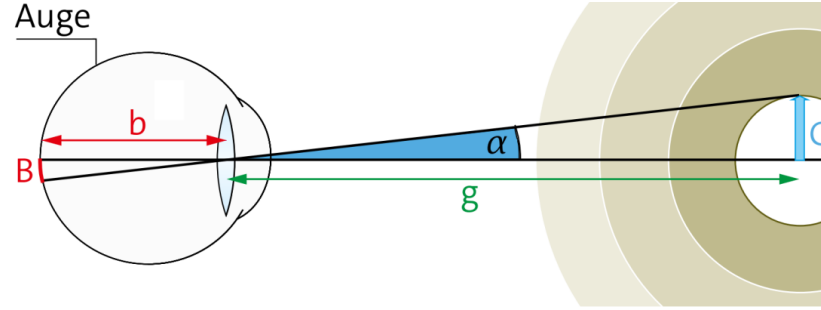


Gleiche Methode der **Erkenntnisgewinnung** in Didaktik, Erkenntnistheorie, Naturwissenschaft und Technik: **Induktive** sowie **hypothetisch deduktive** Methode und **Paradigmenwechsel**

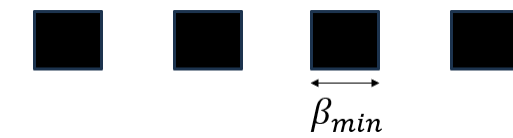
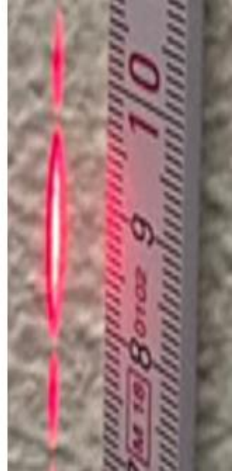
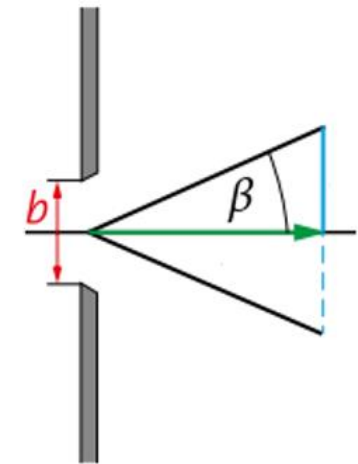


4 Beugungswinkel  $\beta$  des ersten Minimums

### 3. Wie genau trifft Licht ins Auge?



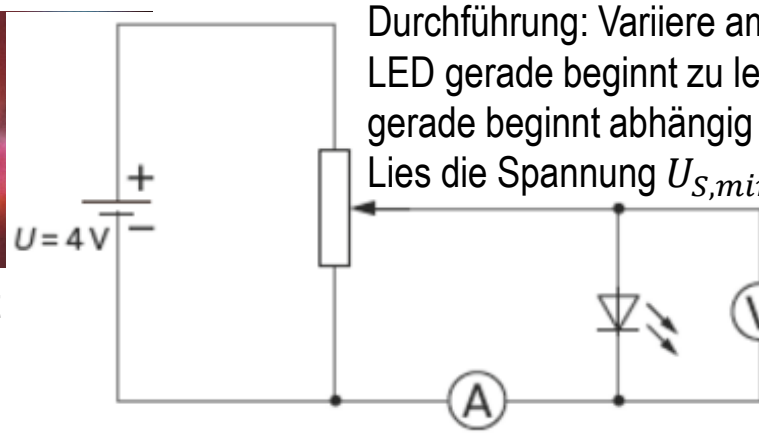
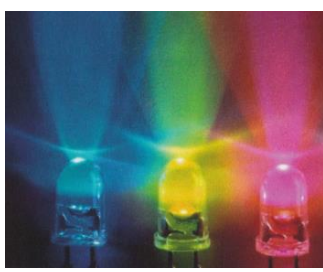
Destruktive Interferenz an einem Spalt



- **Biophysik-Transfer:** Licht wird hinter der Pupille gebeugt. Erklärt das die Begrenzung der Sehschärfe?
- **Modell [2]:** Licht kommt von Gegenstand mit  $G = 0$ , trifft in Pupille als Einzelspalt und wird gebeugt zu **Bildgröße  $B > 0$** 
  - Exemplarische Lichtwellenlänge  $\lambda = 500 \text{ nm}$ . Allgemein ist  $\lambda \in [400 \text{ nm}; 700 \text{ nm}]$
  - Pupillendurchmesser  $b \in [1,5 \text{ mm}; 12 \text{ mm}]$ , exemplarisch:  $b = 5 \text{ mm}$
  - Beugung am Einzelspalt:  $\sin(\beta) = \frac{\lambda}{b} \rightarrow 2\beta = 2 \cdot \arcsin\left(\frac{\lambda}{b}\right) = 2 \cdot \arcsin\left(\frac{500 \text{ nm}}{5 \text{ mm}}\right) = 0,0115^\circ = 0,69'$
  - $2\beta_{min} = 2 \cdot \arcsin\left(\frac{400 \text{ nm}}{12 \text{ mm}}\right) = 0,23' = \text{Beugungsgrenze} < 0,342' = 2\beta_{\text{Zentrum Sportschießen}}$
  - $2\beta_{max} = 2 \cdot \arcsin\left(\frac{700 \text{ nm}}{1,5 \text{ mm}}\right) = 3,21'$
  - **Erste Lösung:** Lichtwellen ermöglichen das Zentrum beim Sportschießen scharf zu sehen.
  - Mögliche Visuswerte  $\frac{1'}{2\beta} = V = \frac{1'}{2 \arcsin\left(\frac{\lambda}{b}\right)} \in [0,31; 4,35]$  verteilen sich um den Normalvisus  $V = 1$ .
  - Bei Linienstimuli erreicht der Keilschwanzadler  $\beta_{min} = 0,21'$  und der Turmfalke  $\beta_{min} = 0,19'$  [16].
- **Ergebnis:** Beugung von Licht an der Pupille erklärt die menschliche Sehschärfe quantitativ passend, ergibt eine physikalische Grenze der Sehschärfe und kann das Sehen des Zentrums beim Sportschießen ermöglichen.
- **Selbstkompetenzerfahrung:** Durch Transfer, Paradigmenwechsel und Pupillenmodell beantworten Lernende die Sportfrage und finden eine physikalische Grenze  $V_{max} = 4,35$  der Sehschärfe.
- Durch die verwendete hypothetisch deduktive Methode bleibt die **grundlegende Frage** offen [2]:
  - Ist Licht eine Welle?

