

Physik III Atom- und Quantenphysik

Kapitel 2: Licht – Welle oder Teilchen

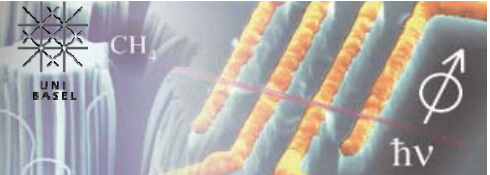


Prof. Dr. Christian Schönenberger
www.nanoelectronics.ch

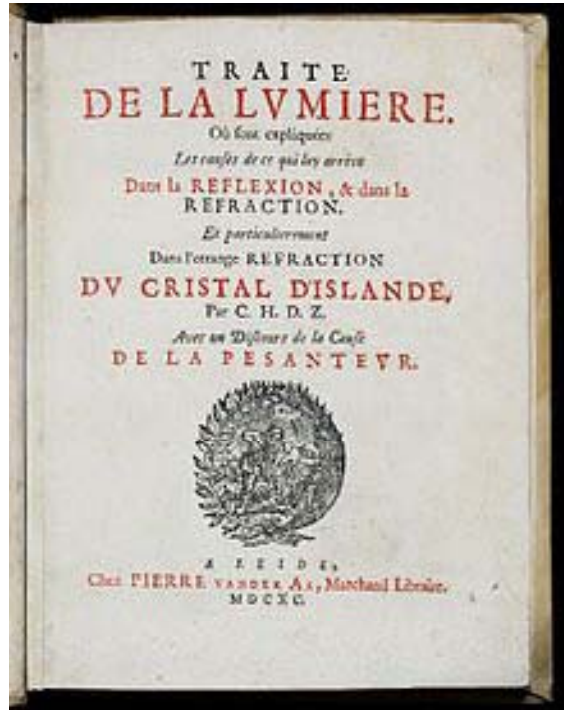
basierend auf der Vorlesung von
Prof. Dr. Philipp Treutlein
<http://atom.physik.unibas.ch>

Huygens'sches Prinzip

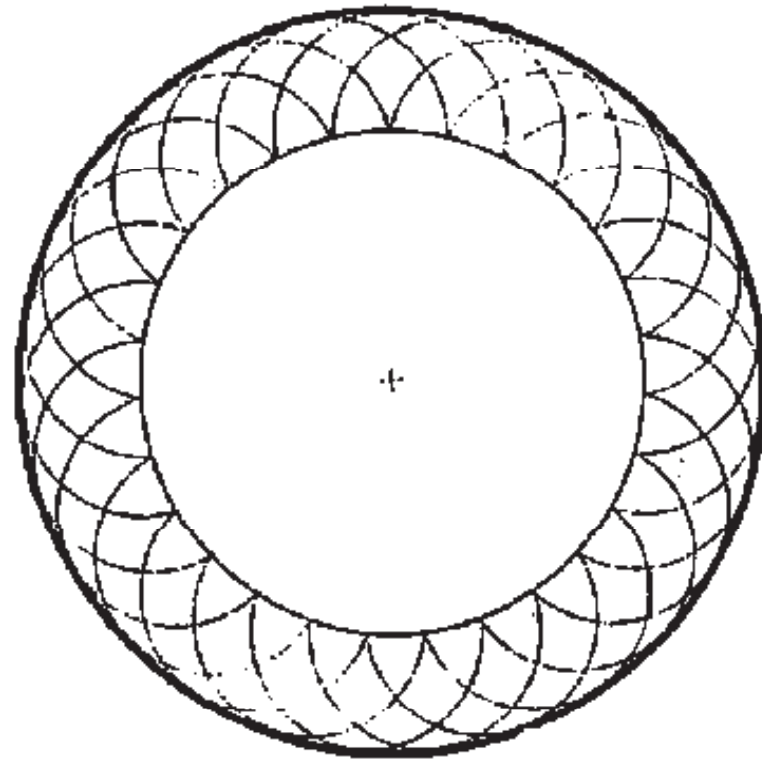
Schönenberger group www.nanoelectronics.ch



Huygens (1629-1695)



jeder Punkt einer Wellenfront ist Ausgang einer neuen Kugelwelle und die Superposition aller dieser Kugelwellen ergibt die Front eine Zeit später



Huygens'sches Prinzip

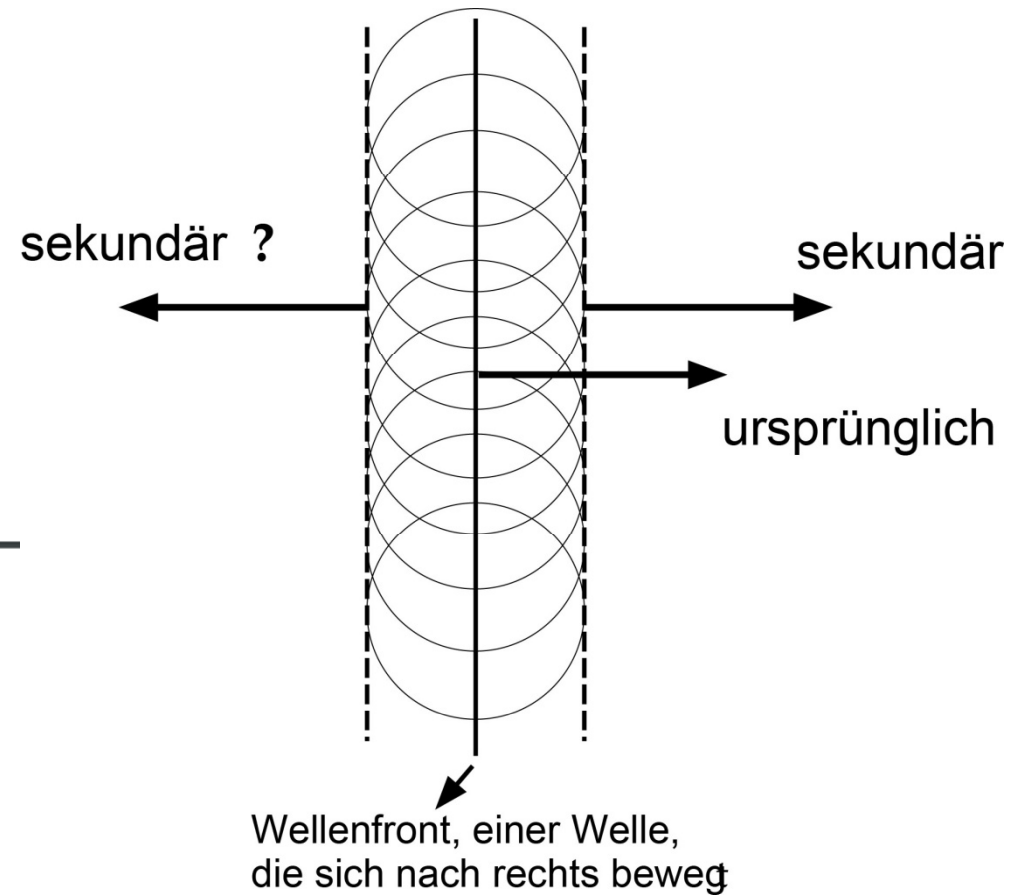
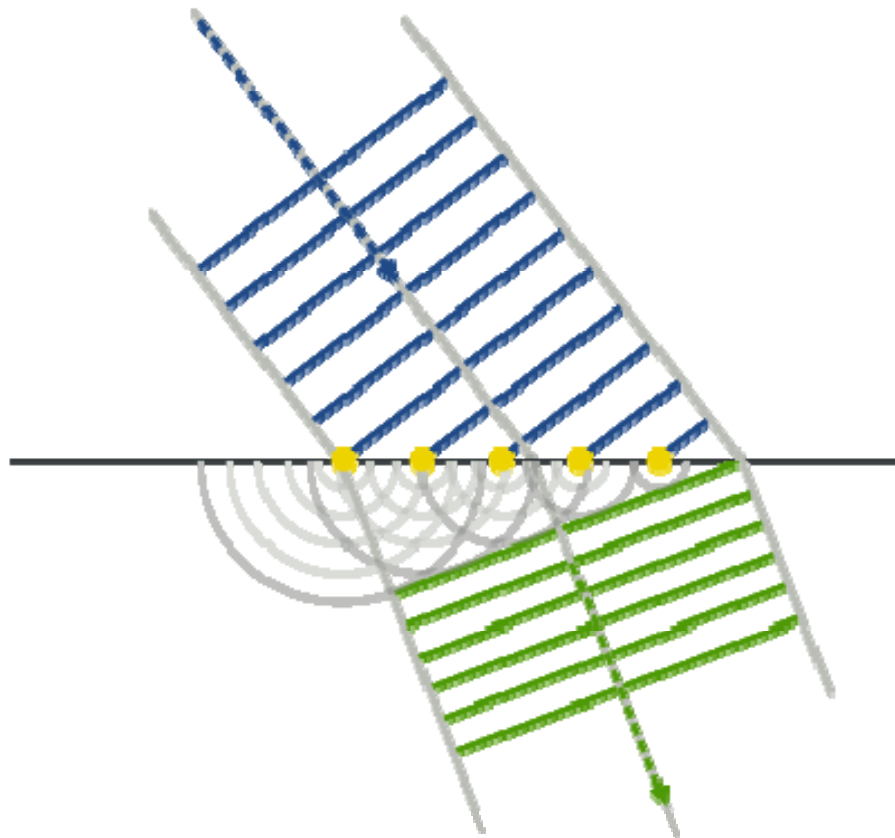
Schönenberger group www.nanoelectronics.ch



