

## **LeLa-Stammtisch zum Thema Quantenphysik in Schülerlaboren - Zusammenfassung**

Lernmaterialien zu Quantenphysik:

<https://www.lloop.uni-hannover.de/de/foexlab/angebote/lernmaterialien-zur-quantenphysik>

<https://bb84-sim.anvil.app>

Bei Interesse an einem vertieften Austausch zum Thema Quantenphysik in Schülerlaboren direkt melden bei:

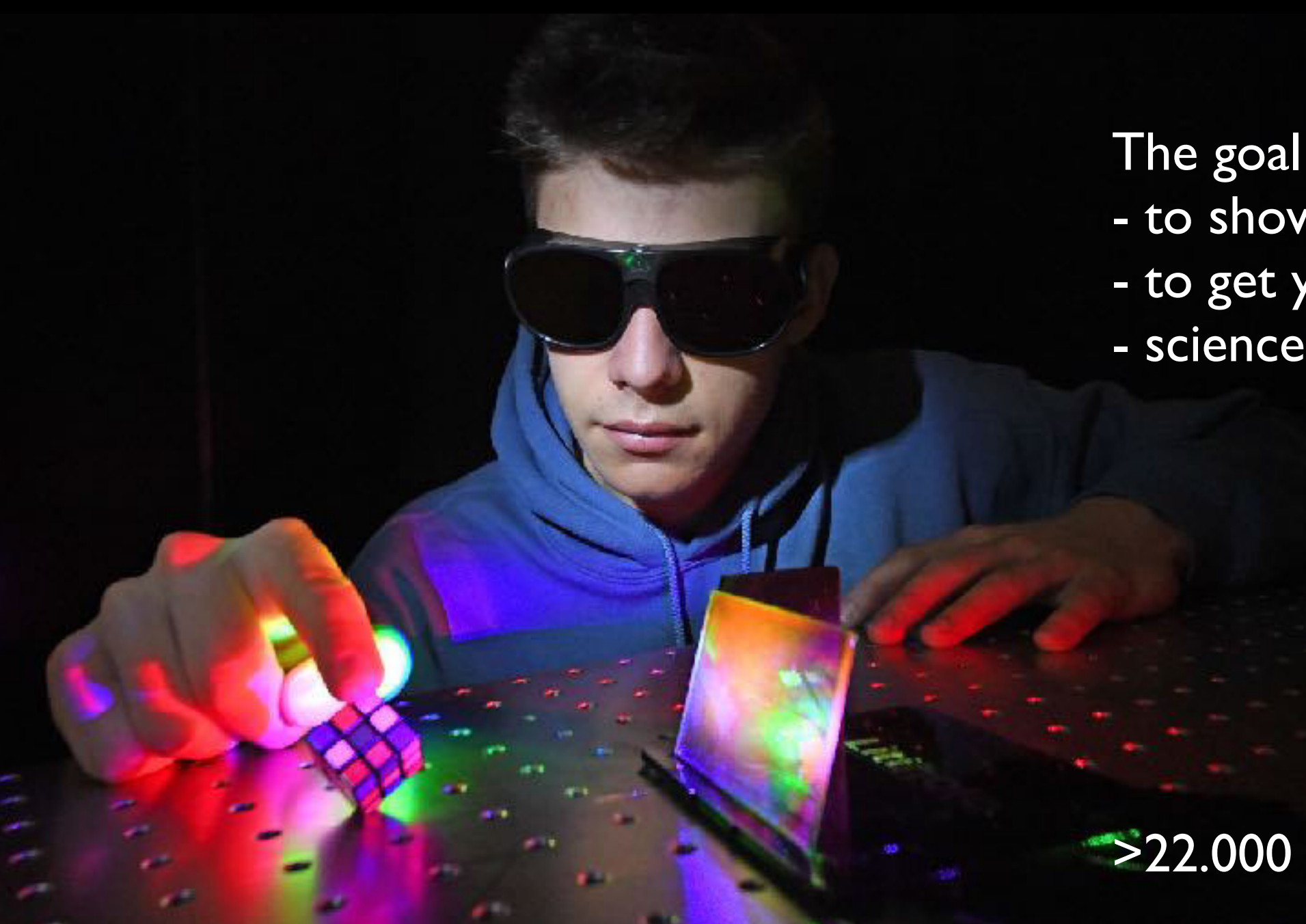
Fabian Leiß (Experimenta Heilbronn): [Fabian.Leiss@experimenta.science](mailto:Fabian.Leiss@experimenta.science)

Sylke Stähler-Schöpf (Photon-Lab): [silke.staehler-schoepf@mpq.mpg.de](mailto:silke.staehler-schoepf@mpq.mpg.de)

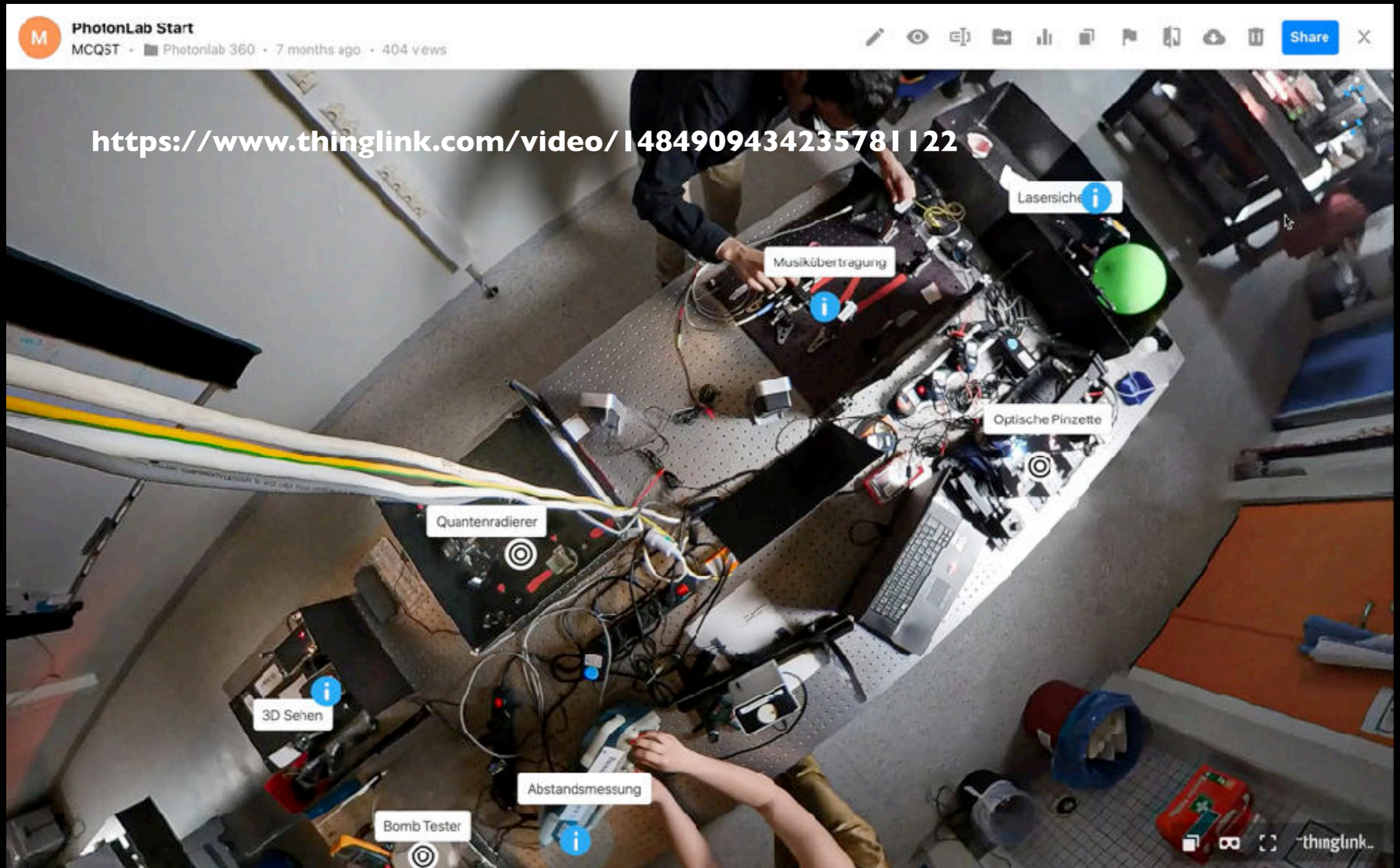
Nachfolgend die vorgestellten Folien von Fabian Leiß und Sylke Stähler-Schöpf, sowie eine Publikation zum Q-Beads

## Lasers, Light and Quanta

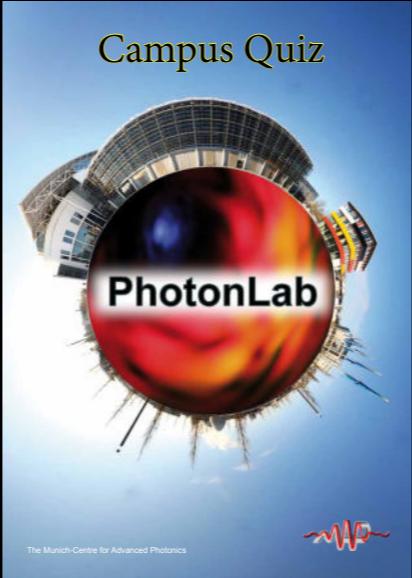
Cooperation of MPQ, MCQST, MQV, LMU (founded by Ferenc Krausz 2010)

- 
- The goal of the PhotonLab is:
- to show that physics is fun
  - to get young talents
  - science communication

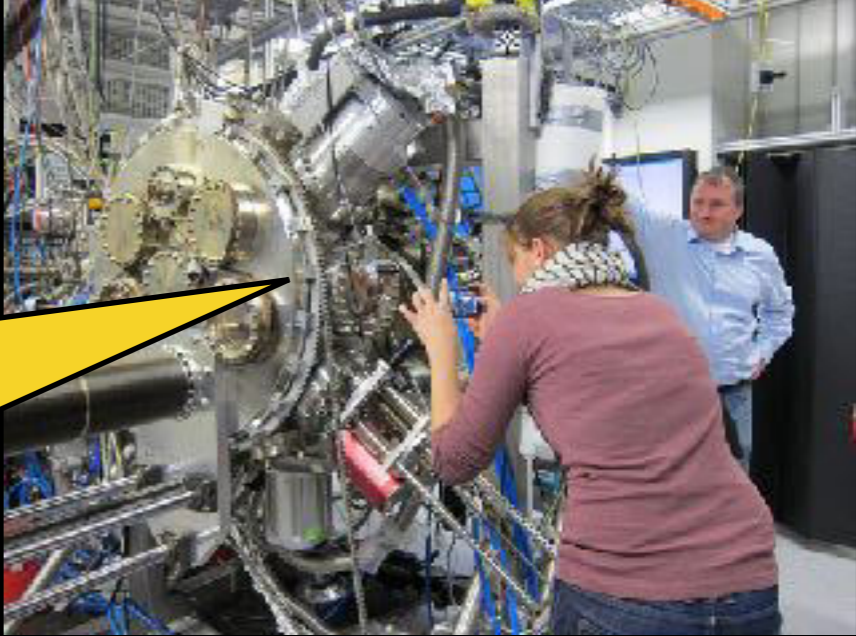
>22.000 visitors since 2011



For every group



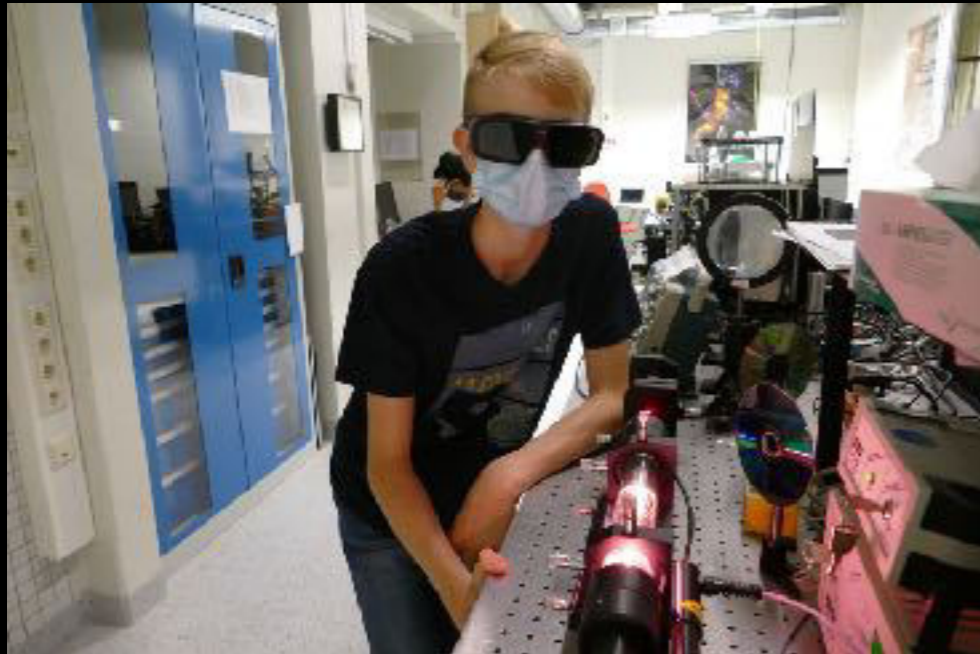
For interested groups only



# At PhotonLab



- Course (class <15 people)
- Larger groups have to be split
- Duration approx. 2 hours (flexible)