[16] Potier, S. (2016): Visual abilities in two raptors with different ecology. J. of experimental biology, 219, p. 2639-2649.

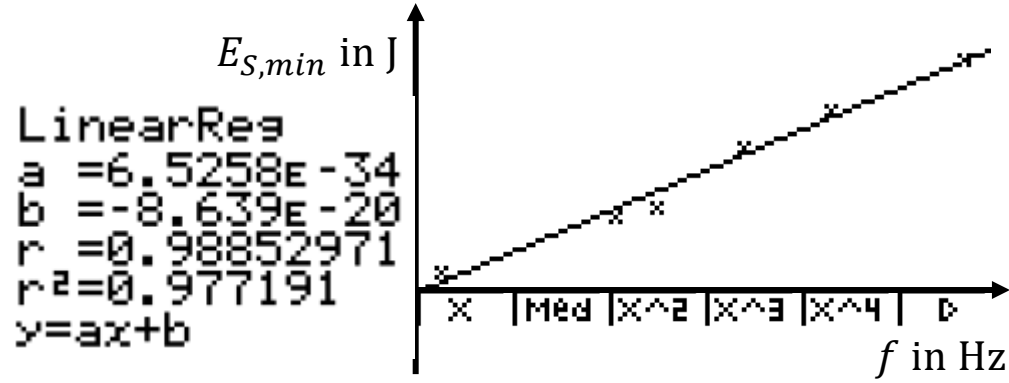
### 3. Wie genau trifft Licht ins Auge?



Durchführung: Variiere am Potentiometer  $U_{LED}$ , bis die LED gerade beginnt zu leuchten und die Stromstärke gerade beginnt abhängig von  $U_{LED}$  steil anzusteigen. Lies die Spannung  $U_{S,min}$  dieser Schwelle ab und miss  $\lambda$ .

Berechne  $f = \frac{c}{\lambda}$ . Die **kleinste lichterzeugende Energieportion** wird der kleinsten Ladung  $e$  zugeführt:  $E_{S,min}(f) = U_{S,min}(f) \cdot e$

$\lambda$ in nm	$f$ in $10^{14}$ Hz	$U_{S,min}$ in V	$E_{S,min}$ in $10^{-19}$ J
405	7,40	2,5	4
470	6,38	2,1	3,36
525	5,71	1,85	2,96
590	5,08	1,4	2,24
630	4,76	1,33	2,128
875	3,43	0,95	1,52



- **Grundlegende Frage:** Ist Licht eine Welle?
- **Hypothese [2]:** Licht sei eine Welle.
- **Folgerung:**
  - Die Amplitude von Licht könnte beliebig klein sein.
  - Daher wäre die kleinste lichterzeugende Energieportion  $E_{S,min}(f)$ , mit der man Licht einer Frequenz  $f$  erzeugen kann, beliebig klein.
  - Bei der Menge der LEDs (für Farben) wäre  $E_{S,min}(f)$  beliebig klein.
- **Überprüfungsversuch:**  $E_{S,min}(f) = h \cdot f$ .
- Dabei ist  $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$  Js und heißt Plancks Wirkungsquantum.
- Also ist  $E_{S,min}(f)$  nicht beliebig klein.
- **Ergebnis:** Die Hypothese ist widerlegt [3-5]. **Antwort:** Licht ist keine Welle.
- Da Licht  $E_{S,min}(f)$  benötigt, hat es eine Teilcheneigenschaft.
- Eine Lichtportion mit  $E_{S,min}(f) = h \cdot f$  heißt Photon oder Lichtquant.
- Da Licht Welleneigenschaft hat, ist es kein Teilchen.
- Daher hat Licht Wellen- und Teilcheneigenschaft.
- Ein Objekt mit beiden Eigenschaften heißt Quantenobjekt.

- **Selbstkompetenzerfahrung** durch **systematischen Erkenntnisweg** zur Wellen-, Teilchen- und Quanteneigenschaft [2] von Licht mit **Paradigmenwechseln:** Lichtbündel  $\rightarrow$  Welle  $\rightarrow$  Photon  $\rightarrow$  Quantenobjekt.
- Quantenobjekte öffnen den Weg zu zukunftsweisenden Quantentechnologien wie Quantenkryptographie und Quantencomputer [7].
- **Konzeptüberprüfung:** Wie erklären Photonen die Sehschärfe?

**Bemerkenswert:** Viele Fragen über Quanten sind **ungelöst**, aber die Hypothese Licht sei eine Welle ist **eindeutig widerlegt**. Das leistet die **hypothetisch deduktive Methode** sehr gut.

### 3. Wie genau trifft Licht ins Auge?

- **Konzeptüberprüfung:** Wie erklären Photonen die Sehschärfe,  $V$ ?
- **Modell [2]:** Licht kommt von Gegenstand mit  $G = 0$ , trifft in Pupille als Einzelspalt und wird gebeugt zu **Bildgröße  $B > 0$** . Herleitung durch Transformation:

