

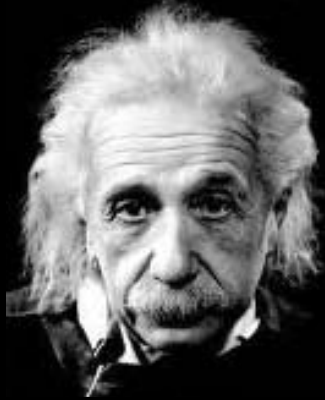


# ÜBER KURZE UND LANGE PHOTONEN

Oder was ist Licht überhaupt

Thomas Feurer  
Uni Bern

# WAS MEINT EIN GENIE DAZU



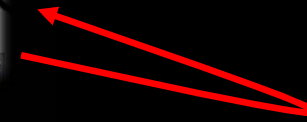
Albert Einstein 1916:

... Für den Rest meines Lebens will ich nachdenken, was Licht ist. ...

Albert Einstein 1951:

... Fünfzig Jahre angestrebten Nachdenkens haben mich der Antwort auf die Frage „Was sind Lichtquanten?“ nicht näher gebracht. Heute glaubt zwar jeder Lump, er wisse es, aber er täuscht sich. ...

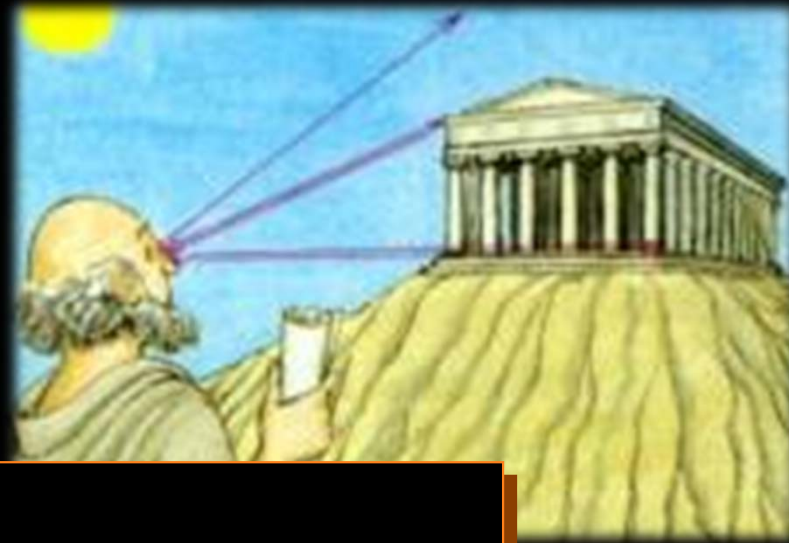
# PYTHAGORAS (570 – 480 AD)



## Pythagoras:

- Vom Auge gehen heiße *Sehstrahlen* aus, die von kalten Körpern dann zurückgedrängt werden.

# EMPEDOKLES (492 – 432 AD)



## Empedokles:

- Idee der **Augenstrahlen**: Vom Auge gehen **Fühler** aus. Diese tasten den Gegenstand ab.
- Noch heute spricht man in den darstellenden Künsten von **Sehstrahlen**.

# HIPPARCH (190 – 120 AD)



## Hipparch:

- *"Einen Blick auf etwas werfen"*
- *"Einen Blick austauschen"*
- *"Durch das Fenster sehen"*
- *"In einen Kasten gucken"*
- *"Genau hinsehen"*
- *"Ein stechender Blick"*
- *"Ein heisser Blick"*

- Vergleicht die von den Augen ausgehenden Sehstrahlen mit Händen, die Gegenstände abtasten und dadurch sichtbar machen.



# PTOLEMÄUS (100 – 160)

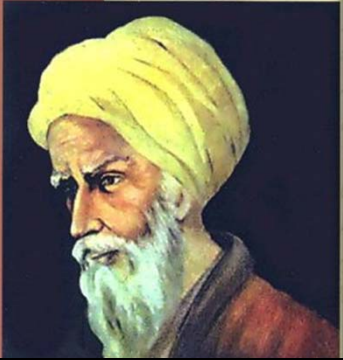


## Ptolemäus:

- Widerspruch der Theorie der Sehstrahlen: Schickt das Auge Sehstrahlen aus, so müsste man auch in der Nacht sehen können.
- Vermutete zwei Typen von Strahlen, durch deren Zusammenwirken das Sehen möglich wird: **Sehstrahlen**, die vom Auge, und **Lichtstrahlen**, die von Lichtquellen ausgehen.

# ABU ALI AL-HASAN (966- 1039)

Ibn al-Haytham  
FIRST SCIENTIST



- Licht hat einen physikalischen Effekt auf das Auge.
- Schaut man in die Sonne, so tut das weh.
- Schaut man erst in ein Lagerfeuer und dann in die Dunkelheit, so gibt es ein Nachglühen.
- Aus diesen Gründen, so argumentiert er, ist es falsch, dass das Auge Sehstrahlen aussendet.

## Abu Ali al-Hasan ibn al-Haitham:

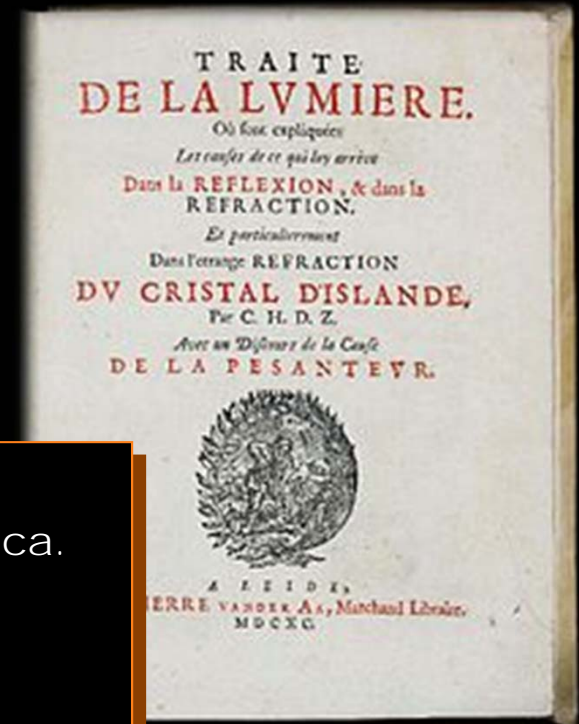
- Objekte senden gerade Lichtstrahlen in alle Richtungen.
- Lichtstrahlen besitzen eine Farbe.
- Sie werden wahrgenommen, wenn sie ins Auge fallen.
- Das Auge empfängt die Strahlen und das Gehirn formt daraus ein Bild.
- Sein Buch (in Latein Ende 12. Jhd) war DAS BUCH für weitere 500 Jahre.

