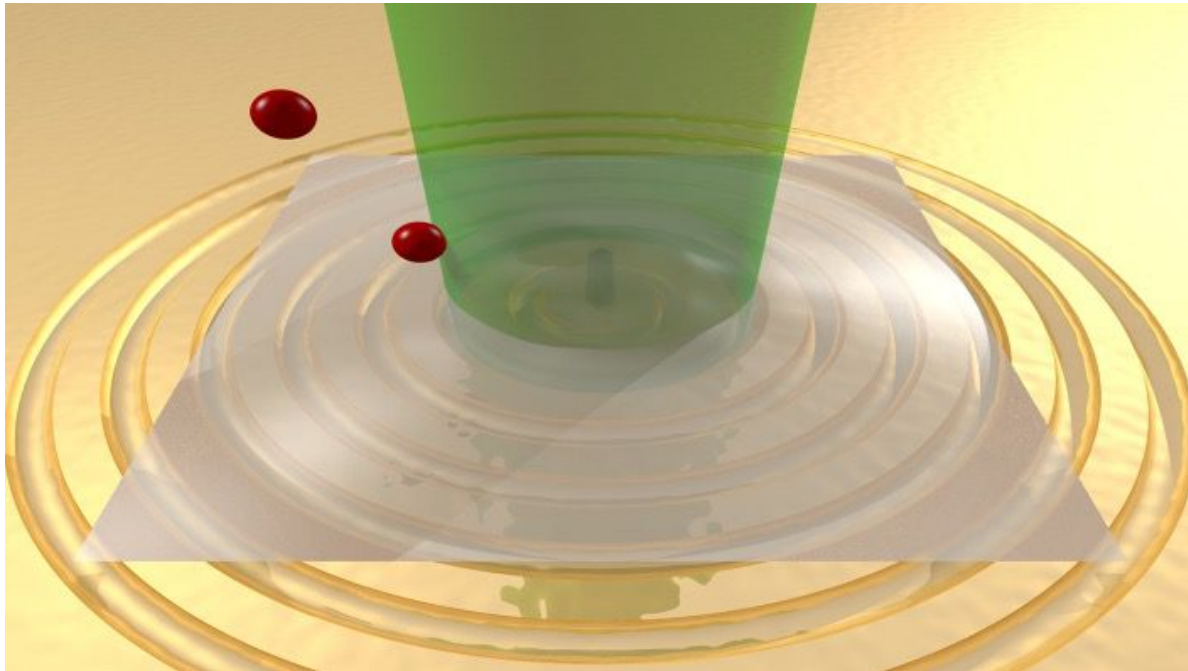


# Quantentechnologie – von der Lehre zur Anwendung

---



Prof. Dr. Martin Silies  
*Hochschule Emden/Leer*

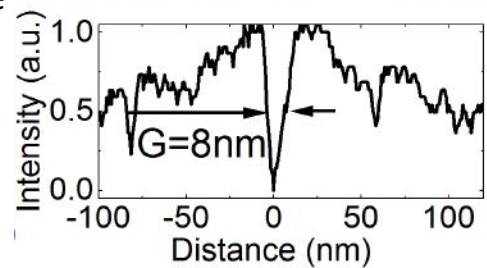
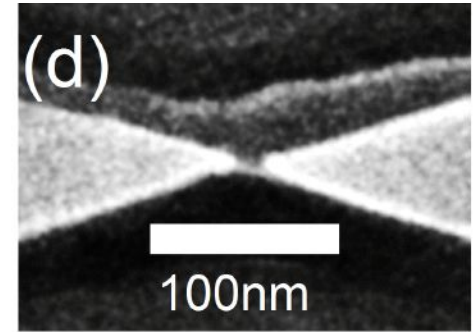
*Fachbereichstag  
Physikalische Technologien e.V.*



- \*1979, verheiratet, 2 Kinder
- Studium Ingenieurwesen „Physikalische Technik“ in Steinfurt (genau hier!)
- Promotion in Münster in 2009 (irgendwas mit Lasern...)
- Seit 2009 Forschungsarbeit in Oldenburg an der Carl von Ossietzky-Universität
- Seit 2014 Gruppenleiter einer Nachwuchsgruppe
- Seit 2021 Professor an der Hochschule Emden/Leer für Optoelektronik



Ultrakurze Laserpulse  
+  
Nanostukturierung  
(Plasmonik)





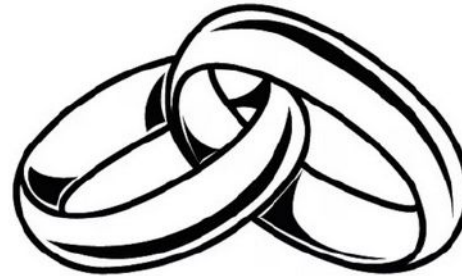
# Quantentechnologie – von der Lehre zur Anwendung

- Studiengang „Engineering Physics“ in Emden/Oldenburg
- Einbettung „Quantum Physics“ in das Studium Bachelor/Master
- Quantenschlüsselaustausch – Was ist das?
- Forschungsaktivitäten an der Hochschule Emden/Leer
- Implementierung in die Lehre

Maschinenbau  
Elektrotechnik  
Materialwissenschaften



Physik  
Medizinphysik  
Audiologie  
Regenerative Energien



in englischer Sprache!  
=  
Engineering Physics





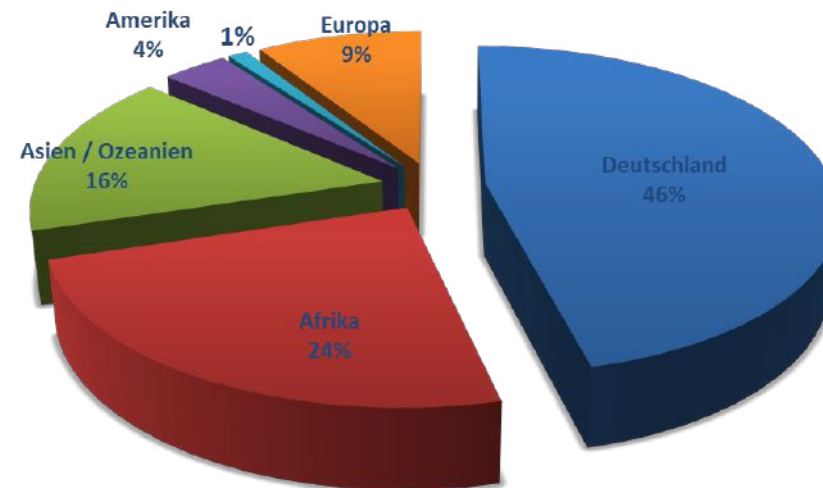
# Engineering Physics



Abschluss	Bachelor of Engineering		Master of Science	
Regelstudienzeit	6 Semester		4 Semester	
Leistungspunkte	180 ECTS		120 ECTS	
Unterrichtssprache	Englisch		Englisch	
Studienform	Vollzeit / Teilzeit		Vollzeit / Teilzeit	
Studienbeginn	Wintersemester		Winter- und Sommersemester	
Bewerbungszeitraum	Deutsch	15.07.-15.10.	01.06.-15.07.	Winter
			15.12.-15.01.	Sommer
Bewerbungszeitraum	International (Uni-Assist)	15.05.-15.10.	15.05.-15.07.	Winter
			15.11.-15.01.	Sommer
Zugangsvoraussetzung	Sprachnachweis Englisch	Niveau B2	Sprachnachweis Englisch	Niveau B2
	Sprachnachweis Deutsch	Niveau A2		
Zulassungsbeschränkt	Nein		Ja	

\*durchschnittlich 8 Punkte in den letzten vier Halbjahren im Abitur

[uol.de/ep](http://uol.de/ep)





## Fachbereich Technik



- 5 Arbeitsgruppen
- Ca. 20 Mitarbeiter
- Forschung in
  - Lasermaterialbearbeitung
  - Laser in Medizin, Mikroskopie und Analytik
  - Intensive, ultrakurze Laserimpulse
  - Laser- und optische Messtechnik
  - **Optoelektronik**

Fachbereich Wirtschaft

Fachbereich Soziale  
Arbeit und Gesundheit

Fachbereich „Seefahrt und  
Maritime Wissenschaften“



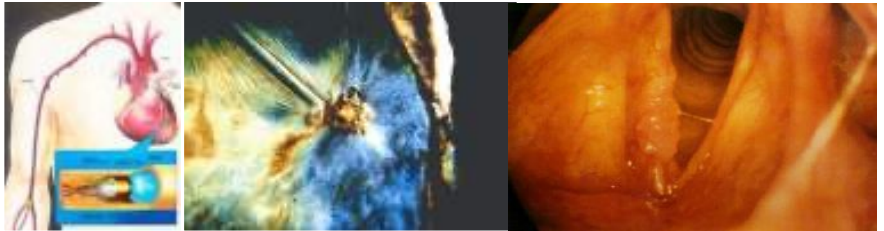
# Spezialisierung: Laser&Optik



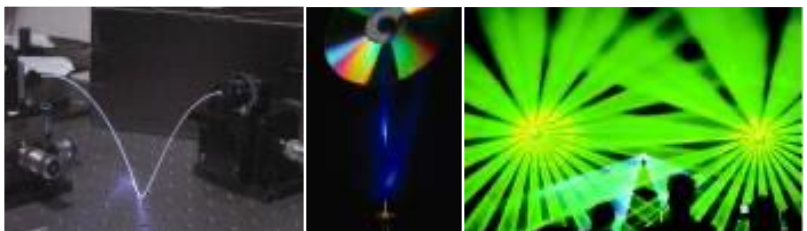
**Light, laser, photonics**  
Safety and Environment



**Macro-, Micro-, Nano-**  
Manufacturing with light



**Medicine & Biotechnology**  
Minimal invasive therapy, fast diagnostics



**Informatics & Communication**  
Light transports, Storing, Visualization



**Metrology and Sensors**  
Contact-free, precise, lightning-fast

Curriculum Master Engineering Physics

CP ->	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30	Sum	
4	Thesis											
CP	30										30	
3	Theoretical Methods	Seminar Advanced Topics in EP	Specialization	Advanced Research Project (Preparation Master Thesis)								
CP	6	3	6	15								30
2	Advanced Physics	Engineering Sciences	Specialization	Specialization	Tools and Skills in Engineering Sciences							
CP	6	6	6	6	6						30	
1	Advanced Physics	Advanced Metrology	Engineering Sciences	Engineering Sciences	Specialization							
CP	6	6	6	6	6						30	

Fields of study: Physics, Engineering, Specialisation, Management, Laboratory, Thesis, compulsory, elective

It is possible to specialize in the following areas: *Biomedical Physics, Acoustics, Laser & Optics or Renewable Energies.*

## Curriculum Bachelor Engineering Physics

Table 1: Curriculum - Bachelor Engineering Physics: Math, Physics, Engineering, Specialization, Laboratory, Thesis  $\sum SWS = 101, \sum CP = 180$

CP ->	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30	sum			
6. Semester	Practice Module Engineering Physics (PB)					Thesis								
SWS	1(2 Month)					2 (max. 4 month)						3		
CP	15					15						30		
5. Semester	Control Theory	Solid-State Physics	Material Science	PB e.g. Spec.		PB / Lab Project II								
SWS	5	6	4	4		6						25		
CP	6	6	6	6		6						30		
4. Semester	Numerical Methods	Thermodynamics & Statistics	Metrology	Quantum Structure of Matter		PB e.g. Spec.								
SWS	4	6	5	4		4						23		
CP	6	6	6	6		6						30		
3. Semester	Mathematical Methods for Physics and Engineering III	Atomic and Molecular Physics	Lab Project I (Project)	Specialization		PB e.g. Spec.								
SWS	4	6	6	2		2		5						25
CP	6	6	6	3		3		6						30
2. Semester	Mathematical Methods for Physics and Engineering II	Electrodynamics and Optics	Basic Engineering (Applied Mechanics)	Electronics		Lab Project I (Design Fundamentals)	Basic Laboratory (Course II)							
SWS	4	6	2	2		6		2		4		26		
CP	6	6	3	3		6		3		4		31		
1. Semester	Mathematical Methods for Physics and Engineering I	Mechanics	Basic Engineering (Production Engineering)	Basic Laboratory (Course I)		PB e.g. Computing								
SWS	6	6	2	4		4						22		
CP	9	6	3	5		6						29		

## Master

- Spezialisierung wird weiter geführt (grau)
- Laser&Optik-Module
  - (Fundamentals of Optics)
  - Laser Design and Beam Guiding, Optoelectronics Photonics, Nonlinear Optics,
- Aber: in Master „neue Studierendenschaft“ mit anderen Voraussetzungen (E-Technik, Maschinenbau)

## Bachelor:

- fundierte Physik-Ausbildung (rot und blau)
- Ingenieurs-Elemente (gelb) kombiniert mit Praktikumselementen (grün)
- Spezialisierung und Prof-Module (grau)

## Ende Bachelor:

erste Erfahrungen mit Quantenoptik/technologie



„Fundamentals of Optics“ & „Laser Design“: Repetitorium für die „Neuen“

## Photonics

- Strahlen/Wellen/Fourier-Optik
- Photonen; Statistische Optik
- Wellenleiter/ Fasern

## Optoelectronics

- klassische Optik, Festkörperphysik
- Optoelektronische Anwendungen (LD, LED, PV, Photodioden,...)
- Optische (Faser)-Kommunikation

## Quantenoptik

Einzelphotonenquellen, Quantenkommunikation,  
-verschlüsselung, No Cloning-Theorem



- **Quantenkryptographie (QC):** Verwendung quantenmechanischer Effekte zur Kryptographie/Kryptoanalyse
- Verschlüsselung mit mathematischen Methoden nicht lösbar, da Gesetze der Physik als Limit
- **Quantenschlüsselaustausch (QSA / QKD):** Möglichkeit, einen Quantenschlüssel auszutauschen, dessen Missbrauch entdeckt würde
- Quantenschlüssel wird DANN benutzt, um Informationen aus einem öffentlichen Kanal zu ver-/entschlüsseln



# Die Protagonisten

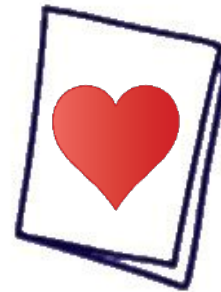
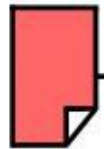