$$\rightarrow \sin(\beta) = \frac{\lambda}{b} = \frac{\Delta p_x}{p}$$

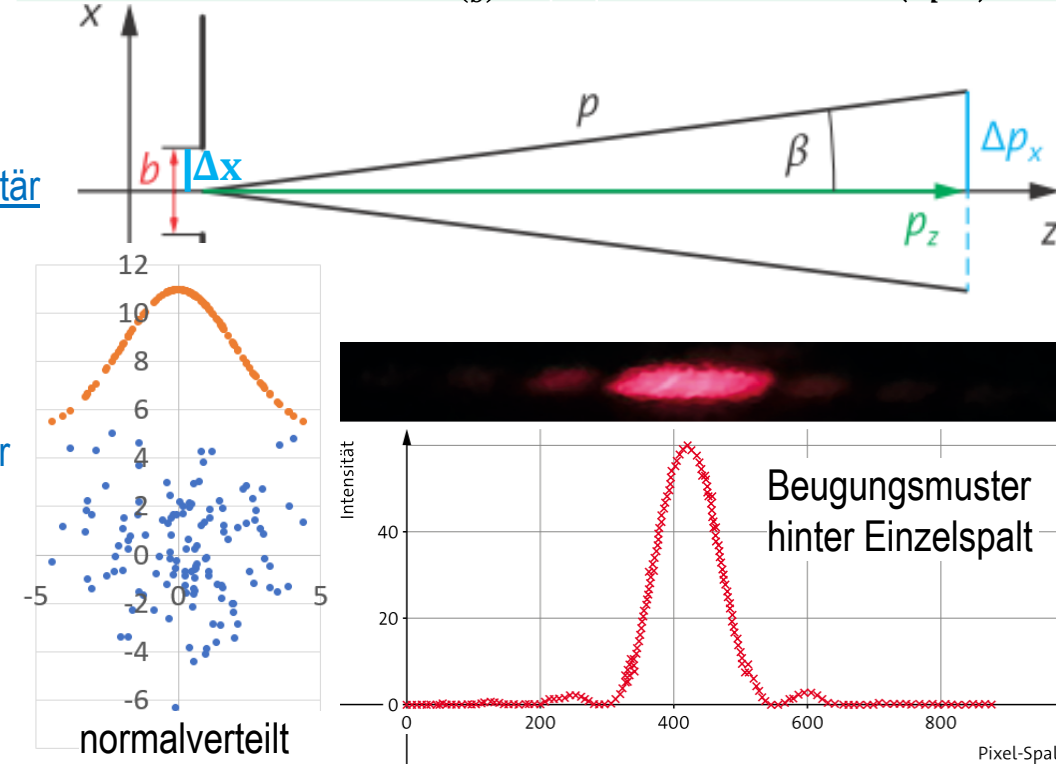
$$\text{Relativitätstheorie: } E = p \cdot c \rightarrow p \cdot c = h \cdot f \rightarrow \mathbf{p} = \frac{h \cdot f}{c} = \frac{h}{\lambda}$$

$$\text{Einsetzen } \rightarrow \frac{\lambda}{2 \cdot \Delta x} = \frac{\Delta p_x \cdot \lambda}{h} \rightarrow \Delta p_x \cdot \Delta x = \frac{h}{2}$$

$$\text{Visus } V = \frac{1'}{2 \arcsin\left(\frac{\lambda}{b}\right)} = \frac{1'}{2 \arcsin\left(\frac{\Delta p_x}{p}\right)}$$

- **Ergebnis:** Sehschärfe,  $V$ , wird sowohl von Wellen- als auch Teilcheneigenschaften des Lichts gefolgt.
- **Unbestimmtheitsrelation/Unschärferelation [17],** auch  $(y, p_y); (z, p_z); (t, E)$ , komplementär
- Mit größeren Abweichungen:  $\Delta p_x \cdot \Delta x \geq \frac{h}{2}$ : geometrische Unschärferelation
- Auch herleitbar:  $\Delta p_x \cdot \Delta x \geq \frac{h}{4\pi}$ : Heisenbergsche Unbestimmtheitsrelation
- Dabei ist  $\sigma_x = \Delta x = \sqrt{\langle (x - \langle x \rangle)^2 \rangle}$ ;  $\sigma_{p_x} = \Delta p_x = \sqrt{\langle (p_x - \langle p_x \rangle)^2 \rangle}$
- **Ergebnis:** Die Unschärfe (Abweichung vom Idealwert) ist bei Quantenobjekten stets größer null. Es ist also eine naturgesetzliche Unschärfe, keine **Messunsicherheit [2]**
- **Besonderheiten quantenphysikalischer Sichtweisen [2], Komplementarität, Unschärfe.**
- Die Unbestimmtheitsrelation beschreibt das naturgesetzliche Minimum der Unschärfe oder **Maximum der Schärfe**. Das menschliche Auge und das Falkenauge erreichen fast das Maximum der Schärfe, das zeigt die **Wirksamkeit biologischer Evolution, fast bis zum naturgesetzlichen Optimum**.  $\rightarrow$  **Selbstwirksamkeitserfahrung**

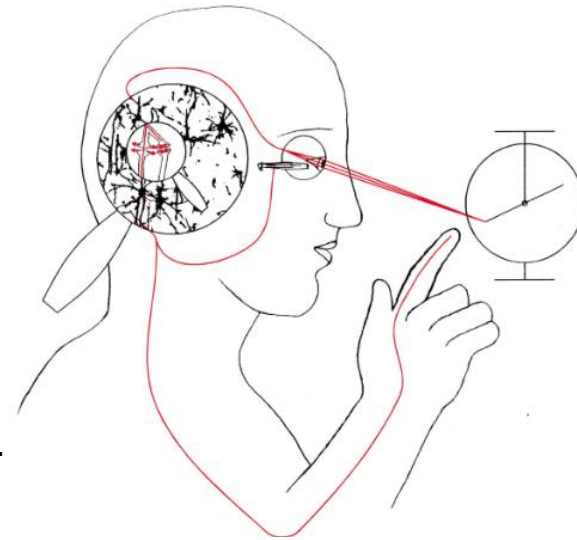
Quantenobjekt Licht	
Welleneigenschaft	Teilcheneigenschaft
↓	↓
$\sin(\beta) = \frac{\lambda}{b}$	$\sin(\beta) = \frac{\Delta p_x}{p}$
↓ erklärt	↓
Sehschärfe $V = \frac{1'}{2 \arcsin\left(\frac{\lambda}{b}\right)}$	$V = \frac{1'}{2 \arcsin\left(\frac{\Delta p_x}{p}\right)}$



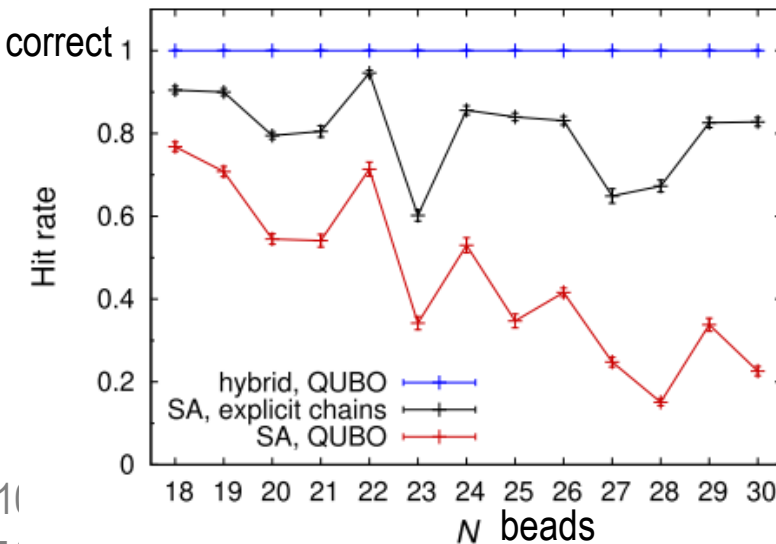
[17] Passon, O. und Grebe-Ellis, J. (2015) Was besagt die Heisenbergsche Unschärferelation? Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule, 64, S. 44-49.