# HUYGENS (1629- 1695)



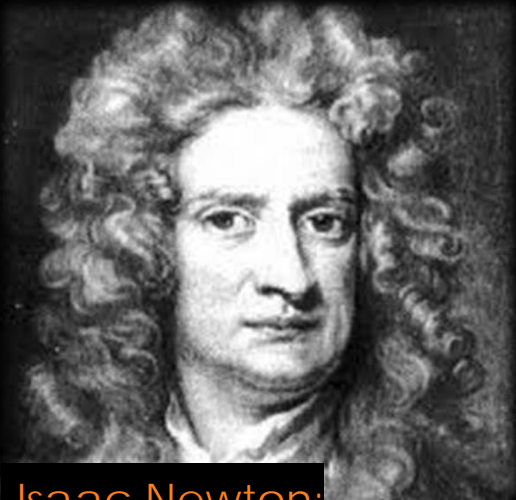
## Christiaan Huygens:

- Entwickelt Wellentheorie des Lichts.
- Damit baut er bessere Teleskope, Camera Obscura, Laterna Magica.
- „Huygen'sches Prinzip“.
- Raum ist gefüllt mit elastischem Äther in dem sich Lichtwellen fortpflanzen.



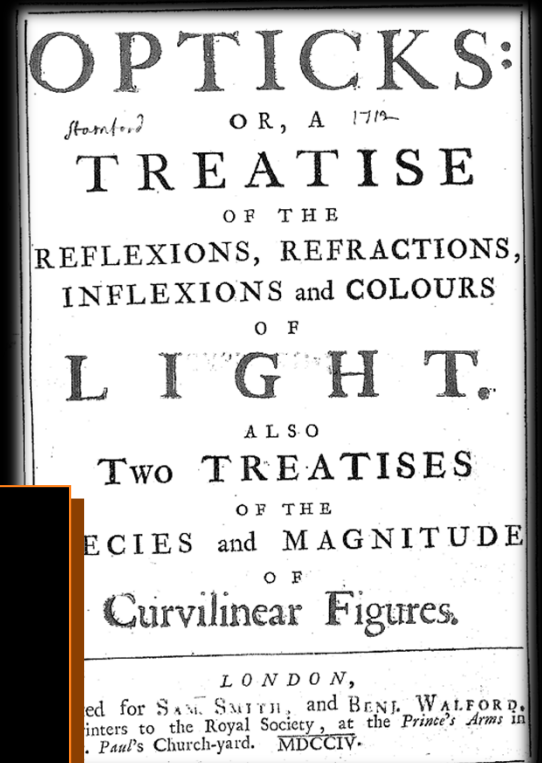


# ISAAC NEWTON (1643 – 1727)



## Isaac Newton:

- Weisses Licht besteht aus Licht verschiedener Farben.
- Wellen brauchen ein Medium und das würde zu Reibung führen und Planeten abbremesen...
- Einzig mögliche Erklärung: Von der Lichtquelle gehen kleine Partikel aus, die sich nach allen Richtungen geradlinig fortbewegen.



# THOMAS YOUNG (1773 – 1829)

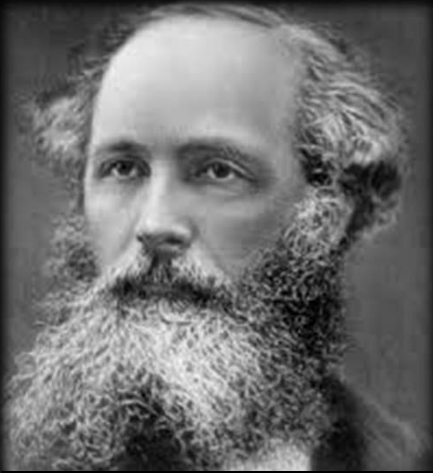


## Thomas Young:

- Führt 1802 ein Experiment durch, das sich nur erklären lässt, wenn man Licht als eine Welle interpretiert.



# JAMES C. MAXWELL (1831 – 1879)



*„Diese Geschwindigkeit ist so nahe an der Lichtgeschwindigkeit, dass wir einen starken Grund zu der Annahme haben, dass das Licht selbst (einschließlich Wärmestrahlung und anderer Strahlung, falls es sie gibt), eine elektromagnetische Welle ist.“*

James Clerk Maxwell:

- Licht als *elektromagnetische Welle*.
- Kann sich im Vakuum ausbreiten (kein Äther notwendig).

# A. A. MICHELSON (1852 – 1931)



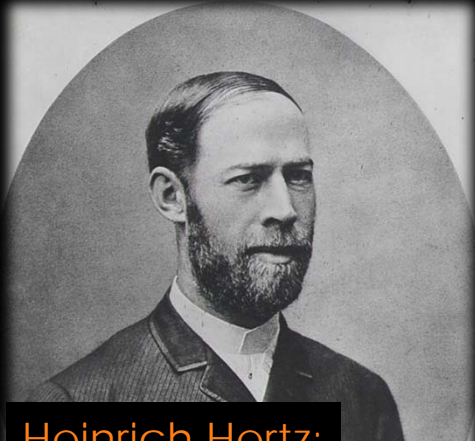
Albert A. Michelson:

- Führt viele Präzisionsexperimente in der Optik durch.
- Bestimmt die Geschwindigkeit des Lichts.
- Zeigt konstante Lichtgeschwindigkeit, im Widerspruch zur Äthertheorie.