Huygens (1629-1695)

Augustin Fresnel (1788-1827)

z.B. Erklärung der Brechung



eigentlich Huygens-Fresnel Prinzip

Newton und Licht

Schönenberger group www.nanoelectronics.ch



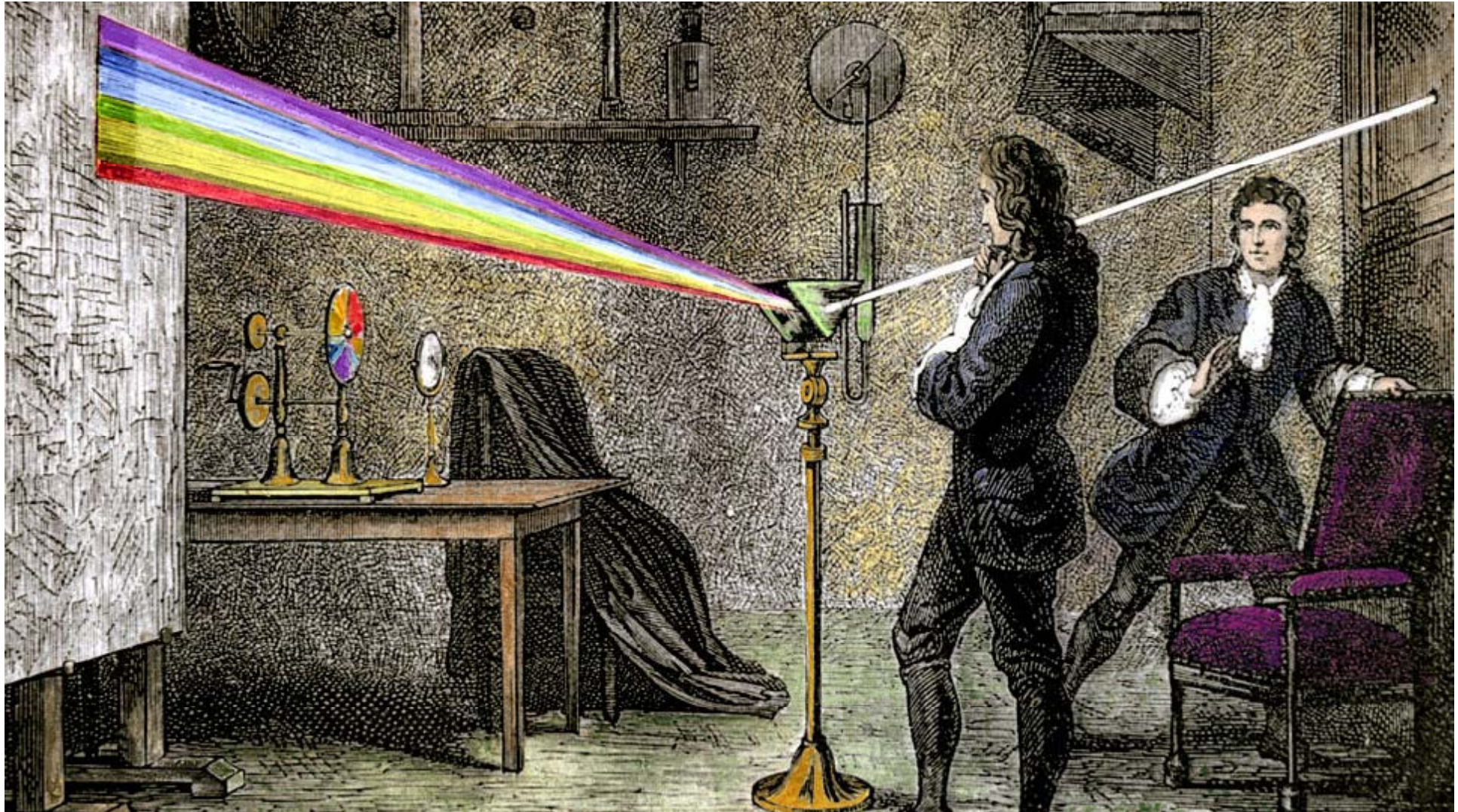
CH

UNI
BASEL



$h\nu$

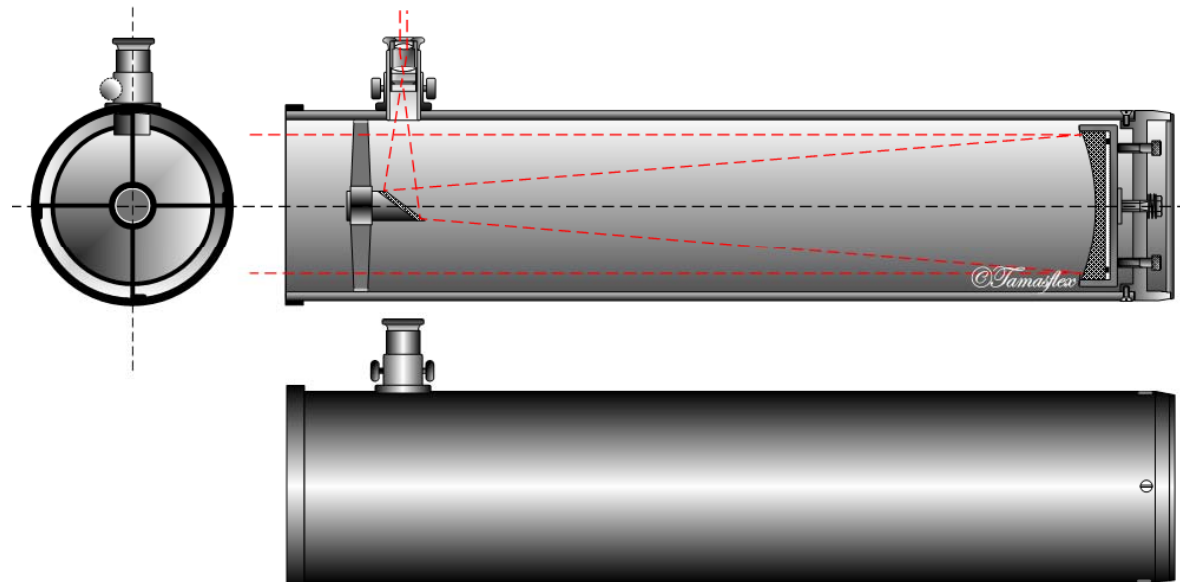
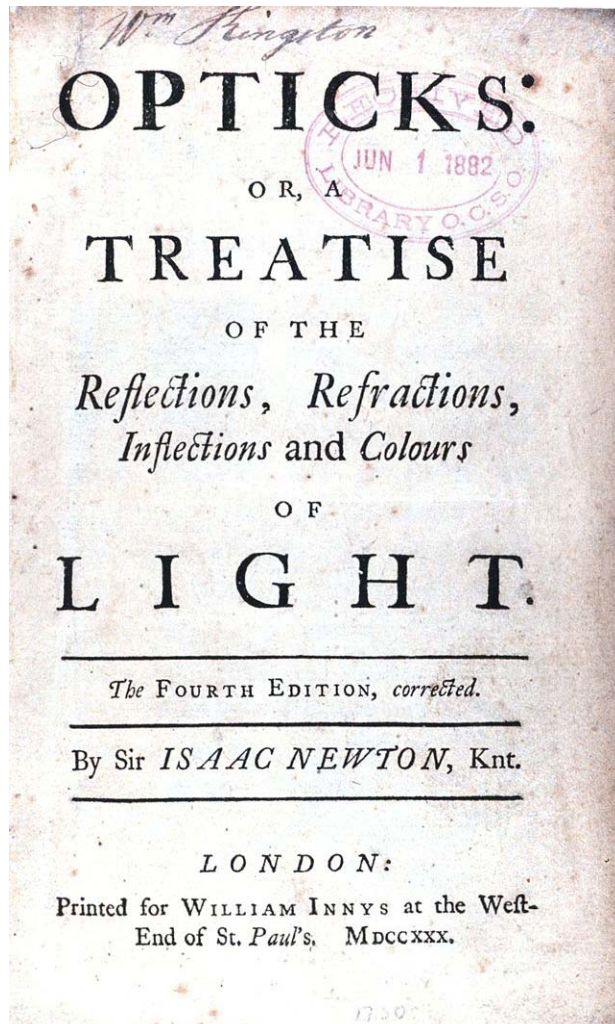
