Erkenntniswege der Physik

Kompetenzentwicklung und Erkenntnisgewinnung in der Sekundarstufe II

Hans-Otto Carmesin, 20.5.2026

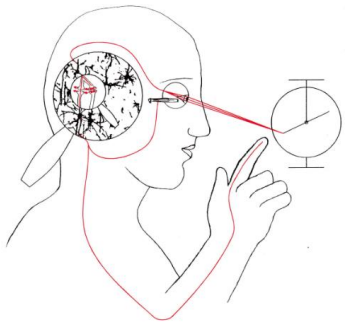
Gymnasium Athenaeum, Studienseminar Stade, Universität Bremen, Universum Physik

Webinar 2026

Cornelsen

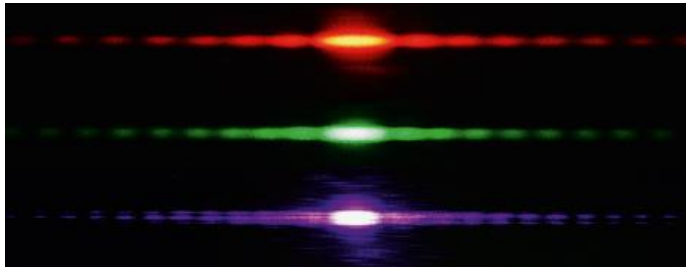
1. Einleitung

Wozu und wie gewinnen wir physikalische Erkenntnisse reflektiert und bewusst?



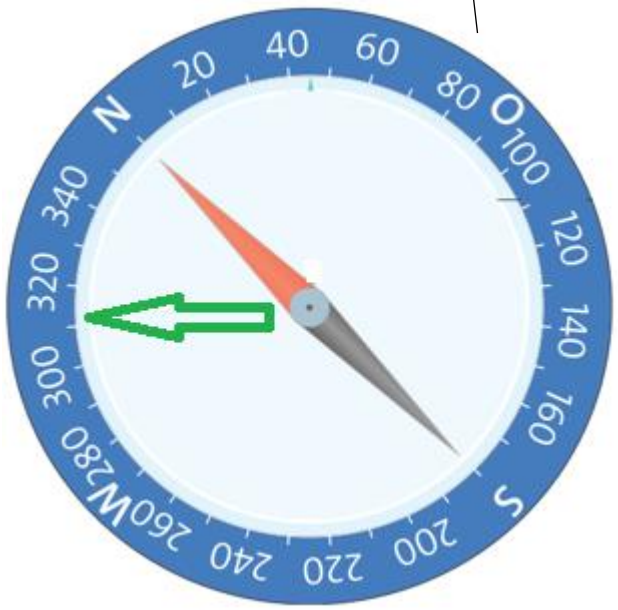
- Wir Menschen erkunden die Natur. Erst mit Spielzeug, später mit Versuchen oder Expeditionen. Stets gewinnen wir physikalische Regeln und Kompetenzen mit Wegen physikalischer Erkenntnisgewinnung.
  - Auf dieser angeborenen **Kompetenz zur Erkundung** bauen wir auf und professionalisieren diese.
  - 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.

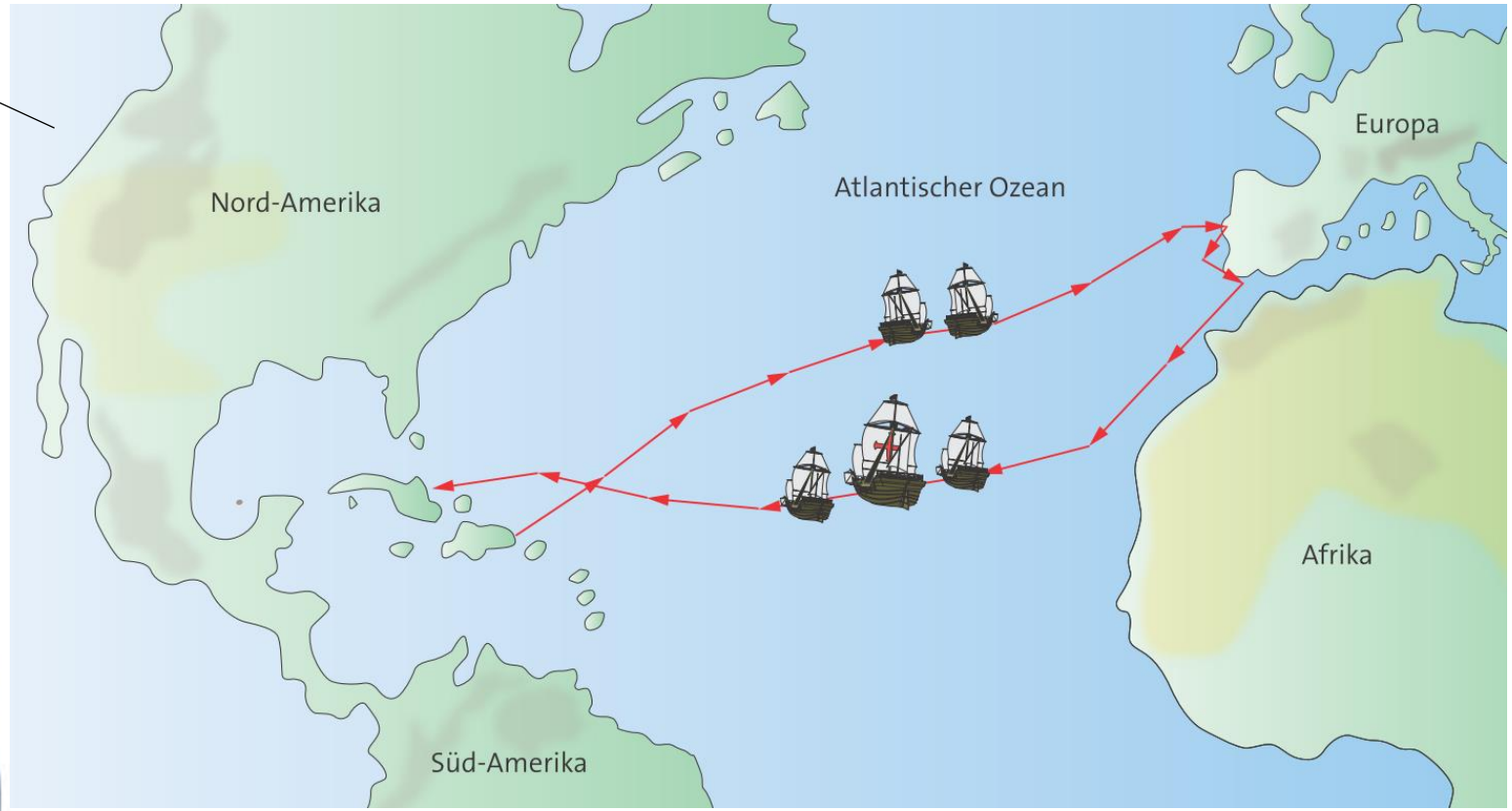


2. Reise als Weg zu physikalischer Erkenntnis

- 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]

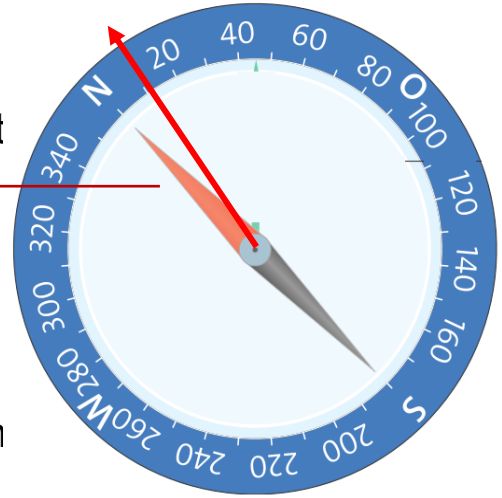


2 Wenn du einen Stabmagneten an einen Faden hängst, dann weist er in Nord-Süd-Richtung.

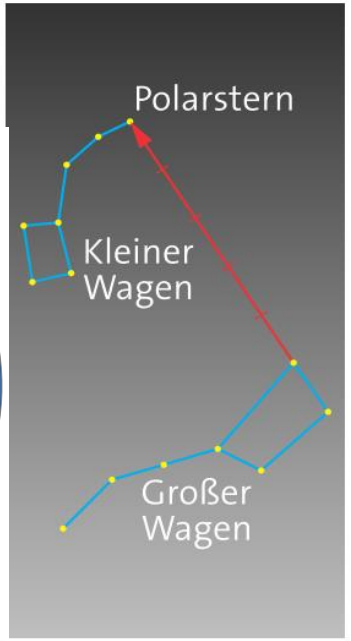


2. Reise als Weg zu physikalischer Erkenntnis

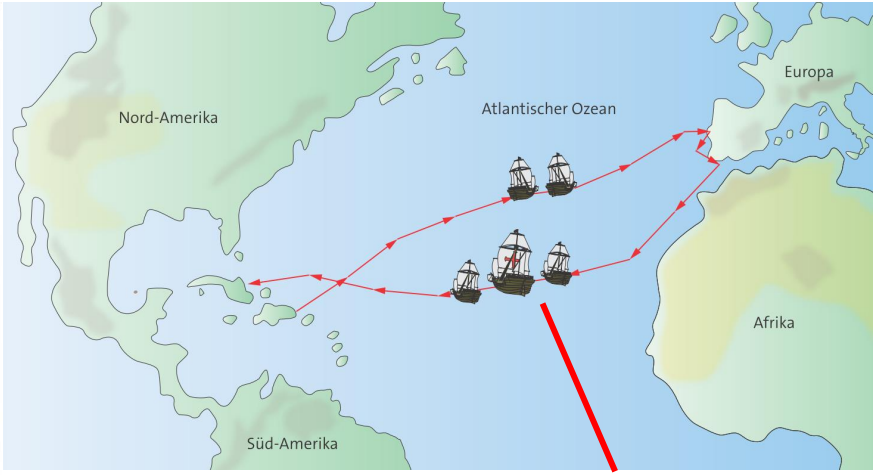
- **Folgerung/Deduktion**: Die Kompassnadel zeigt auch im Atlantik nach Norden.
- **Überprüfungsversuch [1]**: Der Polarstern liegt in **nördliche** Richtung, Kompassnadel: NNW.
- **Hypothese ist widerlegt/falsifiziert**
- **hypothetisch deduktive Methode der Erkenntnisgewinnung [2]**.
- **Beurteilter 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°20‘ (Bogenminuten), also $40' = \frac{40^o}{60} = 0{,}67°$ entfernt vom Himmelsnordpol. **Systematische Fehler** 0,67°.
- **Ablesefehler** $\frac{1}{2}$ Skalenteil: 5°. **Summe** 5,67°.
- **Informationsgewinnung Experiment [2]:** Karte der Missweisung:
  - **Europa**: $0 \pm 5°$ → kaum messbar
  - Entdeckung im **Atlantik**: $-5{,}625°$
  - Mitten im **Atlantik**: $-15°$ oder mehr: messbar