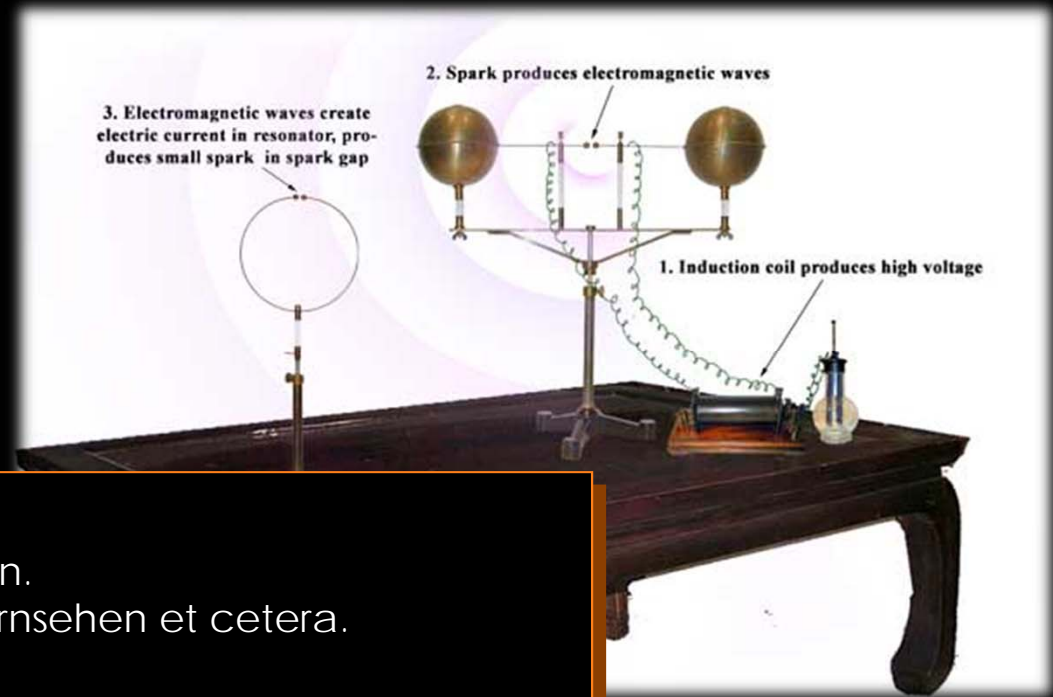


# HEINRICH HERTZ (1827 – 1914)



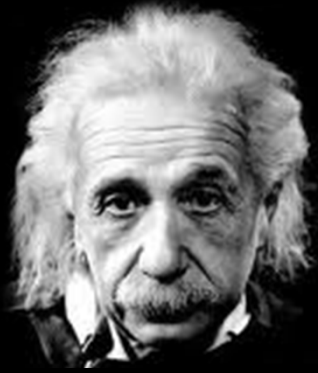
Heinrich Hertz:

- Nachweis der elektromagnetischen Wellen.
- Der Startschuss für Telegraphen, Radio, Fernsehen et cetera.



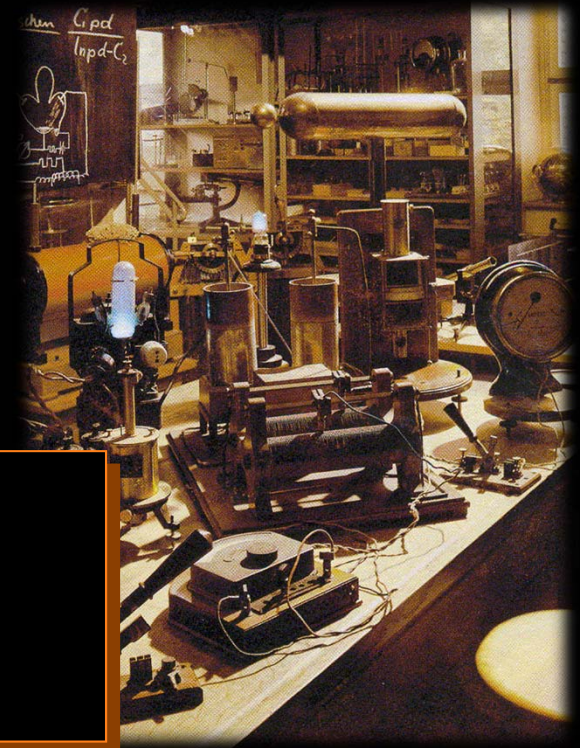


# ALBERT EINSTEIN (1879 – 1955)



Albert Einstein:

- Um die experimentellen Befunde des Photoeffektes zu erklären postuliert Einstein:
- Licht besteht aus Teilchen mit einer bestimmten Energie.



# WAS WISSEN WIR NUN

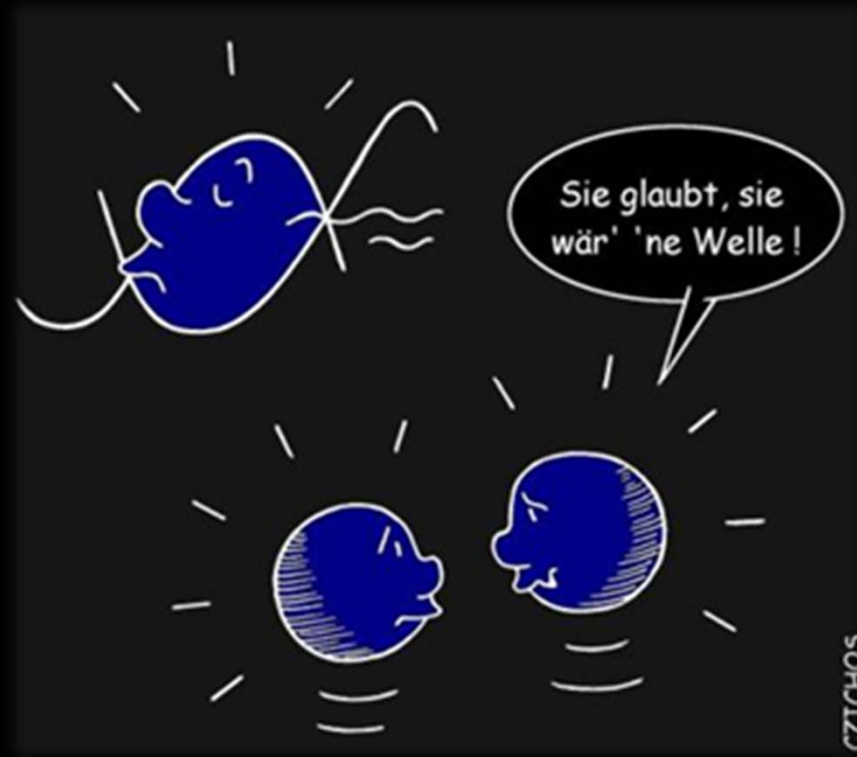


- Licht ist eine elektromagnetische Welle.
- Licht breitet sich mit Lichtgeschwindigkeit aus
- Licht braucht keinen Äther.
- Licht zeigt Interferenz.

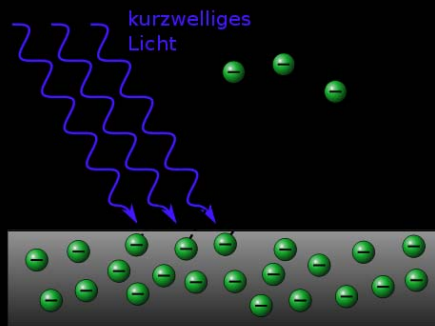
- Licht besteht aus Teilchen, die eine bestimmte Energie mit sich herumtragen.
- Diese Teilchen besitzen keine Masse.

Ein Lichtstrahl bei Dr. Einstein auf der Couch:  
»Früher folgte ich geraden Bahnen. Dann begann ich zu  
schwingen. Und jetzt bin ich Ihre wegen in lauter kleine Teil-  
chen zerfallen. Ich habe eine Identitätskrise, Herr Doktor!«

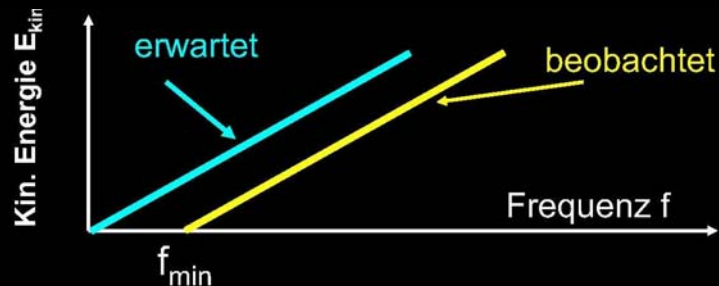
# TEILCHEN



# EIN HIEB- UND STICHFESTER BEWEIS



Wir lassen Licht mit einer bestimmten Farbe auf eine Metalloberfläche fallen und beobachten die Geschwindigkeit (kinetische Energie) der ausgelösten Elektronen.