# 4. Wie funktionieren Quantencomputer [7]

- **Wozu?**
- Schnell, wenig Energiebedarf
- Klassischer Computer: 5 Prozessoren · 64 Bit · 3 Milliarden Takte pro s:  $10^{12}$  Schaltereignisse/s
- Gehirn:  $10^{12}$  Neuronen mit je  $10^4$  Synapsen mit je 1000 Spikes/s:  $10^{19}$  Schaltereignisse/s
- Quantencomputer: bis zu **7,8 Billionen** mal schneller als ein herkömmlicher Computer [19].
- Durch Superposition, Verschränkung, reichhaltige Datendarstellung im Qubit, universelle Quantengatter, Transfer von Algorithmen
- Reales Problem **Proteinfaltung**:
- Simulation mit 5000 Qubits [18]: Mit Quantencomputer (QUBO) hohe Rate (Hit Rate) der exakten Lösung im Vergleich zum klassischen Simulated Annealing (SA, explicit chains)
- **Relevanter Kontext [1]**: Lernende interessieren sich für Quantenkryptographie und Quantencomputer.
- **Selbstkompetenzerfahrung, Versuche [2]**: Lernende interessieren sich für Experimente mit Quantencomputern.
- **Spannende Erkenntnisse [2] zur Teleportation mit Quantengattern interessieren Lernende.**



Fraction of correct solutions



[18] Irbäck, A. et al. (2022) Folding lattice proteins with quantum annealing. Phys. Rev. Research, 4, S. 043013-1-10



[19] Arute, Frank et al. (2019): Quantum supremacy using a programmable superconducting processor. Nature, 574, S. 505-509.

Zhong, H. et al. (2020): Quantum computational advantage using photons. Science 370/6523, S. 1460-1463.

Madsen, Lars S. et al. (2022): Quantum computational advantage with a programmable photonic processor. Nature, 606, S. 75-81.

[20] Carmesin, H.-O. (1996): Neuronal Adaptation Theory. Frankfurt, Peter Lang Europäischer Verlag der Wissenschaften.

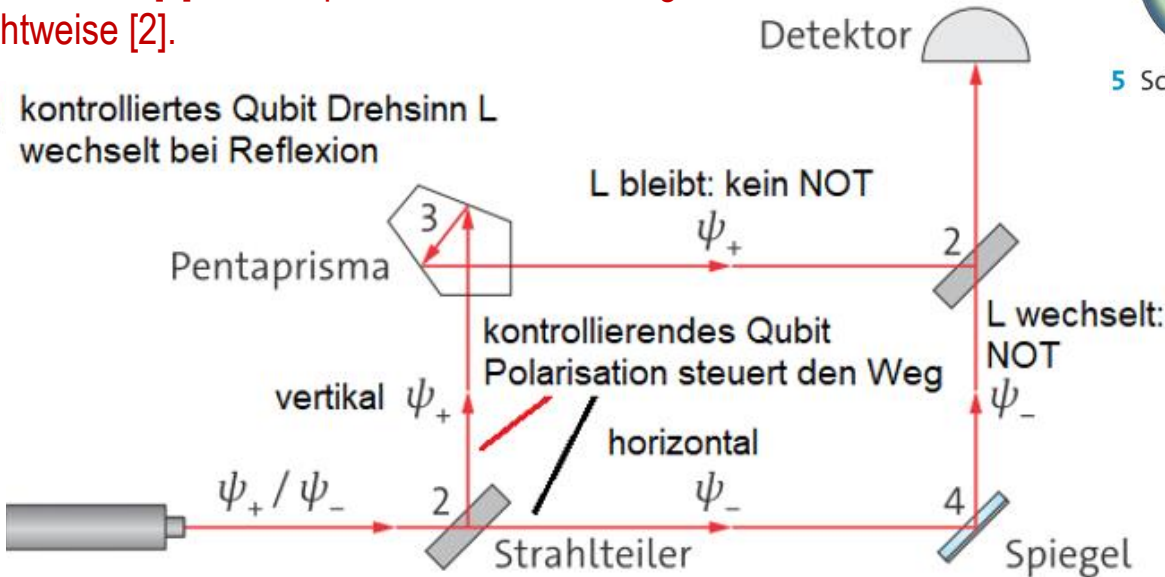
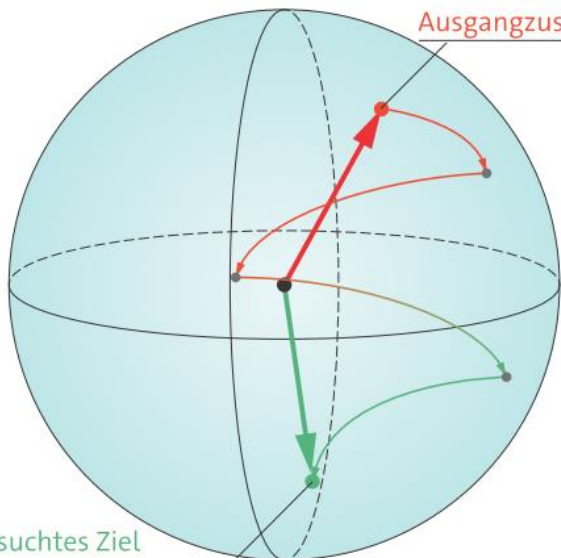
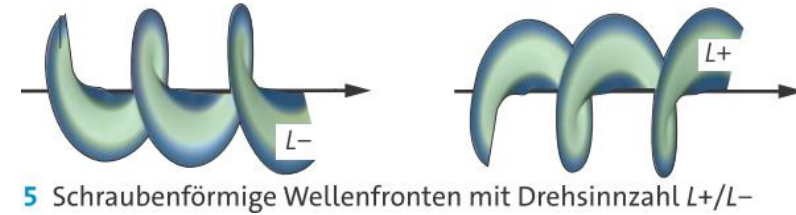
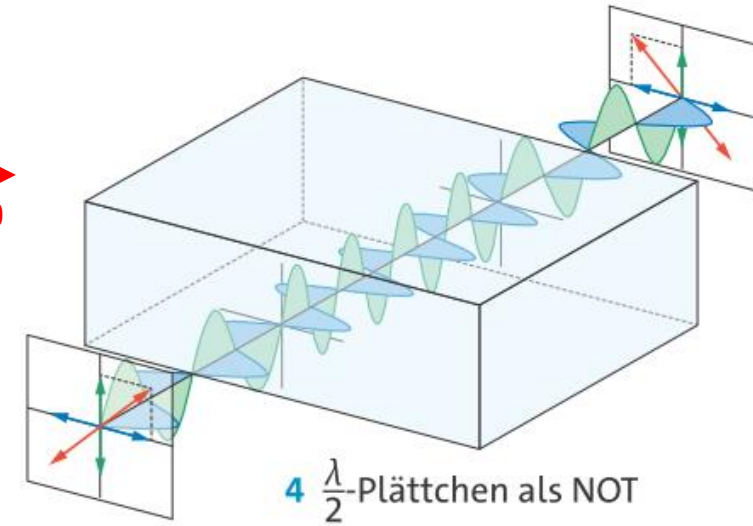
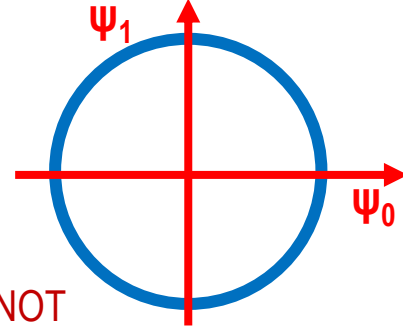
# 4. Wie funktionieren Quantencomputer