**Alice**



**Bob**

Message



„geheim“



Message





# Die Protagonisten

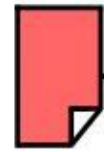


**Alice**



**Bob**

Message



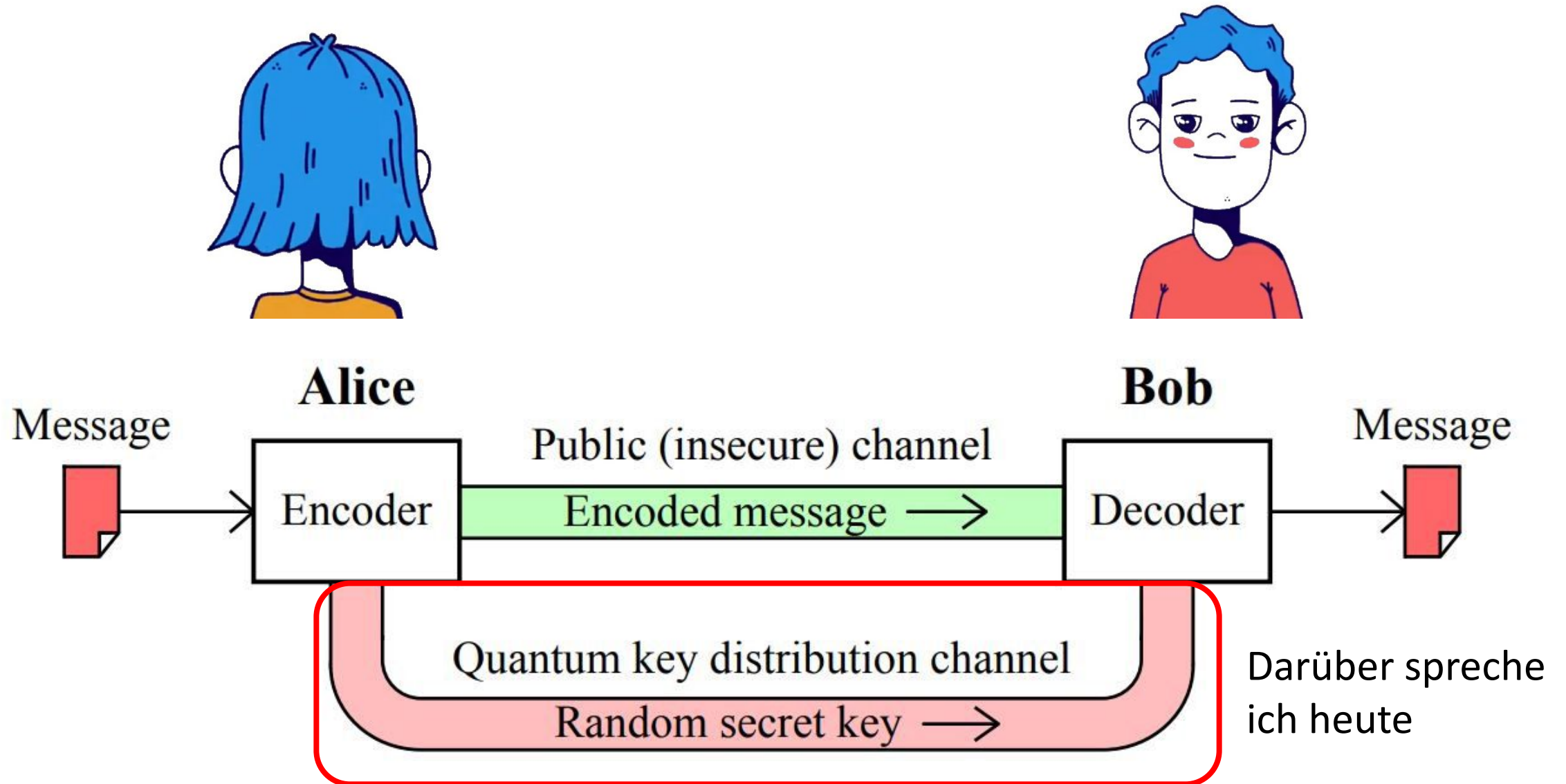
**Eve**

Message



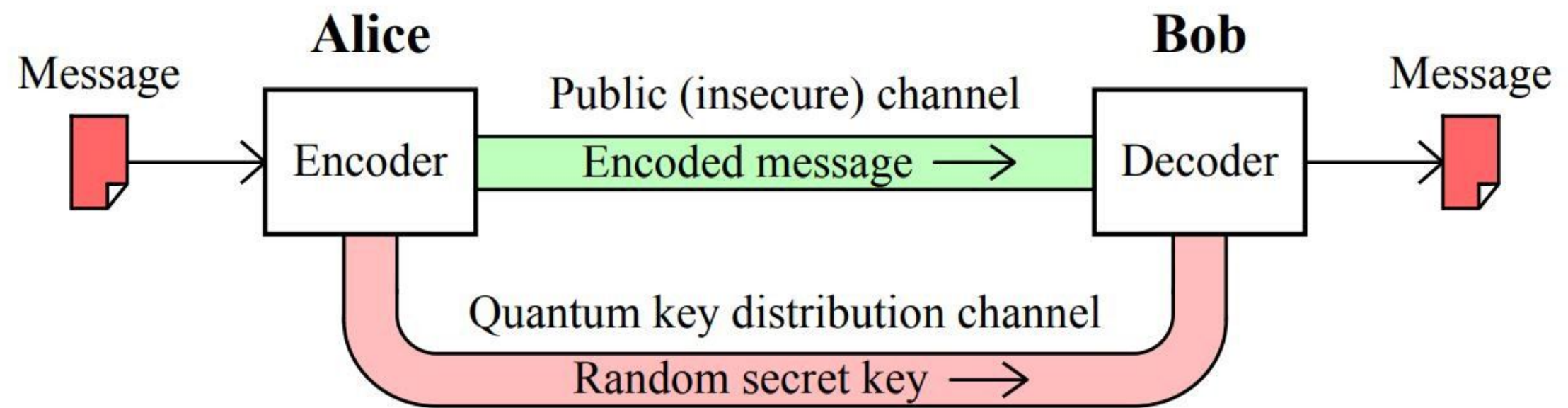
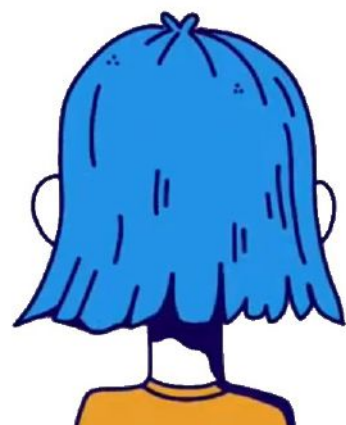
Möchte mithören, ohne dass es auffällt!

# BB84 Protocol



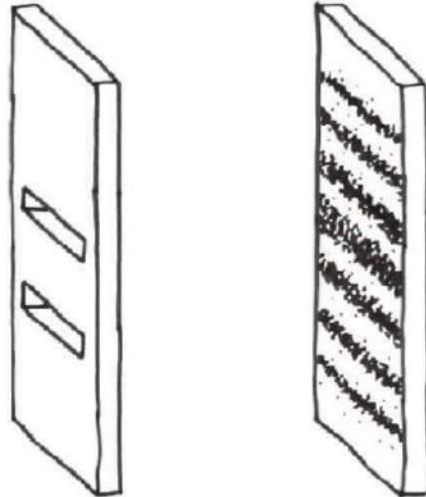


# BB84 Protocol

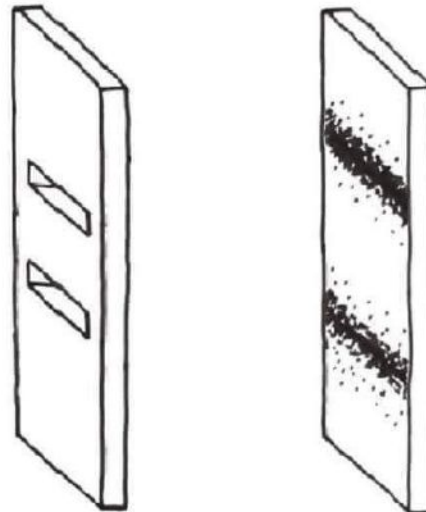




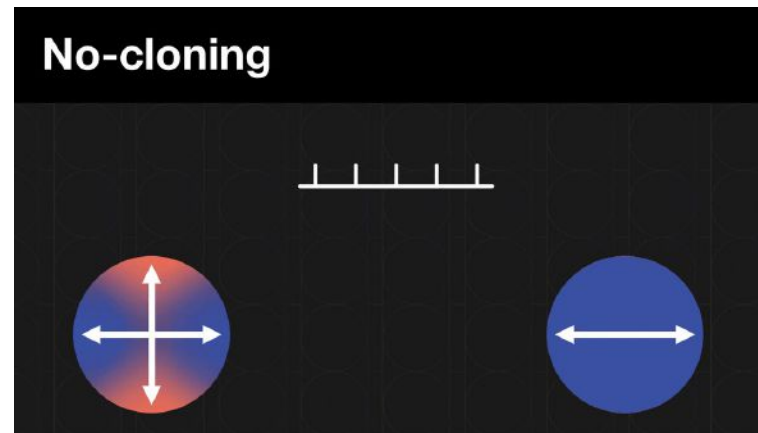
# Voraussetzungen: Quantenmechanik



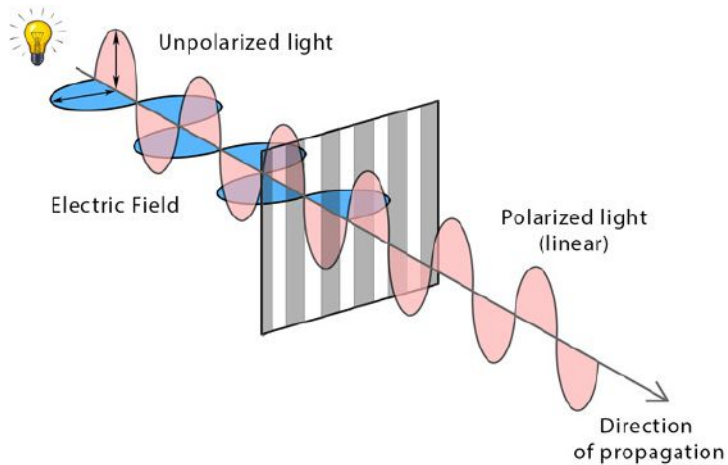
Messung beeinflusst Ergebnis!!



Das ist das „Geheimnis“ der QKD



# Wie funktioniert das Protokoll

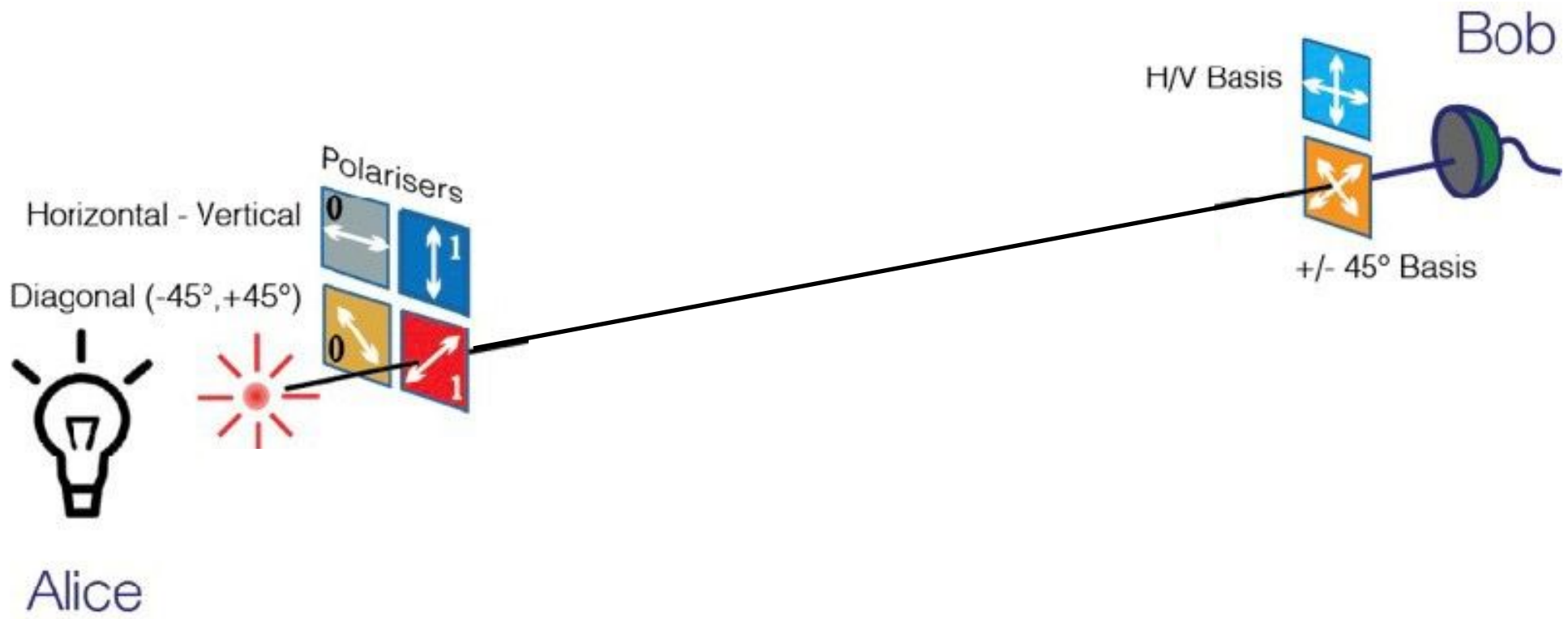


- Lichtteilchen = Photonen = tragen Zustand der Polarisation; Polarisation = Qubit
- Zustand des Qubit kann mithilfe von Polarisatoren eingerichtet/gemessen werden
- Zwei Basen von Polarisatoren werden genutzt: Horizontal/Vertikal (+) UND Diagonal (x)
- Basen tragen Zustände von 0 und 1 (0: z.B. | und / )
- Alice und Bob nutzen einzelne Photonen/Qubits zur Informationsübertragung
- Polarisatoren zur Einstellung (Alice) und Bestimmung (Bob) ihres gemeinsamen Schlüssels