Erhöht man die Frequenz der Lichtstrahlung, so erwartete man, dass die kinetische Energie der Elektronen grösser wird.

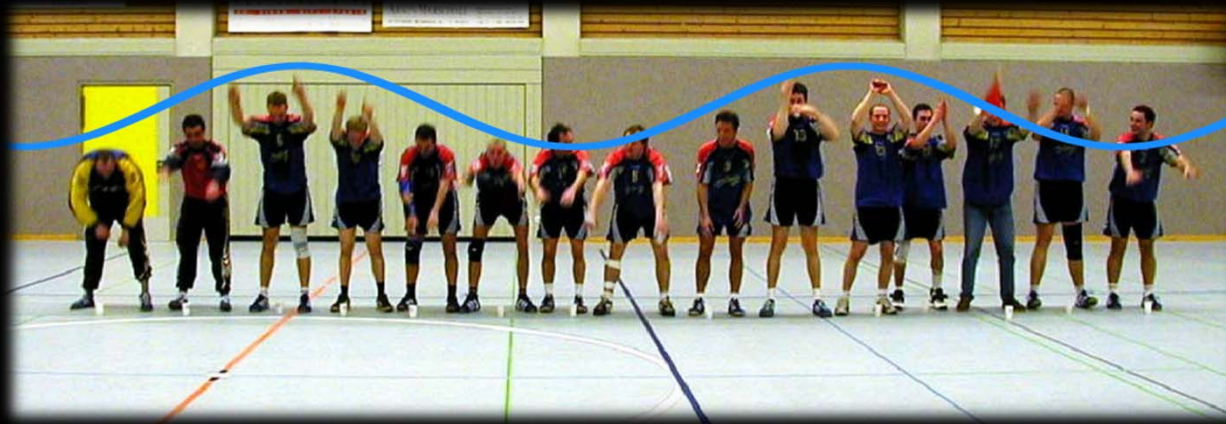


WELLE





# WAS SIND WELLEN



## Erklärung:

- Eine Welle ist die Ausbreitung einer Störung in Raum und Zeit.
- Eine Welle transportiert keine Materie.
- Nur die Störung breitet sich aus.
- Ausbreitungsgeschwindigkeit: 10 cm/s

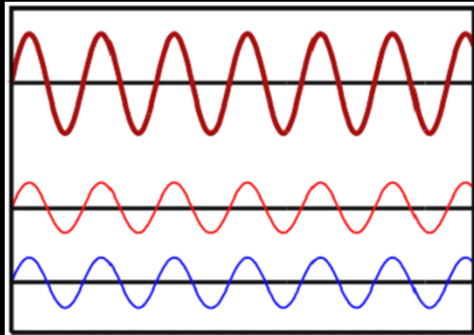
# WELLEN INTERFERIEREN

## Konstruktive Interferenz

Interferenz

Welle 2

Welle 1



### Erklärung:

- Wenn sich mehrere Wellen gegenseitig verstärken oder auslöschen, sagt man *die Wellen interferieren*.
- Ein Gerät, das dieses Phänomen ausnutzt wird *Interferometer* genannt.