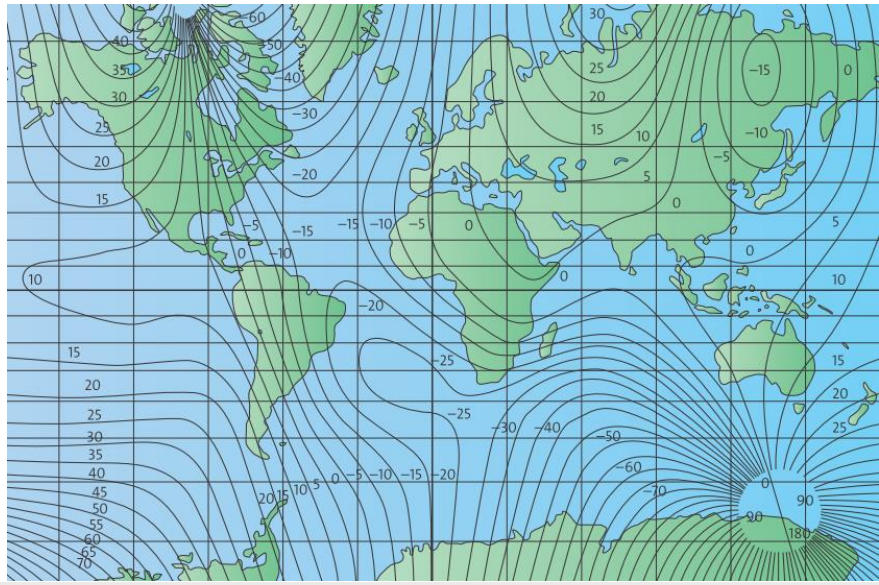
Der Himmelsnordpol ist über dem geografischen Nordpol, auf der Erdachse.



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

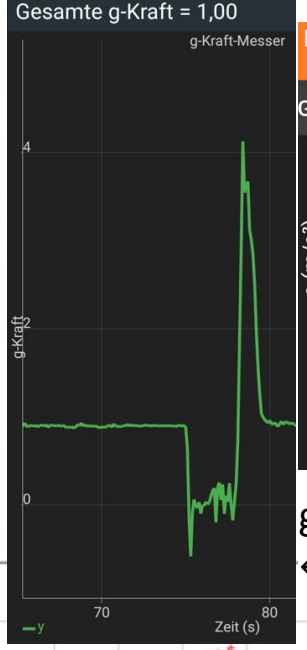


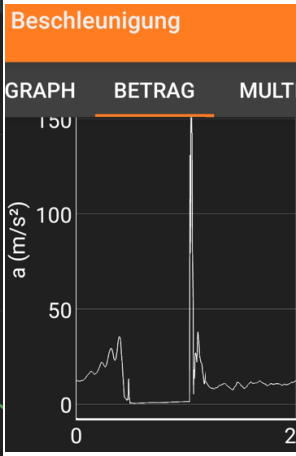
Bordtagebuch, 13.9. 1492: „... An dem Tag, bei Einbruch der Nacht, zeigte die Kompassnadel einen halben Punkt (5,625°) Richtung Nordwest. Am Morgen zeigte sie etwas weiter Richtung Nordwest.“



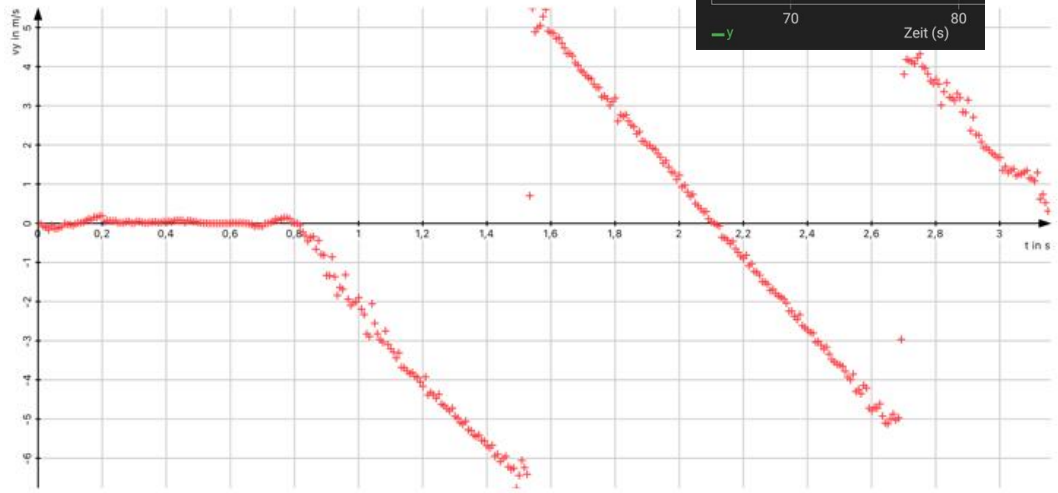
2. Reise zum Heidepark als Weg zu physikalischer Erkenntnis

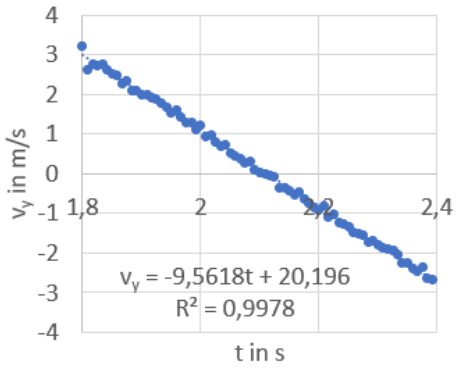
- **Forschungsfrage:** Wie schnell fällt man beim Freifallturm auf 39 m (Betreiber) Fallstrecke?
- **Modellversuch [2]**:
  - Messung mit Slow Motion Video (120 fps), Videoanalyse Viana und Tabellenkalkulation: $v = a \cdot t$ mit $a = -9{,}562\,\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$
  - Literaturwert $|a| = 9{,}81\,\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \coloneqq g$ 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 $t_{Fall} = 2{,}9\ \text{s}$
  - $v = g \cdot t = 9{,}81\,\frac{m}{s^2} \cdot 2{,}9\ \text{s} = 28{,}45\,\frac{m}{s} = 102{,}4\,\frac{km}{h}$
  - Betreiberangabe: $v = 98{,}3\,\frac{\text{km}}{\text{h}}$, $\frac{\Delta v}{v} = 4{,}2\%$ passt gut





geworfen ↑
←Heidepark



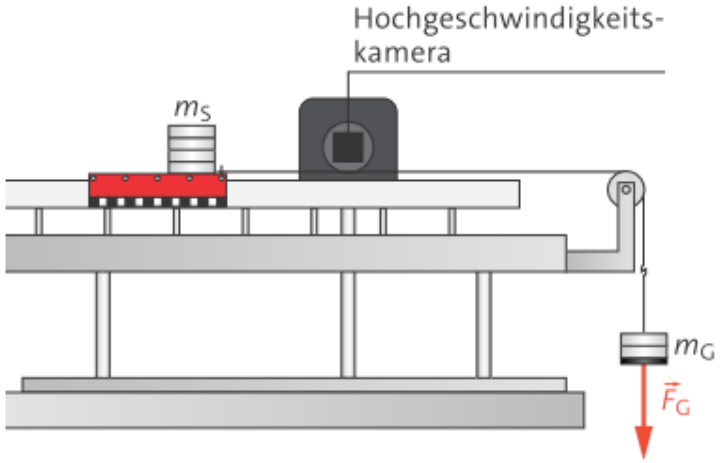


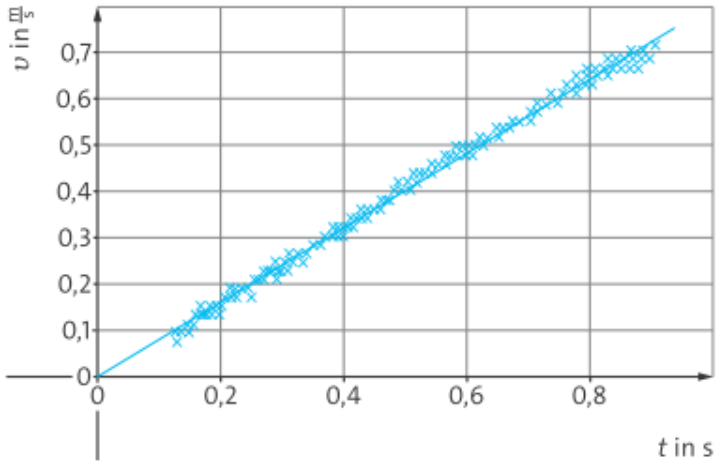
Selbstkompetenzerfahrung mit Kopf und Sinnen: **Vier Darstellungsebenen** von Wissen und Erkenntnis: Wahrnehmung (Schwerelosigkeit, Gleichgewichtssinn, Innenohr), enaktiv (analog und digital), ikonisch, symbolisch.

[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: $F = 600\,000\ \mathrm{N}$
  - Startmasse: $m = 240\,000\ \mathrm{kg}$
  - Nötige Startgeschwindigkeit: $v = 300\,\frac{\mathrm{km}}{\mathrm{s}}$
  - Startbahn in Gibraltar: $L = 1777\ \mathrm{m}$
- **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 $\boldsymbol{F = m \cdot a}$ mit $1\mathrm{N} = 1\,\frac{\mathrm{kg \cdot m}}{\mathrm{s}^2}$
  - **Grundgleichung der Mechanik** durch induktive Methode der Erkenntnisgewinnung: Verallgemeinerung von Messungen
- **Problemlösung [2]**
  - $a = \frac{F}{m} = 2{,}5\,\frac{m}{s^2}$
  - $v = \frac{300}{3{,}6}\frac{m}{s} = 83{,}3\,\frac{m}{s}$
  - $t = \frac{v}{a} = 33{,}3\ \mathrm{s}$
  - $s = \frac{1}{2}\,at^2 = 1386\ \mathrm{m}$. Das genügt.
- Noch unklar: Gültigkeitsbereich [2] =?





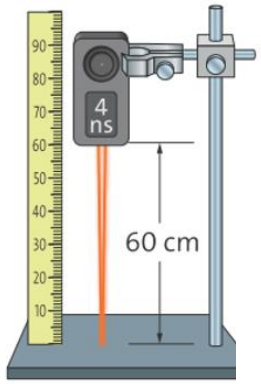
Oder Perspektivwechsel ins rotierende System mit Zentrifugalkraft/Trägheitskraft

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].