Basis	0	1
+	↑	→
×	↗	↘

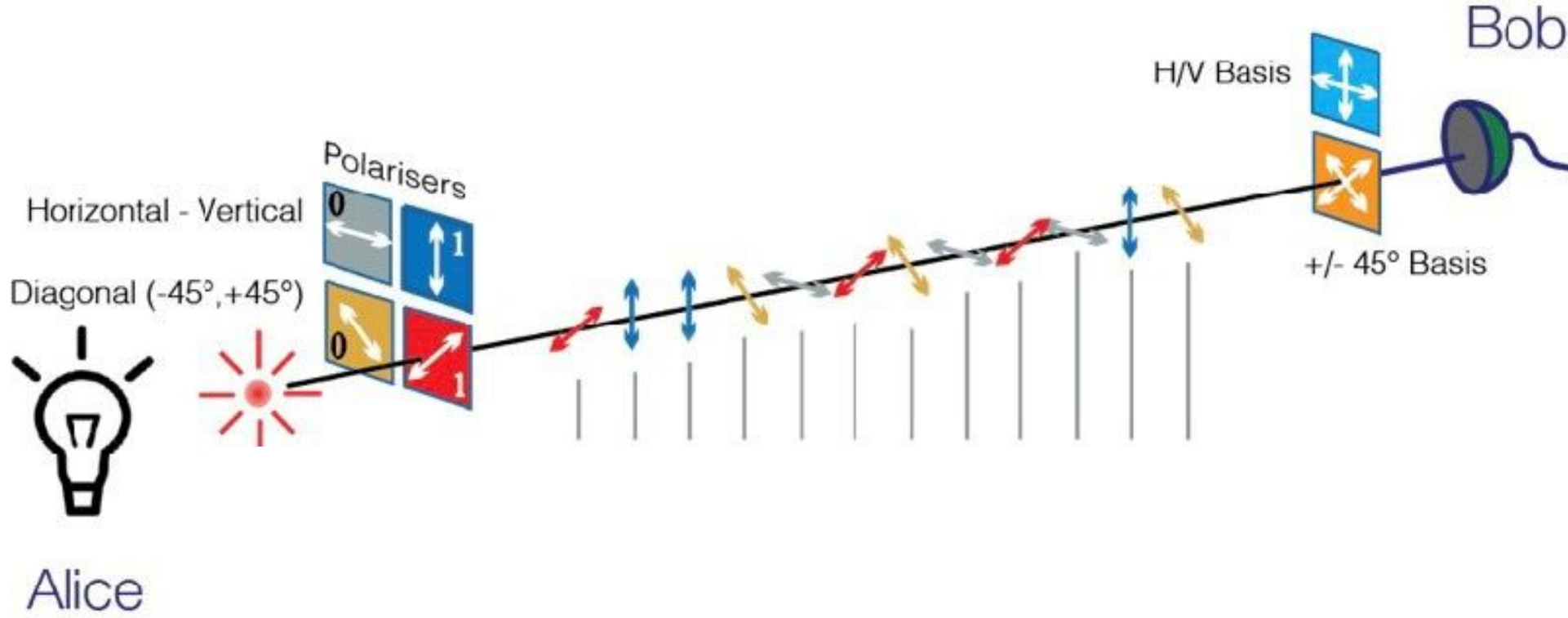


# Aufbau des Protokolls - Schlüsselerzeugung

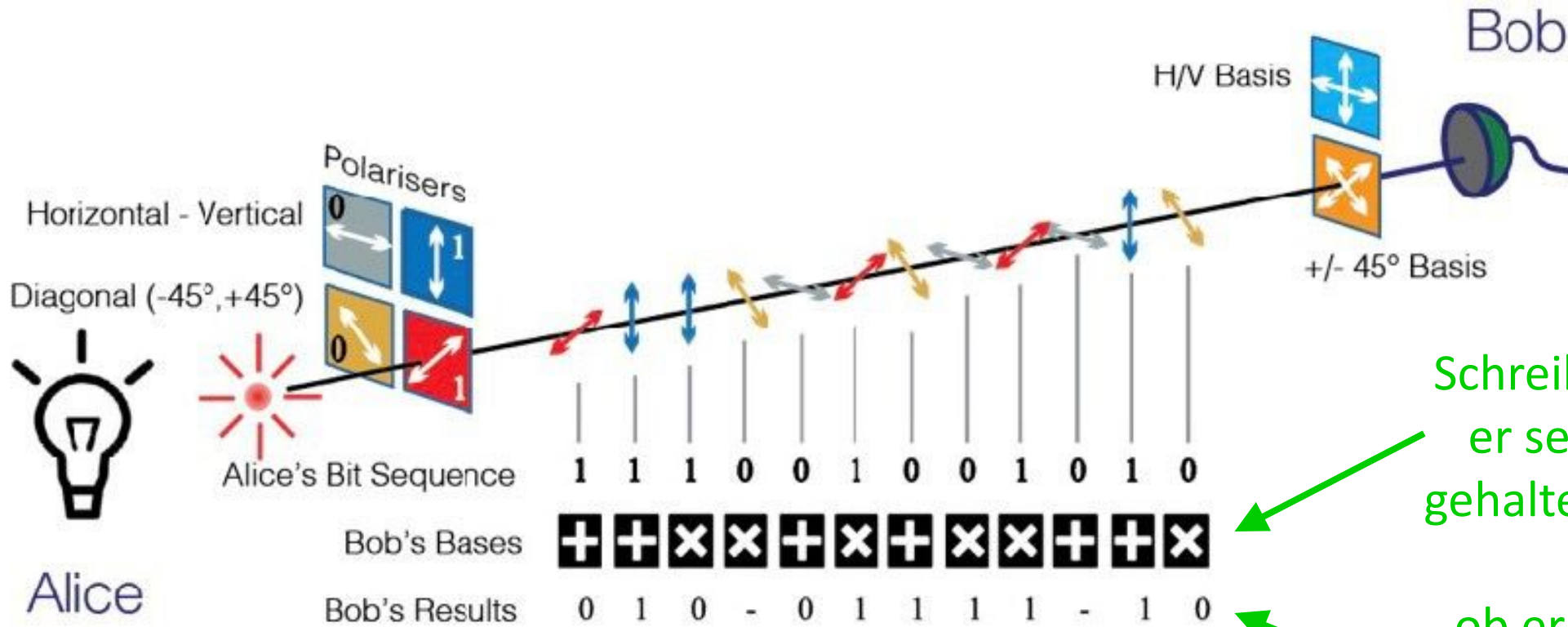




# Aufbau des Protokolls - Schlüsselerzeugung



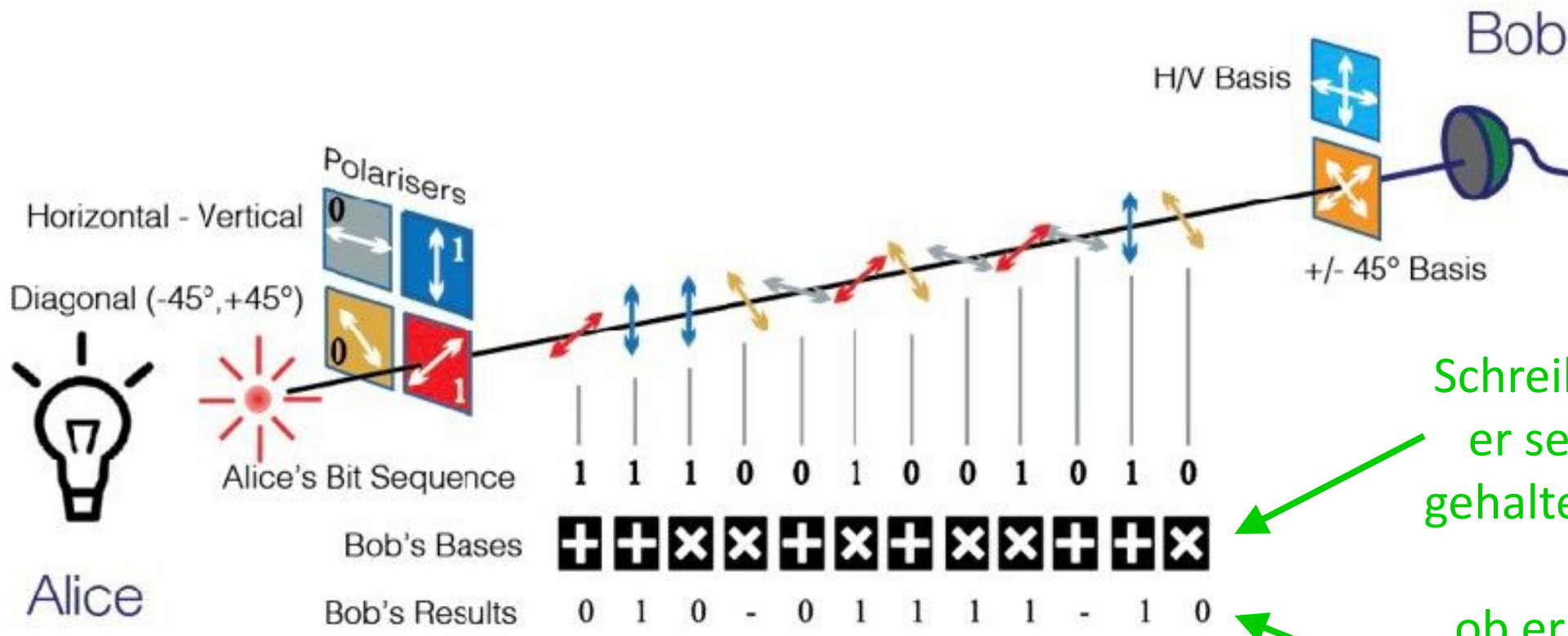
Übermittelt Informationen (1,0)  
in beliebigen Basen (+ oder x)



Schreibt auf, wie er seinen Filter gehalten hat und

ob er Photonen gemessen hat

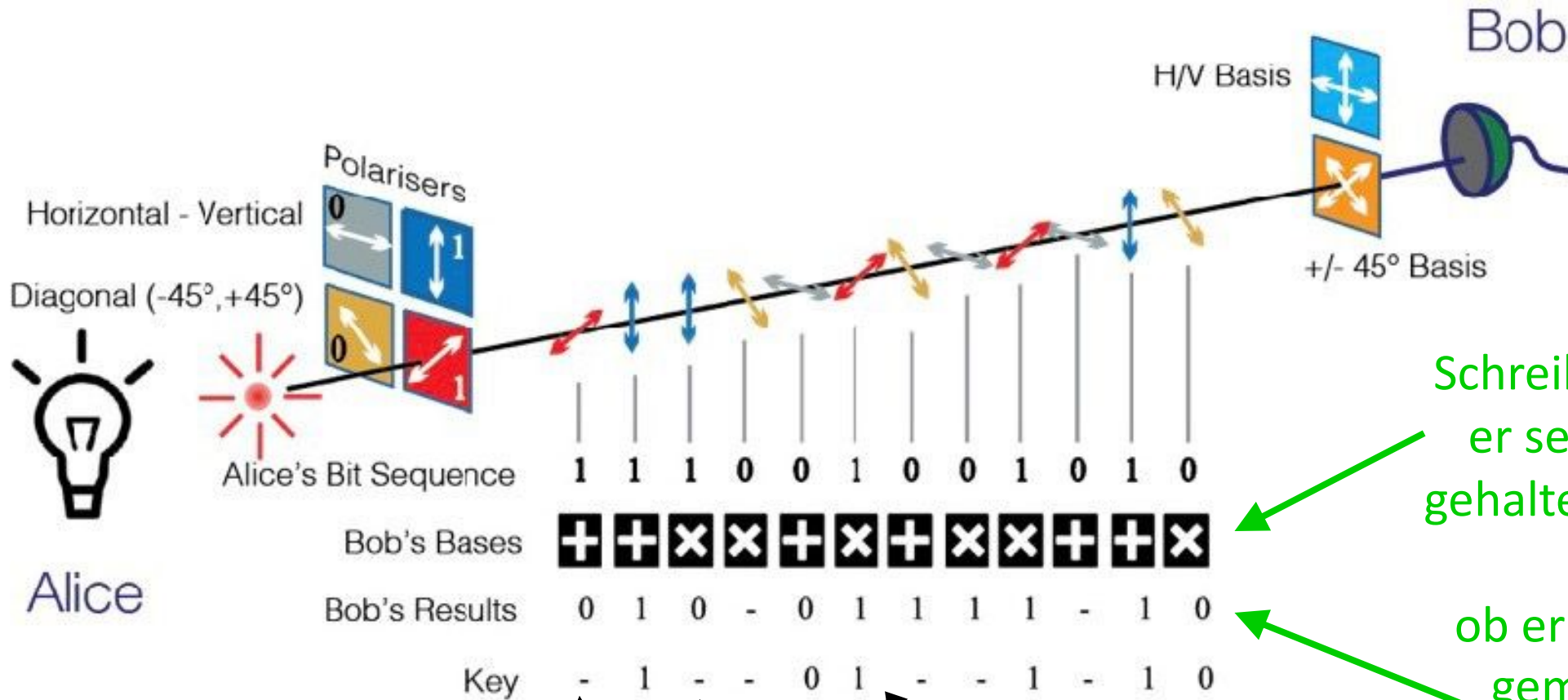
Schreibt auf, wie sie ihren Polarisationsfilter eingestellt hat



Schreibt auf, wie sie  
ihren Polarisationsfilter  
eingestellt hat

Schreibt auf, wie  
er seinen Filter  
gehalten hat und  
ob er Photonen  
gemessen hat