# WASSERWELLEN

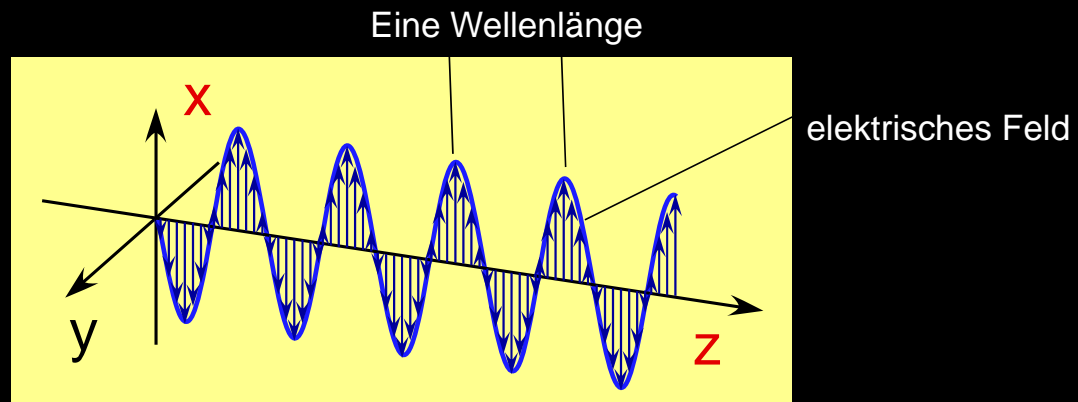


Interferenzen sind schön

Interferenzen können enorm sein

Interferenzen können auch  
grossen Schaden anrichten

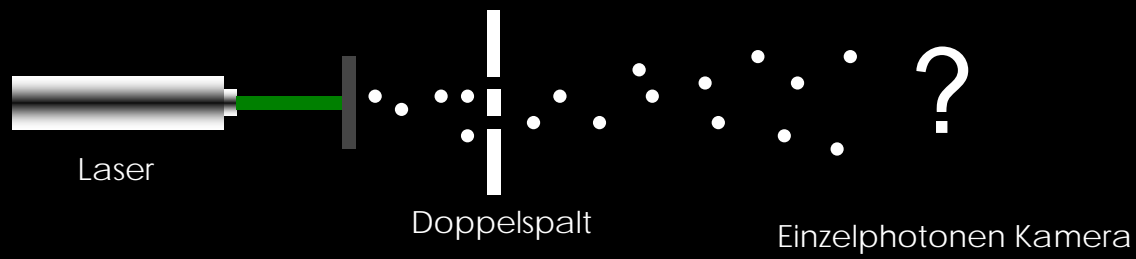
# ELEKTROMAGNETISCHE WELLE



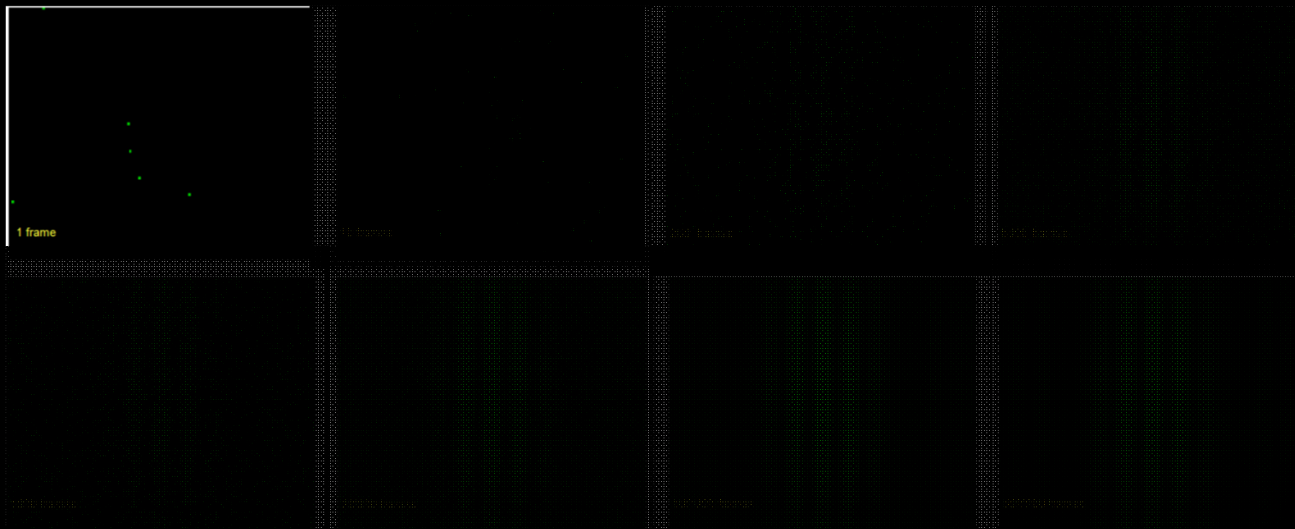
## Erklärung:

- Licht ist eine elektromagnetische Störung, die sich in Raum und Zeit ausbreitet
- Licht breitet sich mit einer Geschwindigkeit von etwa 300'000 km/s aus
- Licht 1 Sekunde bis zum Mond, 8 Minuten bis zur Sonne

# DIE WAHRHEIT



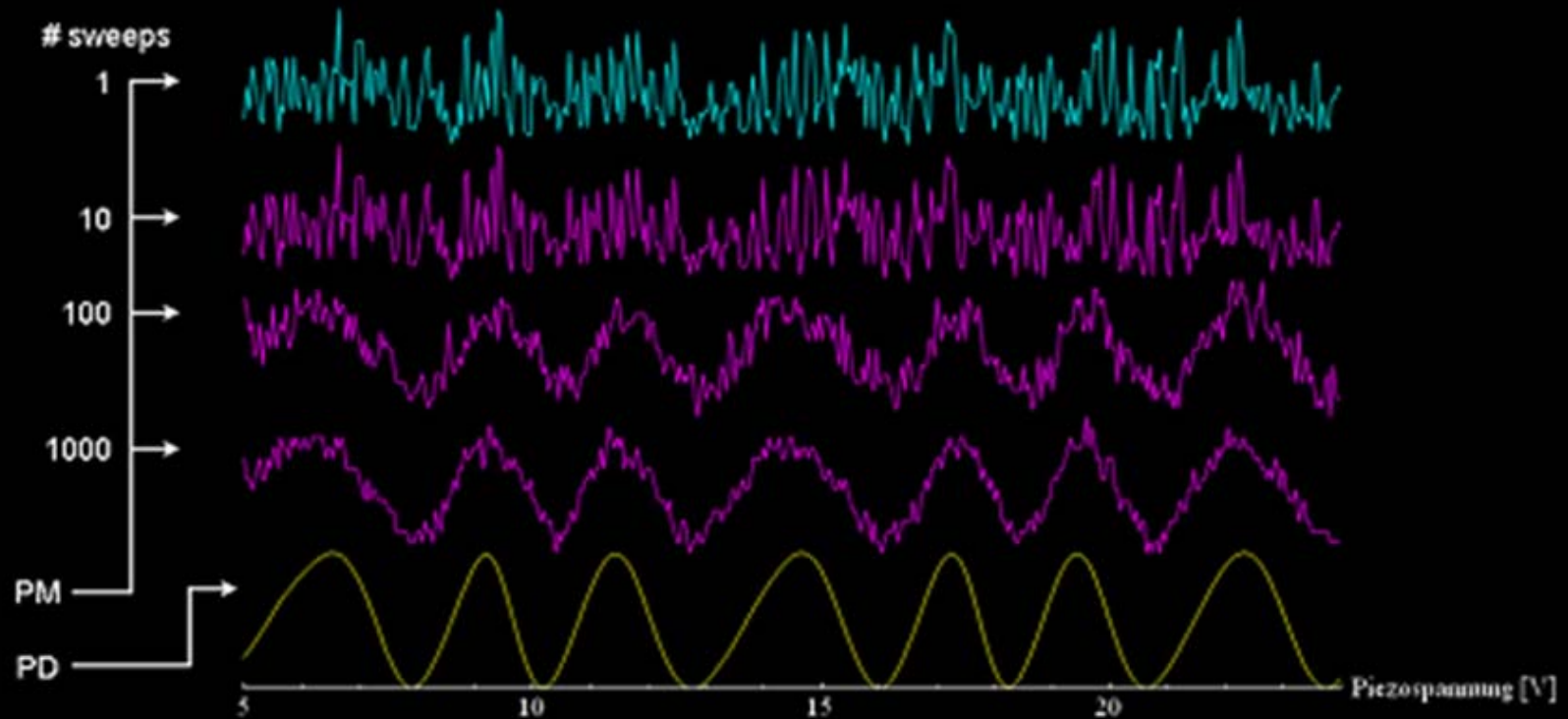
von Teilchen



zu Wellen



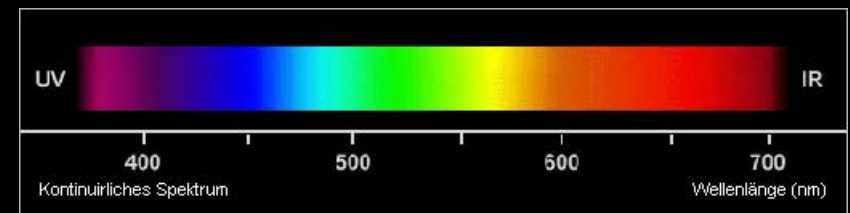
# PHOTON = WELLE + TEILCHEN



# EIGENSCHAFTEN VON LICHT

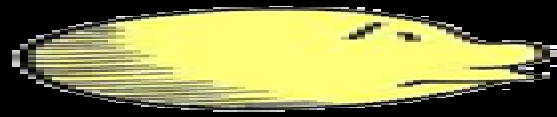
- Licht besteht aus **Quantenteilchen**, die wir **Photonen** nennen
- In manchen Situationen ist ihr Teilchen– in anderen ihr Wellencharakter entscheidend
- Eine elektromagnetische Welle ist charakterisiert durch die Wellenlänge  $\lambda$  oder die Frequenz  $\nu$
- Ein Teilchen ist charakterisiert durch seine Energie  $E$
- Zusammenhang

$$E = h \cdot \nu = h \cdot c / \lambda$$



- Sichtbares Licht: Wellenlängenbereich  $\lambda = 380 \text{ nm}$  bis  $700 \text{ nm}$   
Energie  $E = 1.5 \text{ eV}$  bis  $4.0 \text{ eV}$