Isac Newton (1643-1727)



Newton und Licht

Schönenberger group www.nanoelectronics.ch

Isac Newton (1643-1727)

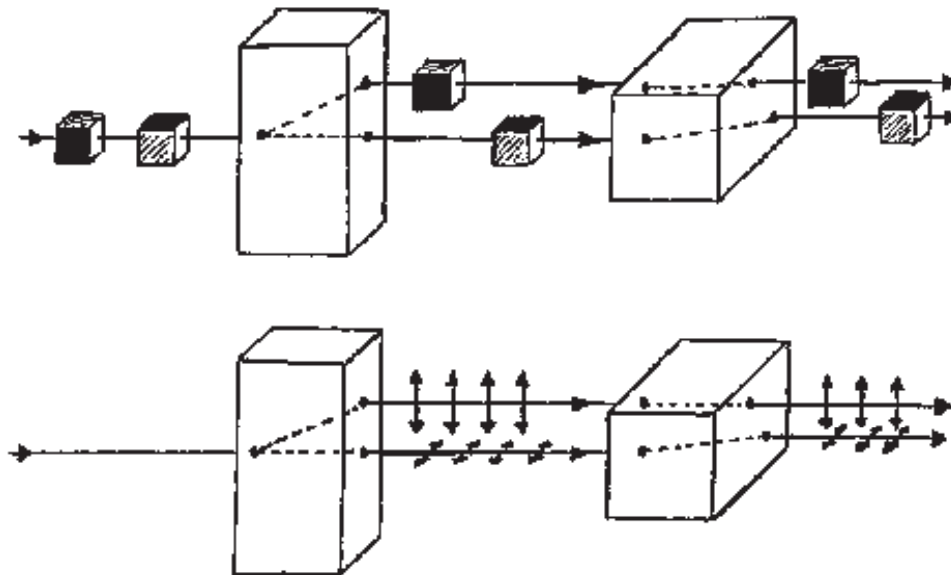


Newton und Licht

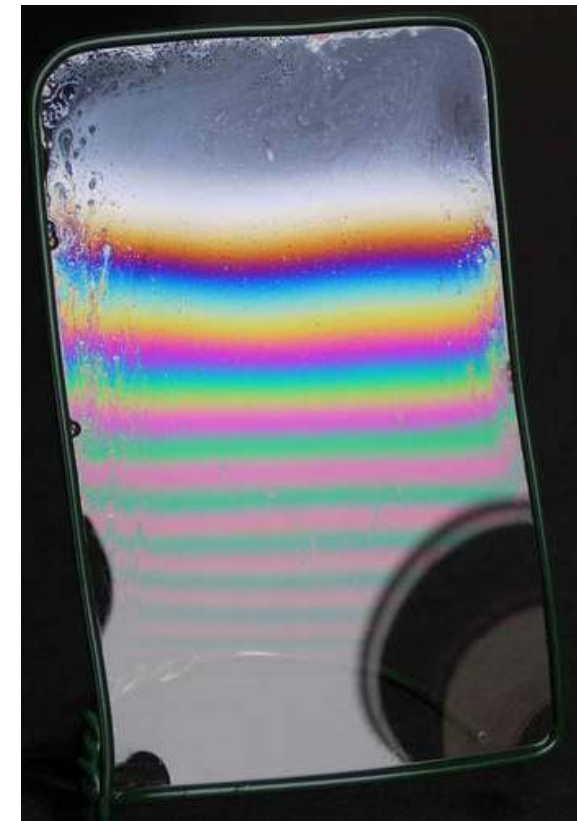
Schönenberger group www.nanoelectronics.ch



Isaac Newton (1643-1727)