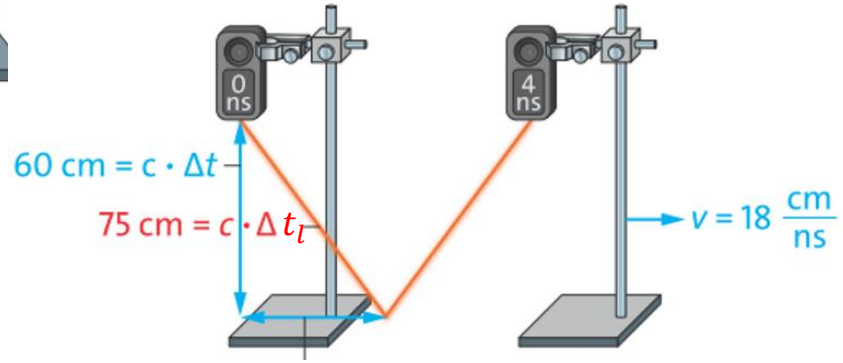
2. Zeitreise als Weg zu physikalischer Erkenntnis

1 Zeitreise mit dem Spaceshuttle

- **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: $(c \cdot \Delta t_l)^2 = \left(c \cdot \Delta t_p\right)^2 + (v \cdot \Delta t_l)^2$
  - Daher: $\Delta t_p = \Delta t_l \cdot \sqrt{1 - \frac{v_{p,l}^2}{c^2}}$ (Wirkung / Ursache), $v_{\mathrm{p,l}}$ ist v des Piloten relativ zum Labor
  - 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 $\Delta t_{\mathrm{p}} = 6a$ mit einer Geschwindigkeit v. Deike bleibt bei der Erde bei unwesentlicher Gravitation. Bei der Rückkehr soll Deike schon $\Delta t_{\mathrm{l}} = 10a$ gealtert sein. Wie groß muss dazu v sein?
- Lösung: GKZ |: Δt_l | ↑ 2 → $\left(\frac{\Delta t_p}{\Delta t_l}\right)^2 = 1 - \frac{v^2}{c^2} = 0.36 \rightarrow v = \mathbf{0.8 \cdot c}$



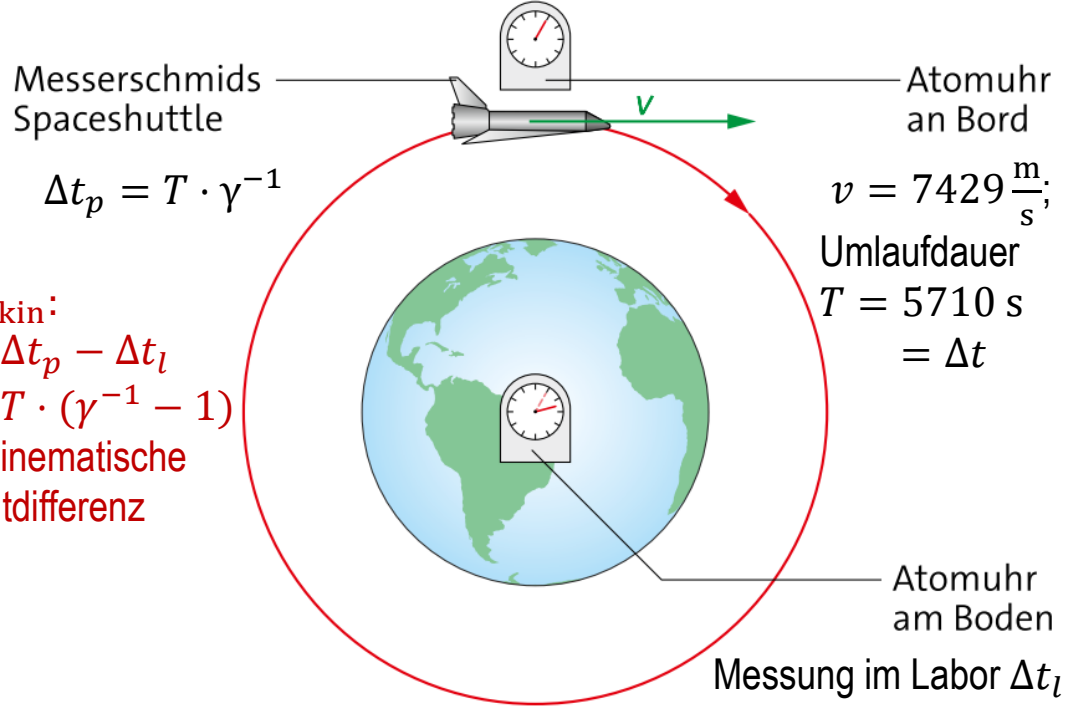
[7] Burisch, C., Carmesin, H.-O., Emse, A., Kienle, R., Konrad, U., Küblbeck, J., Pardall, C.-J., Piehler, M., Pröhl, I. K., Schäfer, J., Wienbruch, U. und Wilhelm, S. (2025): Universum Physik, Gesamtband Ausgabe B, Berlin: Cornelsen.

[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: $\delta t_{\mathrm{kin,obs}} = -1.75\ \mu s$ → 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].
- **Selbstkompetenzerfahrung** zur Nutzung von **Idealisierung kombiniert mit realistischem Gültigkeitsbereich**.



2 Die Zeitreise von Ernst Messerschmid in einer Erdumlaufbahn

[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.

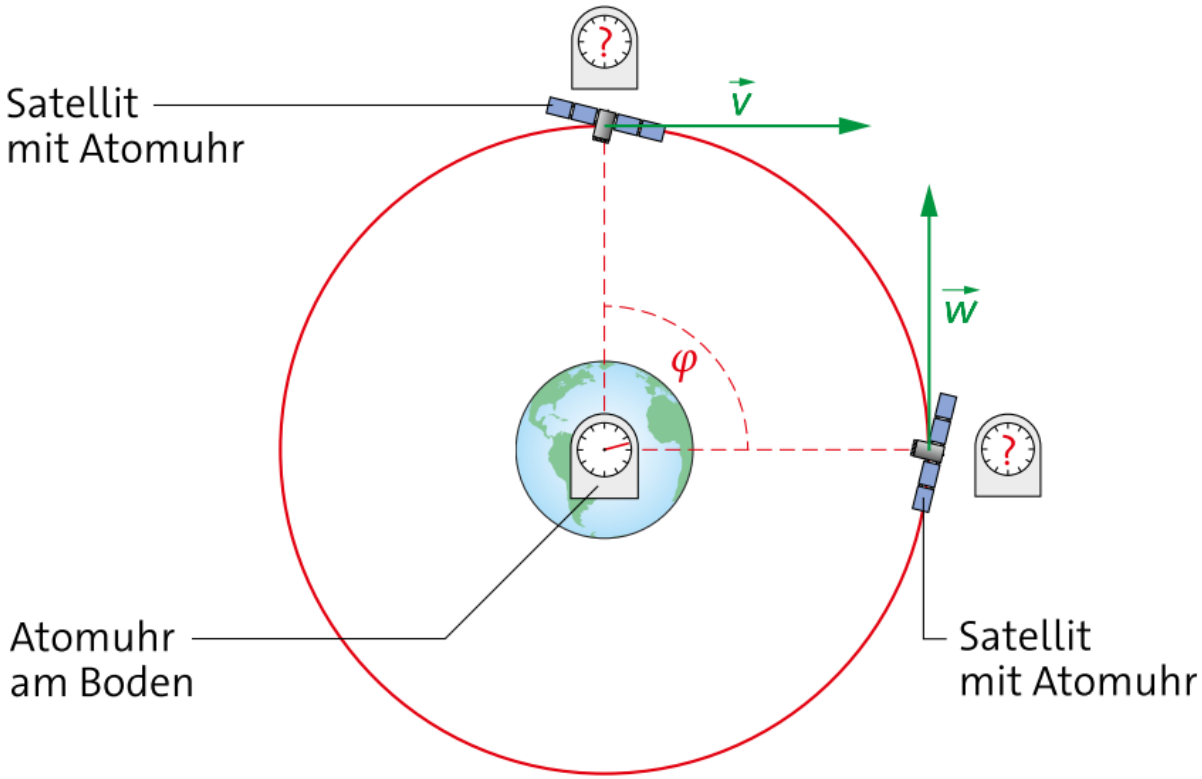
[11] Relativität wurde postuliert im *„[A] Relativitätsprinzip“ (Gleichförmig zueinander bewegte Systeme seien äquivalent,* s. Einstein 1905*), und im „[B] Prinzip der Kovarianz“ („Es bleibt daher nichts anderes übrig, als alle Koordinatensysteme als für die Naturbeschreibung prinzipiell gleichberechtigt 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 17th 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 & implications to physics learning. In: Physics Teacher Education Beyond 2000. Amsterdam: Elsevier.

2. Zeitreise als Weg zu physikalischer Erkenntnis

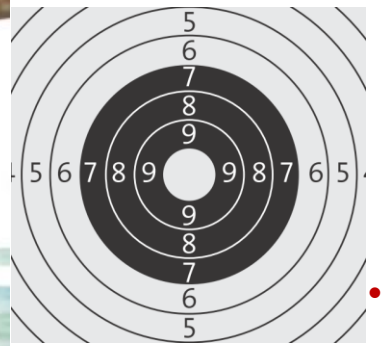
- Was ist das Bezugssystem zur Zeitdilatation?
  - Viele Satelliten zeigen: (induktive Methode)
  - Bei der Erde liefert die Geschwindigkeit relativ zum Erdmittelpunkt δt_{kin}.
  - Bei der Sonne liefert die Geschwindigkeit rel. zum Sonnenmittelpunkt δt_{kin}.
  - Die International Astronomische Union (IAU) bestätigt dies [14]:
  - das Geocentric Celestial Reference System (GCRS) für erdnahe Raumfahrt,
  - das Barycentric (ca. heliozentrisch) Celestial Reference System (BCRS) für Raumfahrt im Planetensystem.
  - Verallgemeinerung:
  - Die IAU ruft zur Suche Adäquater Koordinatensysteme auf [14]
  - Das Signal für δt_{kin} erhält die Uhr über das Gravitationsfeld, denn andere Felder/Kräfte sind durch ihr Fehlen falsifiziert [15,16] (hypothetisch deduktive Methode)
- **Selbstkompetenzerfahrung** zur Ursachenforschung und Verallgemeinerung.