Öffentliche Unterhaltung über  
Alice und Bobs Polarisations-einstellungen

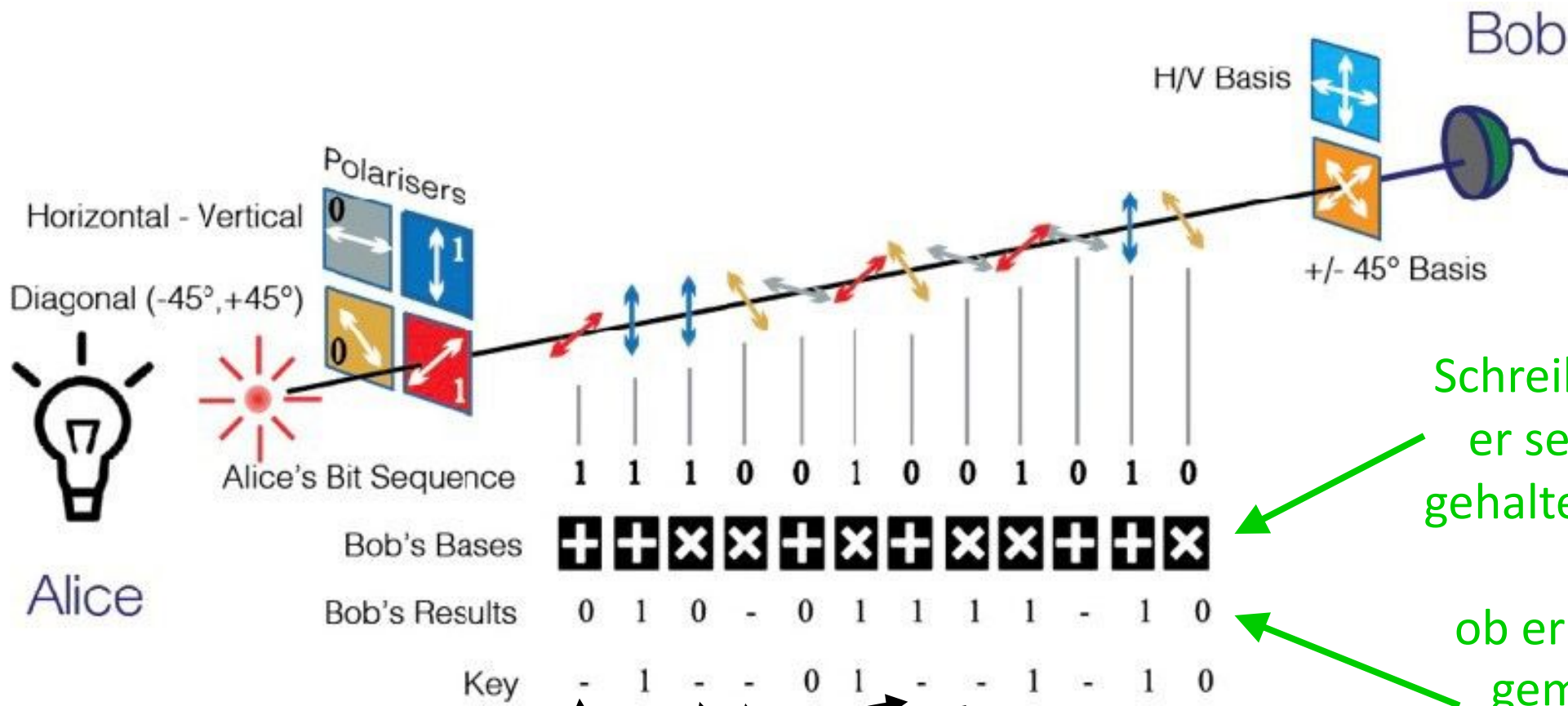


Schreibt auf, wie sie ihren Polarisationsfilter eingestellt hat

Schreibt auf, wie er seinen Filter gehalten hat und

ob er Photonen gemessen hat

Messung mit unterschiedlichen Basen führt zu doppeldeutigen Ergebnissen (Ergebnis streichen)



Alice

Bob

H/V Basis

+/- 45° Basis

Schreibt auf, wie er seinen Filter gehalten hat und

ob er Photonen gemessen hat

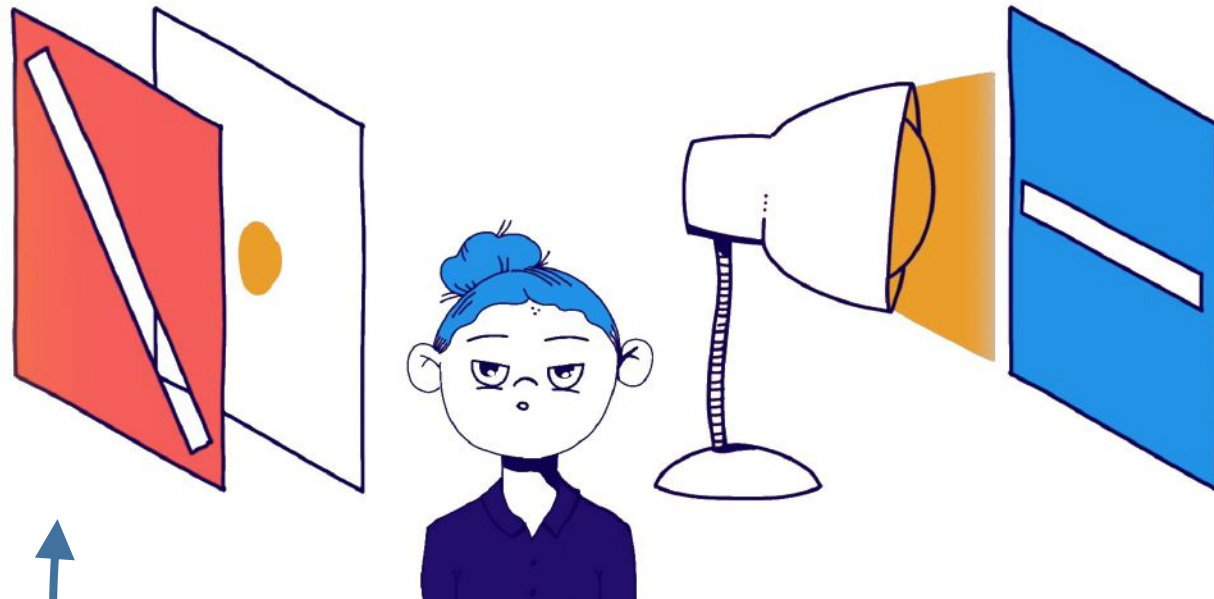
Schreibt auf, wie sie ihren Polarisationsfilter eingestellt hat

Messung mit unterschiedlichen Basen führt zu doppeldeutigen Ergebnissen (Ergebnis streichen)

Übriges Resultat ist der Schlüssel → One Time Pad



# Eve liest mit...

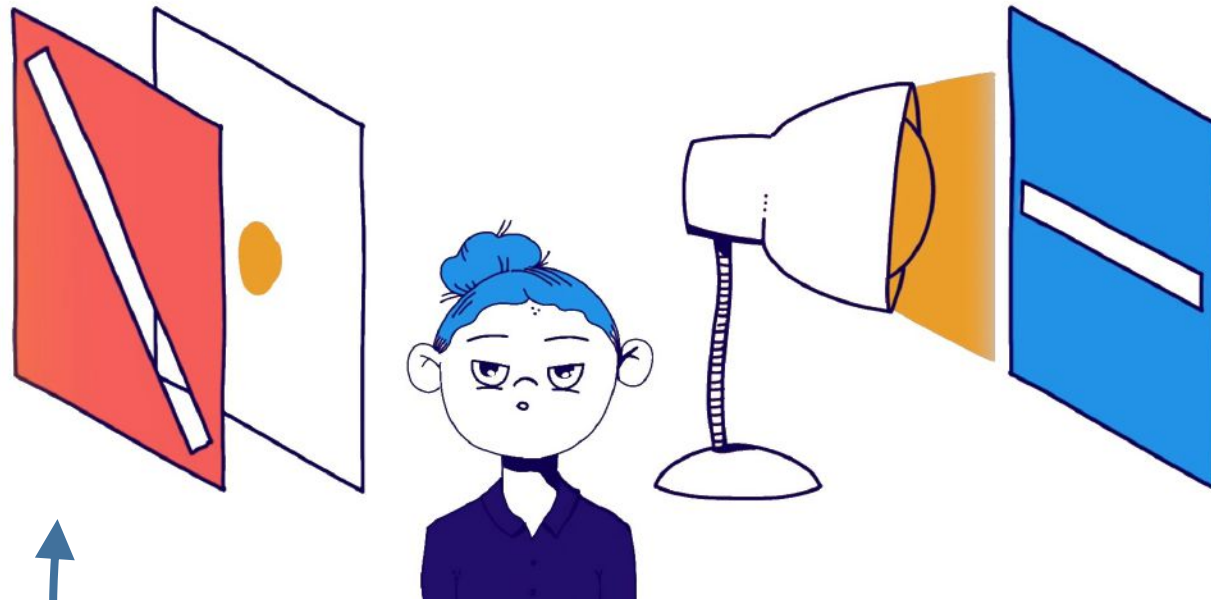


Misst mit  
Diagonal-Pol.

- Eve nutzt auch Polarisatoren, um den Schlüssel zu bestimmen
- Messung des Qubits vernichtet es, sie muss ein neues erzeugen, mit dem Zustand, den sie gemessen hat



# Eve liest mit...



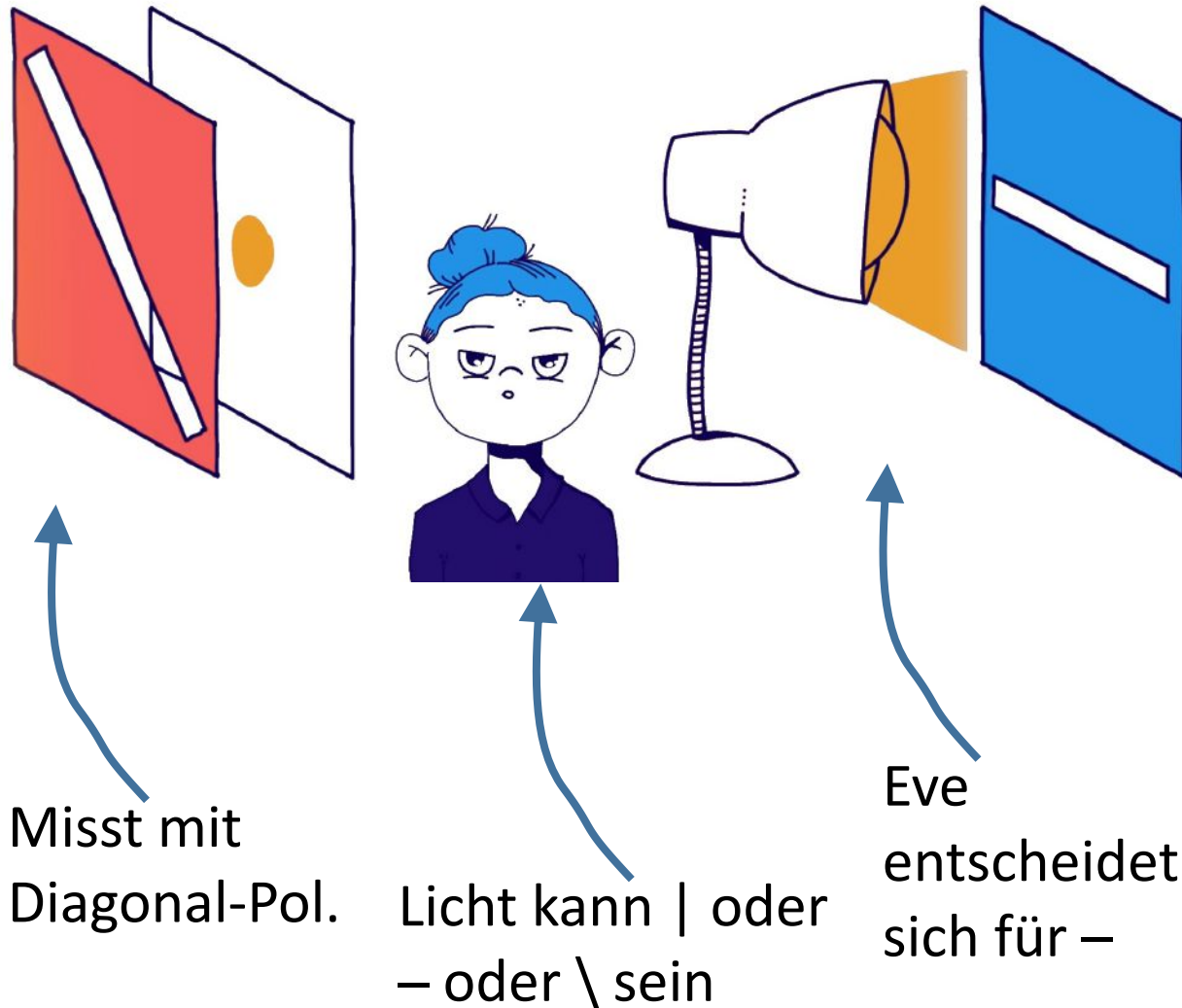
Misst mit  
Diagonal-Pol.