Erklärungsversuch der Doppelbrechung
resp. der Polarisierung



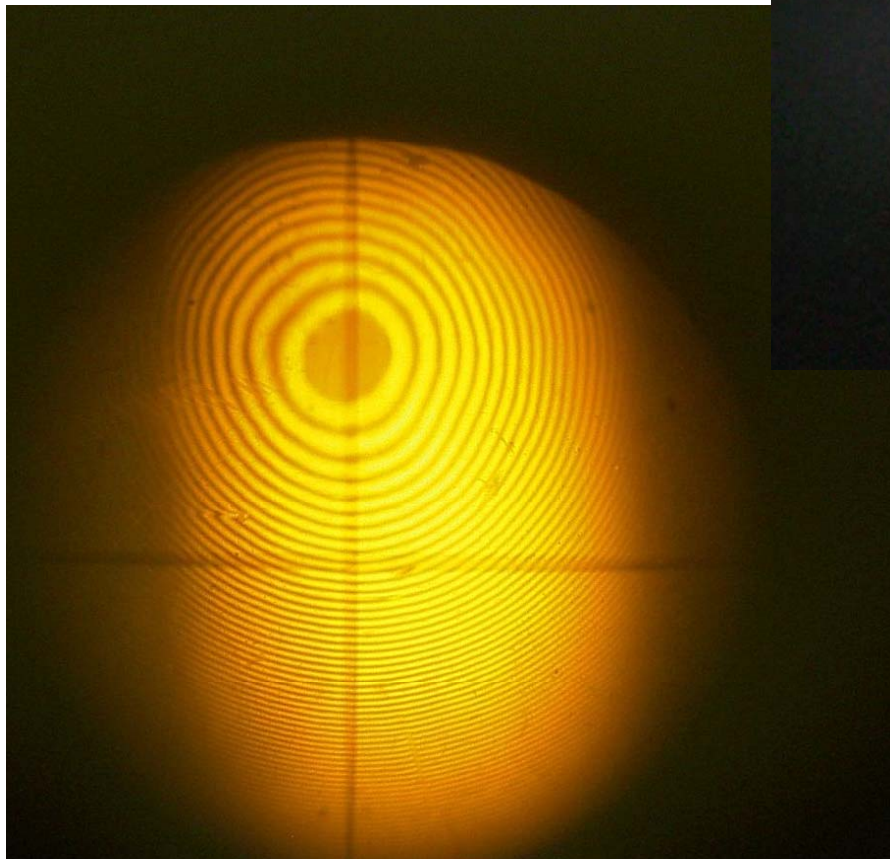
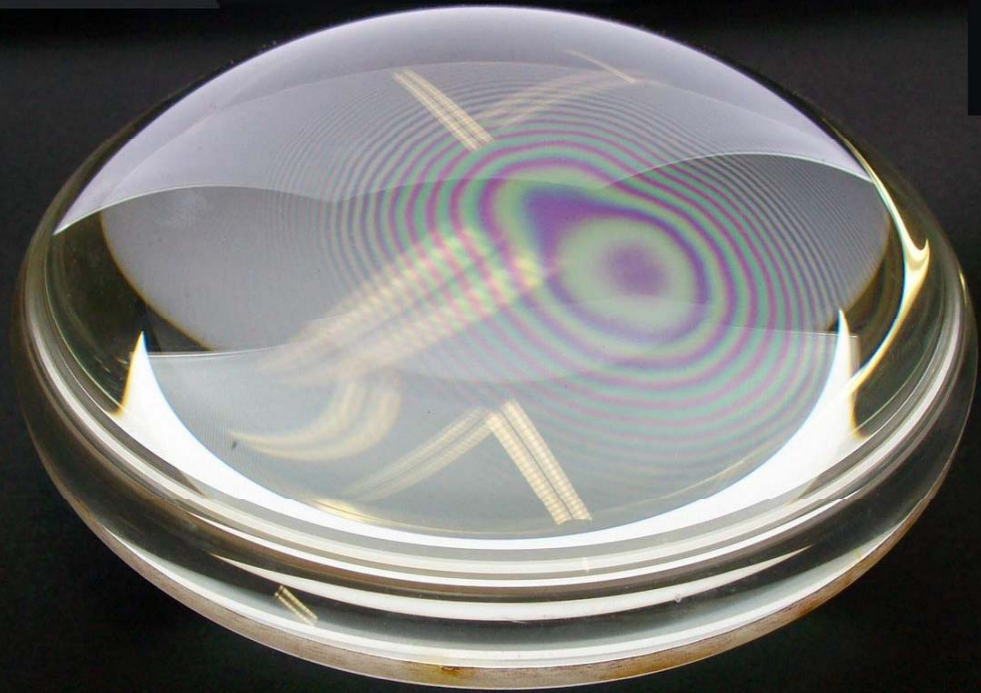
Farben bei einer
Seifenlamelle
Interferenz

Licht als Welle

Schönenberger group www.nanoelectronics.ch

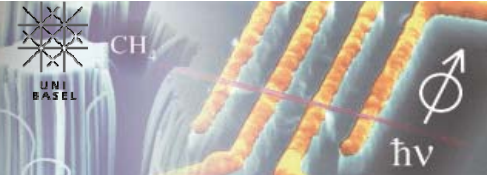


Newton'sche Ringe

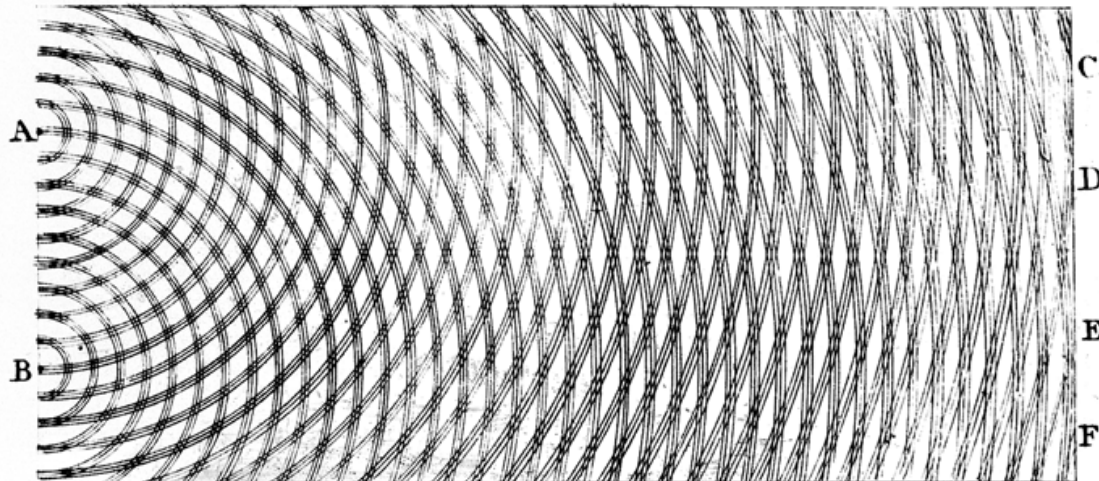
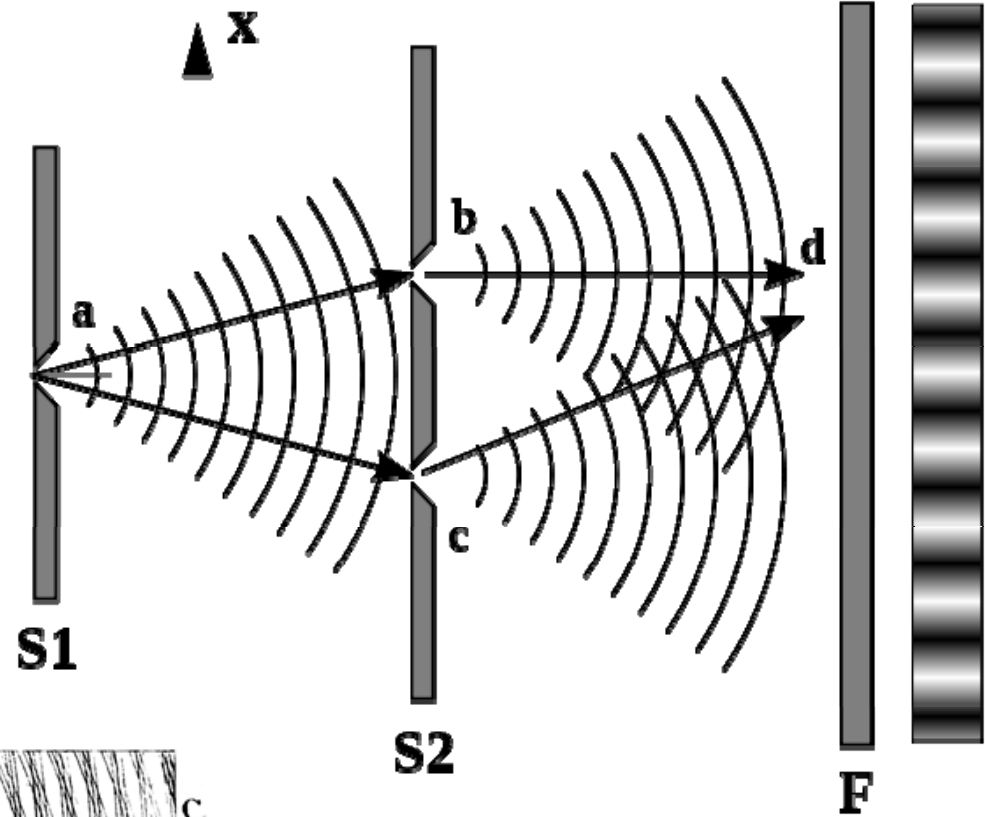