Internships 1-2 weeks  
2024: 42 interns



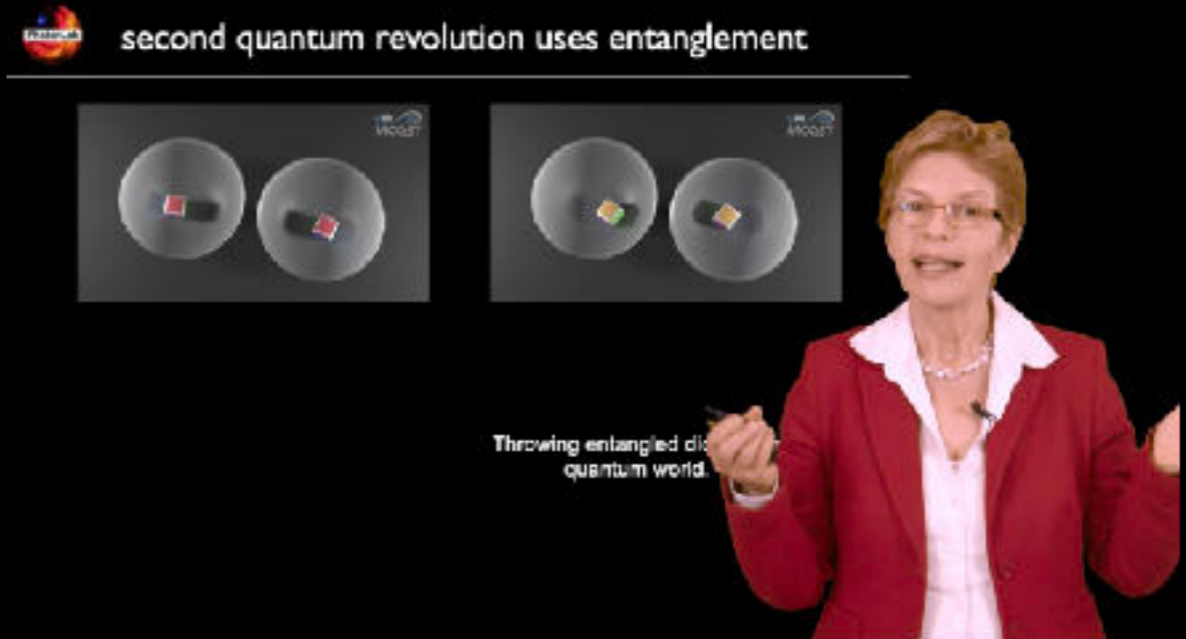
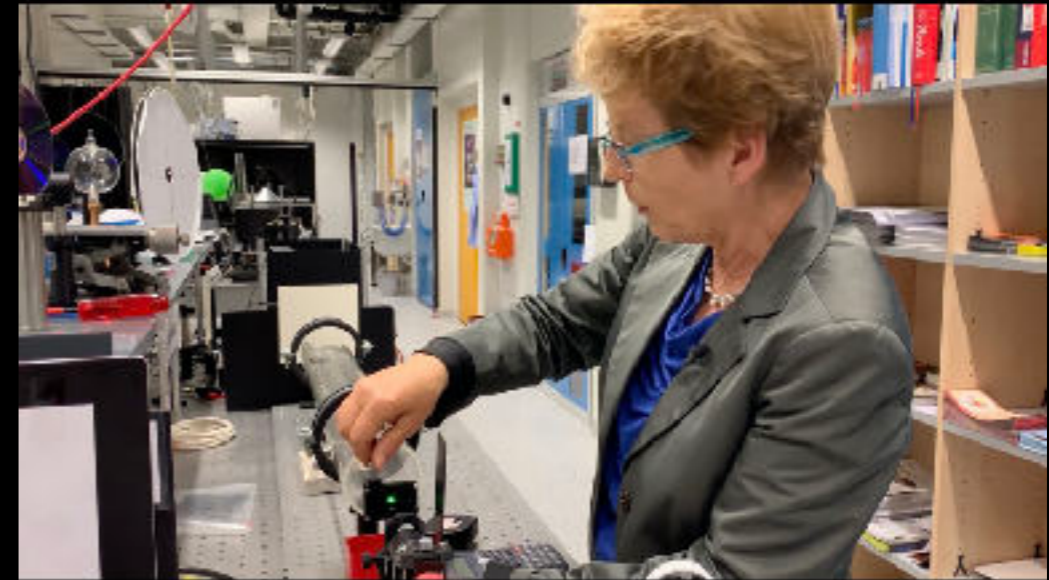
Basics of laser and quantum physics  
Grundlagen des Lichts

with kind permission of Ferenc Krausz

graphics & animations  
Christan Hackenberger,  
Thorsten Naeser, Jacqueline Pflüger, Christoph Hohmann  
Woogieworks Animation Studio

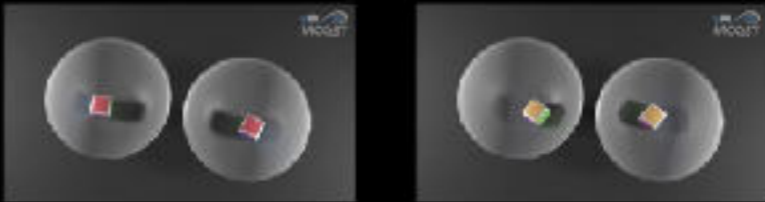
MCOST MPQ IMU

Almost 10.000 clicks!



second quantum revolution uses entanglement

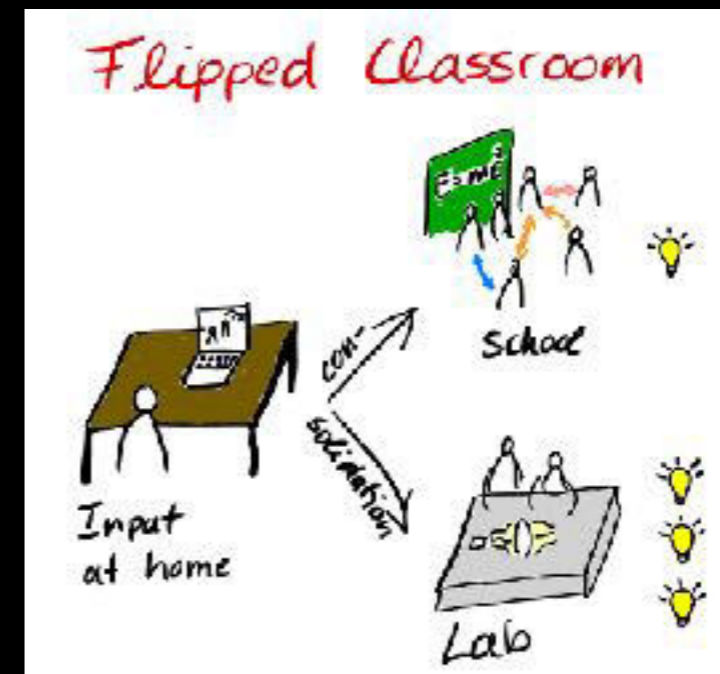
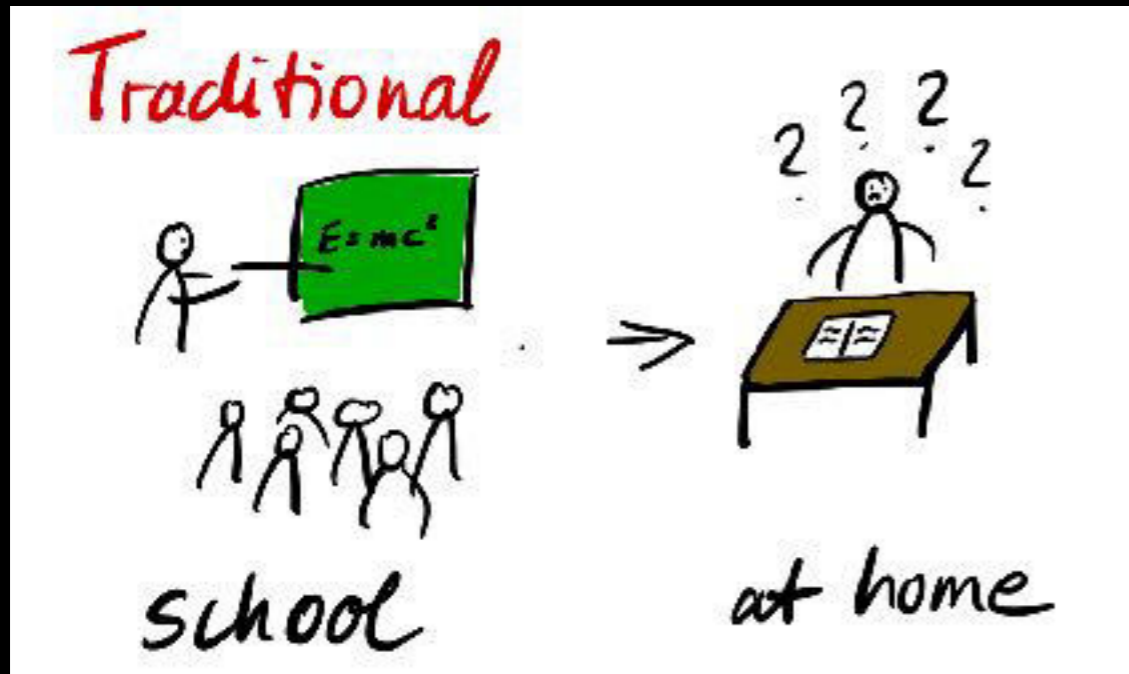
Throwing entangled dice  
into the quantum world.