ABER WIE LANGE IST EIN PHOTON

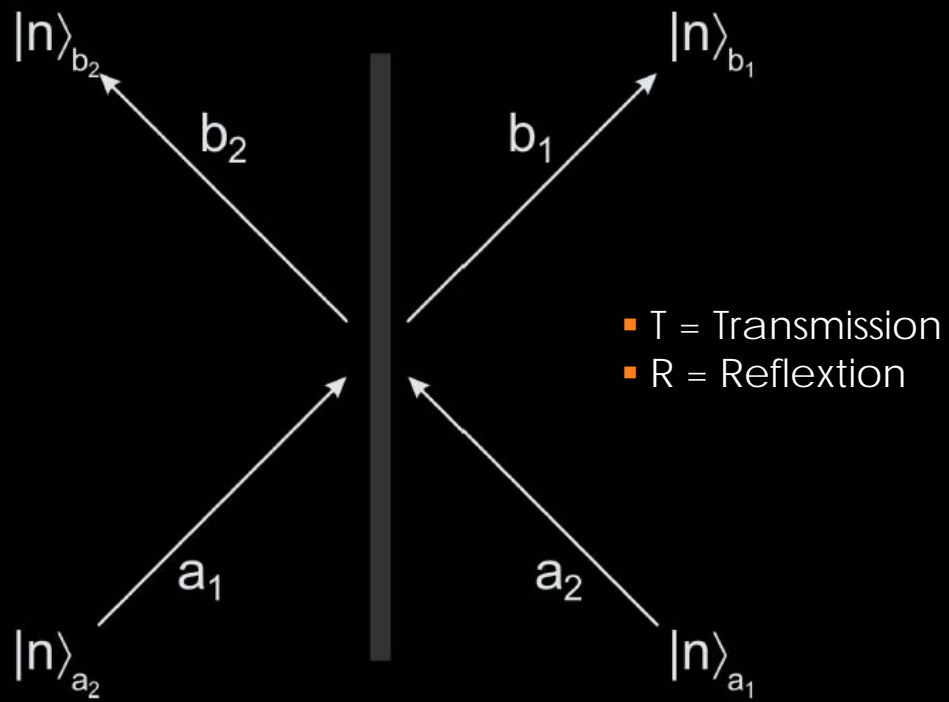




# GEDANKENEXPERIMENTE

- Gibt es einen Detektor, der Anfang und Ende eines Photons messen kann ?
- Kann man aus einem Photonenzählexperiment auf deren Länge schliessen ?
- Kann man die Welleneigenschaften nutzen ?
- Vielleicht ein Interferenzexperiment ?
- .....

# STRAHLTEILER



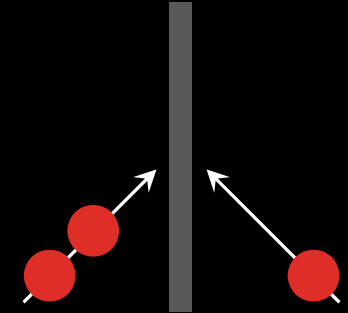


# STRAHLTEILER

$$|1\rangle_{a_1} |0\rangle_{a_2} = \left( \sqrt{T} b_1^\dagger - \sqrt{R} b_2^\dagger \right) |0\rangle$$

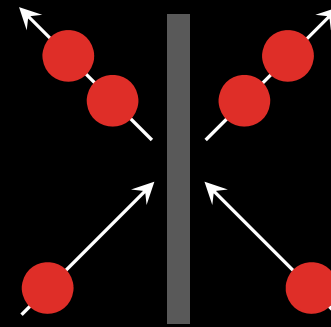
$$\begin{aligned} |2\rangle_{a_1} |0\rangle_{a_2} &= \frac{1}{\sqrt{2}} \left( \sqrt{T} b_1^\dagger - \sqrt{R} b_2^\dagger \right)^2 |0\rangle \\ &= \frac{1}{\sqrt{2}} \left( T b_1^{\dagger 2} - 2\sqrt{RT} b_1^\dagger b_2^\dagger + R b_2^{\dagger 2} \right) |0\rangle \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} |1\rangle_{a_1} |1\rangle_{a_2} &= \left( \sqrt{T} b_1^\dagger - \sqrt{R} b_2^\dagger \right) \left( \sqrt{R} b_1^\dagger + \sqrt{T} b_2^\dagger \right) |0\rangle \\ &= \sqrt{RT} |2\rangle_{b_1} |0\rangle_{b_2} + (T - R) |1\rangle_{b_1} |1\rangle_{b_2} - \sqrt{RT} |0\rangle_{b_1} |2\rangle_{b_2} \end{aligned}$$



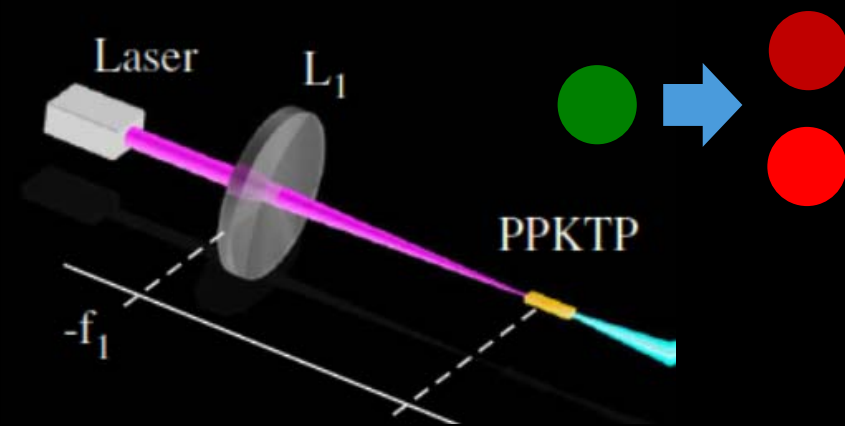
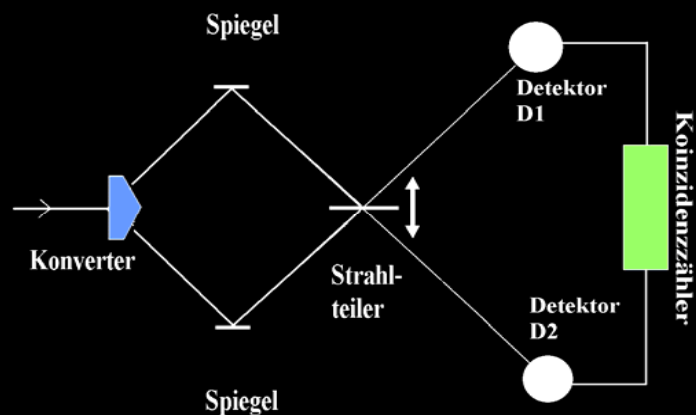
# HONG – MANDEL – OU EFFEKT

$$|1\rangle_{a_1} |1\rangle_{a_2} = \frac{1}{2} (|2\rangle_{b_1} |0\rangle_{b_2} - |0\rangle_{b_1} |2\rangle_{b_2})$$