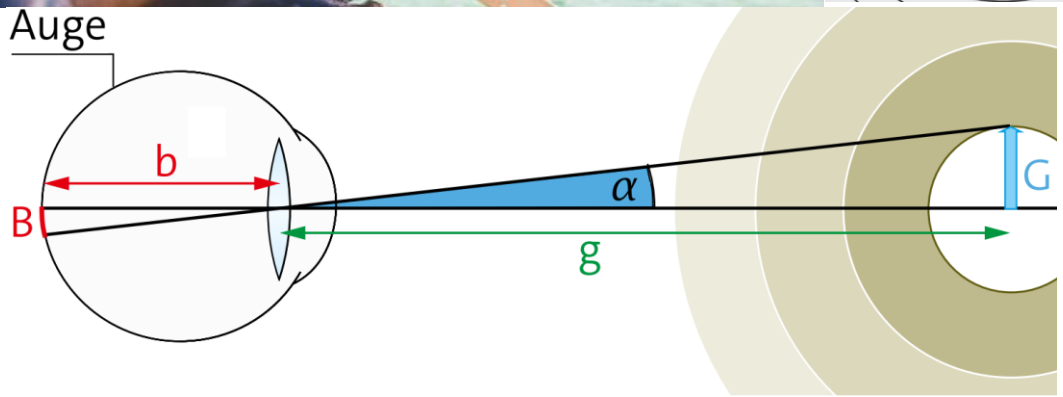


3 Die Zeitreisen der Satelliten des Navigationssystems GPS

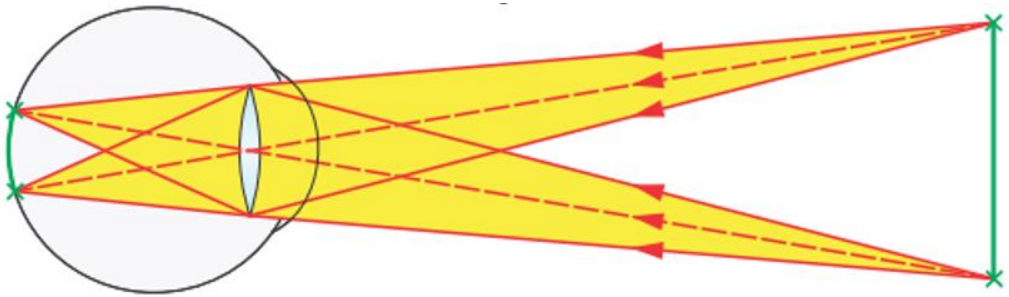
[14] Soffel, M. et al. (2003): The IAU 2000 Resolutions for Astrometry, Celestial Mechanics, and Metrology in the relativistic Framework: Explanatory Supplement. The Astronomical Journal, 126, pp 2687-2706. IAU: International Astronomical Union.
[15] Carmesin, H.-O. (2025): Construction of a Physically Adequate Coordinate System . Journal of Geosciences, Earth and Planetary Systems, 1(1), pages 1-12.
[16] Carmesin, H.-O. (2026): Simultaneity at Earth in the Planetary System and in the Universe. Journal of Geosciences, Earth and Planetary Systems, 3, accepted.
[17] Carmesin, H.-O. (2026): A Fundamental Solution of the Hubble Tension, Foundations, 6, 7, p. 1-66.
[18] Carmesin, H.-O. (2026): Natural Coordinates of Space and Time, Implied Quanta and Gravity and Structuring Applications in Geoinformatics, Int. J. of Appl. Phys., 11, p. 1-39.

3. Wie genau können wir sehen?



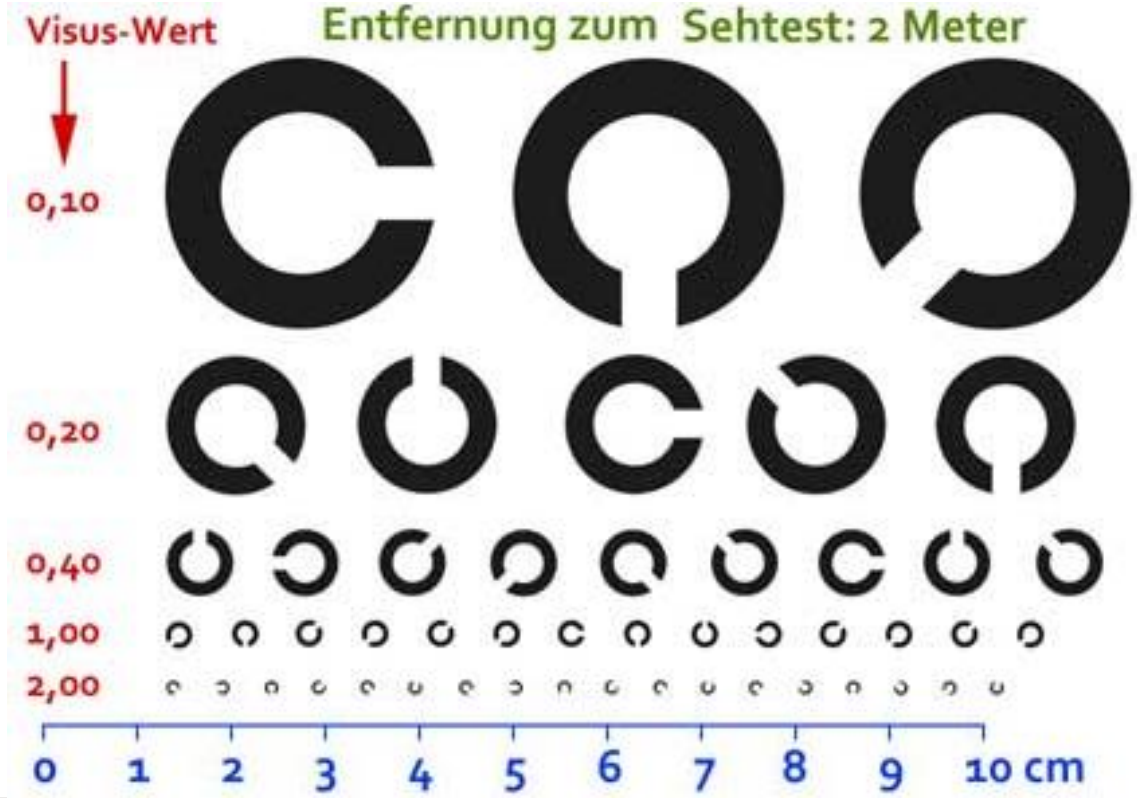


Modell [2] Kamera/Lochkamera: Lichtbündel erzeugen Bildpunkte



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

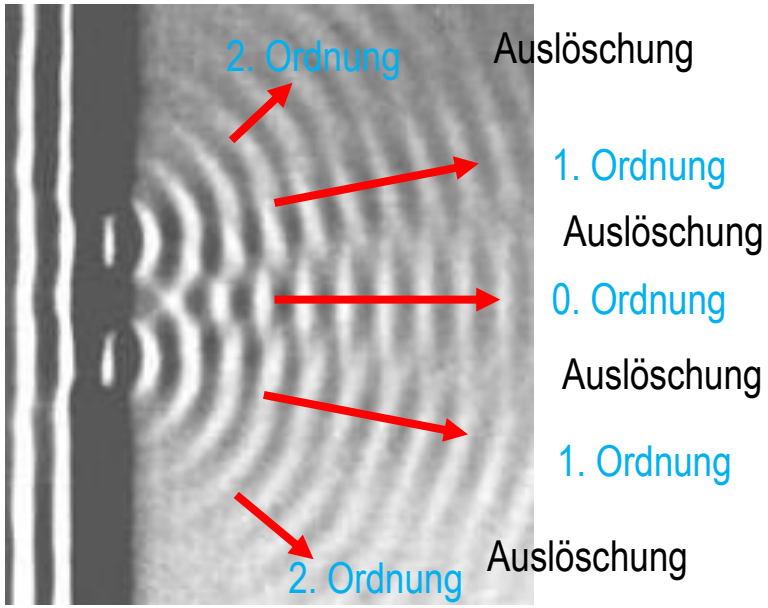
- Kontext [1]: Sehen mit bloßem Auge
- **Sportfrage**: Kann sie $G = 2{,}5$ mm in $g = 50$ m scharf sehen?
  - **Sehwinkel:** $\tan\alpha = \frac{r}{g} = \frac{G}{g} = \frac{B}{b} = \frac{2{,}5\ \text{mm}}{50\ \text{m}} = 5 \cdot 10^{-4}$
  - Ring: $2\alpha = 0{,}0057^o = 0{,}342'$
  - normalsichtig: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

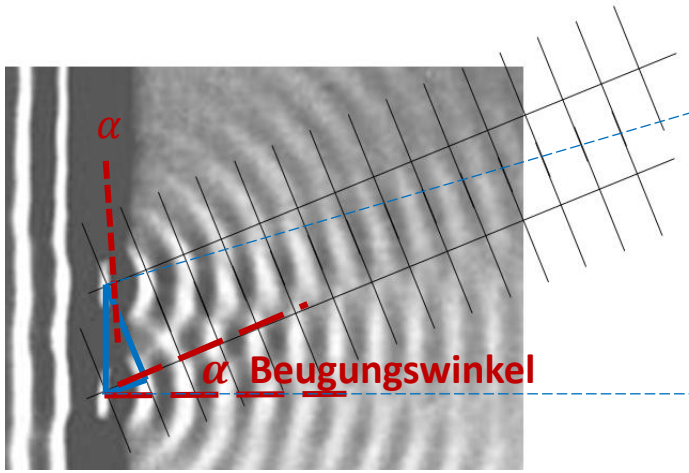


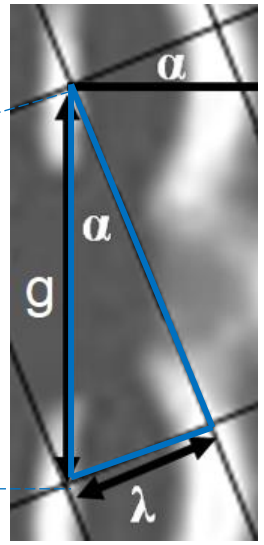
3. Wie genau trifft Licht ins Auge?

- **Transferfrage**: Warum entstehen im Wasser Wellenbündel wie Lichtbündel [7]?
- Versuch zum Initiieren von Idee/Hypothese [2]:
  - Wellenerregende Beine entsprechen Doppelspalt
  - Überprüfungsversuch und deduzierte/gefolgerte Berechnung
- **Überlagerung** von Wellen gleicher Frequenz $f = \frac{c}{\lambda}$ heißt **Interferenz**.
- **Beugungswinkel** α via Dreieck $\sin(\alpha) = \frac{n \cdot \lambda}{g}$ mit **Wellenlänge** λ und **Beugungsordnung** n
- Messung: $g = 3\lambda$; $\alpha_1 = 21°$ und $\alpha_2 = 43°$; Berechnung: $\alpha_1 = 19{,}5°$ und $\alpha_2 = 41{,}8°$ → 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







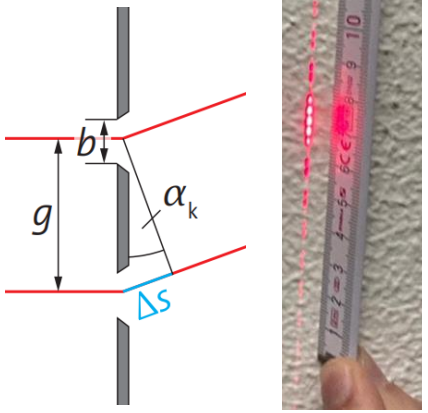
Konstruktive Interferenz entsteht durch Überlagerung von Wellenbergen.
Im Nahfeld entsteht ein Muster aus Elementarwellen.
Im Fernfeld entstehen strahlenförmige Wellenbündel.