YouTube: Channel of „Max Planck Institute of Quantum Optics“

Flipped classroom:

Homework (self activities) and instruction at school are flipped



Interactive books:

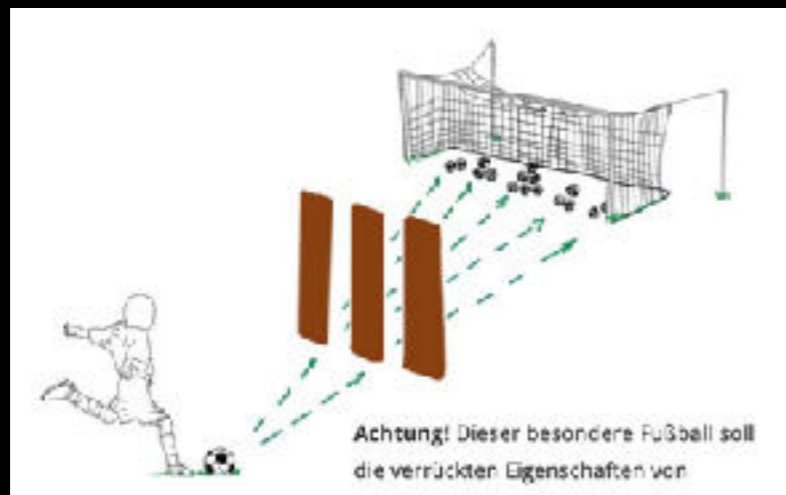
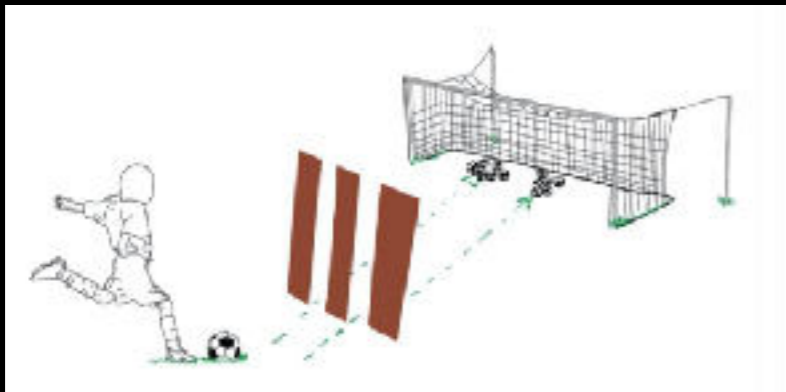
- Laser + **Nobel Prize in progress**
- Interferometer **LeLa-Prize**
- Quantum Cryptography
- Quantum Eraser
- Quantum Random Number Generation
- Bomb Tester
- .....



- Animations
- Quizzes
- Videos
- Silent videos
- Research question
- Hints for teachers

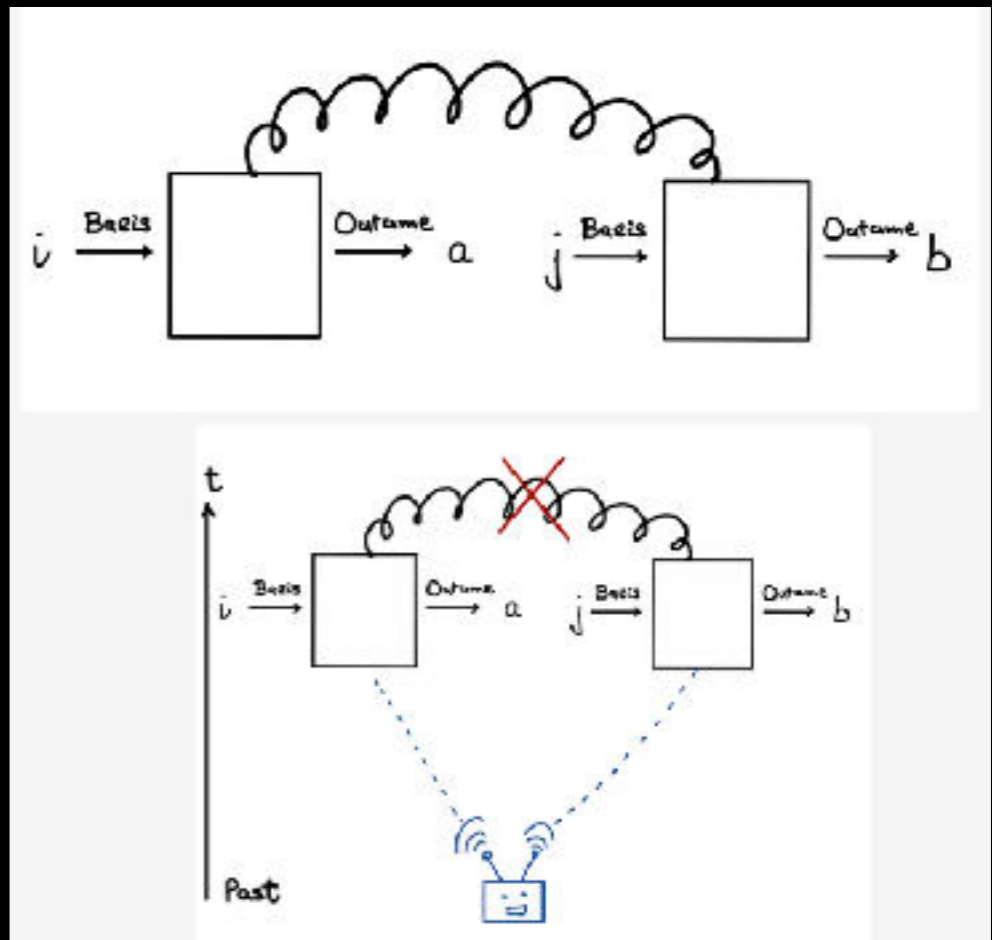
## Quantumbook 1 (Link at Photonworld):

- Double slit
- quantum particles
- Superposition
- Measurement
- Spin
- states



## Quantumbook 2 (link at photonworld):

- Entanglement
- Correlations
- EPR paradox
- Hidden variables
- Bell game
- Teleportation





# Some of our 20 Experiments:



3-d at the cinema



Holography



Spectrometer



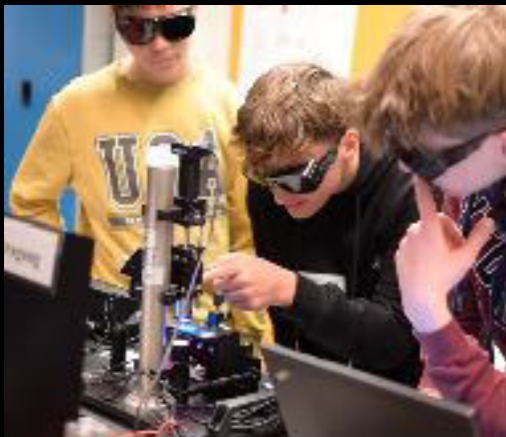
Sugar concentration



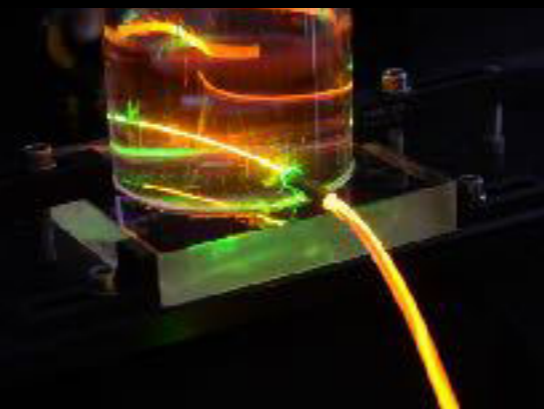
Ruby Laser



IR camera



Optical tweezer



Water as a light guide



Polarisation

Quantum Random Number Generation

Quantum Cryptography

Bomb Tester

Quantum Eraser  
-> I-Qubit-Quantum-Computer

- Building a Quantum Computer Demonstrator
- Quantum Tuesdays (every week at Deutsches Museum)
- Quantum Friday (once a month at PhotonLab)
- Teacher Training
- Quantum Courses at PhotonLab (6 h)
- PlayDecide Game
- Single Photon Experiments -> Sonja
- „From Qubit to Quantum Computer in 30 Minutes“ -> Moritz



**PhotonLab**

Im PhotonLab gibt es mehr als 20 Versuche zum selber machen rund um Laser und Licht: [www.photonworld.de](http://www.photonworld.de). In diesem Flyer werden nur die Angebote zur Quantenwissenschaft vorgestellt.

Mit diesen können Schülerinnen und Schüler auf vielfältige Weise ihr Wissen über Quantenphysik vertiefen. Für das gesamte Programm (maximal 15 Personen) sollte man sechs Stunden einplanen; für eine gekürzte Version mindestens jedoch zwei Stunden (Module nach Absprache).

- Einführungsvertrag Quantenphysik
- Laser und Lasersicherheit
- Eigenes Experimentieren im Labor (Analogieexperimente), Anleitungen auf iPads
- Diskussion über Quantentechnologien
- Einzelphotonenexperiment
- Wissenschaftliche Laborführung (nur beim 6h-Kurs)
- Vorbereitung mit interaktiven Büchern „Quatschen über Quanten“ – ein erster Einstieg in Phänomene der Quantenphysik
- Workshop „Vom Qubit zum Quantencomputer in 30 Minuten“

Angebote ab 9. Klasse auf: [www.photonworld.de](http://www.photonworld.de)

**Kontakt**



**ALICE IM QUANTENLAND**  
LICHTE WIRD NACHHER SCHWÄRMEN

QR Code

Unser Podcast für einen ersten Einstieg in die Quantenphysik für Kinder ab sechs Jahren.

In jeder Podcast-App

Dr. Silke Stähler-Schöpf  
Max-Planck-Institut für Quantenoptik  
Hans-Kopfermann-Str. 1  
85748 Garching  
Tel: 089/32905-197  
[photonlab@mpq.mpg.de](mailto:photonlab@mpq.mpg.de)



Titelbild: Gerald Ahmann/PhotoBy; Design: Thorsten Nasse; Alice-Graphik: Andreas Papad; Fotos: Thorsten Nasse, Katharina Jarrich, Christoph Hohmann und Jan Greene

**Einsteins Spuk**  
Quantenphysik im PhotonLab





**Quantenfreitage im PhotonLab**  
Garching bei München

QR Code

eveno

Foto: Christoph Hohmann

Du bist interessiert an Quantenphysik, findest aber keinen guten Einstieg? Dann laden wir dich herzlich zu uns ins PhotonLab ein! Hier kannst du nach einer kurzen Einführung selbst experimentieren und Phänomene der Quantenphysik anschaulich nachvollziehen. Außerdem besteht die Möglichkeit, in einem Demonstrationsexperiment die Erzeugung echter Einzelphotonen zu erleben. Weiterhin können wir dir näherbringen, auf welche Art die Phänomene der Quantenphysik für die Entwicklung neuer Technologien wie **Quantencomputer** genutzt werden.

Wir freuen uns über Teilnehmer\*innen ab 14 Jahren.