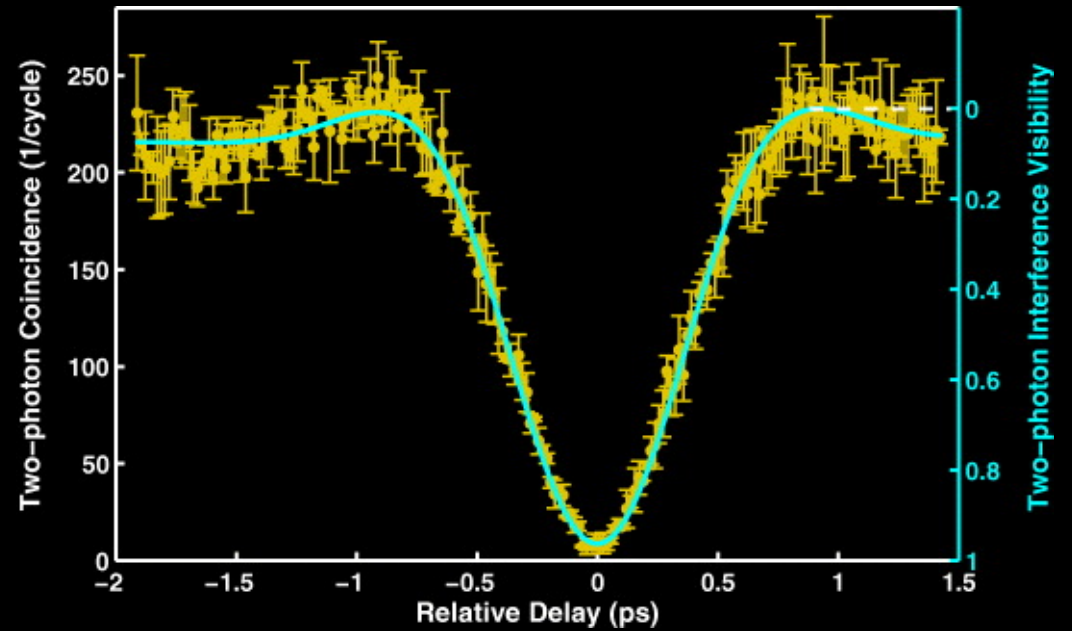
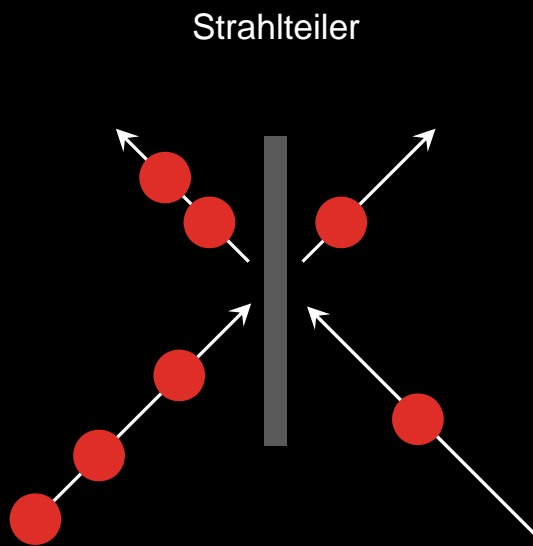


# WIE MACHT MAN ZWEI PHOTONEN

Man kann zeigen: Ein Photon teilen funktioniert nicht  
Es braucht zwei gleiche Photonen