Licht als Welle

Schönenberger group www.nanoelectronics.ch

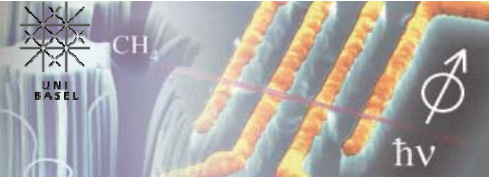


Thomas Young (1773-1829)

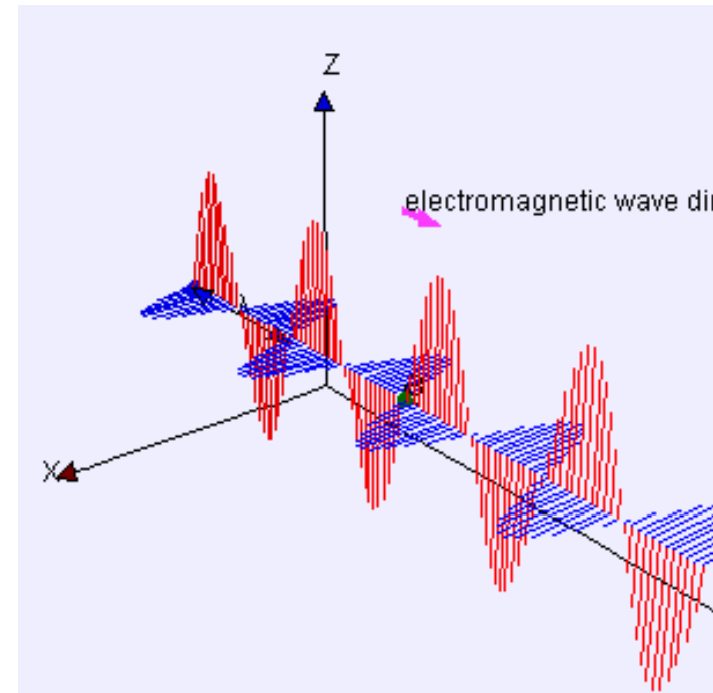


Licht als Welle

Schönenberger group www.nanoelectronics.ch



James C Maxwell (1831-1879)



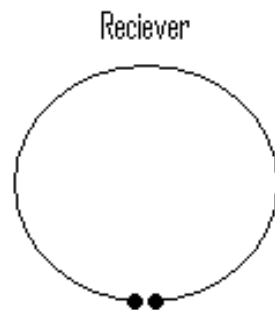
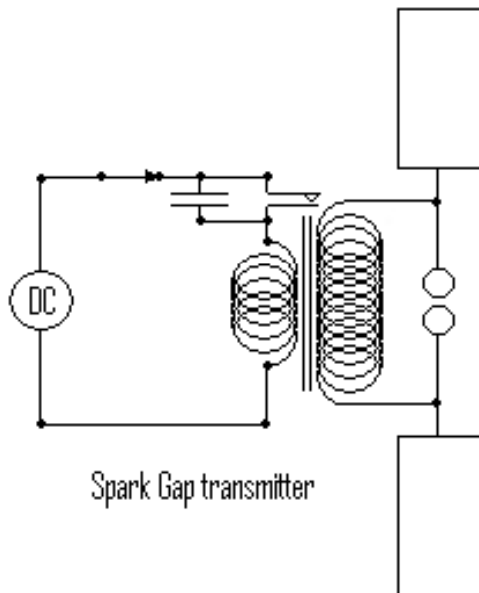
Name	SI	Physikalischer Inhalt
Gaußsches Gesetz	$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho_{\text{frei}}$	Die Ladung ist Quelle des elektrischen Feldes.
Gaußsches Gesetz für Magnetfelder	$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$	Das Feld der magnetischen Flussdichte ist quellenfrei; es gibt keine magnetischen Monopole .
Induktionsgesetz	$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$	Änderungen des magnetischen Feldes führen zu einem elektrischen Wirbelfeld .
Erweitertes Durchflutungsgesetz	$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{j}_{\text{frei}} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$	Elektrische Ströme – einschließlich des Verschiebungsstroms – führen zu einem magnetischen Wirbelfeld.

Licht als Welle

Schönenberger group www.nanoelectronics.ch



Heinrich Hertz (1857-1894)



ELECTRIC WAVES

BEING

RESEARCHES ON THE PROPAGATION OF ELECTRIC
ACTION WITH FINITE VELOCITY
THROUGH SPACE

BY

DR. HEINRICH HERTZ

PROFESSOR OF PHYSICS IN THE UNIVERSITY OF BONN

AUTHORISED ENGLISH TRANSLATION

By D. E. JONES, B.Sc.

DIRECTOR OF TECHNICAL EDUCATION TO THE STAFFORDSHIRE COUNTY COUNCIL
LATELY PROFESSOR OF PHYSICS IN THE UNIVERSITY COLLEGE OF WALES, ABERYSTWYTH

WITH A PREFACE BY LORD KELVIN, LL.D., D.C.L.

PRESIDENT OF THE ROYAL SOCIETY, PROFESSOR OF NATURAL PHILOSOPHY
IN THE UNIVERSITY OF GLASGOW, AND FELLOW OF ST. PETER'S
COLLEGE, CAMBRIDGE

London
MACMILLAN AND CO.