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.

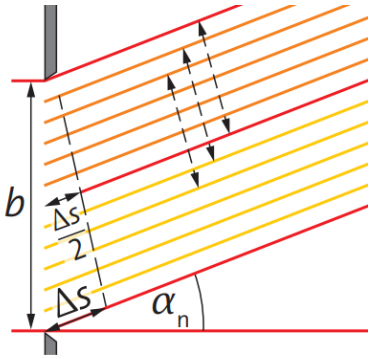
$$\lambda = 630\ \text{nm}$$

Beugung am Doppelspalt



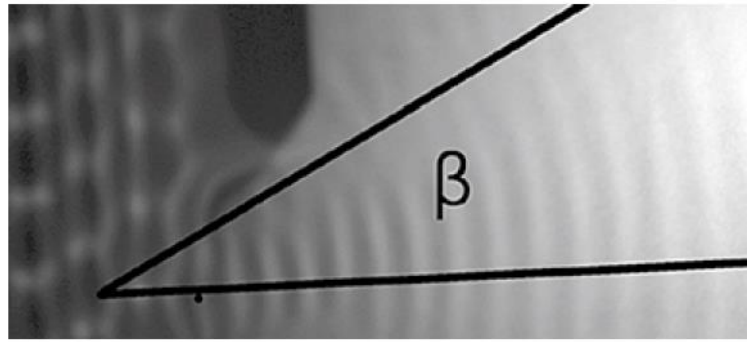
Vergleich ↓ Einhüllende

Beugung am Einzelspalt



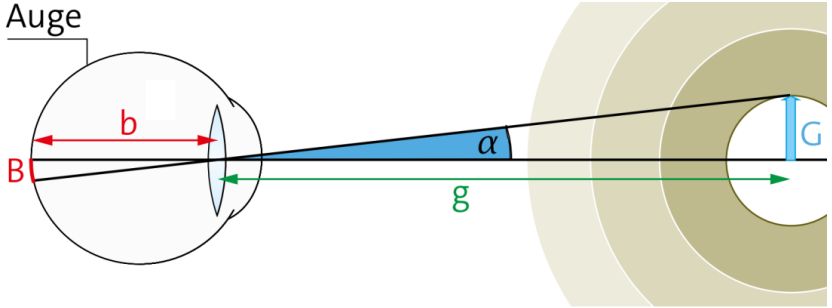
Destruktive Interferenz an einem Spalt

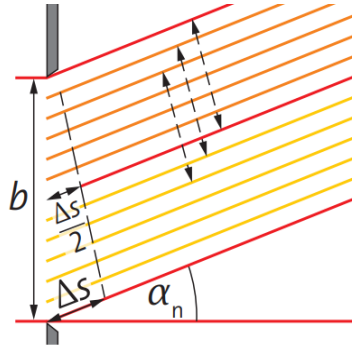
Gleiche Methode der **Erkenntnisgewinnung** in Didaktik, Erkenntnistheorie, Naturwissenschaft und Technik: Induktive sowie hypothetisch deduktive Methode und Paradigmenwechsel



4 Beugungswinkel β des ersten Minimums

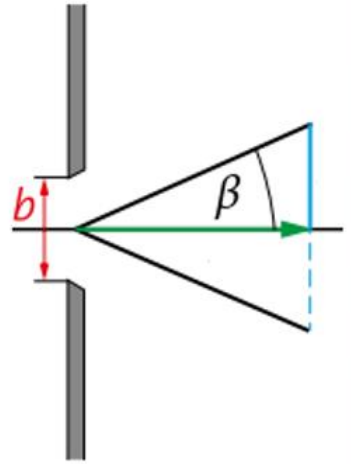
3. Wie genau trifft Licht ins Auge?

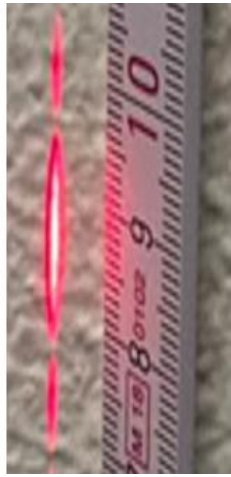


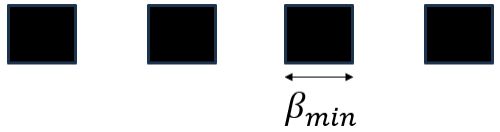


Destruktive Interferenz an einem Spalt

- **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: $\sin(\beta) = \frac{\lambda}{b} \rightarrow \boldsymbol{2\beta = 2 \cdot arcsin\left(\frac{\lambda}{b}\right)} = 2 \cdot \arcsin\left(\frac{500\ \text{nm}}{5\ \text{mm}}\right) = 0{,}0115^o = 0{,}69'$.
  - $2\beta_{min} = 2 \cdot \arcsin\left(\frac{400\ \text{nm}}{12\ \text{mm}}\right) = 0{,}23' = \text{Beugungsgrenze} < 0{,}342' = 2\beta_{\text{Zentrum Sportschießen}}$
  - $2\beta_{max} = 2 \cdot \arcsin\left(\frac{700\ \text{nm}}{1.5\ \text{mm}}\right) = 3{,}21'$
  - Erste Lösung: Lichtwellen ermöglichen das Zentrum beim Sportschießen scharf zu sehen.
  - Mögliche Visuswerte $\frac{1'}{2\beta} = \boldsymbol{V = \frac{1'}{2\ \arcsin\left(\frac{\lambda}{b}\right)}} \in [0{,}31; 4{,}35]$ verteilen sich um den Normalvisus $V = 1$.
  - Bei Linienstimuli erreicht der Keilschwanzadler $\boldsymbol{\beta_{min} = 0{,}21'}$ und der Turmfalke $\boldsymbol{\beta_{min} = 0{,}19'}$ [19].
- **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?





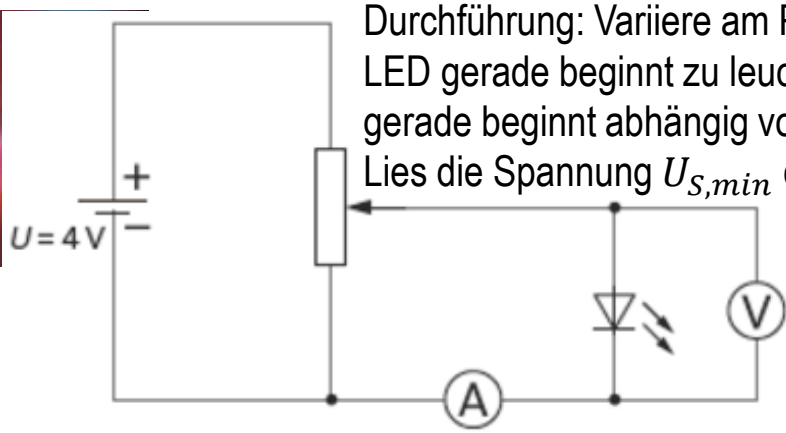


[19] Potier, S. (2016): Visual abilities in two raptors with different ecology. J. of experimental biology, 219, p. 2639-2649.

3. Wie genau trifft Licht ins Auge?

- **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 → Welle → Photon → Quantenobjekt.
- Quantenobjekte öffnen den Weg zu zukunftsweisenden Quantentechnologien wie Quantenkryptographie und Quantencomputer [7].
- **Konzeptüberprüfung**: Wie erklären Photonen die Sehschärfe?

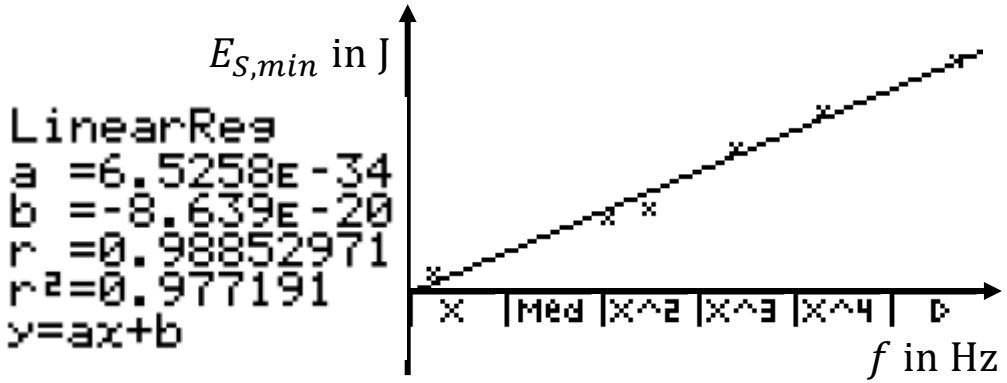
Bemerkenswert: Viele Fragen über Quanten sind ungelöst, aber die Hypothese Licht sei eine Welle ist eindeutig widerlegt. Das leistet die hypothetisch deduktive Methode sehr gut.



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 λ.