- **Versuch [2]**
- Zweiwertige Bits: Qubits: **Polarisation**,   , Zustände in Ebene (2D),
- Algorithmus: Abbildung der Zustände durch sogenannte Quantengatter:
- Realisierung: Universelle Menge an Gattern (De Ro 2021):

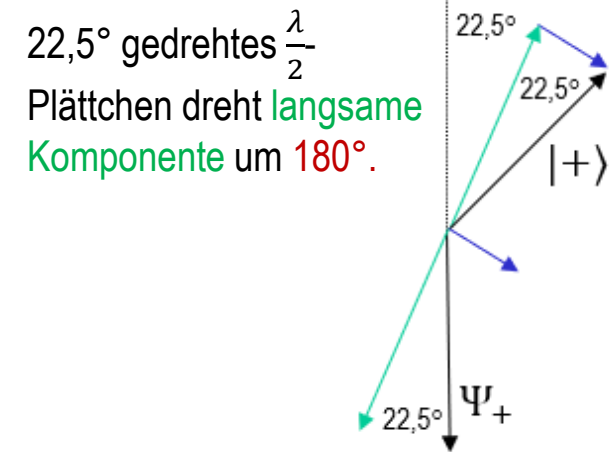
- $\frac{\lambda}{2}$  - Plättchen 45° zur Polarisation gedreht erzeugt **90°-Drehung** der Polarisation: **NOT**
- $\frac{\lambda}{2}$  - Plättchen 22,5° zur Polarisation gedreht erzeugt **45°-Drehung** der Polarisation, „**Hadamard Abbildung**“:  
 $\Psi_+ \rightarrow \frac{\Psi_- + \Psi_+}{\sqrt{2}} = |+\rangle$  &  $\Psi_- \rightarrow \frac{\Psi_- - \Psi_+}{\sqrt{2}}$ , Verschränkung alias **stochastische Abhängigkeit**

- Polarisation kontrolliert   , **CNOT** sowie  $\frac{\lambda}{8}$  - Plättchen

- **Selbstkompetenzerfahrung**, Versuche [2]: Lernende interessieren sich für Experimente mit Quantencomputern. Spannende Erkenntnisse [2] zur Teleportation mit Quantengattern interessieren Lernende. Quantenmechanische Sichtweise [2].



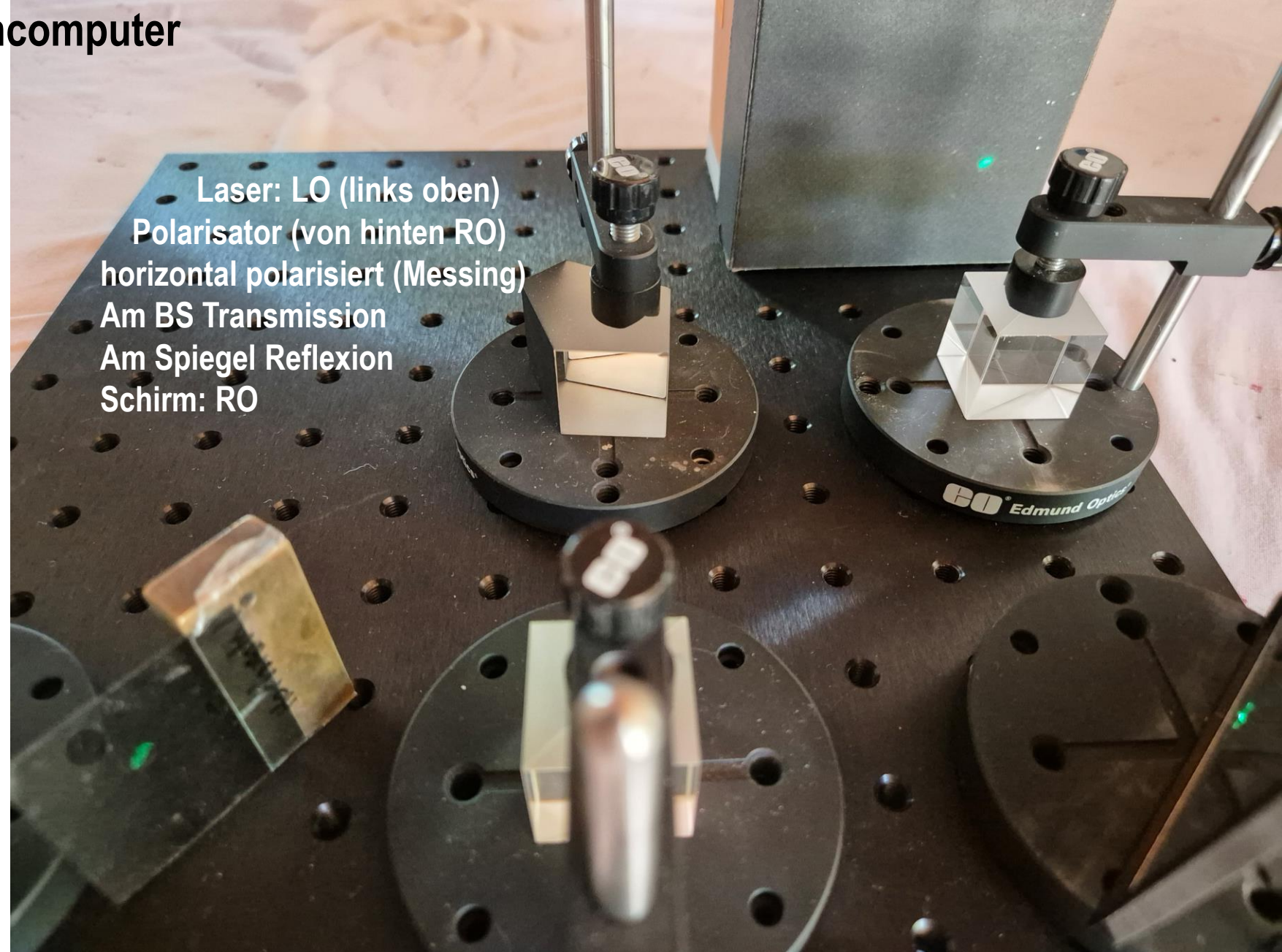
6 Modifiziertes Mach-Zehnder-Interferometer als CNOT-Gatter