Veranstalter: <http://photonworld.de/de/photonlab.html>

Zur Anmeldung: <https://eveno.com/26855715>



in 30 minutes



1. Qubits  
Prof. Glaser, TUM



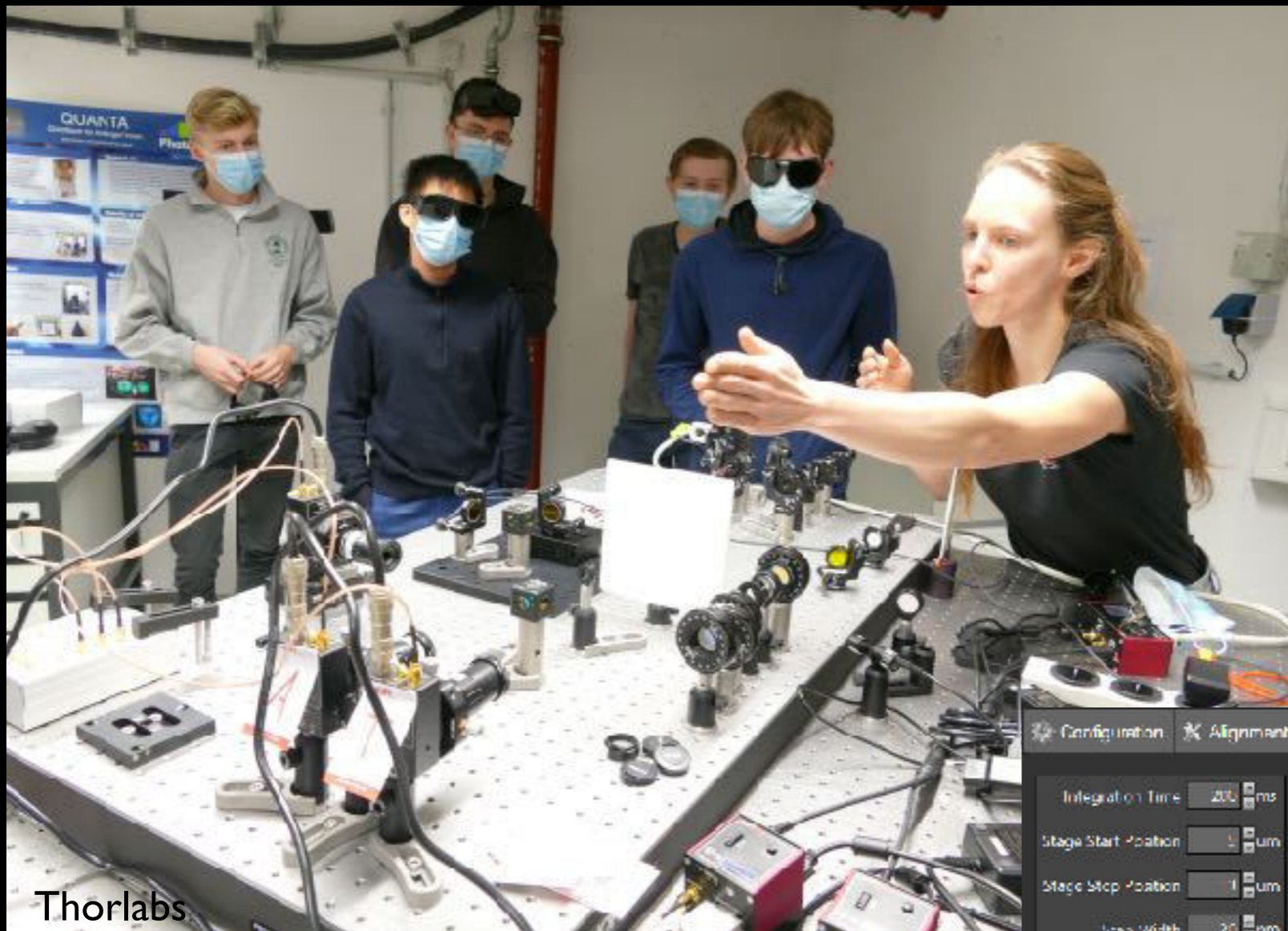
2. Measurement



3. Mach-Zehnder-Interferometer as I-Qubit-Quantumcomputer



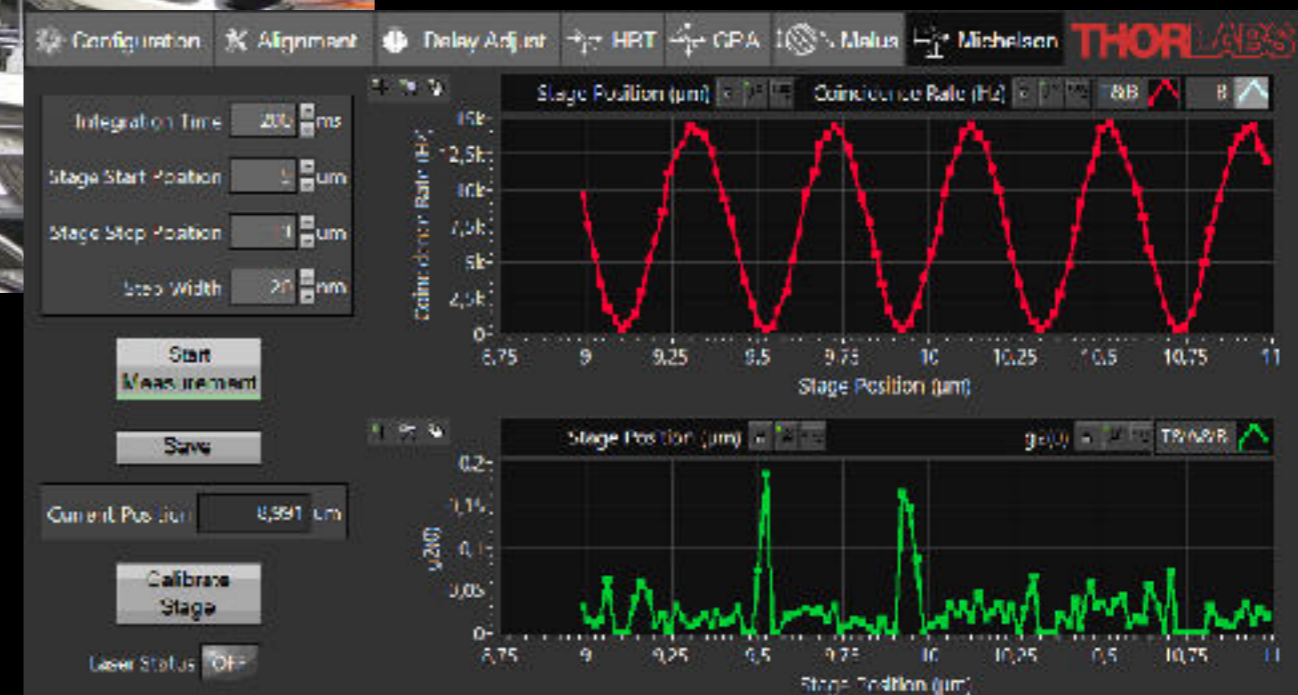
4. Algorithms



- + very motivating, authentic
- + surprising
- + Correlations show wave character of single photons

Thorlabs

Interference of single photons



# Podcast: Alice im Quantenland

In your Podcast App



Live reading



October 3rd, 10-13 h at MPQ



Maustag



Mini München



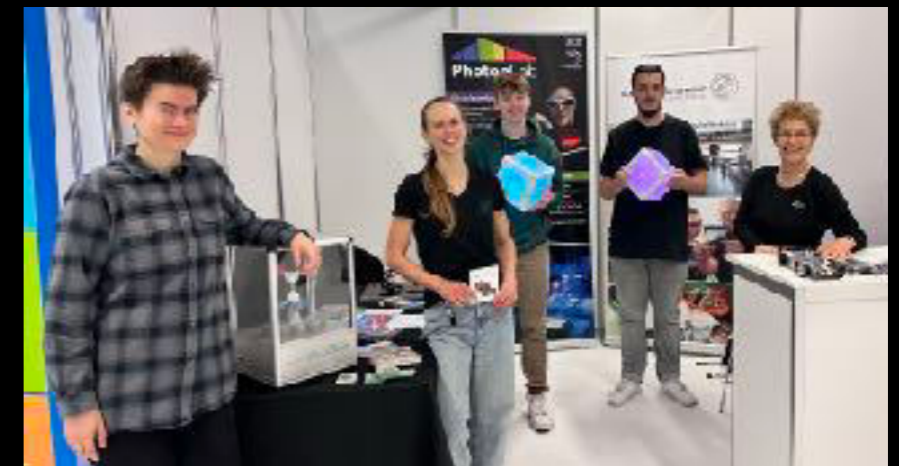
Girls Day



Forscha



GYPT Bad Honnef



Vocatium



Festival of the future

- videos, animations
- interactive books (flipped classroom)
- audio play „Alice im Quantenland“
- link to 360° Video of PhotonLab



Hands on Material:  
„Entangled Quantum Dice“



# Special thanks to my team



.....Linda, Karan, Berit, Caspar, Yülo.....and everybody, who supports me!



Sofie



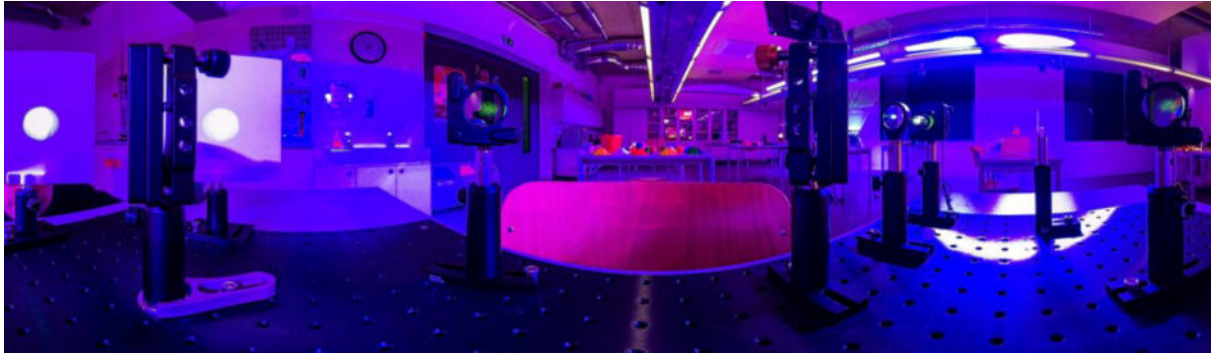
Yannik



Henry



Jonas



Vorstellung beim LeLa-Stammtisch:

# Das Physik-Schülerlabor der Experimenta in Heilbronn

**Fabian Leiß**

[fabian.leiss@experimenta.science](mailto:fabian.leiss@experimenta.science)

28.11.2024



# Die Experimenta im Zentrum von Heilbronn

**Sternwarte**

**Ausstellung**

**Science Dome**

Planetarium, 3D-Kino, Bühne

**Physik-Labor im 4.OG**

**Schülerlabore**

8 Laborräume + Küche

**Jugend-Forschungs-  
Zentrum (JFZ)**

**Maker Space**

**KI-Pavillon**

# Das Physik-Schülerlabor der Experimenta

## Zielgruppe:

Schulklassen & Gruppen von Jahrgangsstufe 5 bis zum Abitur



## Standardkurse:

Sekundarstufe 1  
Sekundarstufe 2

## Dauer

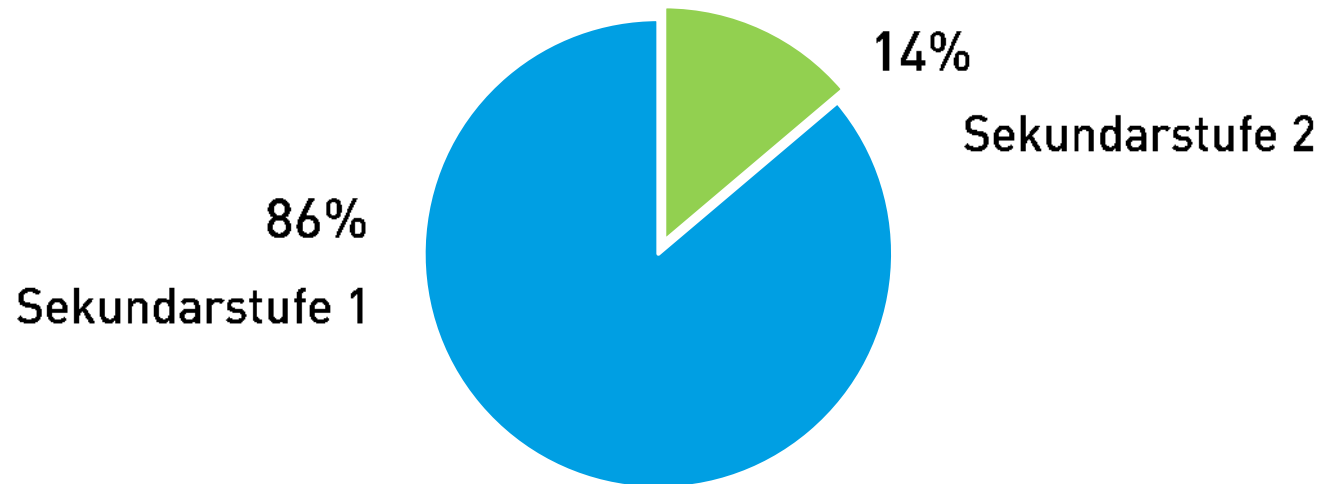
3,5 Zeitstunden  
6,5 Zeitstunden

## Beginn

9:15 Uhr; 14:00 Uhr  
9:15 Uhr

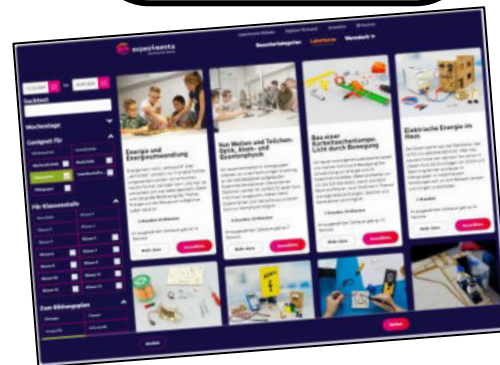
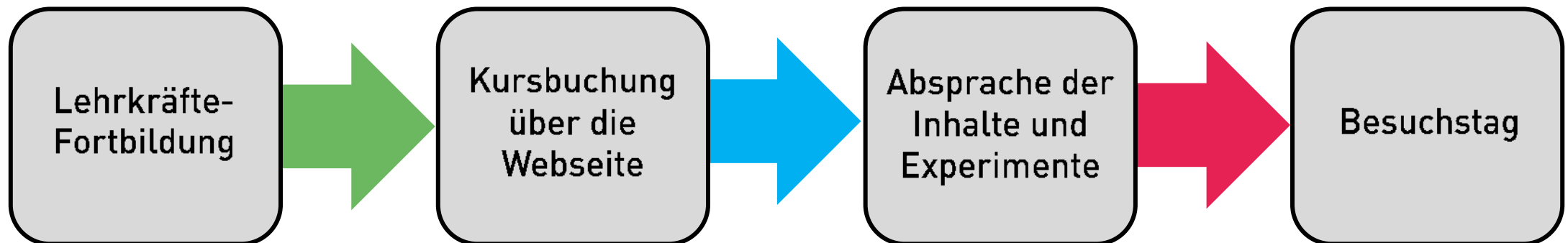
123 Kurse mit 2907 Teilnehmenden im Schuljahr 2023/2024

(ohne Veranstaltungen wie GirlsDayProgramme, ExperiClub, JuFo, ext. Workshops o.ä.)