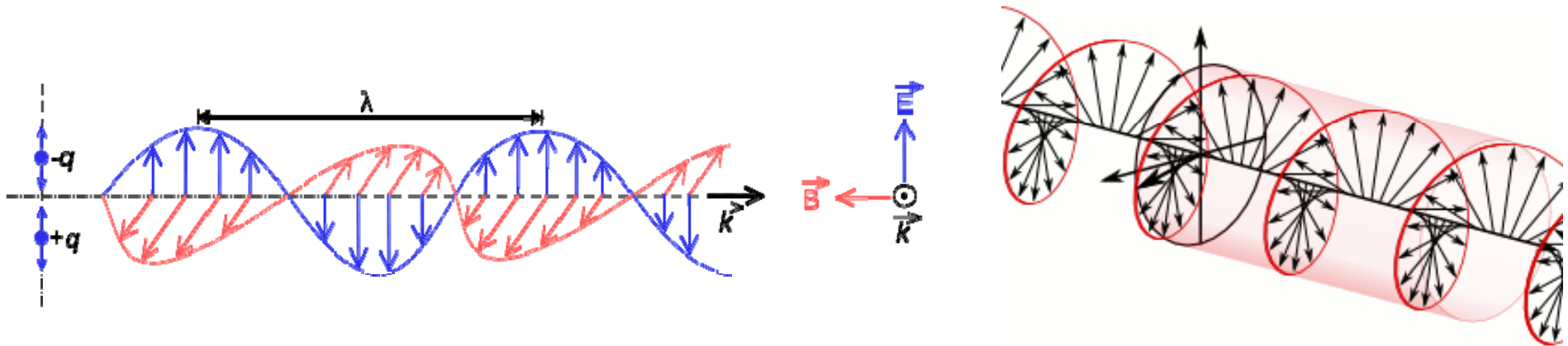
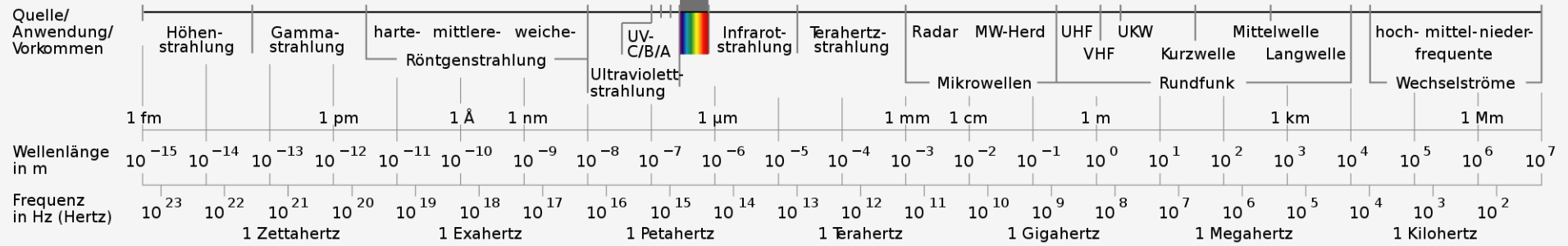
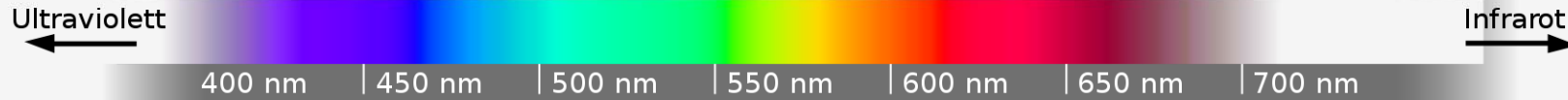
AND NEW YORK

1893

Licht ist elektromag. Welle

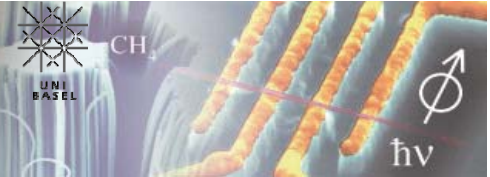
Schönenberger group www.nanoelectronics.ch

Das für den Menschen sichtbare Spektrum (Licht)

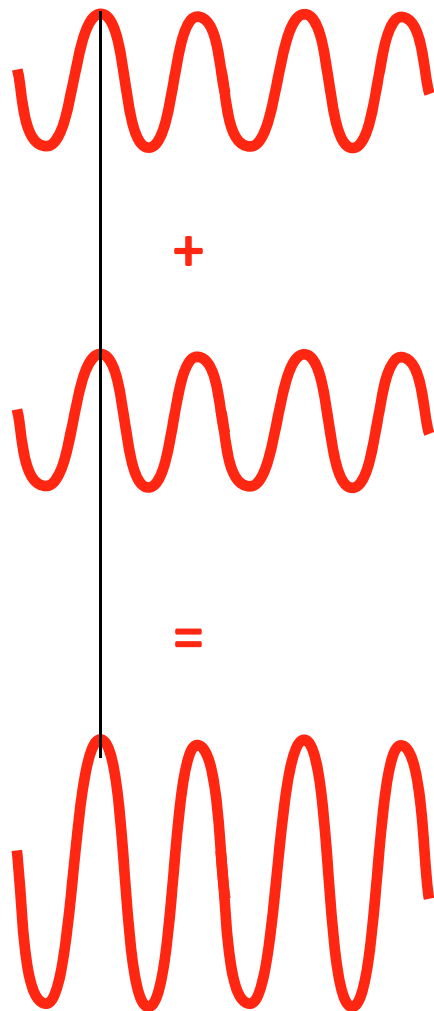


Licht als Welle: Superposition!

Schönenberger group www.nanoelectronics.ch

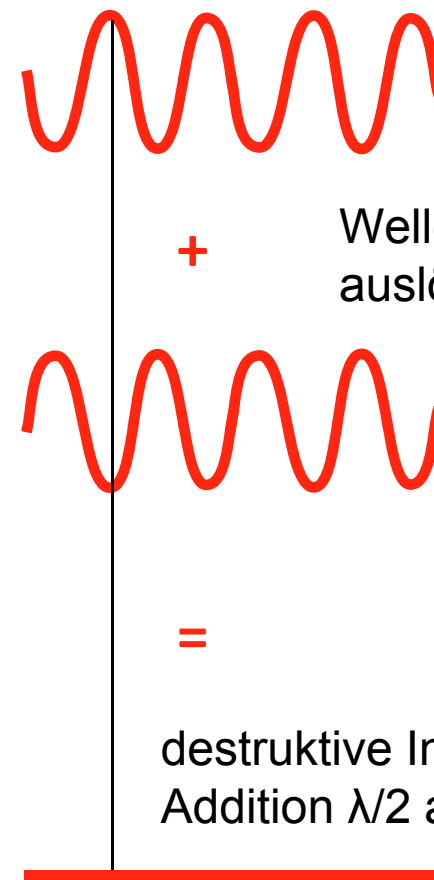


Interferenz von Wellen!



Wellen können sich verstärken!