## 4. Wie funktionieren Quantencomputer

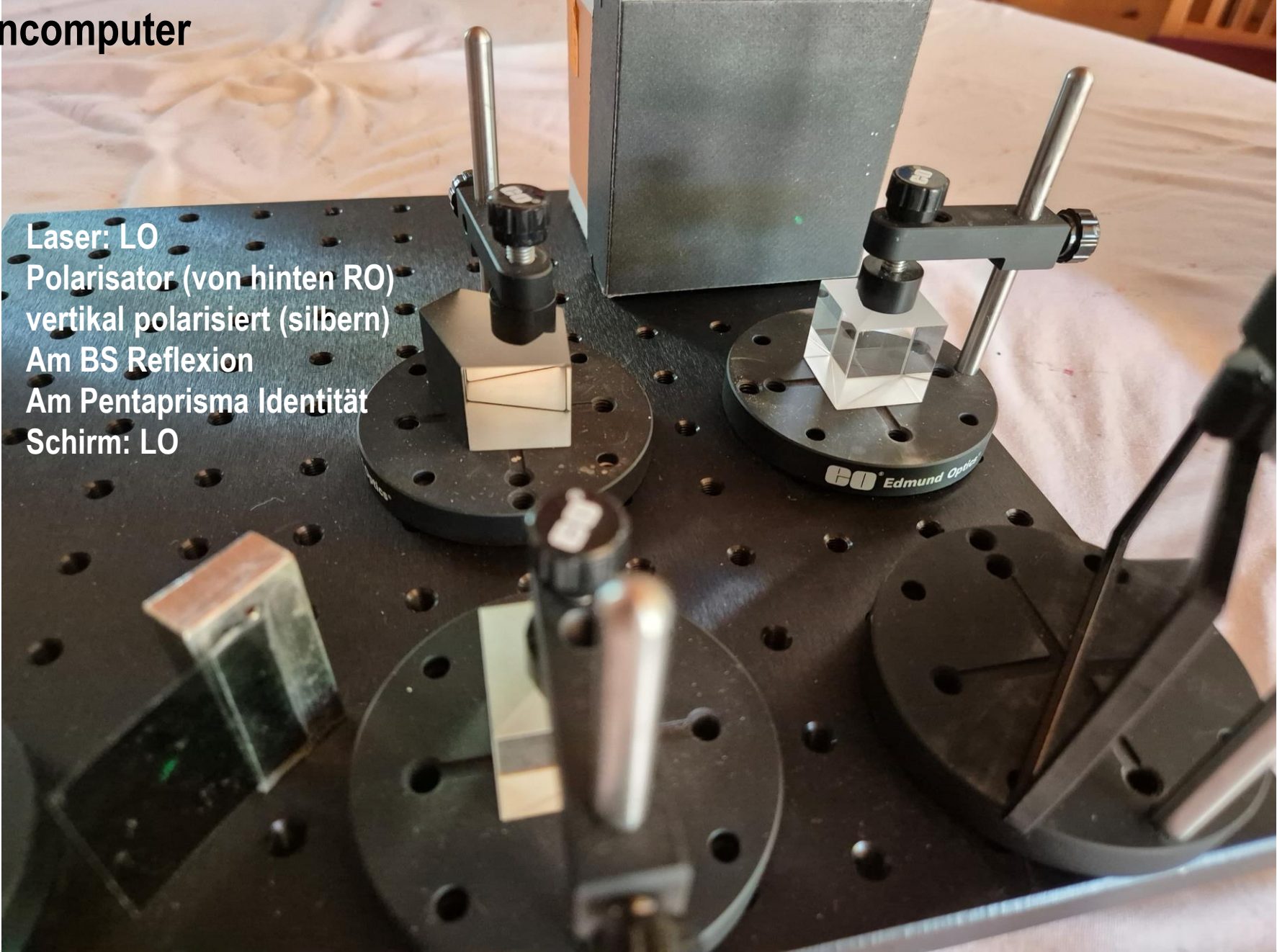
- Versuch [2]

Laser: LO (links oben)  
Polarisator (von hinten RO)  
horizontal polarisiert (Messing)  
Am BS Transmission  
Am Spiegel Reflexion  
Schirm: RO



## 4. Wie funktionieren Quantencomputer

- Versuch [2]