Licht kann | oder  
– oder \ sein

- Eve nutzt auch Polarisatoren, um den Schlüssel zu bestimmen
- Messung des Qubits vernichtet es, sie muss ein neues erzeugen, mit dem Zustand, den sie gemessen hat

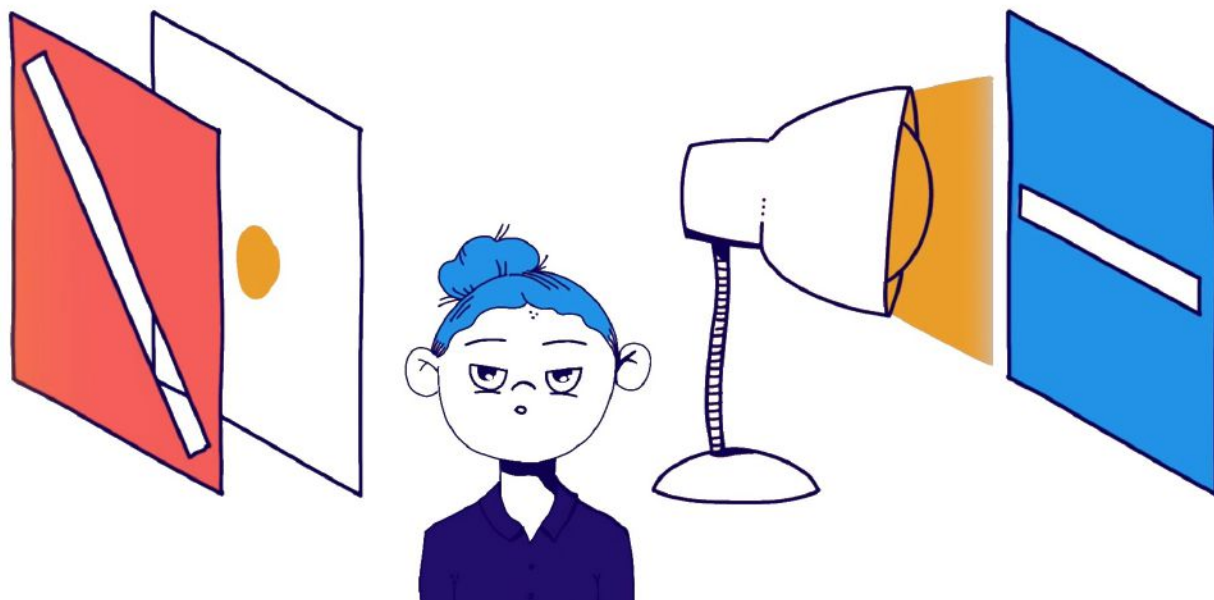


# Eve liest mit...



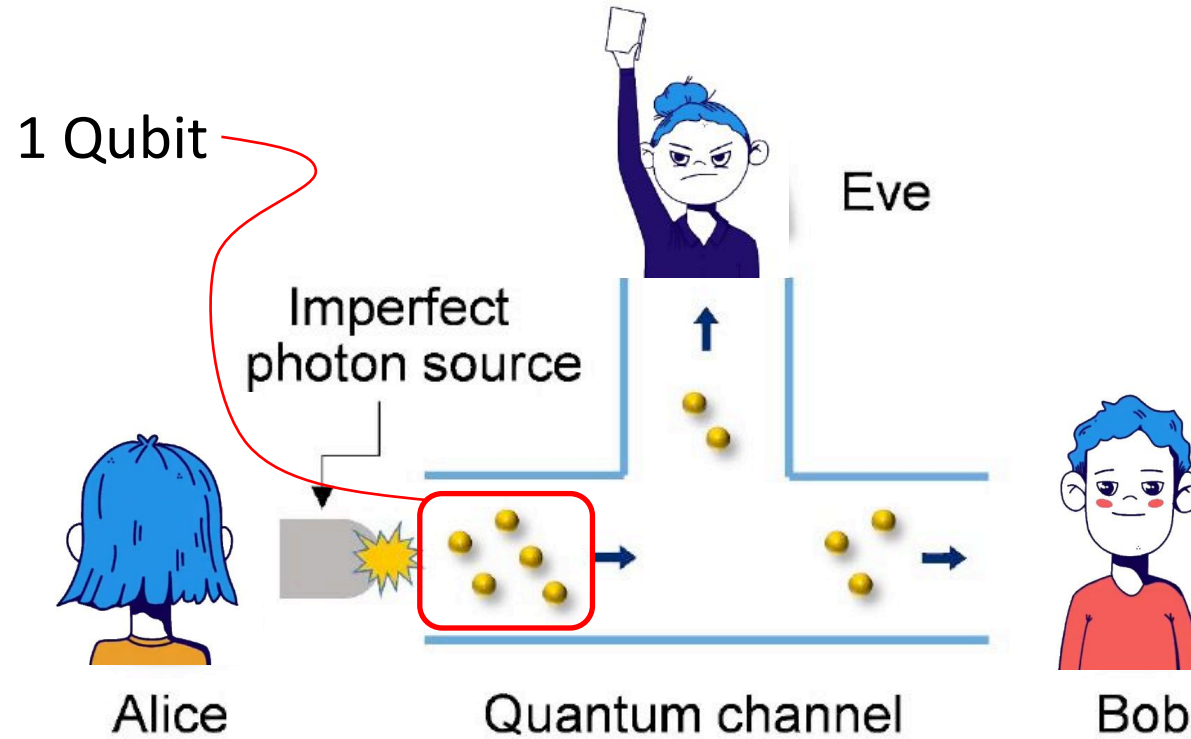
- Eve nutzt auch Polarisatoren, um den Schlüssel zu bestimmen
- Messung des Qubits vernichtet es, sie muss ein neues erzeugen, mit dem Zustand, den sie gemessen hat
- Sie kann aber aufgrund der 2er-Basis nicht 100%ig sicher sein, wie das Qubit polarisiert war und ob ihr Filter richtig war
- sie muss (oft) raten, was sie an Bob weiterschickt

# Eve liest mit...



- Eve nutzt auch Polarisatoren, um den Schlüssel zu bestimmen
- Messung des Qubits vernichtet es, sie muss ein neues erzeugen, mit dem Zustand, den sie gemessen hat
- Sie kann aber aufgrund der 2er-Basis nicht 100%ig sicher sein, wie das Qubit polarisiert war und ob ihr Filter richtig war
- sie muss (oft) raten, was sie an Bob weiterschickt
- Hohe Fehlerquote, die nicht unentdeckt bleibt

Niemand kann unentdeckt mithören!

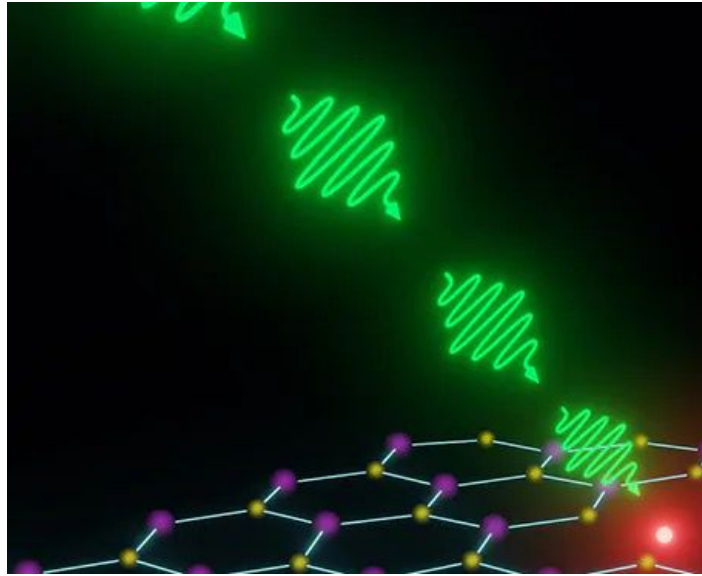


Was passiert, wenn mehrere Photonen/Qubit ausgesandt werden? (Imperfect photon source)

→ Eve könnte die zusätzliche Photonen abspalten und etwas über den Code lernen

→ “keine Informationen preisgeben”

→ Entwicklung der Lichtquellen → Forschung



## Licht/Photonenquelle, die

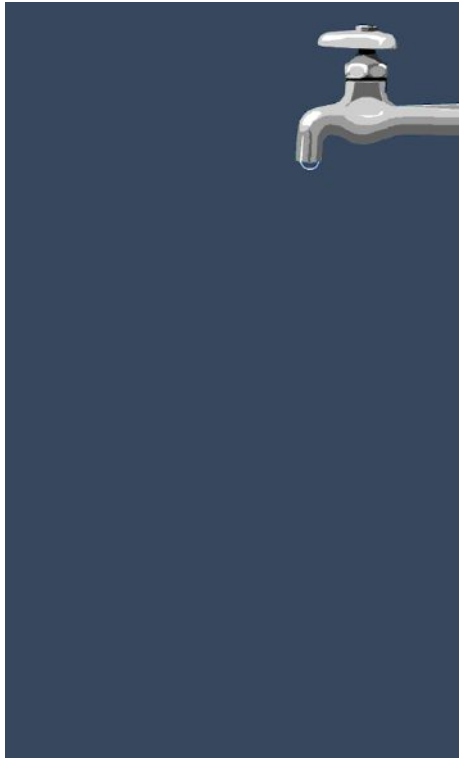
- eine Farbe hat
- Möglichst viele Photonen emittiert
- aber in GENAU festgelegten Abständen (damit Eve nicht Photonen „abschöpfen“ kann)
- Abstandsregel nennt der Physiker AntiBunching (kein Verklumpen)