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

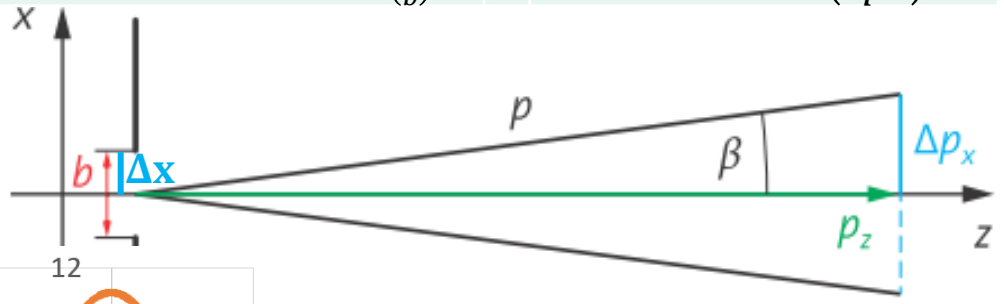
λ in nm	f in 10^{14} Hz	$U_{S,min}$ in V	$E_{S,min}$ in 10^{-19} J
405	7,40	2,5	4
470	6,38	2,1	3,36
525	5,71	1,85	2,96
590	5,08	1,4	2,24
630	4,76	1,33	2,128
875	3,43	0,95	1,52

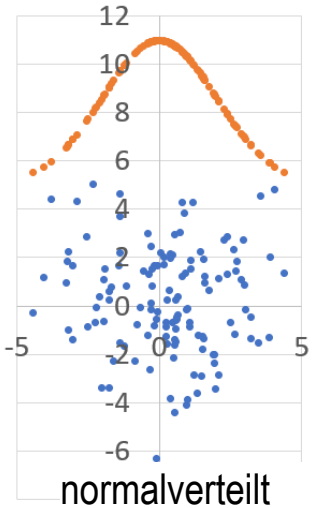


3. Wie genau trifft Licht ins Auge?

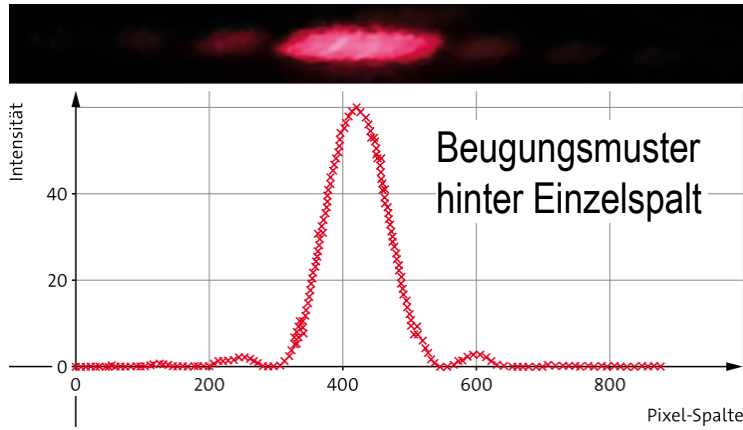
- **Konzeptüberprüfung**: Wie erklären Photonen die Sehschärfe, V?
- Modell [2]: Licht kommt von Gegenstand mit $G = 0$, trifft in Pupille als Einzelspalt und wird gebeugt zu Bildgröße $B > 0$. Herleitung durch Transformation:
  - → $\sin(\beta) = \frac{\lambda}{b} = \frac{\Delta p_x}{p}$
  - Relativitätstheorie: $E = p \cdot c \rightarrow p \cdot c = h \cdot f \rightarrow \boldsymbol{p} = \frac{h \cdot f}{c} = \frac{\boldsymbol{h}}{\boldsymbol{\lambda}}$
  - Einsetzen → $\frac{\lambda}{2 \cdot \Delta x} = \frac{\Delta p_x \cdot \lambda}{h} \rightarrow \Delta p_x \cdot \Delta x = \frac{h}{2}$
  - 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 gefolgert.
- Unbestimmtheitsrelation/Unschärferelation [20], 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 beschriebt 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. → **Selbstwirksamkeitserfahrung**

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



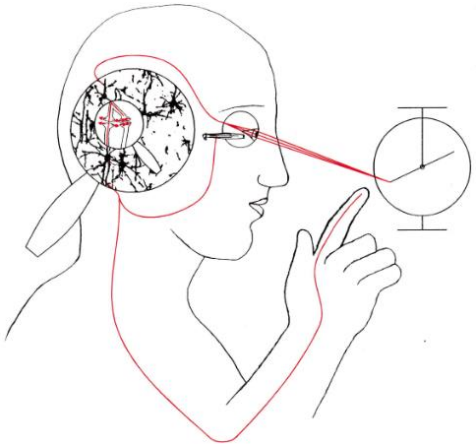


normalverteilt

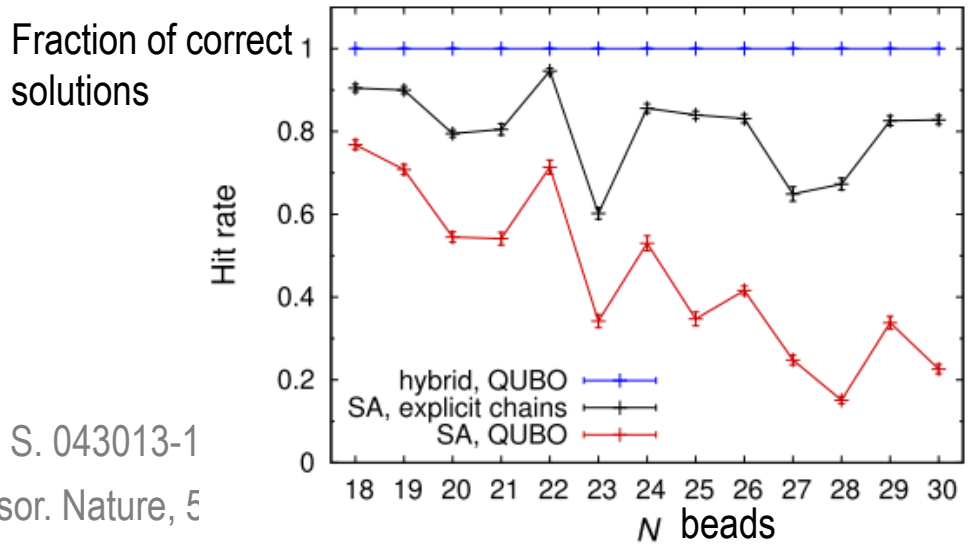


[20] Passon, O. und Grebe-Ellis, J. (2015) Was besagt die Heisenbergsche Unschärferelation? Praxis der Naturwissenschaften – Physik in der Schule, 64, S. 44-49.

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 Billiarden mal schneller als ein herkömmlicher Computer [22, 23].
  - Durch Superposition, Verschränkung, reichhaltige Datendarstellung im Qubit, universelle Quantengatter, Transfer von Algorithmen
  - Reales Problem Proteinfaltung:
  - Simulation mit 5000 Qubits [21]: 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 Quantenkryprographie und Quantencomputer.
- **Selbstkompetenzerfahrung**, Versuche [2]: Lernende interessieren sich für Experimente mit Quantencomputern.
- Spannende Erkenntnisse [2] zur Teleportation mit Quantengattern interessieren Lernende.



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

[22] Arute, Frank et al. (2019): Quantum supremacy using a programmable superconducting processor. Nature, 5

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

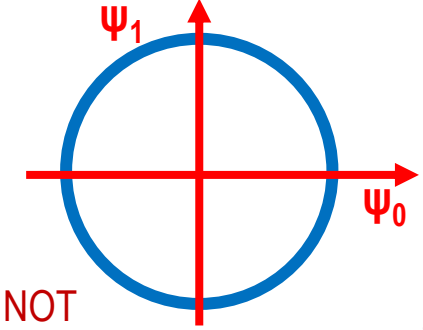
Madsen, Lars S. et al. (2022): Quantum computational advantage with a programmable photonic processor. Nature, 606, S. 75-81.

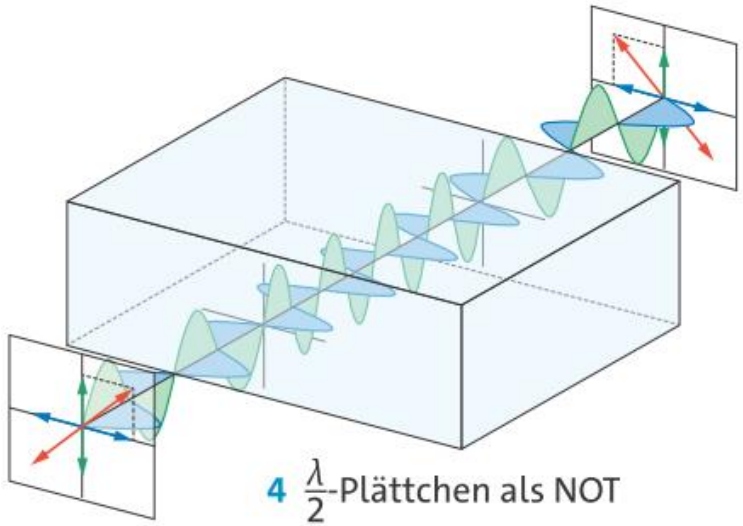
[23] Carmesin, H.-O. (1996): Neuronal Adaptation Theory. Frankfurt, Peter Lang Europäischer Verlag der Wissenschaften.

[24] Schöneberg, Philipp and Carmesin, Hans-Otto and Gustke, Phil and Ruder, Jannes (2024): Experimental and Theoretical Analysis of Quantum Computing, PhyDid B, FU Berlin.

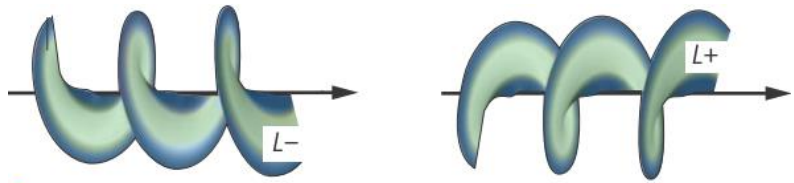
4. Wie funktionieren Quantencomputer

- **Versuch [2]** RO LO
- 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].