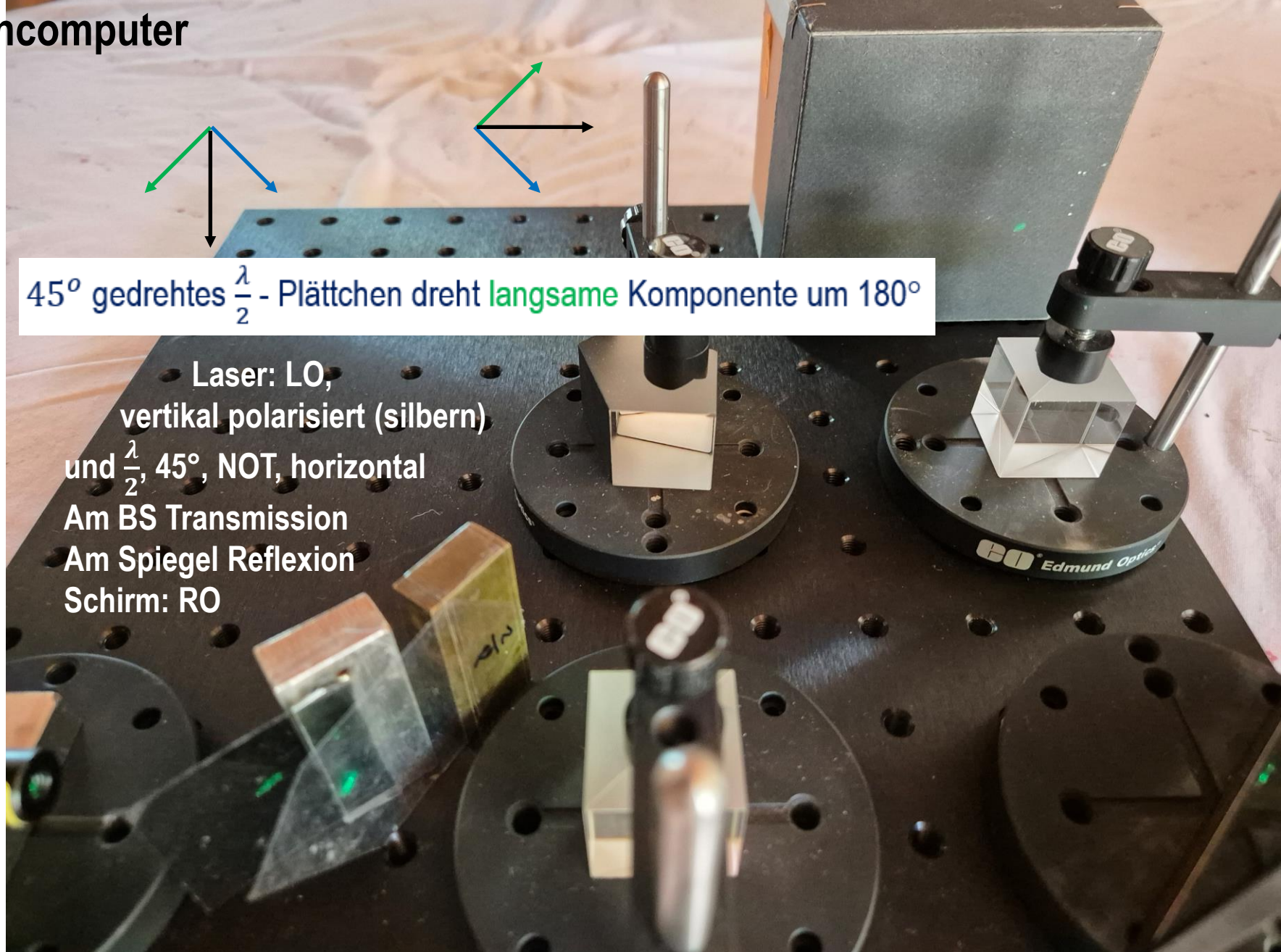


The image shows an optical setup on a black breadboard. A laser (LO) is positioned at the bottom left, emitting a green beam. The beam passes through a vertically polarized polarizer (RO) mounted on a circular base. It then reflects off a beam splitter (BS) and is directed towards a pentaprism (Identity) also on a circular base. A screen (LO) is positioned at the top right to capture the beam. The breadboard has several circular bases with holes for mounting components. A small green laser dot is visible on the breadboard surface.

Laser: LO  
Polarisator (von hinten RO)  
vertikal polarisiert (silbern)  
Am BS Reflexion  
Am Pentaprisma Identität  
Schirm: LO