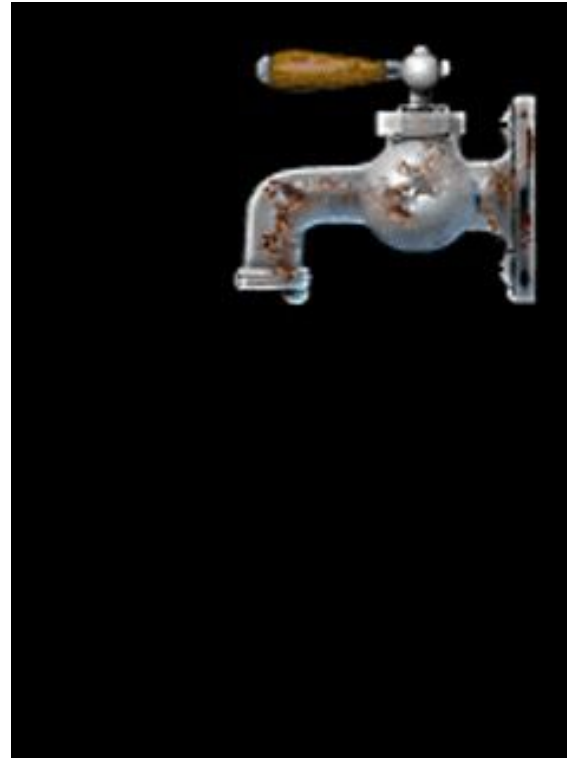
Das ist Bunching



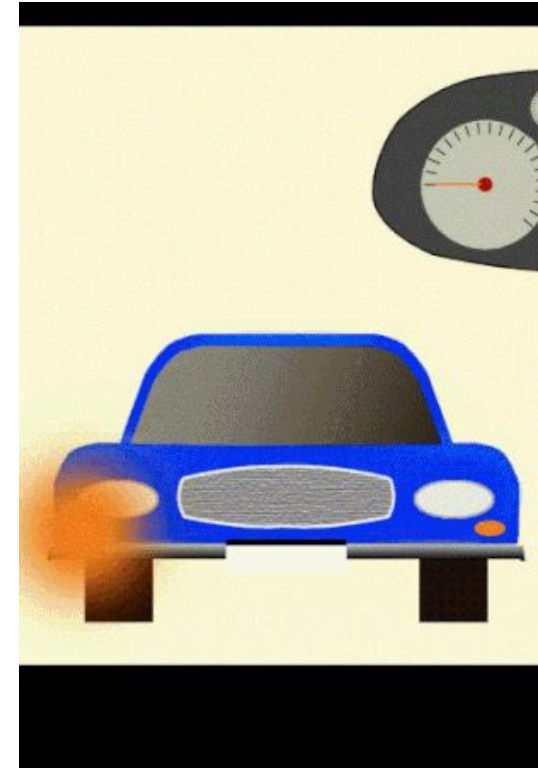
# AntiBunching



Bunched



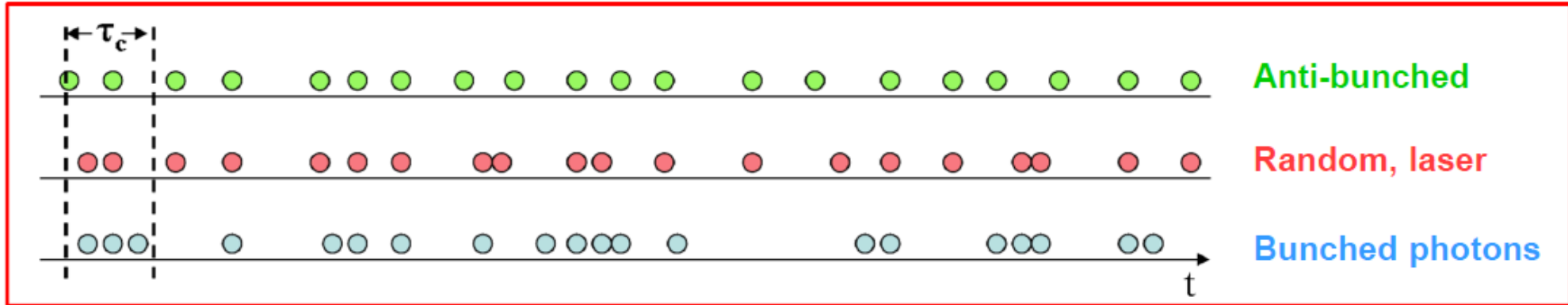
Anti-Bunched



Anti-Bunched - verbessert



# Einzelphotonenquellen

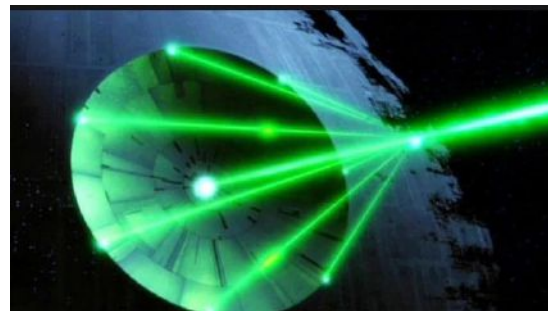


source: J.S. Lundeen

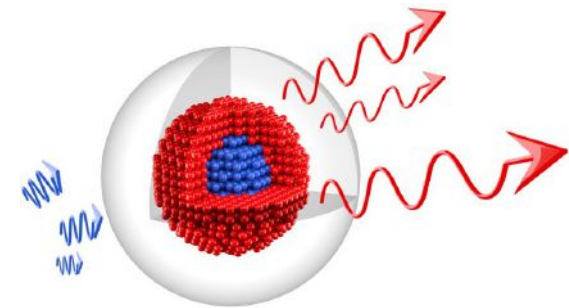
## Bunched Photons

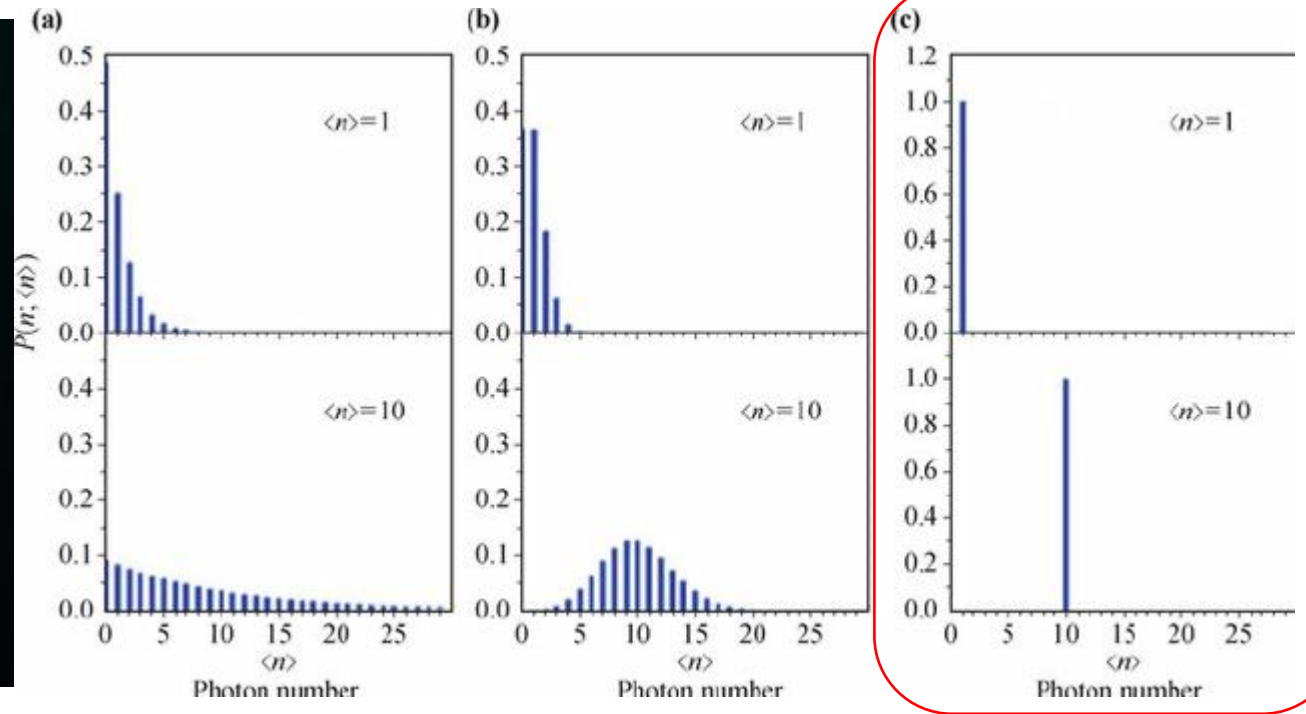
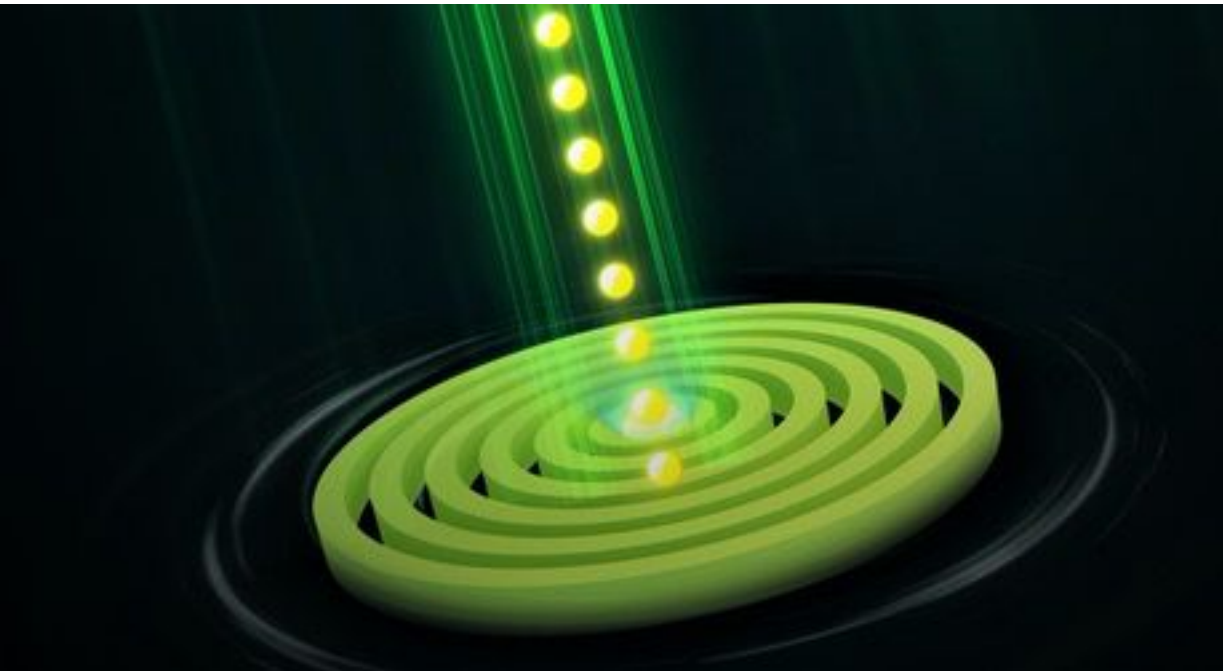


## Random



## Anti-Bunched Photons



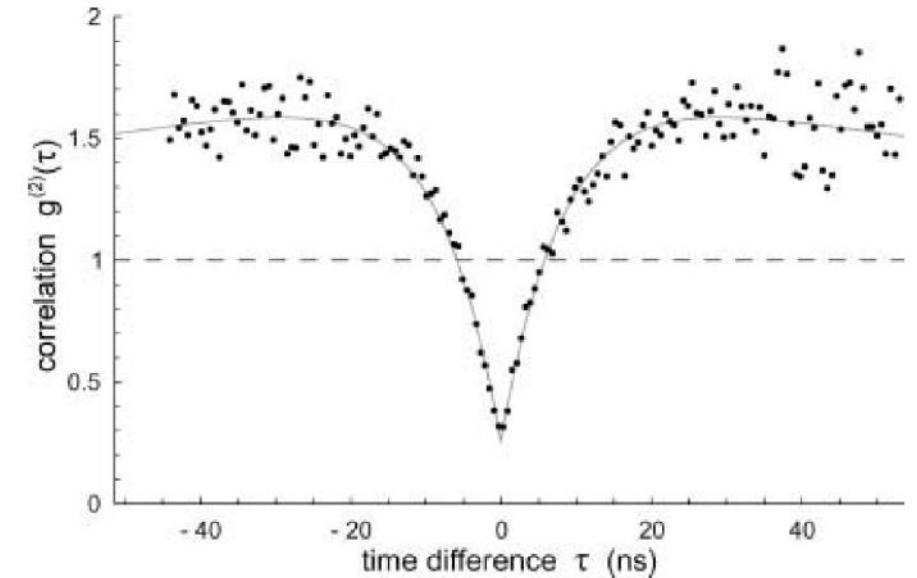
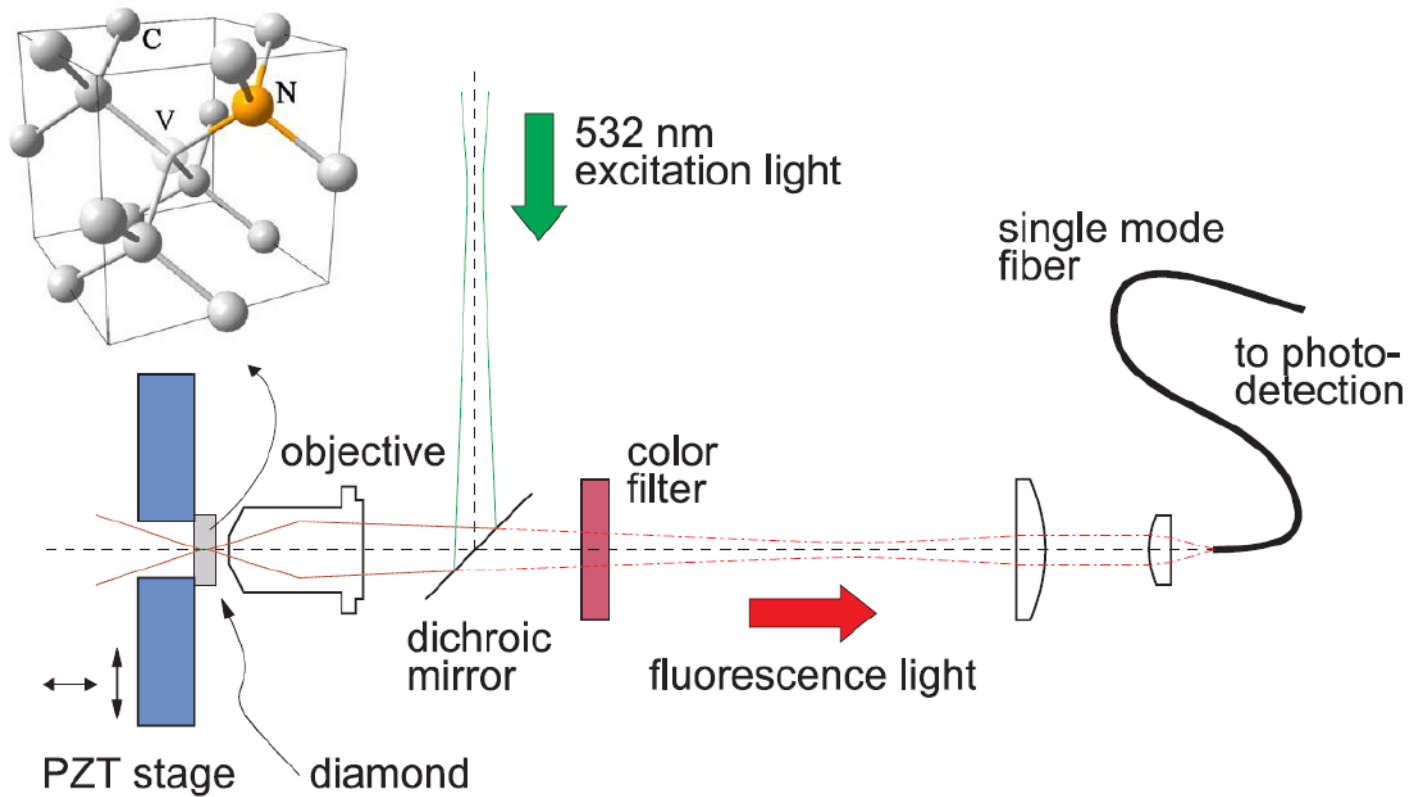


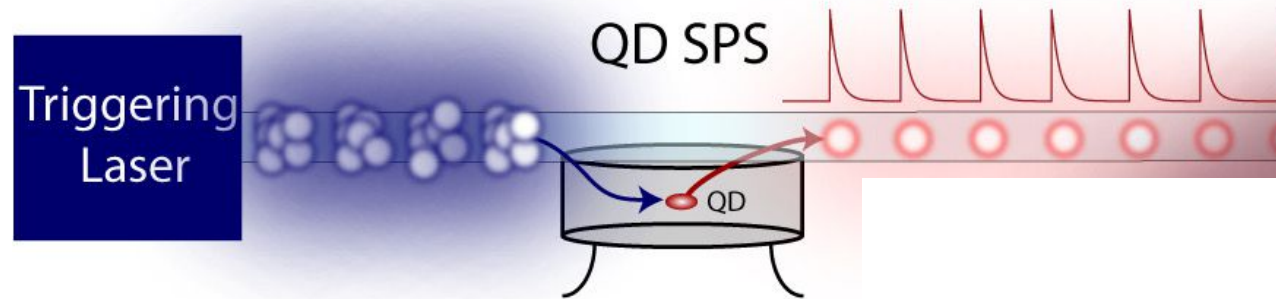
Es werden IMMER einzelne Photonen pro Zeiteinheit aus der Lichtquelle entlassen!



## Forschung

1. Einzelphotonenquelle auf TMDC-Basis bei tiefen (4 K) Temperaturen
2. Verbesserung der Emissionsrate der EPQ durch plasmonische Kavität
3. Forschung an neuartigen EPQ auf hBN-Basis bei Raumtemperatur (RT)

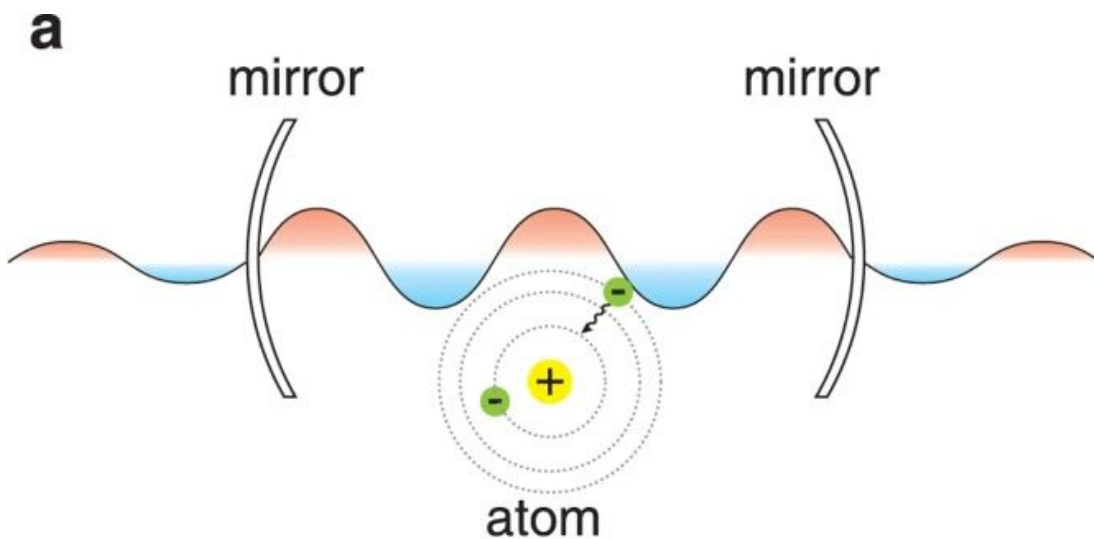




Es werden **IMMER** einzelne Photonen aus der Lichtquelle emittiert!