# Vorbereitungen eines Schülerlaborbesuchs

- Lehrkräfte können 8-10 Experimente passend für ihre Gruppe auswählen aus insgesamt ca. 25 Experimenten
- Vorbereitung mit Experimentier-Anleitungen im Vorfeld möglich



# Ablauf eines Besuchs für Sekundarstufe 2-Kurse

## Anreise

9:15 Uhr

Einstieg: Motivation, Interessen, Brainstorming o.ä.

Stationsweise Durchführung der Experimente  
in Kleingruppen (2-3 Personen)

12:30 Uhr

## Mittagspause

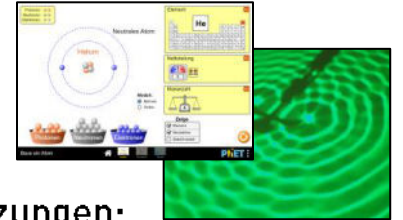
13:15 Uhr

Stationsweise Durchführung der Experimente  
in Kleingruppen (2-3 Personen)

Abschluss: Demo-Experiment/Besprechung/Quiz o.ä.

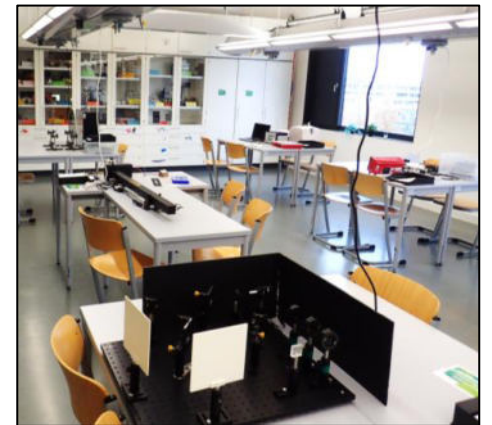
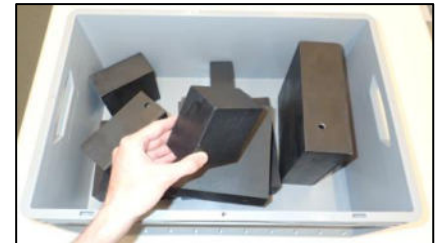
15:45 Uhr

## Ausstellungsbesuch, Abreise

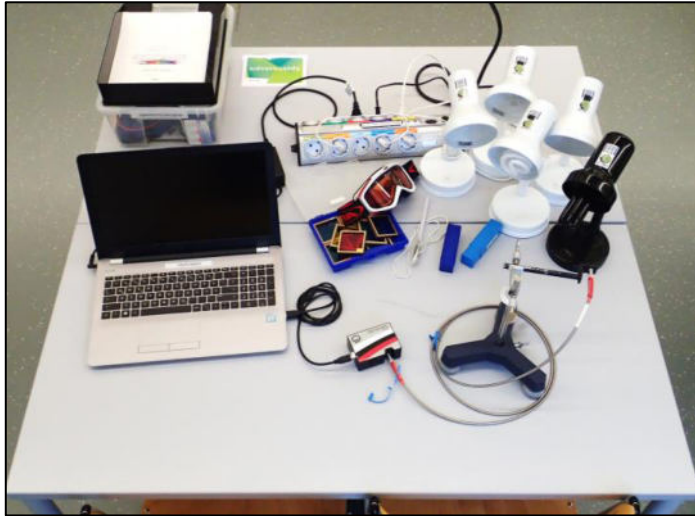


Voraussetzungen:

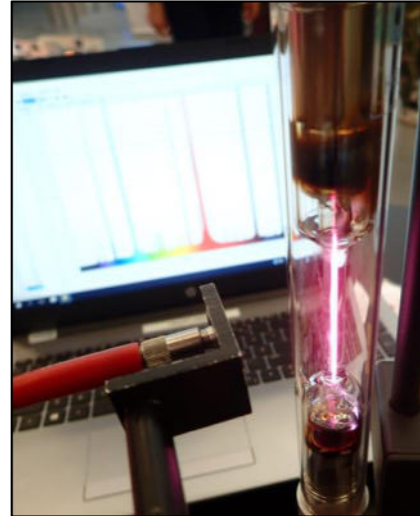
- Bohrsches Atommodell
- Wellen, Interferenz



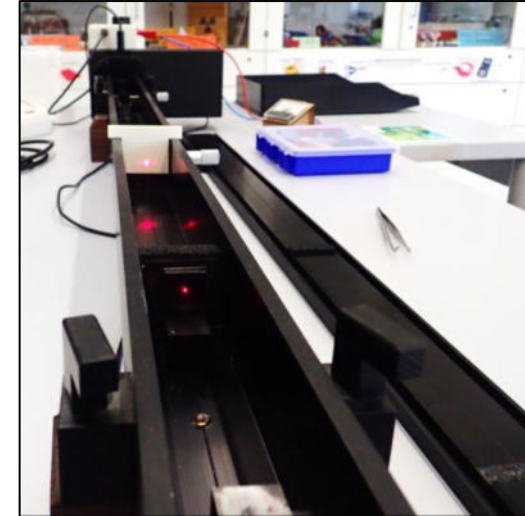
# Beispiel-Experimente



Untersuchungen mit  
digitalem Spektrometer



z.B. der Balmer-Serie



Doppelspalt-Experiment  
mit Photomultiplier



Quanten-  
kryptografie

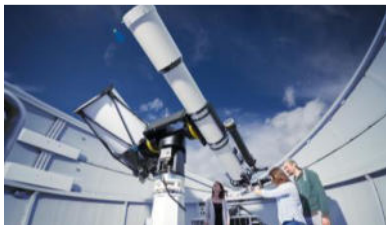
Weitere gefragte Experimente:

- Michelson-Interferometer
- Quanten-Radierer
- Computer-Tomografie
- Ultraschall-Untersuchungen

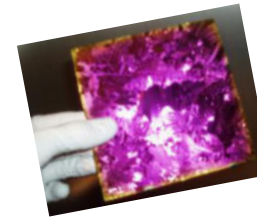
# Vernetzung: Ziele, Wünsche & Möglichkeiten

## Das kann unser Schülerlabor anbieten:

- Tests von Experimenten mit Schulklassen
- langfristige Planbarkeit
- gemeinsame Veranstaltungen  
(ein-/mehrtägig, MINT-EC-Camps, o.ä.)
- mit Ausstellung etc. große Reichweite



## Das wäre wünschenswert:



- Anschauungsbeispiele, Anwendungen aus Forschung/Unternehmen
- Austausch/Synergien beim Finden & Erstellen von Anleitungen, Videos, Simulationen o.ä.
- Gemeinsame Veranstaltungen



**Vielen Dank für  
Eure Aufmerksamkeit!**

**Fabian Leiß**  
**fabian.leiss@experimenta.science**

# Erkundung der Quantenphysik-Landkarte

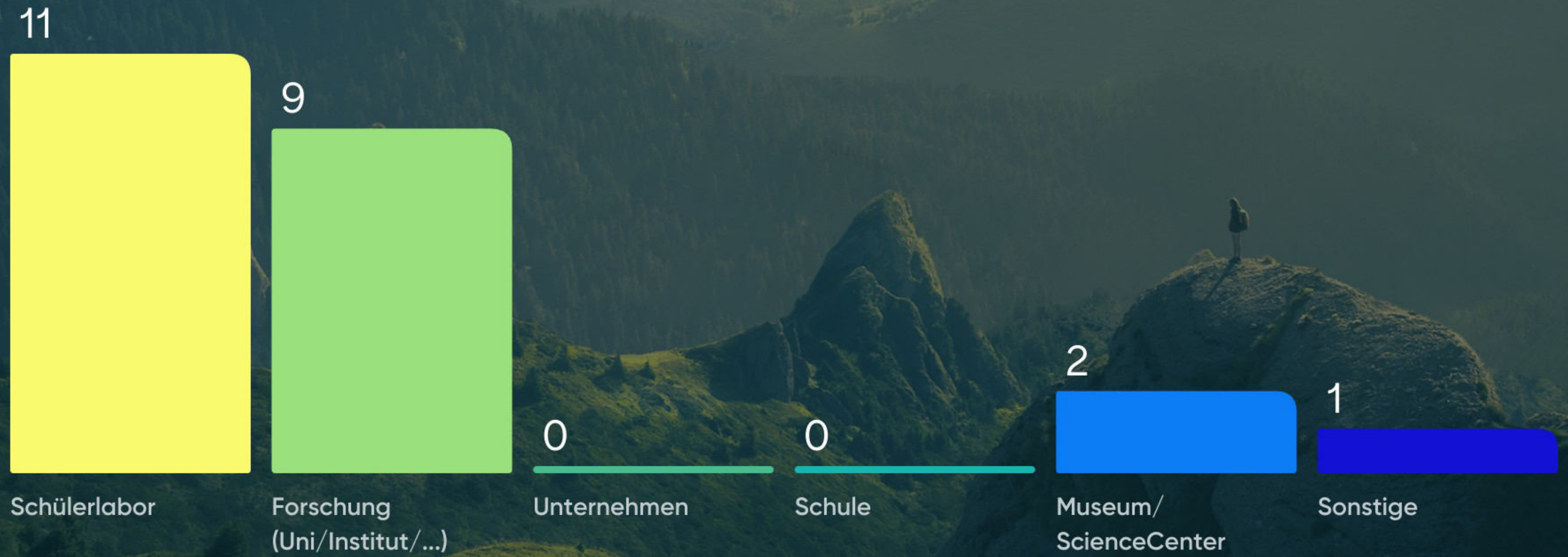
Unsere nachfolgenden Antworten sollen uns einen Überblick ermöglichen über bereits vorhandene Angebote im Bereich der Quantenphysik, so dass wir uns noch besser vernetzen können.



# Hier ist der Standort meiner Einrichtung:



Meine Einrichtung ist diesem Bereich zuzuordnen. Mehrfachnennungen möglich.