# HONG – MANDEL – OU MESSUNG

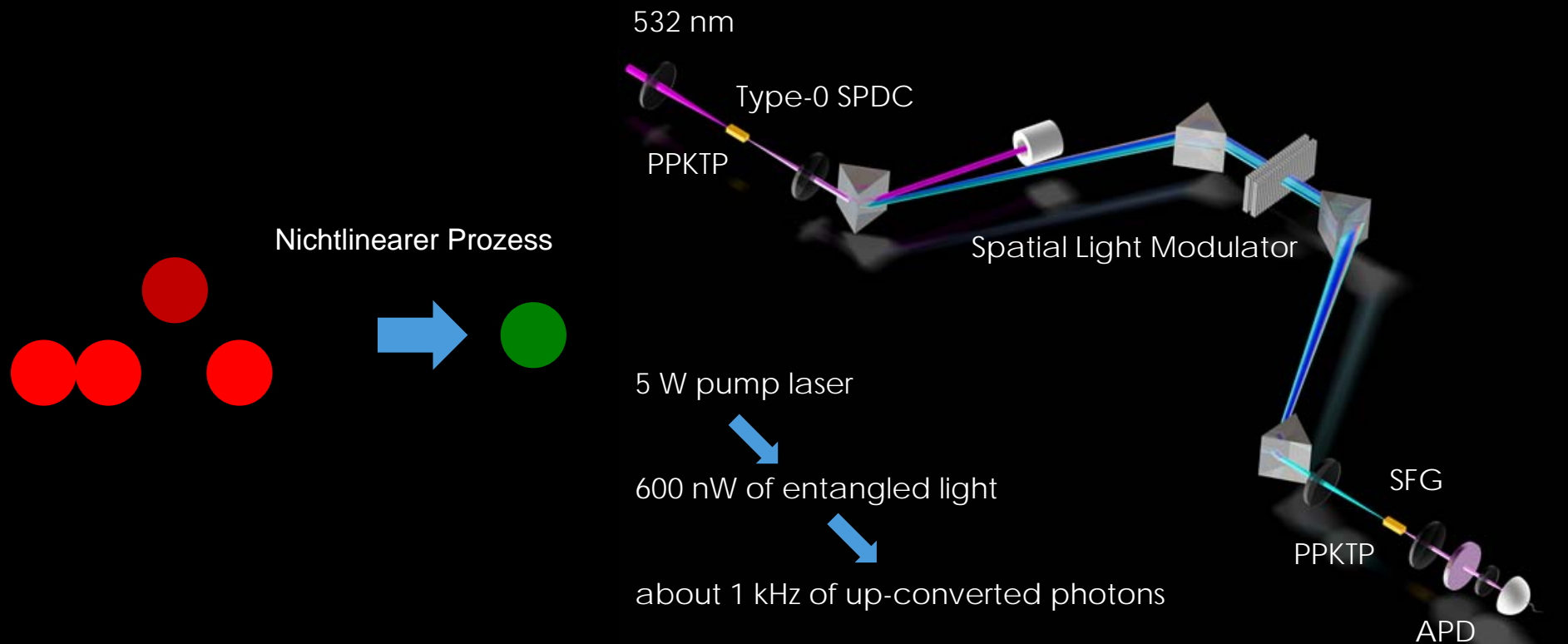




# WIE KURZ KANN EIN PHOTON SEIN

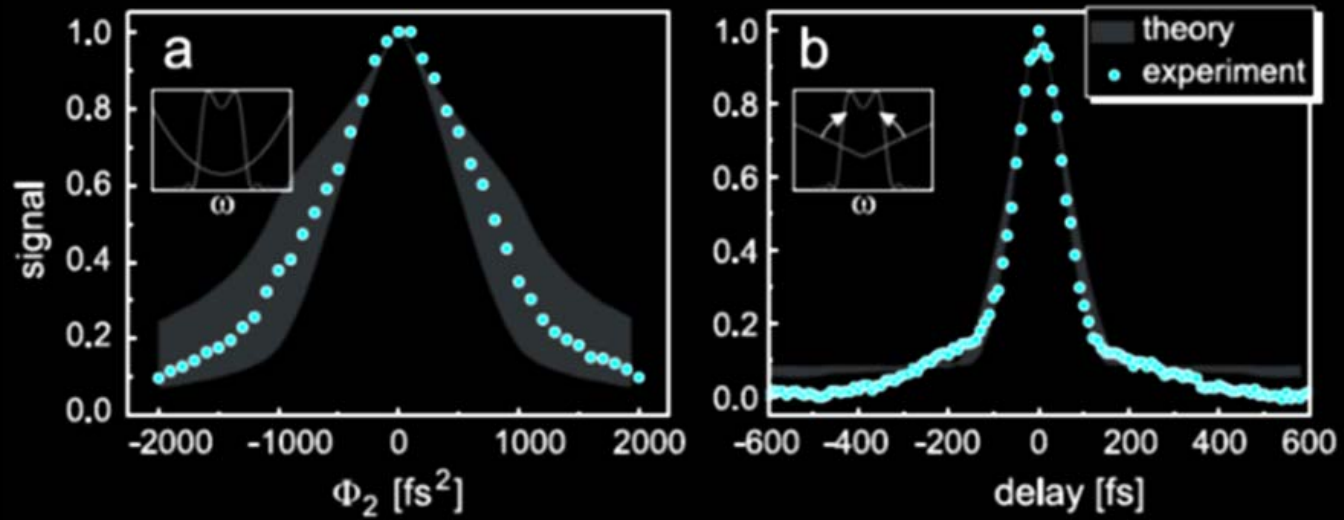
Zeit – Energie Unschärfe

# AUS DER TRICKKISTE DES NCCR MUST

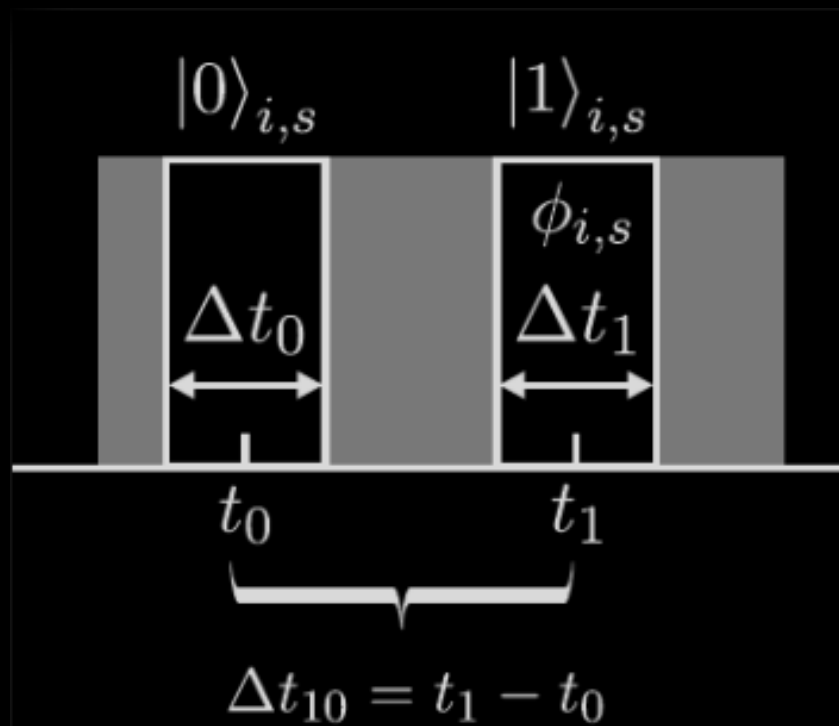




# MESSUNG DER LÄNGE

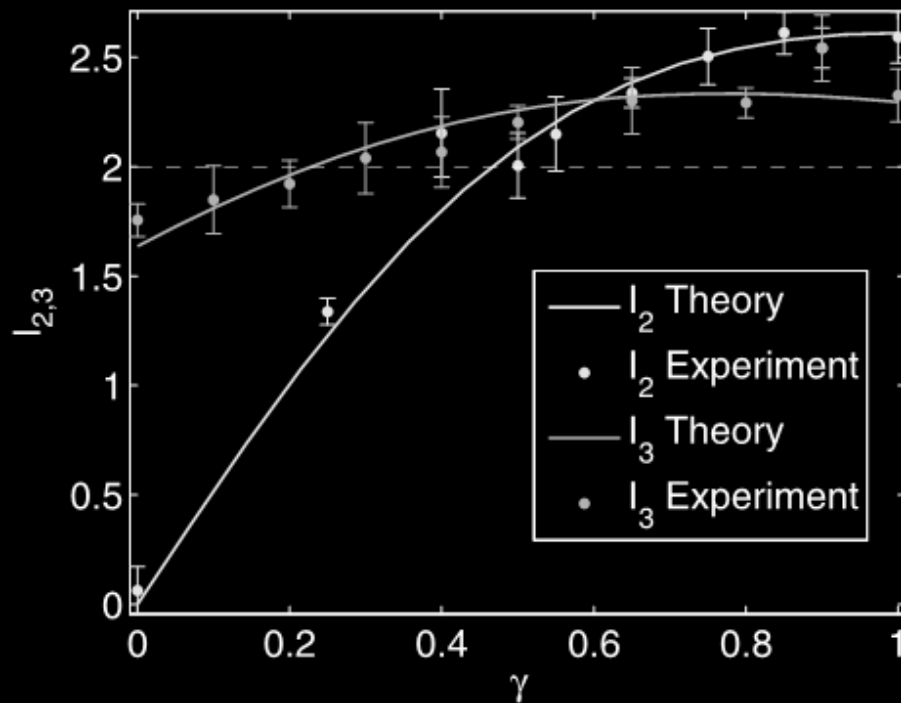


# QUDITS IN DER ZEIT



Arrange qudits along the time axis

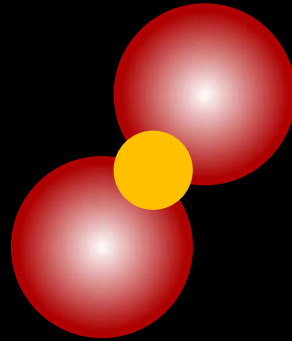
# TEST DER BELL UNGLEICHUNG



Collins-Gisin-Linden-Massar-Popescu  
Ungleichung

$$I_d \leq 2$$

# NICHTLINEARE SPEKTROSKOPIE



Danke für Ihre  
Aufmerksamkeit