- Photonenausbeute gering
- Übertragungsrate in QSA langsam

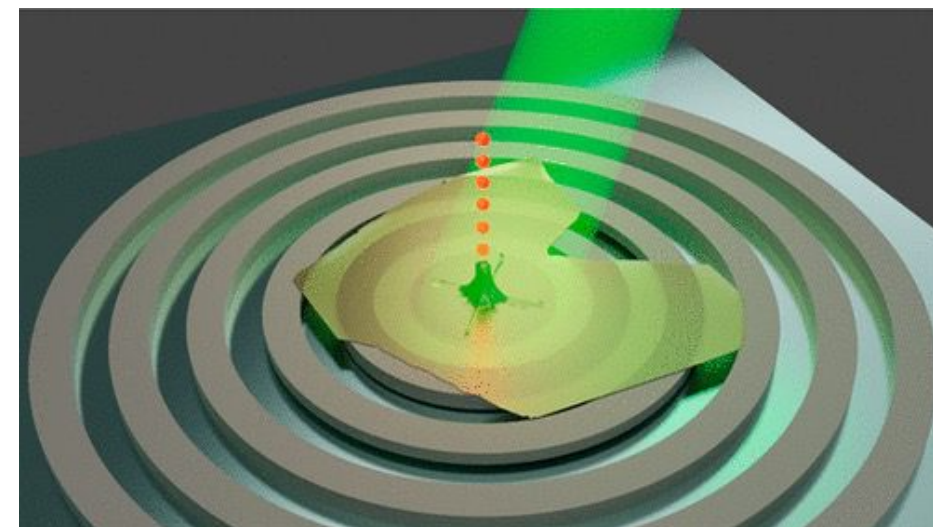




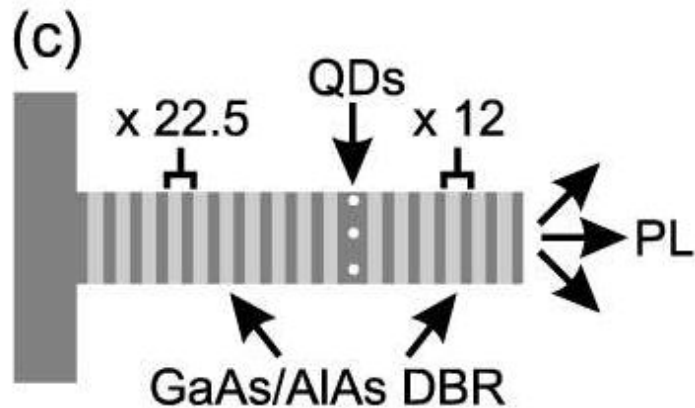
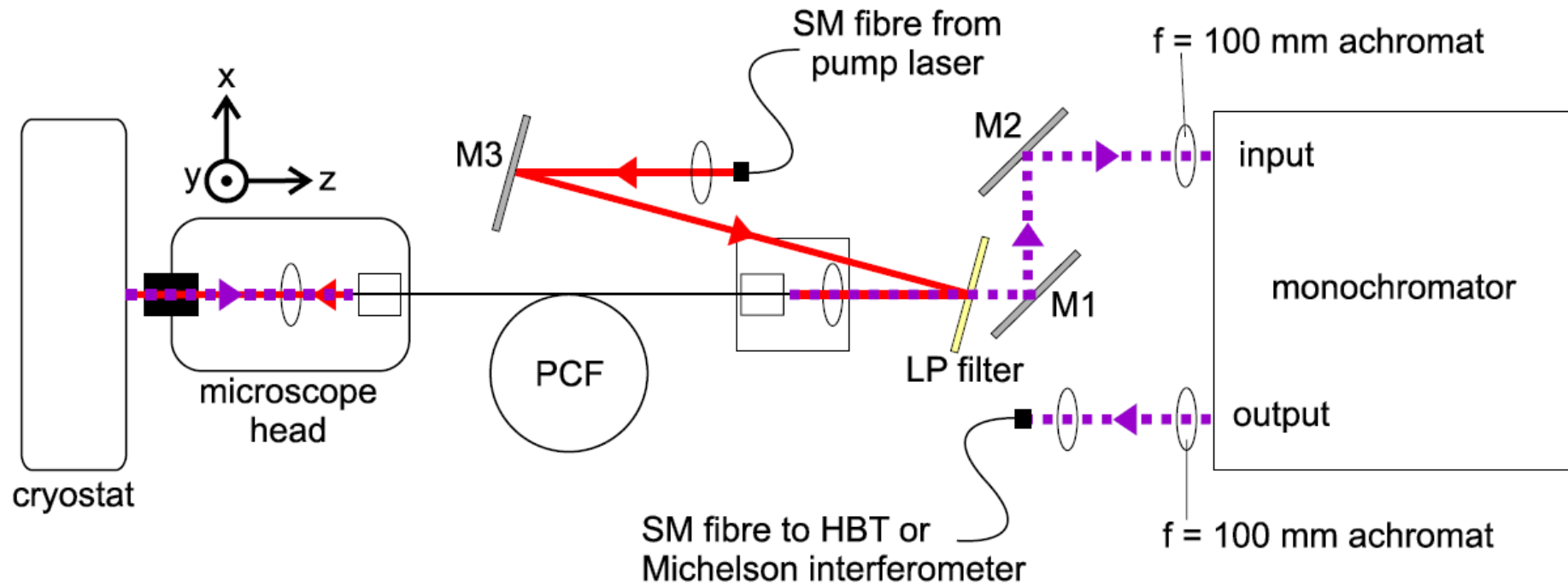
$$F_P = \frac{3}{4\pi^2} \frac{Q}{V} \left( \frac{\lambda}{n} \right)^3 = \frac{W^{Cav}}{W^{frei}}$$

Entweder

- Q hoch oder
- V klein



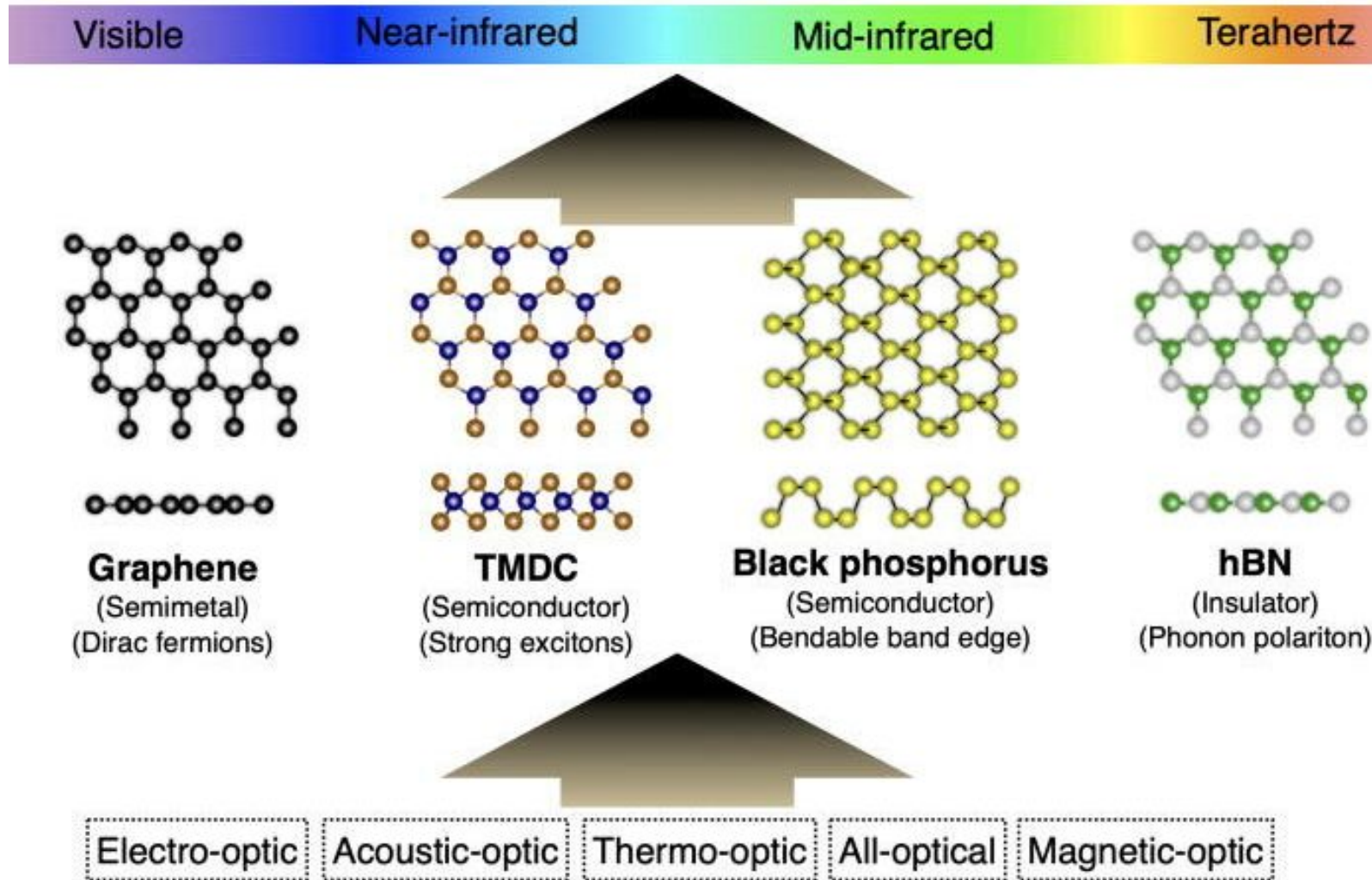
- Einzelphotonenquelle in Kavität
- „Getunte“ Einzelphotonenquelle



„Hohes Q“ in Kavität durch DBR

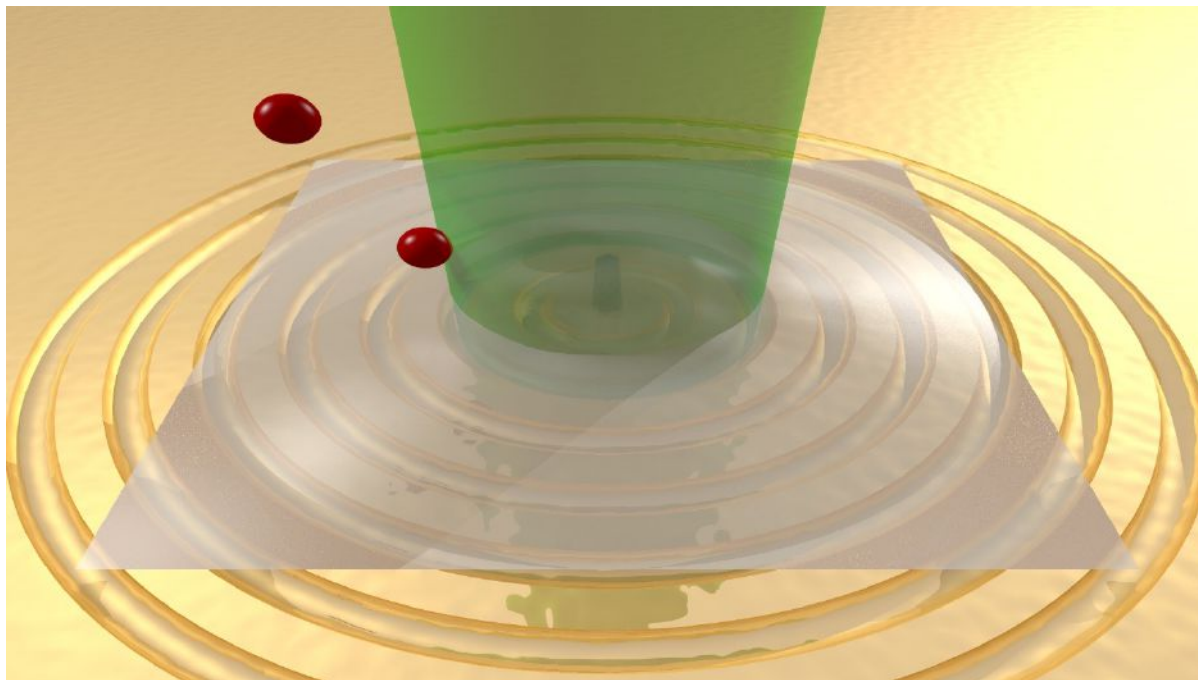
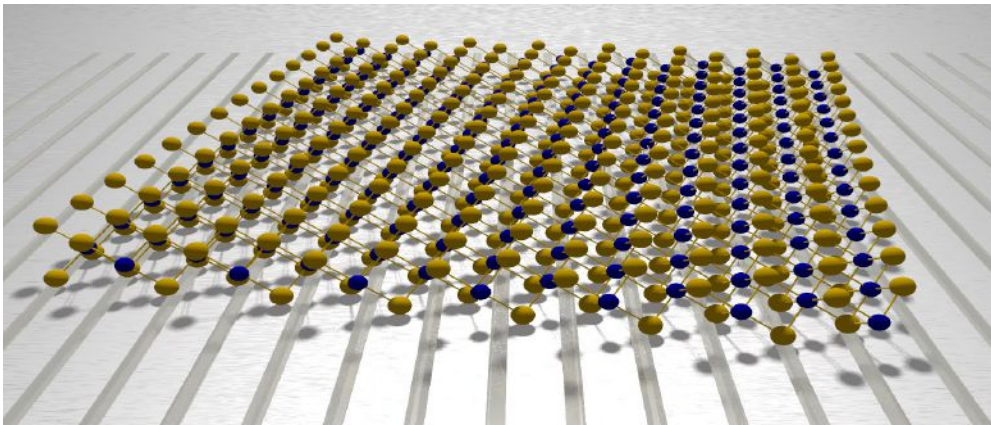