# Meine Einrichtung/Schülerlabor heißt:

12 Antworten

lehr-lern-labor physch

uni duisburg essen

dlr school lab tu dortmun

coolmintpaderborn

kitzdo

offene jugendwerkstatt ka

sciphylab

technoseum

photonlab

ptxlab - im entstehen

light and schools

experimenta

# Die Zielgruppe(n) meiner Einrichtung sind:



Schüler:innen der Sekundarstufe 1



Schüler:innen der Sekundarstufe 2



Lehrkräfte



Studierende

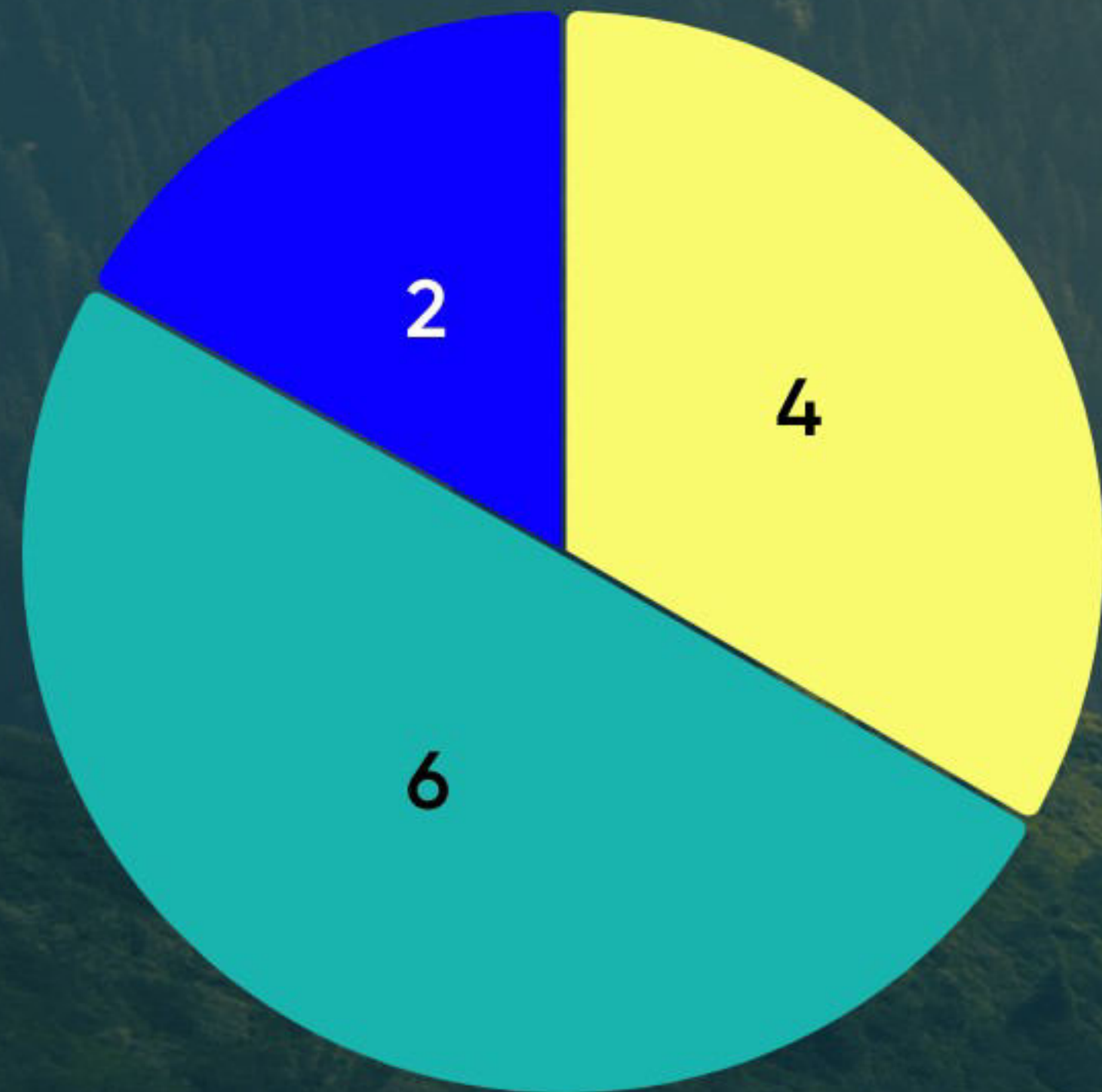


allgemeine Bevölkerung



andere als die genannten

# Schüler-Experimente zur Quantenphysik sind in meiner Einrichtung...



- 4 ... im Aufbau/in Planung
- 0 ... keine weiteren geplant, aber ausreichend vorhanden
- 6 ... vorhanden und das Angebot soll gerne noch erweitert werden
- 2 ... weder vorhanden, noch geplant

# Bei meiner Einrichtung werden Schüler-Experimente ...

... bisher vor allem von Lehrmittelherstellern bezogen (z.B. Phywe, Leybold, Thorlabs,...)

2.7

... im Forschungskontext entwickelt und können auch weitergegeben werden

2.2

... durch Zusammenarbeit mit Unternehmen entwickelt

1.9

... durch fachdidaktische Forschung begleitet

2.1

kommt gar nicht vor

immer



Dies sind meiner Ansicht nach für Teilnehmende besonders motivierende Beispiele/Experimente/Themen/Ideen für die Quantenphysik:

Analogieversuche zum Potentialtopf und Welle-Teilchen-Dualismus

Rastertunnelmikroskopie  
Quantencomputer  
Quantenkryptographie

Quantencomputer  
Quantensensoren

Anwendungen; z.B. aus dem Medizinbereich

Quantencomputing, Schrödingers Katze, Welle-Teilchen Dualismus bzw die statistische/nicht deterministische Natur von Quanteneffekten (z.B: in geführten Diskussionen)

Medizin

Mach-Zehnder-Interferometer als 1-Qubit-Quantencomputer  
Analogieexperimente von Thorlabs Doppelspalt  
Superposition und Verschränkung als Phänomen  
Quantentechnologien

Folgende Schüler-Experimente zur Quantenphysik ließen sich meiner Ansicht nach gut von anderen Einrichtungen nachbauen:

Analogieversuch zum linearen Potentialtopf

Analogieversuch zum Welle-Teilchen-Dualismus

Quantenradierer

"Vom Qubit zum Quantencomputer in 30 Minuten" - erste Schritte von Qubits zu Algorithmen an Hand des Mach-Zehnder-Interferometers

Michelson-Interferometer aus dem 3D-Drucker (O3Q.de)  
<https://physikkommunizieren.de/o3q-wuerfel-interferometer/>

## Unter diesem Link kommt man zu den Angeboten meiner Einrichtung:

<https://www.sciphylab.de> (Quantenphysik noch nicht veröffentlicht)

<https://www.technosum.de/>

[https://www.dlr.de/de/schoollab/standorte/tu\\_dortmund](https://www.dlr.de/de/schoollab/standorte/tu_dortmund)

Aktuell:  
<https://www.ptb.de/cms/ptb/management-der-ptb/pstab.html> (Nur erste Infos.)

[ojw-ka.de](http://ojw-ka.de) auch [Theoprax-stiftung.de](http://Theoprax-stiftung.de)

[www.kitzdo.de](http://www.kitzdo.de)

[ojw-ka.de](http://ojw-ka.de) [theoprax-stiftung.de](http://theoprax-stiftung.de)

[www.kitzdo.de](http://www.kitzdo.de)

Unter diesem Link kommt man zu den Angeboten meiner Einrichtung:

<https://www.kitzdo.de/>

<https://www.kitzdo.de/>

<https://www.coolmint-paderborn.de/kursangebot/>

<https://www.min.uni-hamburg.de/light&schools>

<https://www.experimenta.science/lernen/>

<https://photonworld.de/de/photonlab.html>

Noch nicht online!

**Vielen Dank für Deine Angaben!**

# Quantenkryptographie mit Q-Beads

Moritz Dorband, MPQ, PhotonLab

In dieser Notiz beschreiben wir die Verwendung von Q-Beads für das Experimentierset 'Quantenkryptographie' von ThorLabs.

## Das Q-Bead Modell für Polarisationsqubits

Im Q-Bead Modell [1] werden die Quantenzustände eines Qubits mithilfe von Farben kodiert. Grundlage ist die Blochkugel, bei welcher normalerweise durch einen Vektor der Zustand angezeigt wird. Im Q-Bead Modell hingegen ist die Blochkugel eingefärbt und als gesamtes Objekt gedreht, um einen gewünschten Zustand einzustellen. Ein paar typische Beispielzustände sind in Abb. 1 gezeigt.

Für die Quantenkryptographie werden Polarisationszustände von Einzelphotonen verwendet, um abhörsicher ein One-Time-Pad zur Verschlüsselung einer Nachricht zu erzeugen. Konkret werden zwei verschiedene Basen verwendet, um die Bitwerte 0 und 1 zu beschreiben, die sogenannte +-Basis sowie die x-Basis. Wie die Namensgebung impliziert, werden bei der +-Basis die Polarisierungen  $0^\circ$  und  $90^\circ$ , bei der x-Basis die Polarisierungen  $45^\circ$  und  $-45^\circ$ . Um diese Zustände mithilfe der Q-Beads darzustellen, muss sich auf eine Basis als Konvention geeinigt werden. Im folgenden nutzen wir dafür die +-Basis. Wir legen fest, dass

$$\text{rot} \leftrightarrow |0_+\rangle \hat{=} 0^\circ \quad \text{und} \quad \text{grün} \leftrightarrow |1_+\rangle \hat{=} 90^\circ \quad (1)$$

gilt. In dieser Basis entsprechen die anderen beiden Polarisierungen Superpositionszuständen. Konkret gilt

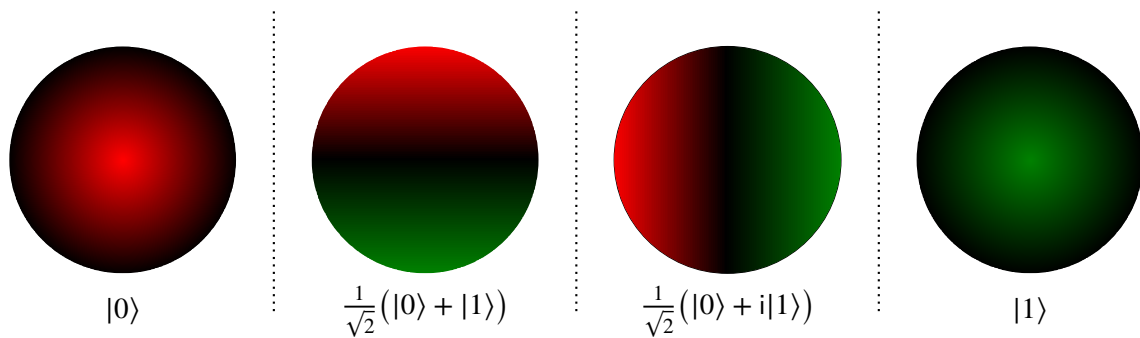
$$|1_x\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0_+\rangle + |1_+\rangle) \hat{=} 45^\circ \quad \text{und} \quad |0_x\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0_+\rangle - |1_+\rangle) \hat{=} -45^\circ. \quad (2)$$

Aus der z-Richtung betrachtet haben wir in der +-Basis also vier verschiedene Q-Bead Stellungen, um alle möglichen Polarisierungen zu beschreiben. Diese sind in Abb. 2 gezeigt.

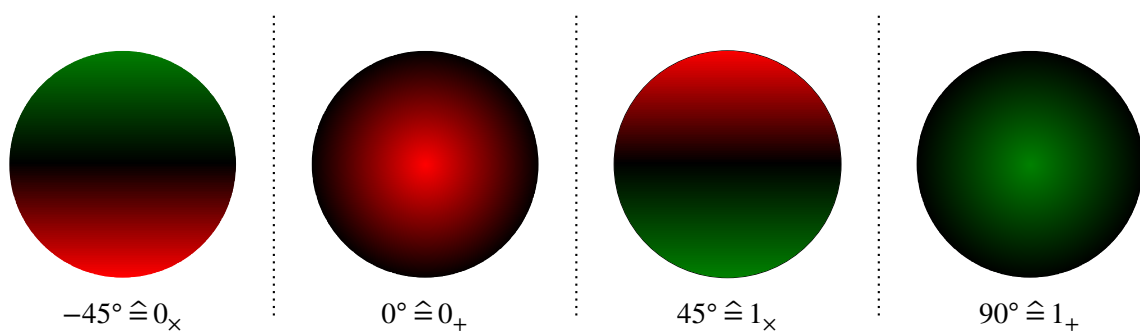
## Durchführung des Experiments mit Q-Beads

In dieser Durchführung wird die Konvention festgelegt, dass immer von oben gemessen wird. Dies entspricht der z-Achse.