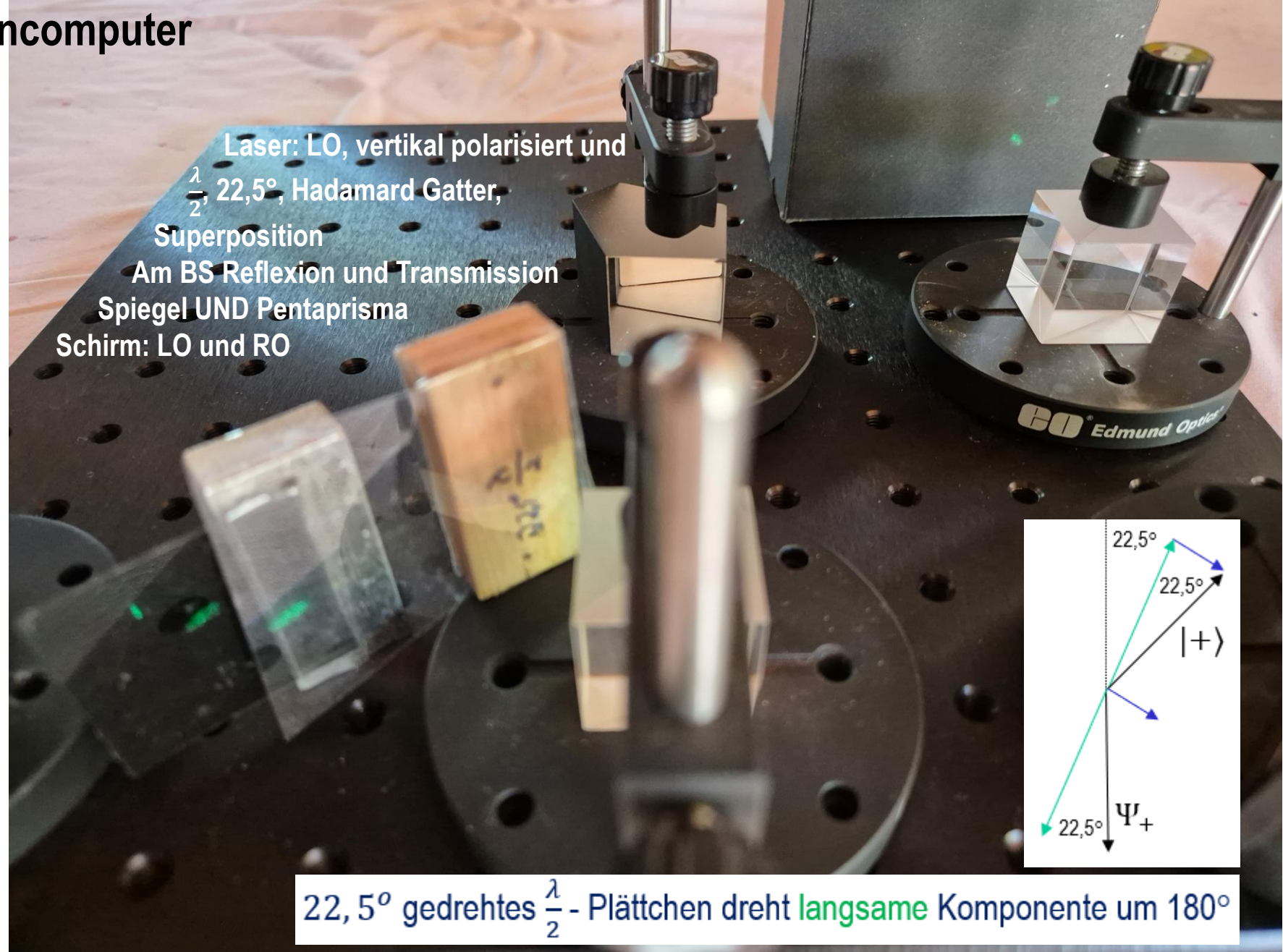
## 4. Wie funktionieren Quantencomputer

- Versuch [2]



# 4. Wie funktionieren Quantencomputer

- **Versuch [2]**
- VORTEIL, beide Wege simultan verarbeitet, **Nichtlokalität [2]**, hohe Rechengeschwindigkeit, z. B. Deutsch Algorithmus



22,5° gedrehtes  $\frac{\lambda}{2}$  - Plättchen dreht **langsame** Komponente um 180°

## 5. Zusammenfassung



- Die drei **Methoden der Erkenntnisgewinnung** wurden an schülergerechten Beispielen entwickelt:
  - **Induktive** Methode: sehr direkt und einfach
  - **Hypothetisch deduktive** Methode: sehr leistungsfähig, sogar bei den teils unerforschten Quantenobjekten
  - **Paradigmenwechsel**: Neuausrichtung der Wissenschaft, oft aufgrund widerlegter alter Konzepte, z. B. Lichtbündel, Teilchenbild, Wellenbild
- **Durchgespielte Erkenntniswege der Physik**
  - Beurteilter Gültigkeitsbereich [2]
  - Messunsicherheit [2], systematische und zufällige Abweichungen
  - Informationsgewinnung aus Experimenten [2]
  - Experimentell initiierte Ideen [2]
  - Modellvorstellung als Hilfsmittel zur Problemlösung und Hypothesenbildung [2]
  - Experimente können widerlegen, nicht beweisen [2]
  - Quantenphysikalische Sichtweisen [2], Quantisierung, Unschärfe, Komplementarität, Nichtlokalität, Hilbertraum
  - Idealisierung kombiniert mit realistischen Gültigkeitsbereichen: Newton-Axiome mit Inertialsystem, Ideales Gas mit Kräftefreiheit, Relativitätstheorie mit GCRS, BCRS, Adäquatem Koordinatensystem
  - Perspektivwechsel, Trägheitskraft
  - Forschungs-, Weltraum, Sport-, Biophysik- oder Transfer-Fragen
  - Gegliederter Erkenntnisweg, konsequente Erweiterung
  - Modellversuch, Konzeptüberprüfung, Deduktion
  - Vier Darstellungsebenen, Wahrnehmung, enaktiv, ikonisch, symbolisch

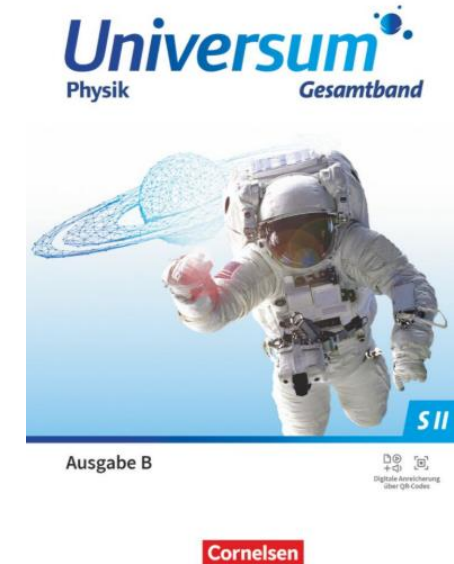
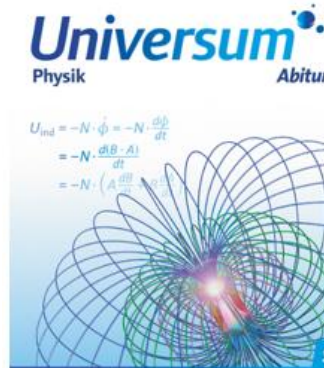
- Lernende machen auf Erkenntniswegen der Physik fundierte **Selbstkompetenzerfahrungen**. Das entwickelt
  - zielführende experimentelle Kompetenz
  - Problemlösekompetenz
  - Entscheidungs-, Beurteilungs- und Bewertungskompetenz
  - Kompetenz zu konsequenter Fortsetzung
- Diese Kompetenzen sind auch außerphysikalisch anwendbar und teils universell.
- Diese Kompetenzen fördern daher die Persönlichkeitsentwicklung.



[9] Vertiefung: [http://hans-otto.carmesin.org/images/script1/24\\_Methoden\\_physikalischer\\_Erkennnisgewinnung.pdf](http://hans-otto.carmesin.org/images/script1/24_Methoden_physikalischer_Erkennnisgewinnung.pdf)

# 6. Universum Physik

- **3 Seiten: Verständliche Themendarstellung**
  - Sanfte Einstiege anhand Lebenswelt
  - Einleuchtende Bilder und Texte regen zu Entdeckungen und Erkenntnisgewinnung an
  - Erklärungen, Merksätze, Aufgaben: Progressiv
- **+ 1 Seite: Aktivierendes Material**
  - Heimversuche
  - Lernmaterial mit Aufgaben: Vielseitig, binnendifferenzierend
- **Methodenseiten**
  - befähigen Schülerinnen & Schüler zu eigenständigem Handeln
  - Binnendifferenzierung
- **Blickpunkte**
  - Highlights, Vernetzung, Zukunftsbedeutung
  - befähigen Schülerinnen & Schüler zu eigenständigem Handeln
  - Binnendifferenzierung
- **Essenzielles kompakt**
  - Auf einen Blick und Check Up
  - Versuche und Schlüsselexperimente
  - Grundwissen
- **Löser** mit didaktischen Hinweisen
- 12-13: 4 Seiten Inhalt + 2 Seiten Material



**Vielen Dank für eure Aufmerksamkeit**

**Cornelsen**

Potenziale entfalten