konstruktive Interferenz bei Addition in Phase

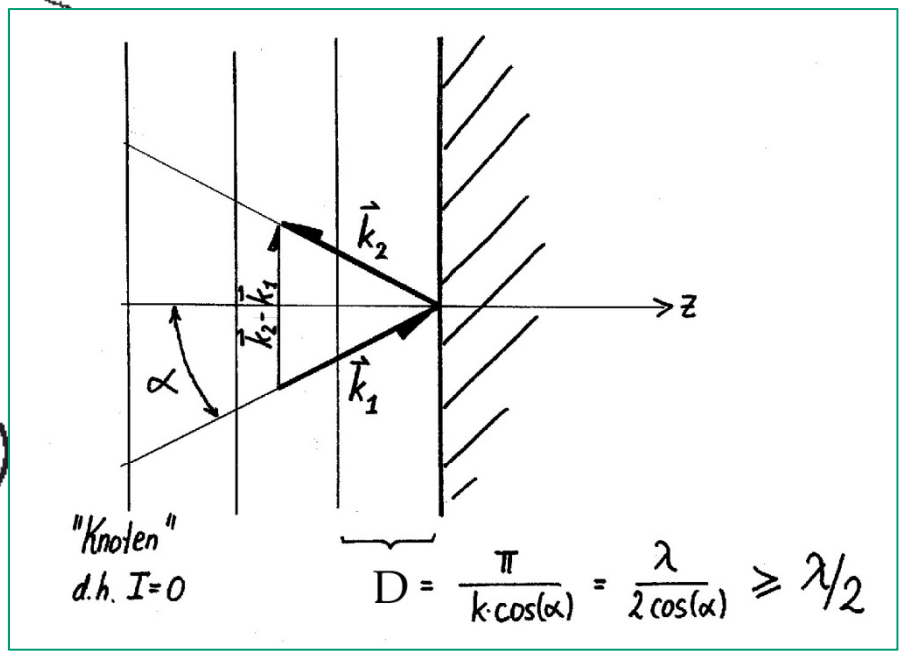
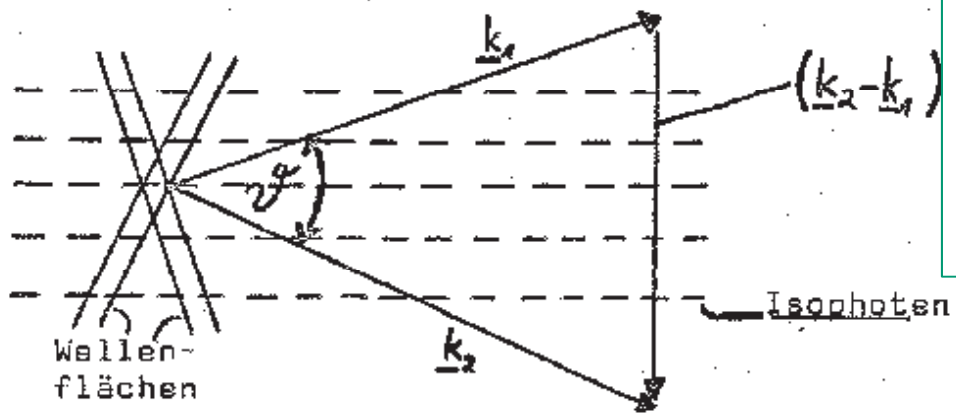
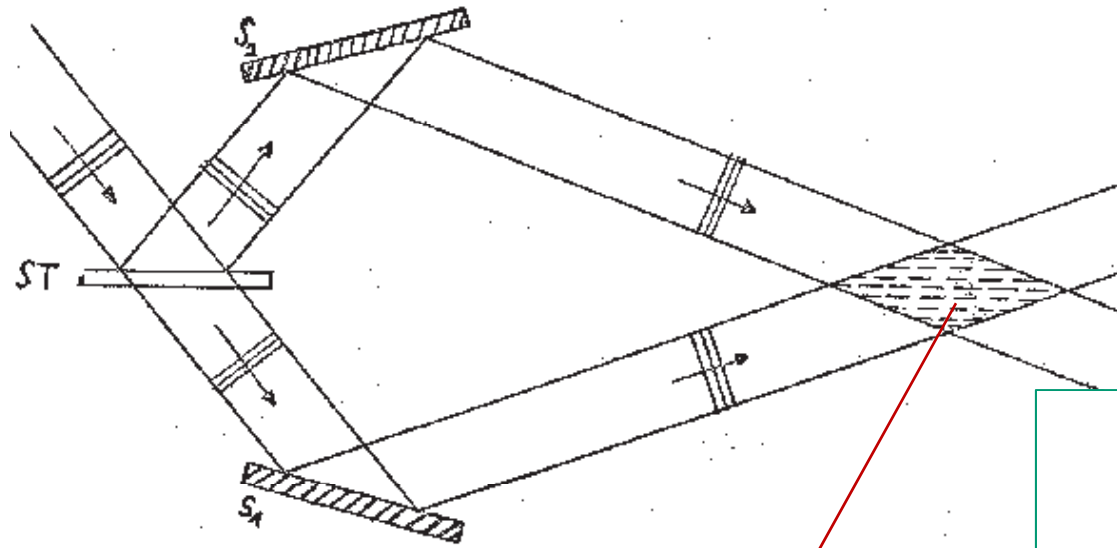


Wellen können sich auslöschen!

destruktive Interferenz bei Addition $\lambda/2$ ausser Phase

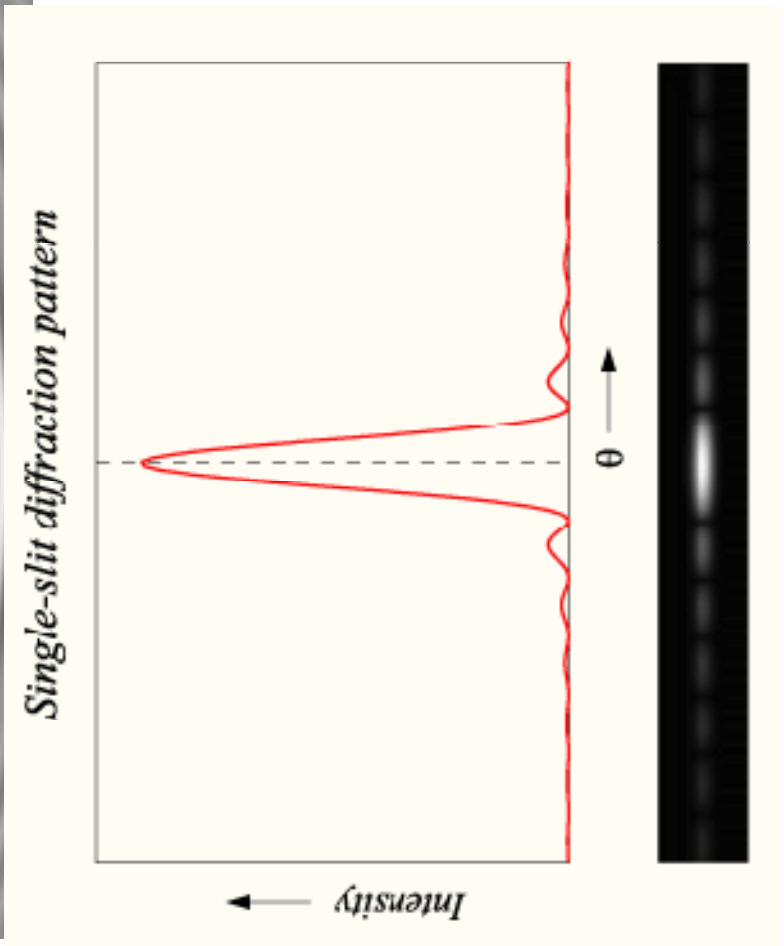
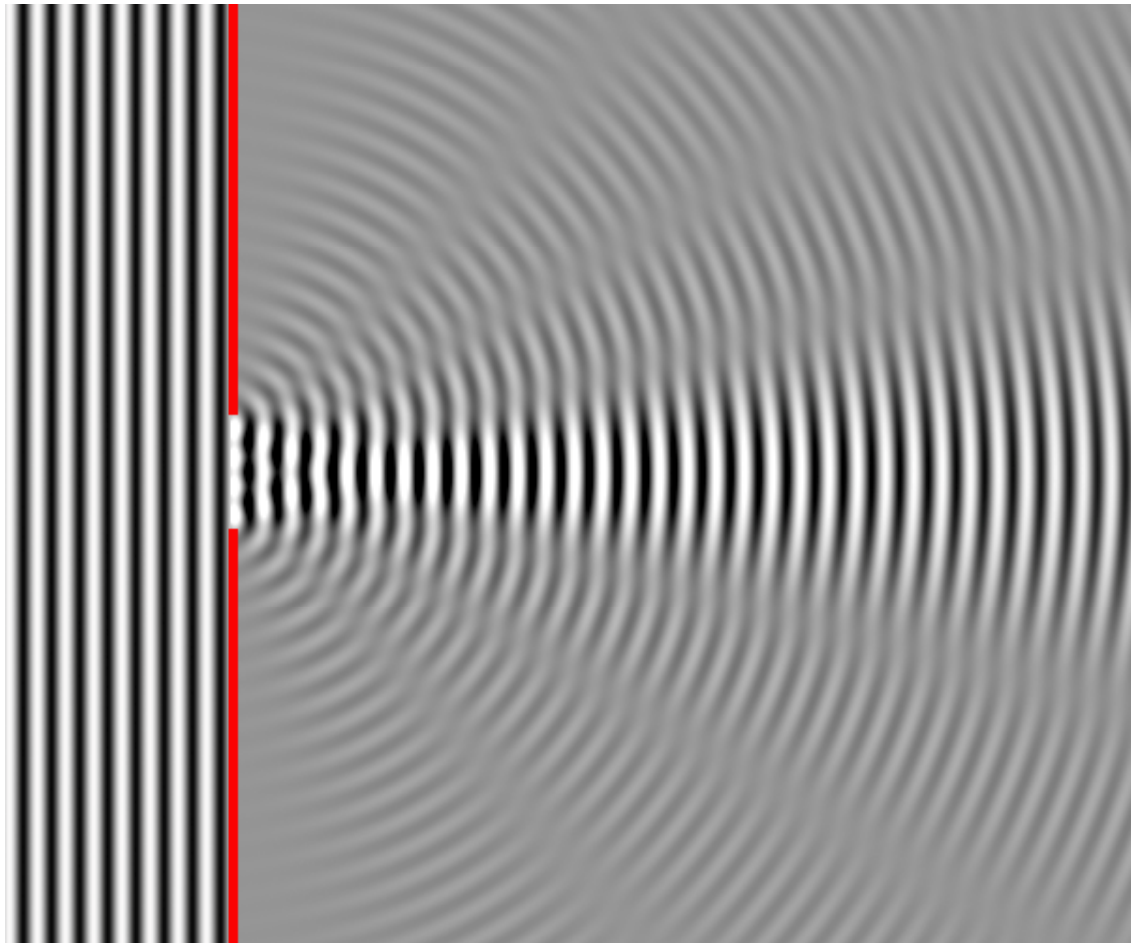
Licht als Welle: Zweistrahlinterferenz