Wir beginnen mit dem Zustand des Qubits am Laser. Dazu nehmen wir an, dass das Laserlicht in der  $0^\circ$ -Ebene polarisiert ist. Im Anfangszustand ist also die rote Seite oben. Im



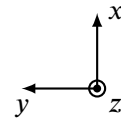
**Abb. 1:** Vier verschiedene Beispielzustände dargestellt im Q-Bead Modell. Per Konvention ist die Messachse so gesetzt, dass sie aus der Bildebene herauszeigt, die  $x$ -Achse nach oben und die  $y$ -Achse nach links. Weiterhin ist die Farbkonvention als  $|0\rangle \leftrightarrow$  rot und  $|1\rangle \leftrightarrow$  grün gewählt.



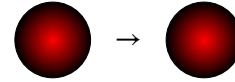
**Abb. 2:** Die vier möglichen Polarisationszustände zur Codierung der Bitwerte 0 und 1, dargestellt in der  $+$ -Basis. Die Blickrichtung entspricht der  $z$ -Achse.

nächsten Schritt stellt Alice sowohl ihre Basis als auch den Bitwert für ihre Übermittlung ein. Durch den ersten Polarisationsdreher wird einer der vier Zustände aus Abb. 2 erzeugt. Nun stellt Bob am zweiten Polarisationsdreher die Basis ein, in der er messen will. Wählt er die  $+$ -Basis, bleibt das Q-Bead unverändert. Wählt er die  $\times$ -Basis, wird der Zustand nochmals um die  $y$ -Achse gedreht. Die einzelnen Drehungen sind in Abb. 3. Bei der anschließenden Messung des Zustandes wird immer in der  $+$ -Basis gemessen. Stimmen die von Alice und Bob gewählten Basen überein, ergibt sich ein eindeutiges Ergebnis und die Bitwerte stimmen überein (die Drehungen des Q-Beads gleichen sich so aus, dass auch bei der Messung in der  $+$ -Basis ein in der  $\times$ -Basis versendetes Bit richtig empfangen wird). Bei unterschiedlichen Basen erhält Bob einen zufälligen Bitwert. Der gesamte Ablauf, mit allen möglichen Kombinationen, ist in Abb. 4 gezeigt.

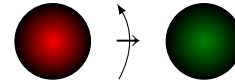
Da immer in der  $+$ -Basis gemessen wird, ist die Formulierung 'Bob wählt sich seine Messbasis' eventuell etwas irreführend. Genauer sollte man sagen, dass Bob den Zustand so beeinflusst, um danach in der  $+$ -Basis zuverlässig messen zu können. Das bedeutet, falls von Alice die  $+$ -Basis gewählt wurde, dass Bob nichts verändert. Falls die  $\times$ -Basis gewählt wurde, dreht Bob den Zustand nochmals um einen fixen Betrag. Inwiefern diese Erklärungsvariante Alternativen zulässt, wird weiter unten diskutiert.



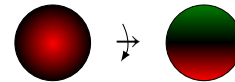
**Bei Alice:** +-Basis, Bitwert 0: keine Drehung;



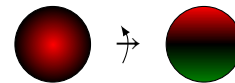
+-Basis, Bitwert 1: 180°-Drehung um  $y$ -Achse;



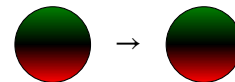
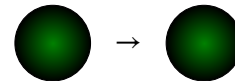
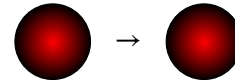
$\times$ -Basis, Bitwert 0:  $-90^\circ$ -Drehung um  $y$ -Achse;



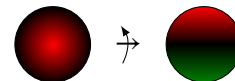
$\times$ -Basis, Bitwert 1:  $90^\circ$ -Drehung um  $y$ -Achse;



**Bei Bob:** +-Basis: keine Drehung;

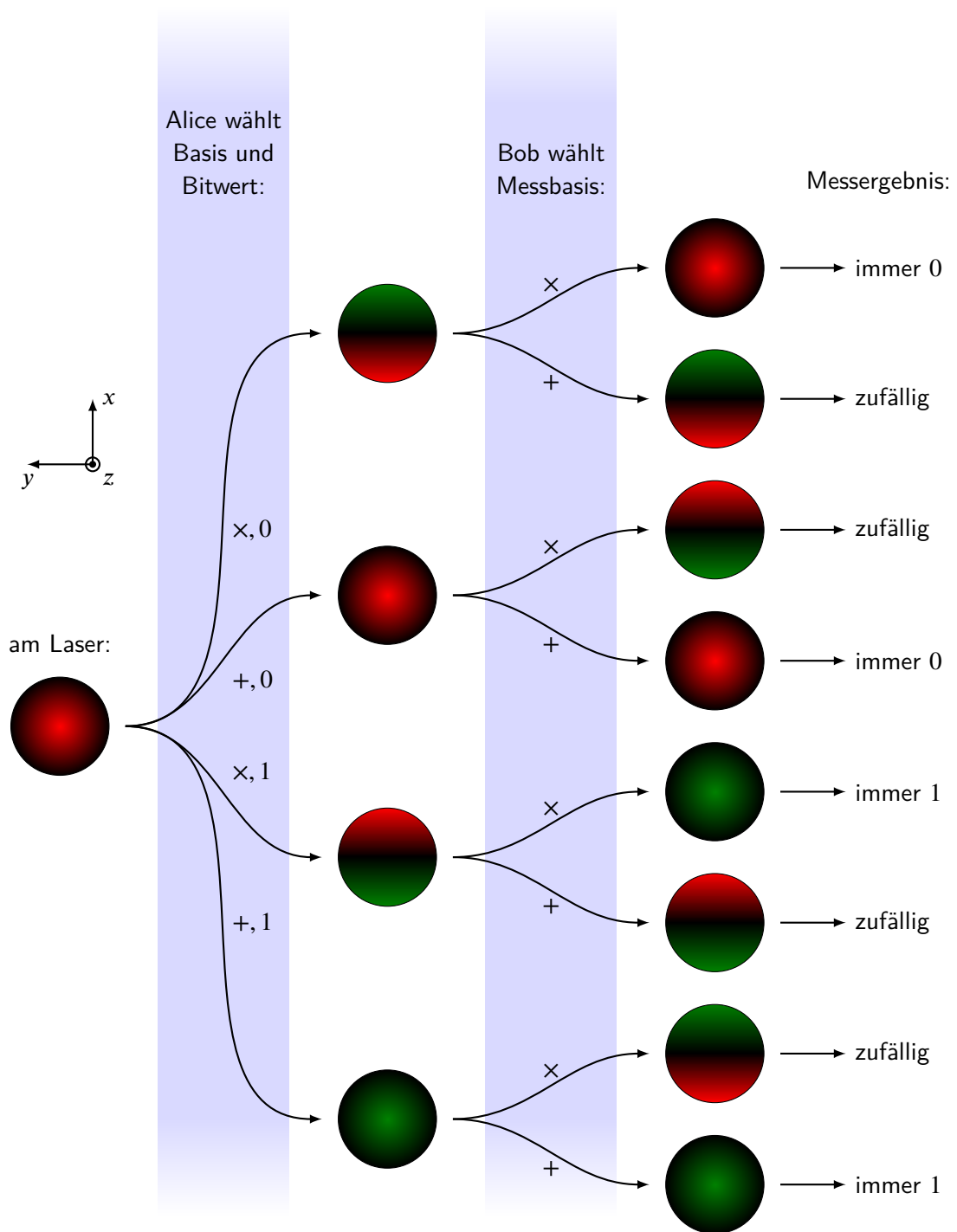


$\times$ -Basis:  $90^\circ$ -Drehung um  $y$ -Achse;



**Abb. 3:** Sowohl bei Alice Wahl der Basis und des zu versendenden Bitwertes als auch bei Bobs Wahl der Messbasis wird das Q-Bead um einen entsprechenden Betrag gedreht. In der Abbildung sind alle relevanten Drehungen gezeigt. Wir nehmen an, dass das Laserlicht in der  $0^\circ$ -Ebene polarisiert ist.





**Abb. 4:** Baumdiagramm mit allen möglichen Ausgängen der Übermittlung eines Bitwertes von Alice zu Bob mit den jeweiligen Stellungen des Q-Beads.

## Durchführung des Experiments mit AbhörerIn

Wenn sich im Übertragungskanal zwischen Alice und Bob eine AbhörerIn (Eve) eingeklinkt hat, kann von Bob nicht mehr in jedem Fall zuverlässig gemessen werden, selbst wenn er die gleiche Basis wie Alice gewählt hat. Dadurch können Alice und Bob beim Vergleichen ihrer Basen und Bitwerte feststellen, ob die Leitung sauber ist oder nicht.

Wenn sich Eve in die Leitung schaltet, hat sie ebenfalls einen Messapparat (wie Bob) und eine Möglichkeit, kodierte Bitwerte zu versenden (wie Alice). Zunächst misst Eve das von Alice kommende Photon. Es ergeben sich die Möglichkeiten wie in Abb. 4. Der wichtige Punkt ist nun, dass Eve bei der Messung lediglich 0 oder 1 erhält. Sie hat keine Möglichkeit festzustellen,

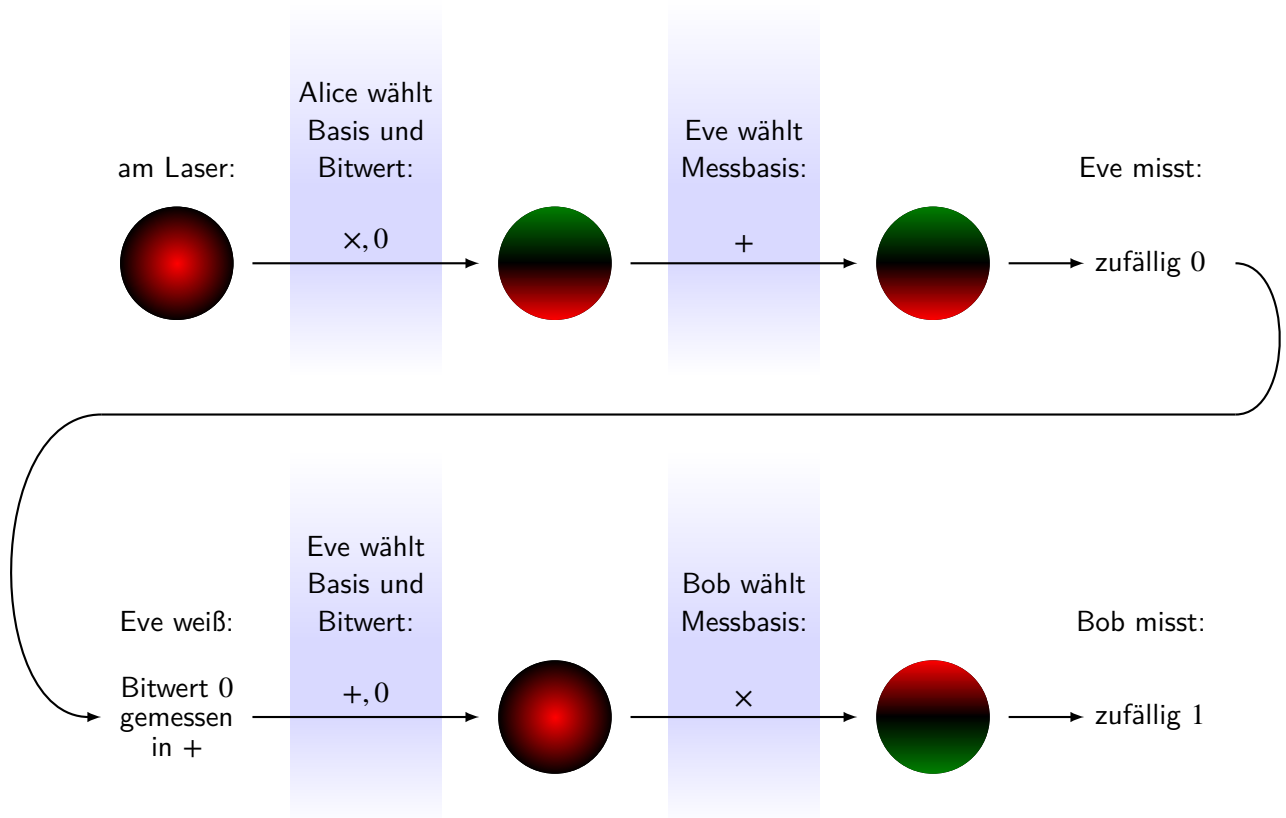
a) ob ihr Messergebnis zufällig oder festgelegt war

und

b) in welcher Basis der Bitwert (egal ob zufällig gemessen oder nicht) versendet wurde.