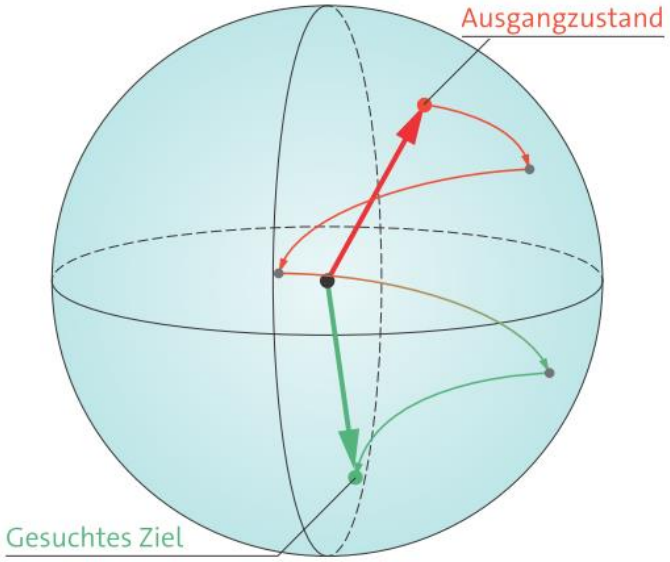


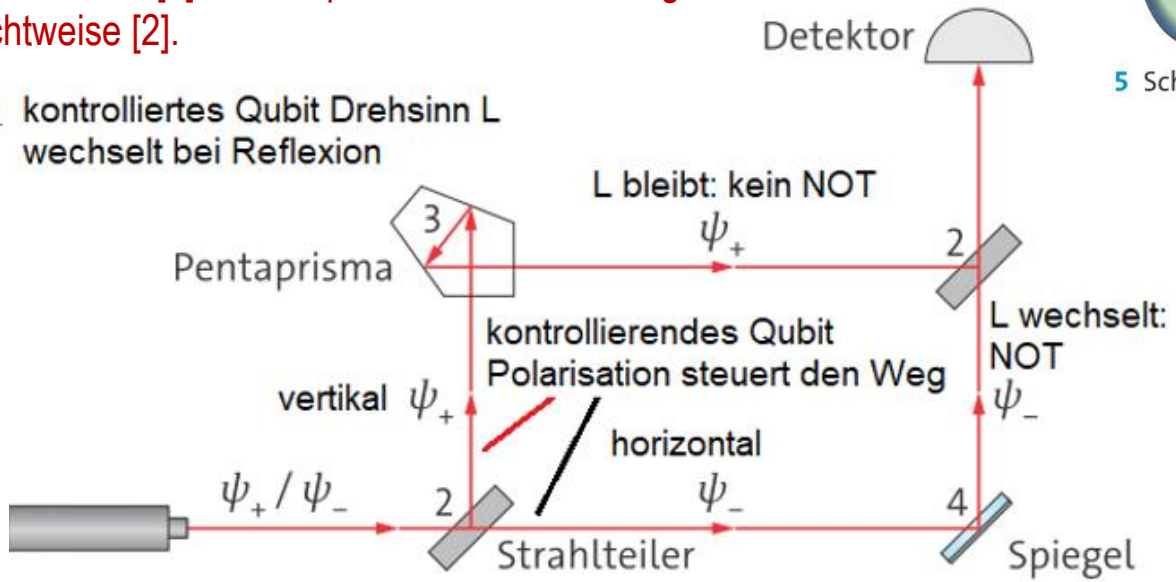


4 $\frac{\lambda}{2}$-Plättchen als NOT



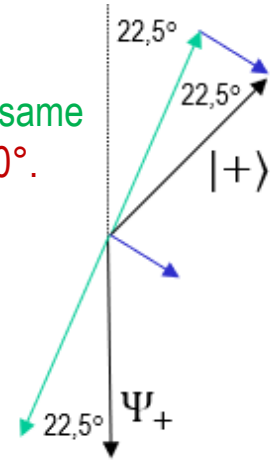
5 Schraubenförmige Wellenfronten mit Drehsinnzahl L+/L−





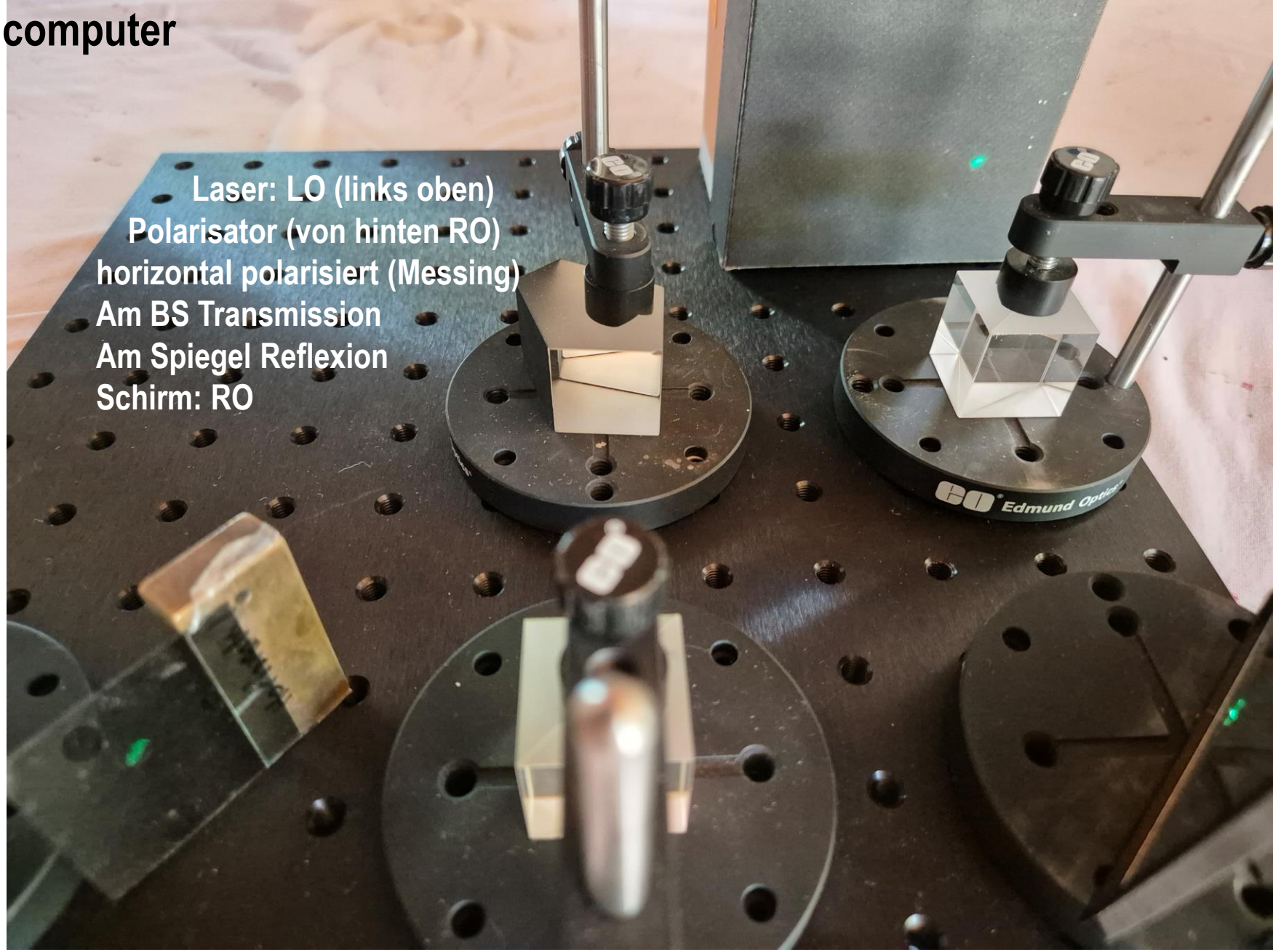
6 Modifiziertes Mach-Zehnder-Interferometer als CNOT-Gatter