# Ultradünne Übergangsmetalle – Das neue Graphen

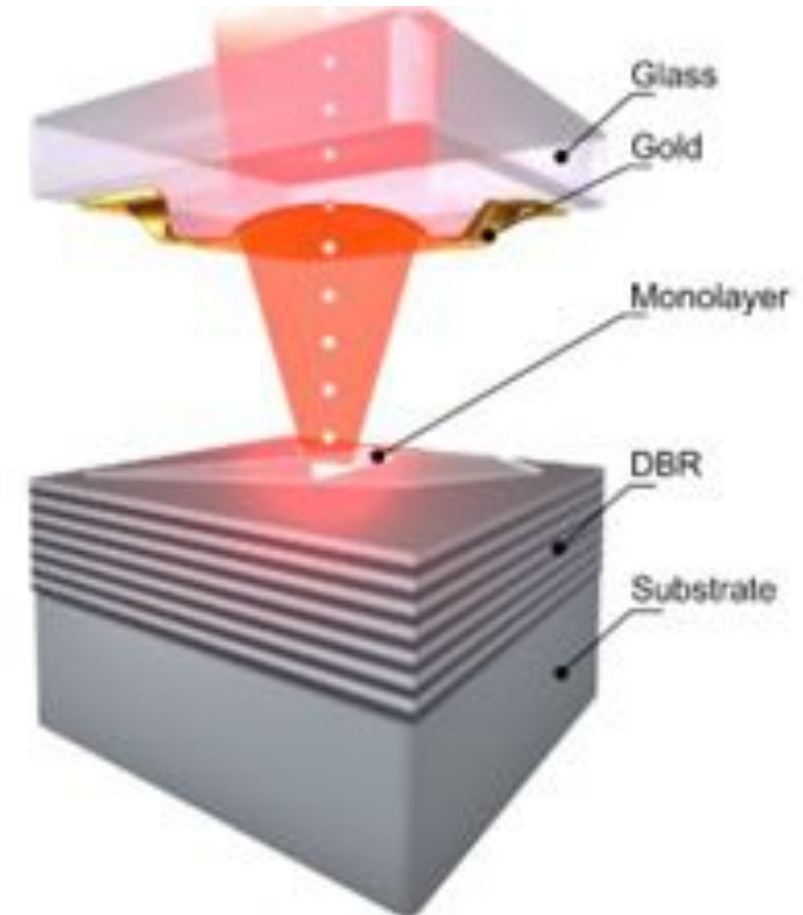




# Einzelphotonenquellen – Ultradünne Übergangsmetalle

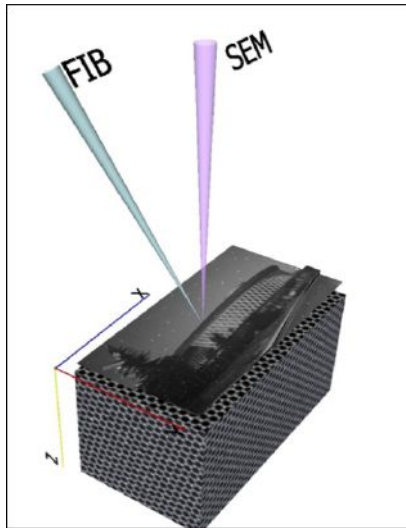


„Kleines“ V in Kavität durch Plasmonik

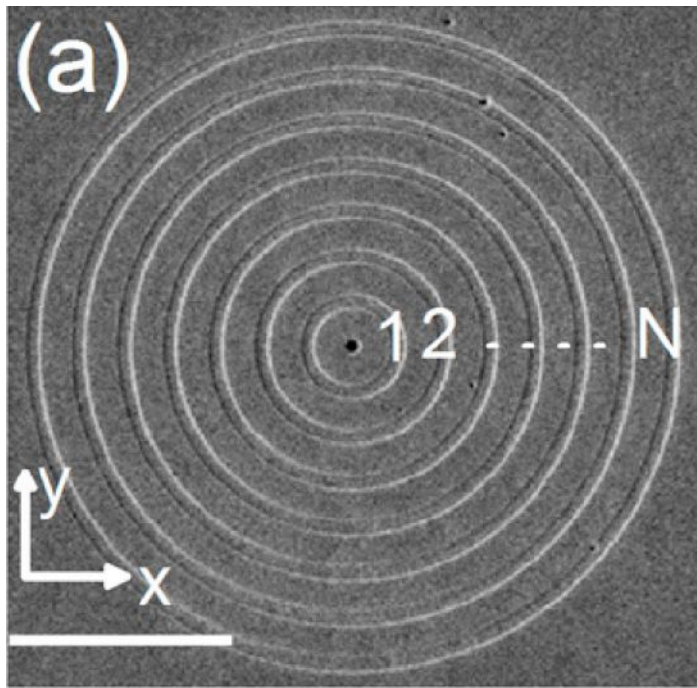


„Hohes Q“ in Kavität durch DBR

# Herstellung der plasmonischen Kavitäten

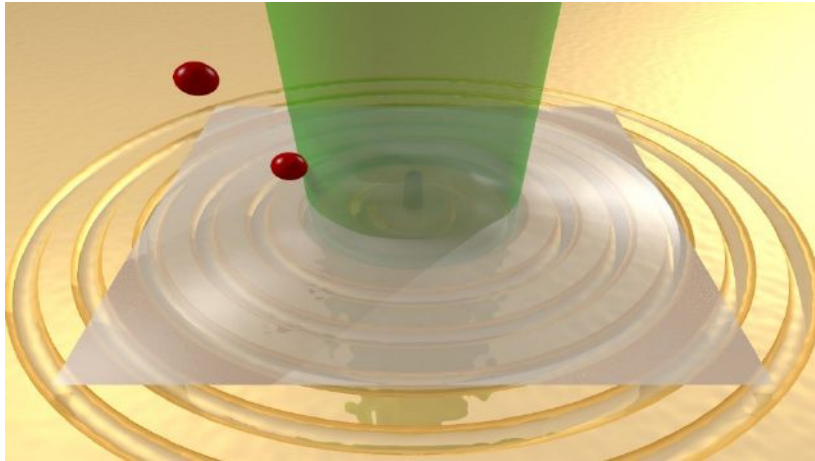


Ga-Ionenstrahl-Lithographie  
(Auflösung: ca. 20nm)



He-Ionenstrahl-Lithographie  
(Auflösung: ca. 5nm)

# Kavität für EPQ

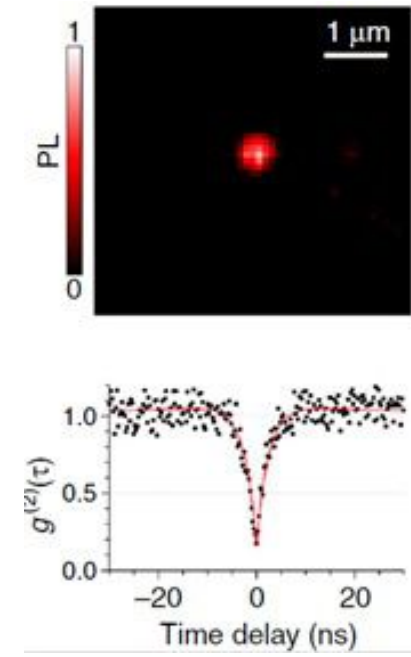
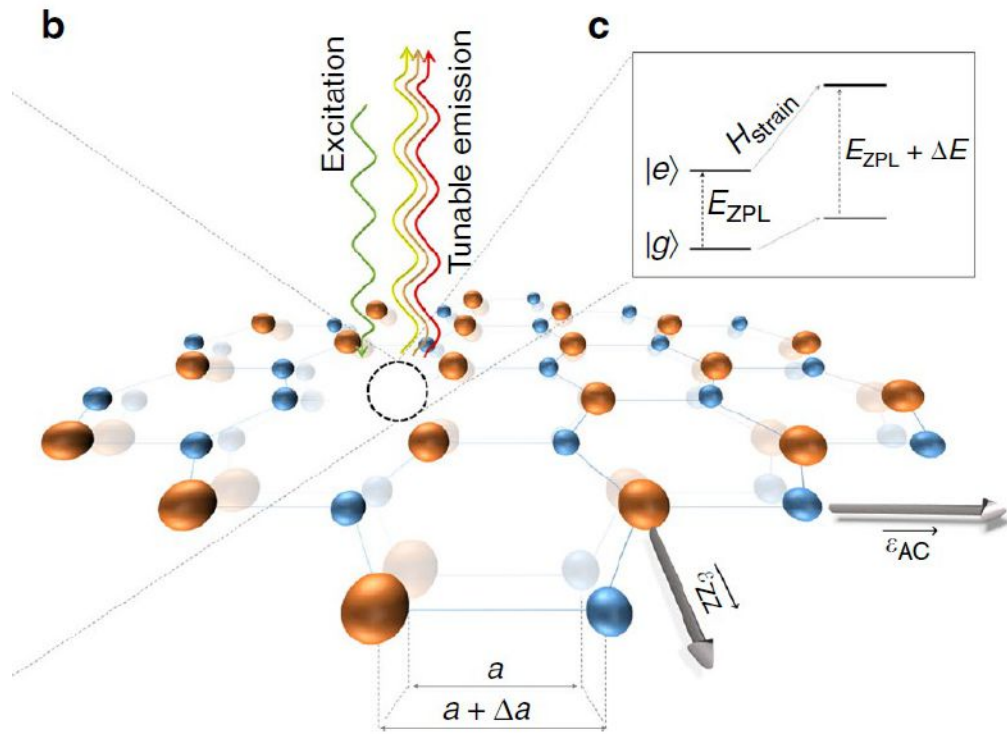


- Ultradünne Filme werden wie bei einem Zirkuszelt über eine Nanospitze gehängt
- Spitze induziert lokale Spannung und Veränderung der elektronischen Eigenschaften

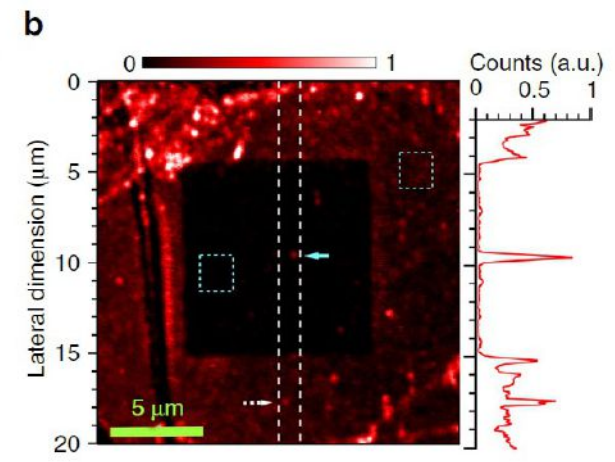
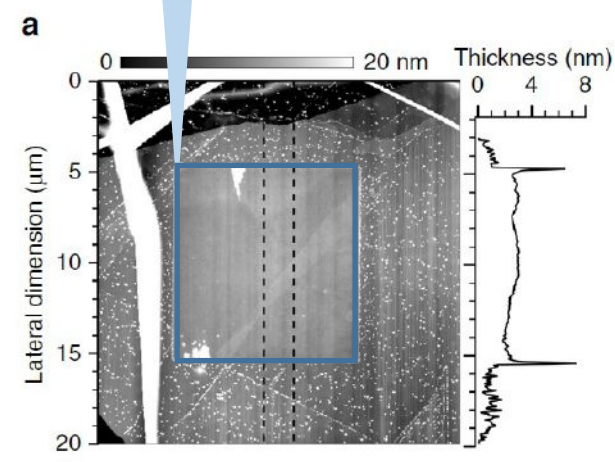


→ Einzelphotonenemitter

- Volumen sehr klein (wenige  $\mu\text{m}^2$ )
- Konstant und stabil
- Hohe Photonenausbeute
- (gerichtete Emission)
- Aber: IMMER NOCH TIEFE Temperaturen



Hexagonales BorNitrid (hBN)  
+ He-Ionen-Behandlung  
+ Annealing  
→ Aussichtsreicher Kandidat





# Von der Lehre zur Anwendung:



## Forschung

1. Einzelphotonenquelle auf TMDC-Basis bei tiefen (4 K) Temperaturen
2. Verbesserung der Emissionsrate der EPQ durch plasmonische Kavität
3. Forschung an neuartigen EPQ auf hBN-Basis bei Raumtemperatur (RT)

## Lehre/Studentische Ausbildung

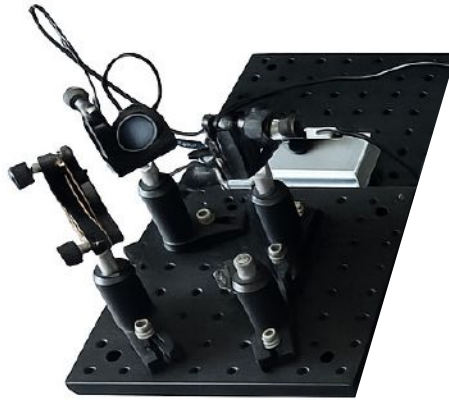
1. QSA-Analog-Experiment mit einfachsten opto-mechanischen Bauteilen ( <5k€ )



# Anbindung Lehre in QSA-Experimenten



## 1. Schritt: QSA-Analog-Experiment einfachster Optik

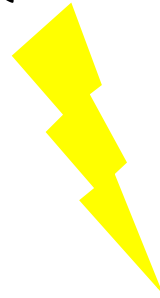


„OpenLab“ / Laborprojekt / praktischer Laborteil mit MasterStudenten



## Forschung

1. Einzelphotonenquelle auf TMDC-Basis bei tiefen (4 K) Temperaturen
2. Verbesserung der Emissionsrate der EPQ durch plasmonische Kavität
3. Forschung an neuartigen EPQ auf hBN-Basis bei Raumtemperatur (RT)



## Lehre/Studentische Ausbildung

1. QSA-Analog-Experiment mit einfachsten opto-mechanischen Bauteilen ( <5k€ )
2. Erweiterte Sensitivität (APD, High-NA-Objektive, Piezos...) (30€)

## 2. Schritt: Erweiterte Sensitivität in pW-range

Wer: Bachelorarbeiten in Kombination mit Laborprojekten durch Master-Studenten

Was: APD / SPC Module in Verbindung mit effizienter Extraktion durch Objektive





## Forschung

1. Einzelphotonenquelle auf TMDC-Basis bei tiefen (4 K) Temperaturen
2. Verbesserung der Emissionsrate der EPQ durch plasmonische Kavität
3. Forschung an neuartigen EPQ auf hBN-Basis bei Raumtemperatur (RT)

## Lehre/Studentische Ausbildung

1. QSA-Analog-Experiment mit einfachsten opto-mechanischen Bauteilen ( <5k€ )
2. Erweiterte Sensitivität (APD, High-NA-Objektive, Piezos...) (30€)
3. Implementierung von fasergebundener Teststrecke (5k€)

**Ready for RT-QSA!**



Vielen Dank für Ihre  
Aufmerksamkeit!

Haben Sie Fragen?