Dadurch kann Eve den gemessenen Bitwert nicht unbemerkt weiterschicken. Sie kann zwar den Bitwert, den sie gemessen hat, neu kodieren und versenden, weiß dabei allerdings nicht, in welcher Basis der Bitwert kodiert werden muss. Wählt sie die falsche Basis, kann Bob trotz mit Alice identischer Basis den falschen Bitwert erhalten, da seine Messung nicht mehr eindeutig sondern zufällig ist. Eve kann dieses Risiko nicht umgehen, da die gemessenen Werte 0 oder 1 keine Rückschlüsse auf die Basis zulassen: wird zum Beispiel 1 gemessen, ist nicht klar, ob dies eindeutig (richtige Messbasis gewählt) oder zufällig (falsche Basis gewählt) war.

Um dies anschaulicher zu machen, gehen wir ein konkretes Beispiel Schritt für Schritt durch. Wir nehmen an, dass Alice den Bitwert 0 in der  $\times$ -Basis versenden will. Eve, die sich in die Leitung geschaltet hat, misst das Photon in der  $+$ -Basis und erhält (in diesem Beispiel) zufällig tatsächlich den Bitwert 0. Der kritische Punkt ist nun, wie Eve weiterverfährt. Sie könnte zum Beispiel festlegen, immer das zu versenden, was sie gemessen hat. Das bedeutet, Eve versendet den Bitwert 0 in der  $+$ -Basis. Misst nun Bob das Photon in der  $\times$ -Basis, erhält er den Bitwert 1 als zufälliges Ergebnis. Diese Abfolge mit den zugehörigen Q-Bead Stellungen ist in Abb. 5 gezeigt. Wenn nun Alice und Bob ihre Messergebnisse vergleichen, stellen sie fest, dass sie die gleiche Basis verwendet haben, aber unterschiedliche Bitwerte notiert haben. Abgesehen von technischen Fehlern in einer tatsächlichen experimentellen Umsetzung darf diese Situation niemals vorkommen, solange die Leitung nicht abgehört wird. Treten also Fälle, in denen Alice und Bob die gleiche Basis aber andere Bitwerte notieren, häufig auf, können Alice und Bob davon ausgehen, dass die Leitung nicht sauber ist. Bei einer tatsächlichen Durchführung des Experimentes werden einige Messpaare aus der gesamten Messreihe von Alice und Bob öffentlich verglichen, um festzustellen, ob Eve mitgehört hat. Falls ja, wird die Messung verworfen. Falls nein, wird aus den restlichen Messpaaren der Schlüssel generiert.



**Abb. 5:** Beispielhafte Abfolge von Q-Bead Zuständen mit Eve in der Leitung.

### Wie wir es im PhotonLab durchführen

Die Farben rot oder grün des Q-Beads stehen immer für 0 oder 1, aber in unterschiedlichen Basen. Basen werden über Drehung bzw Positionierung des Q-Beads eingestellt. Die Messung in der +-Basis erfolgt, indem das Q-Bead von oben betrachtet wird. Eine Messung in der x-Basis bedeutet, das Q-Bead von der Seite zu betrachten (senkrecht zur Flugrichtung der Photonen). Die Schritte zur Beschreibung des Experiments mithilfe der Q-Beads lassen sich wie folgt zusammenfassen:

**Alice:** wählt Basis und Bitwert. Die Kugel wird entsprechend so gehalten, dass entweder von oben oder von vorne (entspricht Wahl der Basis) der rote oder der grüne (entspricht Wahl des Bitwertes) Pol zu sehen ist.

**Bob:** wählt Messbasis. Je nach Wahl wird die Kugel von oben oder von vorne angeschaut. Das Messergebnis ist zufällig, wenn der schwarze Ring auf der entsprechenden Seite zu sehen ist, und eindeutig, wenn der grüne oder der rote Pol zu sehen ist.

**Eve:** wählt Messbasis. Dieser Schritt funktioniert analog zu Bob. Wählt anschließend Basis und Bitwert. Dieser Schritt funktioniert analog zu Alice.

**Was genau passiert bei der Messung?** Wenn Bob das Photon von Alice empfängt, muss er es messen, um einen Bitwert zu erhalten. Außerdem 'stellt er am Polarisationsdreher eine Basis ein', in der er messen möchte. Dieses in Anführungszeichen gestellte Statement wird im folgenden genauer untersucht.

Die Abfolge an physikalischen Prozessen an Bobs Stelle ist wie folgt. Zuerst durchläuft das ankommende Photon einen Polarisationsdreher, der entweder nichts tut oder die Polarisation um  $45^\circ$  ändert. Danach trifft das Photon auf einen polarisierenden Strahlteiler, der  $0^\circ$  polarisiertes Licht transmittiert und  $90^\circ$  polarisiertes Licht reflektiert. Je nachdem, ob ein Superpositionszustand oder ein eindeutiger Zustand dieser beiden Polarisierungen an den Strahlteiler kommt, wird das Photon entsprechend weitergeschickt. Wichtig ist allerdings, dass der Strahlteiler an sich den Zustand des Photons *nicht verändert*. An den jeweiligen Ausgängen stehen 'Einzel'photonendetektoren (i.F. Detektoren),<sup>1</sup> die das transmittierte oder reflektierte Photon messen und somit den Bitwert festlegen (transmittiertes Licht  $\hat{=}$  0, reflektiertes Licht  $\hat{=}$  1).

Für sich genommen messen die Detektoren immer in der +-Basis. Mathematisch können sie also wie folgt dargestellt werden,

$$\text{Det}_{\text{trans}} = |0\rangle\langle 0| \quad \text{und} \quad \text{Det}_{\text{refl}} = |1\rangle\langle 1|. \quad (3)$$

Wird der ankommende Zustand mithilfe dieser Projektoren gemessen, ergibt sich abhängig vom konkreten Zustand ein festgelegtes oder zufälliges Ergebnis. Der Zustand wiederum wird am Polarisationsdreher potentiell verändert. Die Veränderung kann als folgender Operator dargestellt werden,<sup>2</sup>

$$\text{Pol}_{\text{Bob}} = |-\rangle\langle 0| + |+\rangle\langle 1| = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle\langle 0| + |0\rangle\langle 1| - |1\rangle\langle 0| + |1\rangle\langle 1|). \quad (4)$$

Stellt Bob seine Messbasis auf  $\times$  ein, wird dieser Operator auf den Zustand angewendet. Es gibt nun zwei Varianten, diesen Ablauf zu interpretieren.

**Variante a)** Die Messung der Detektoren erfolgt immer in der +-Basis. Um Bits, versendet in der  $\times$ -Basis, korrekt messen zu können, muss der Zustand vorher durch den Polarisationsdreher so angepasst werden, dass er in der +-Basis ein zuverlässiges Messergebnis liefert. Diese Messung erfolgt mit den Operatoren  $\text{Det}_{\text{trans}}$  und  $\text{Det}_{\text{refl}}$  mithilfe der Formeln

$$p_0 = \langle \psi | \text{Det}_{\text{trans}} | \psi \rangle \quad \text{und} \quad p_1 = \langle \psi | \text{Det}_{\text{refl}} | \psi \rangle. \quad (5)$$

Das interpretatorische Problem an dieser Variante ist, dass wir zwar sagen, dass Bob seine Messbasis einstellt, jedoch gleichzeitig sagen, dass die Detektoren immer in der +-Basis messen. Dies lässt sich durch Variante b) umgehen.

<sup>1</sup>Im Analogieexperiment sind es keine echten Einzelphotonen, also auch keine echten Einzelphotonendetektoren. Die Messung wird über Software simuliert.

<sup>2</sup>Wenn auch in einer unkonventionellen Basis kann dieser Operator als Hadamard Gatter verstanden werden.

**Variante b)** Wir betrachten den Polarisationsdreher und die beiden Detektoren zusammengefasst als unseren Messapparat. Steht der Polarisationsdreher auf  $0^\circ$ , wird nach wie vor mithilfe der Operatoren  $\text{Det}_{\text{trans}}$  und  $\text{Det}_{\text{refl}}$  in der +-Basis gemessen. Stellt Bob hingegen die x-Basis ein, verwenden wir andere Operatoren. Diese Operatoren ergeben sich als die Kombination der bisherigen sowie dem Polarisationsdreher. Mathematisch bedeutet das<sup>3</sup>

$$\begin{aligned} \text{Det}'_{\text{trans}} &= \text{Pol}_{\text{Bob}} \text{Det}_{\text{trans}} \text{Pol}_{\text{Bob}}^\dagger = (|-\rangle\langle 0| + |+\rangle\langle 1|)(|0\rangle\langle 0|)(|0\rangle\langle -| + |1\rangle\langle +|) \\ &= |-\rangle\langle -|, \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \text{Det}'_{\text{refl}} &= \text{Pol}_{\text{Bob}} \text{Det}_{\text{refl}} \text{Pol}_{\text{Bob}}^\dagger = (|-\rangle\langle 0| + |+\rangle\langle 1|)(|1\rangle\langle 1|)(|0\rangle\langle -| + |1\rangle\langle +|) \\ &= |+\rangle\langle +|. \end{aligned} \quad (7)$$

Wir sehen also, dass in dieser Variante der Messapparat tatsächlich in der x-Basis misst.

Der entscheidende Punkt dahinter ist letztlich, dass es egal ist, ob man einen Operator 'nach links' oder 'nach rechts' anwendet. Werden zwei aufeinanderfolgende Operatoren auf einen Zustand angewendet, kann man das auf zwei Arten interpretieren. Der erste Operator verändert den Zustand, der zweite Operator wird auf den veränderten Zustand angewendet (vgl. Variante a) ), oder äquivalent dazu, die beiden Operatoren werden zu einem einzelnen Operator kombiniert, der auf den ursprünglichen Zustand angewendet wird (vgl. Variante b) ). Mathematisch sieht das wie folgt aus,

$$O_1 O_2 |\psi\rangle = \begin{cases} O_1 \overset{\rightarrow}{O_2} |\psi\rangle = O_1 |\psi'\rangle & \text{mit } |\psi'\rangle = O_2 |\psi\rangle \\ O_1 \overset{\leftarrow}{O_2} |\psi\rangle = O' |\psi\rangle & \text{mit } O' = O_1 O_2 \end{cases}. \quad (8)$$

Zusammenfassend ergeben sich folgende Möglichkeiten:

$$\begin{aligned} \text{Bob wählt +-Basis: } p_0 &= \langle \psi | \text{Det}_{\text{trans}} | \psi \rangle = \langle \psi | 0 \rangle \langle 0 | \psi \rangle, \\ p_1 &= \langle \psi | \text{Det}_{\text{refl}} | \psi \rangle = \langle \psi | 1 \rangle \langle 1 | \psi \rangle, \\ &\rightarrow \text{eindeutig für } |\psi\rangle = |0\rangle, |1\rangle, \text{ zufällig für } |\psi\rangle = |+\rangle, |-\rangle \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \text{Bob wählt x-Basis: } p_0 &= \langle \psi | \text{Det}'_{\text{trans}} | \psi \rangle = \langle \psi | - \rangle \langle - | \psi \rangle, \\ p_1 &= \langle \psi | \text{Det}'_{\text{refl}} | \psi \rangle = \langle \psi | + \rangle \langle + | \psi \rangle, \\ &\rightarrow \text{zufällig für } |\psi\rangle = |0\rangle, |1\rangle, \text{ eindeutig für } |\psi\rangle = |+\rangle, |-\rangle. \end{aligned} \quad (10)$$

## Literatur

- [1] D. Huber and S.J. Glaser, *Beads: A canonical visualization of quantum states for applications in quantum information processing*, 2024, <https://arxiv.org/abs/2410.01446>.

<sup>3</sup>Da Operatoren zwei 'Matrix'-Indices haben, muss sowohl von links als auch von rechts der Operator (von rechts der adjungierte) des Polarisationsdreher multipliziert werden, um den ursprünglichen Operator korrekt zu transformieren.