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



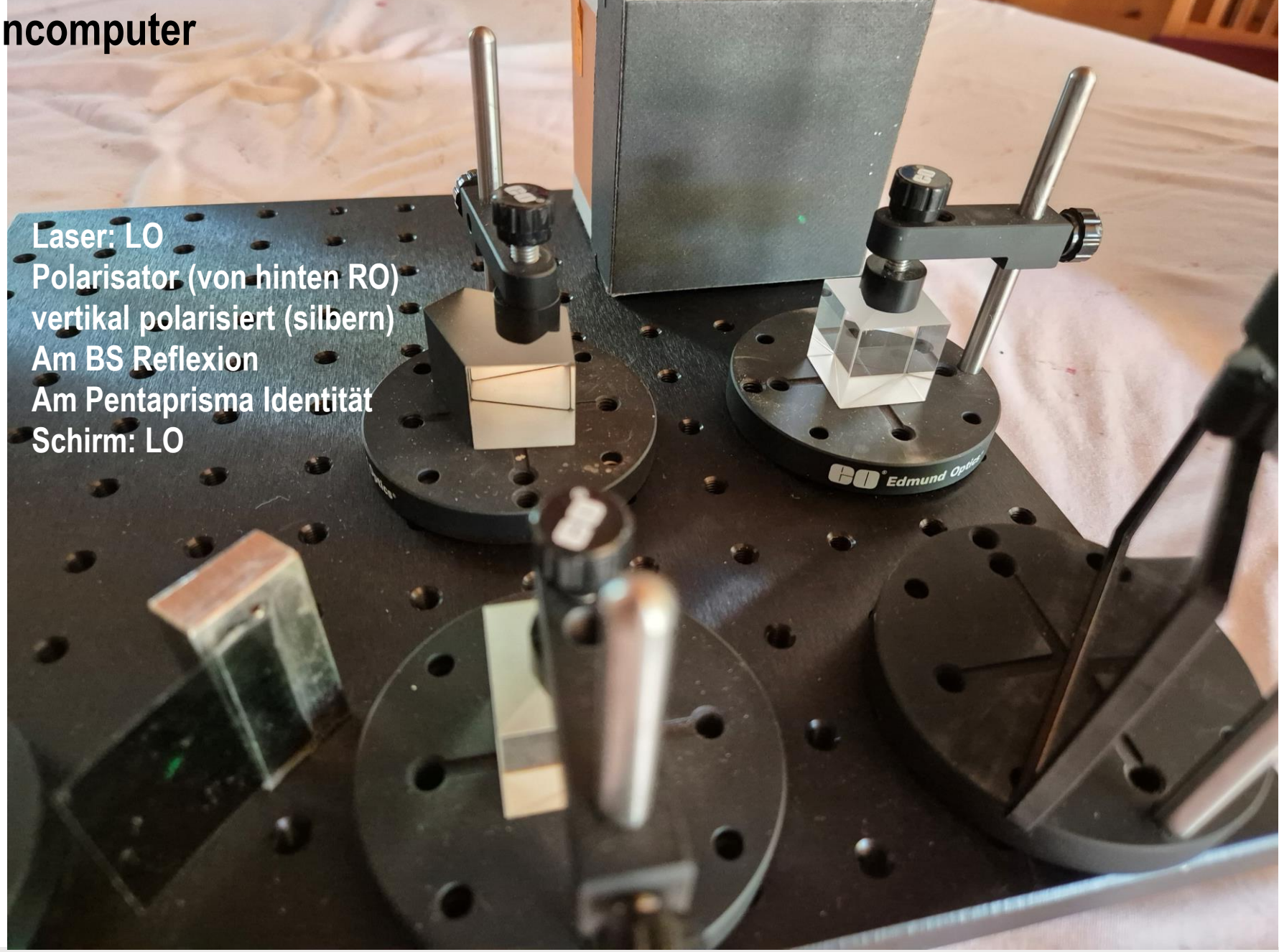
4. Wie funktionieren Quantencomputer

- **Versuch [2]**



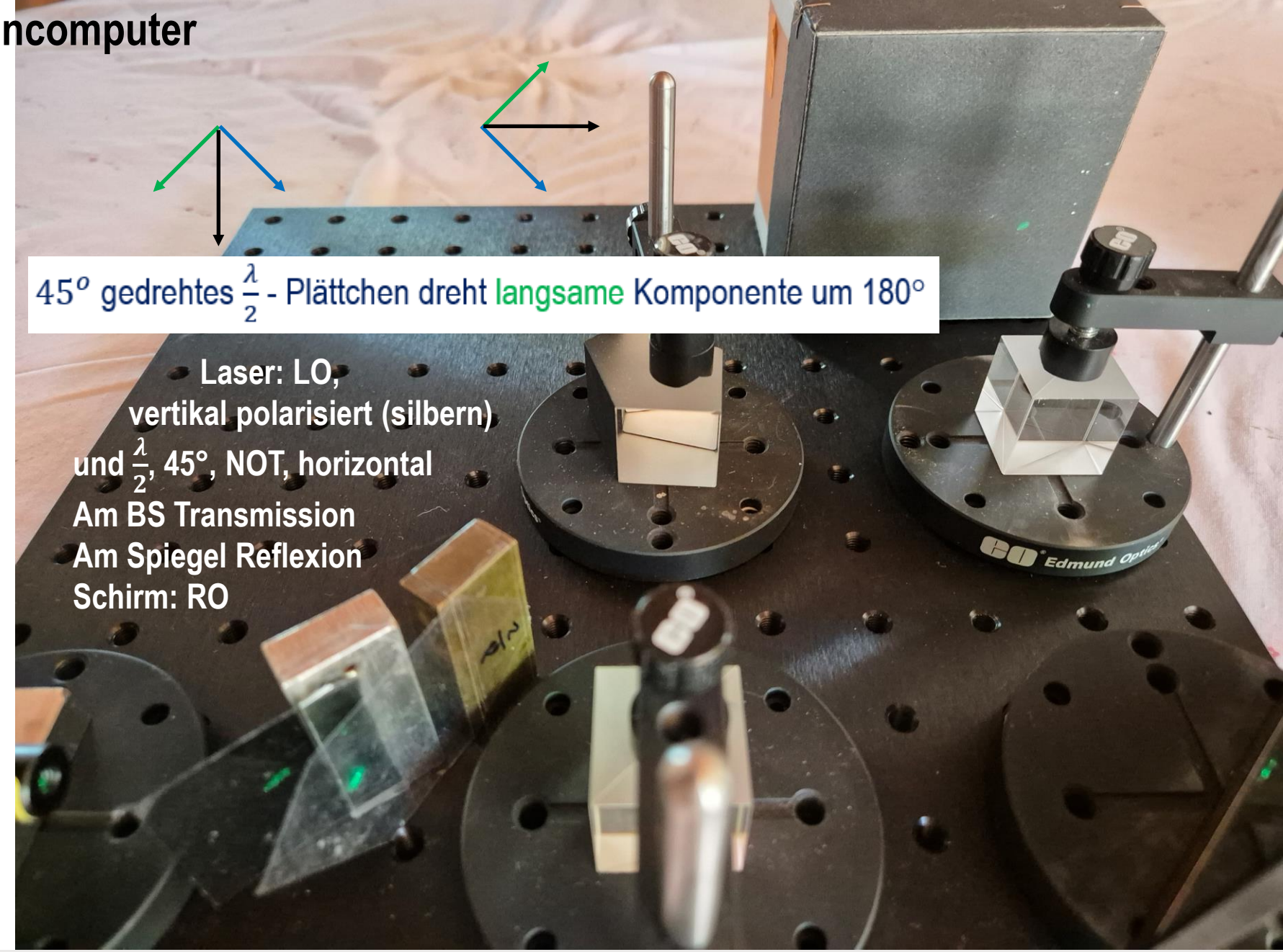
4. Wie funktionieren Quantencomputer

- **Versuch [2]**



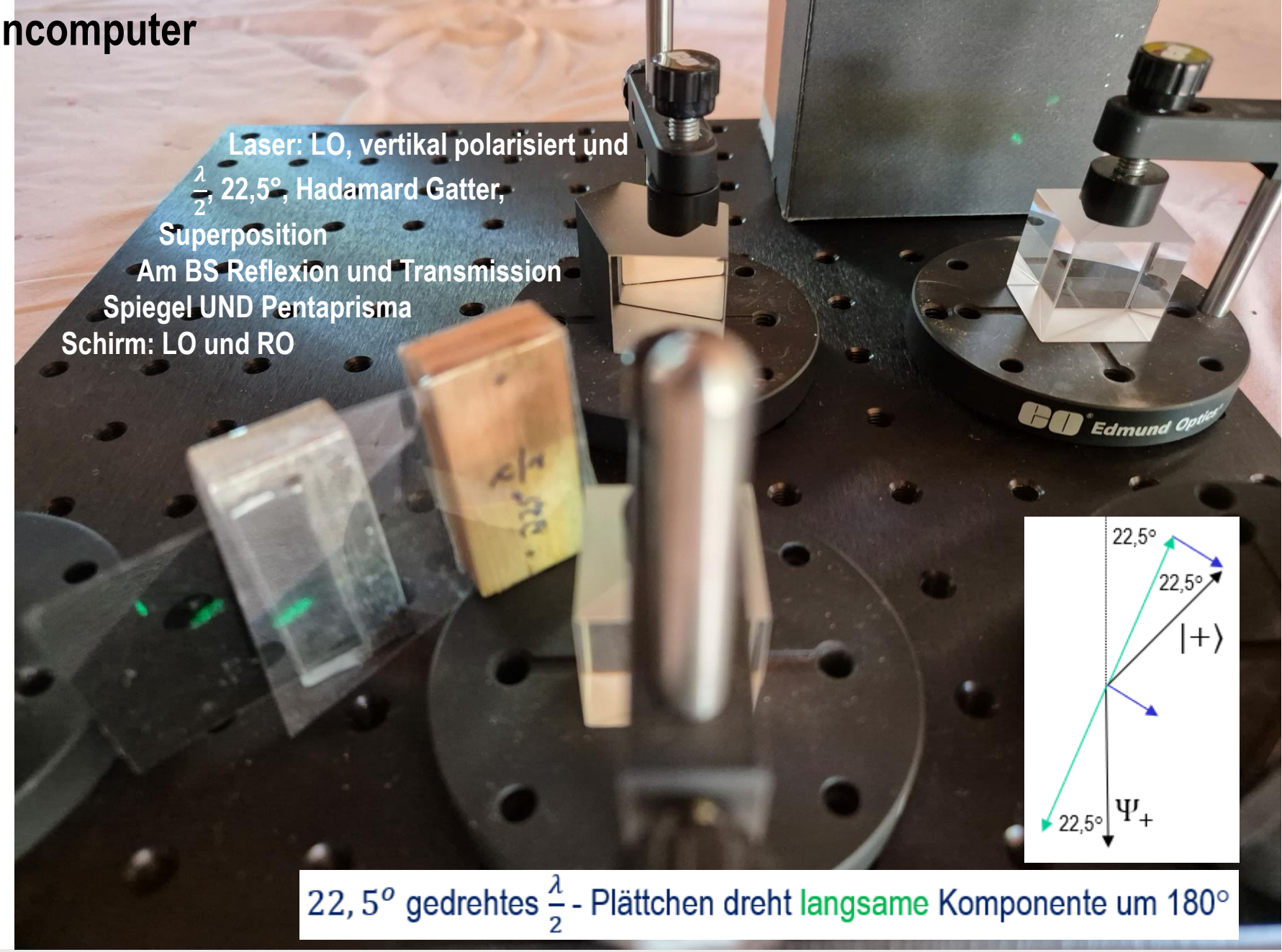
4. Wie funktionieren Quantencomputer

- **Versuch [2]**



4. Wie funktionieren Quantencomputer

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



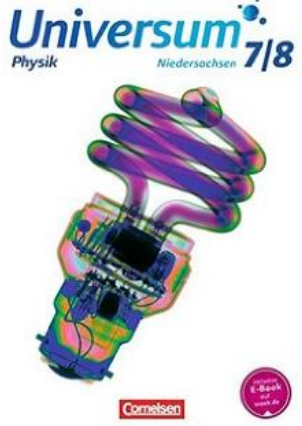
5. Zusammenfassung

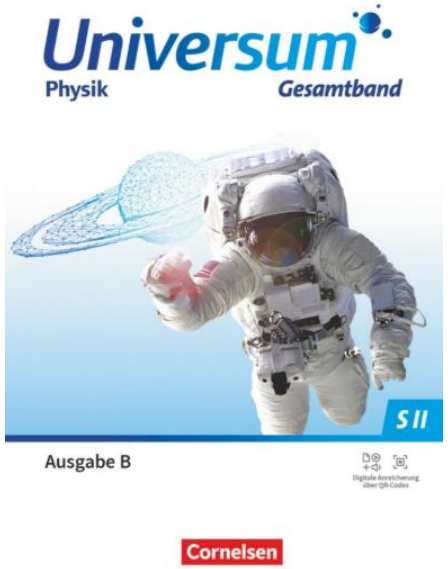
- Die drei **Methoden der Erkenntnisgewinnung** wurden an schülergerechten Beispielen entwickelt:
  - Induktive Methode: sehr direkt und einfach
  - Hypothetisch deduktive Methode: sehr leistungsfähig, sogar bei den teils unerforschten Quantenobjekten
  - Paradigmenwechsel: Neuausrichtung der Wissenschaft, 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

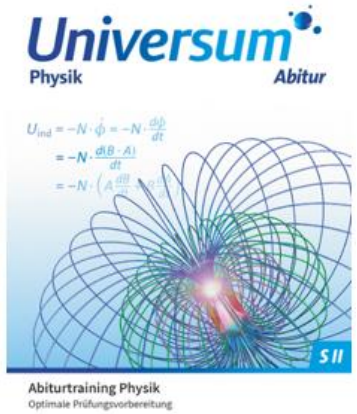
- Lernende machen auf Erkenntniswegen der Physik fundierte **Selbstkompetenzerfahrungen.** Das entwickelt
  - zielführende experimentelle Kompetenz
  - Problemlösekompetenz
  - Entscheidungs-, Beurteilungs- und Bewertungskompetenz
  - Kompetenz zu konsequenter Fortsetzung
- Diese Kompetenzen sind auch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

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







7. Links

https://www.primeopenaccess.com/scholarly-articles/construction-of-a-physically-adequate-coordinate-system-with-help-of-an-observation-on-earths-ground.pdf
https://www.iaras.org/iaras/filedownloads/ijap/2026/015-0001(2026).pdf
Zu [17] https://www.mdpi.com/2673-9321/6/1/7
Zu [24] https://ojs.dpg-physik.de/index.php/phydid-b/article/view/1464
[25] Vertiefung: http://hans-otto.carmesin.org /images/script1/24_Methoden_physikalischer_Erkenntnisgewinnung.pdf

Vielen Dank für eure Aufmerksamkeit

Cornelsen

Potenziale entfalten