Schönenberger group www.nanoelectronics.ch



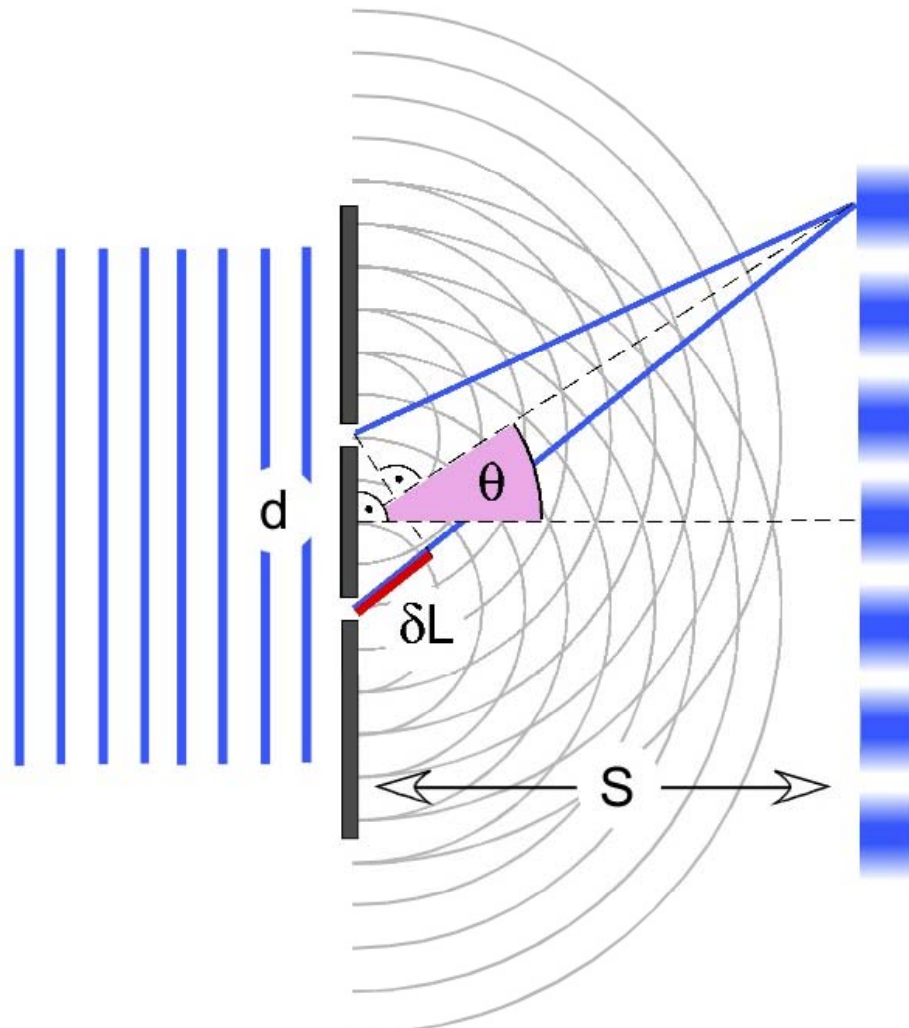
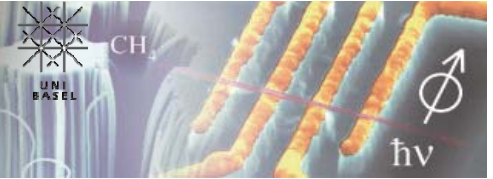
Licht als Welle

Schönenberger group www.nanoelectronics.ch



Licht als Welle

Schönenberger group www.nanoelectronics.ch

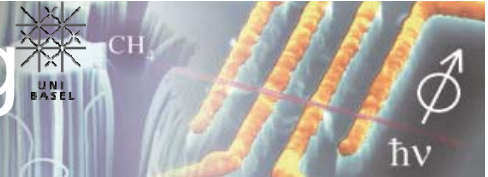


Thomas Young
(1773-1829)

Bedingung für Maxima: $n \cdot \lambda = \delta L \approx d \sin \theta, \quad n = 0, \pm 1, \dots$

$S \gg d$

Max Planck: Akt der Verzweiflung

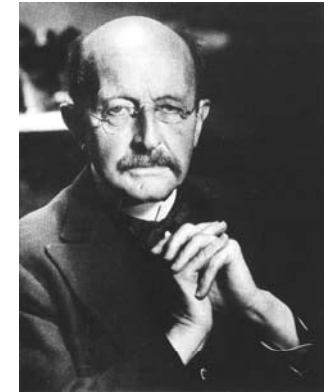


Schönenberger group www.nanoelectronics.ch

14. Dezember 1900, Vortrag vor der Deutschen Physikalische Gesellschaft, Berlin

$$E = h\nu$$

Strahlung wird in diskreten Energiepaketen emittiert und absorbiert
h = "Hilfsgrösse"



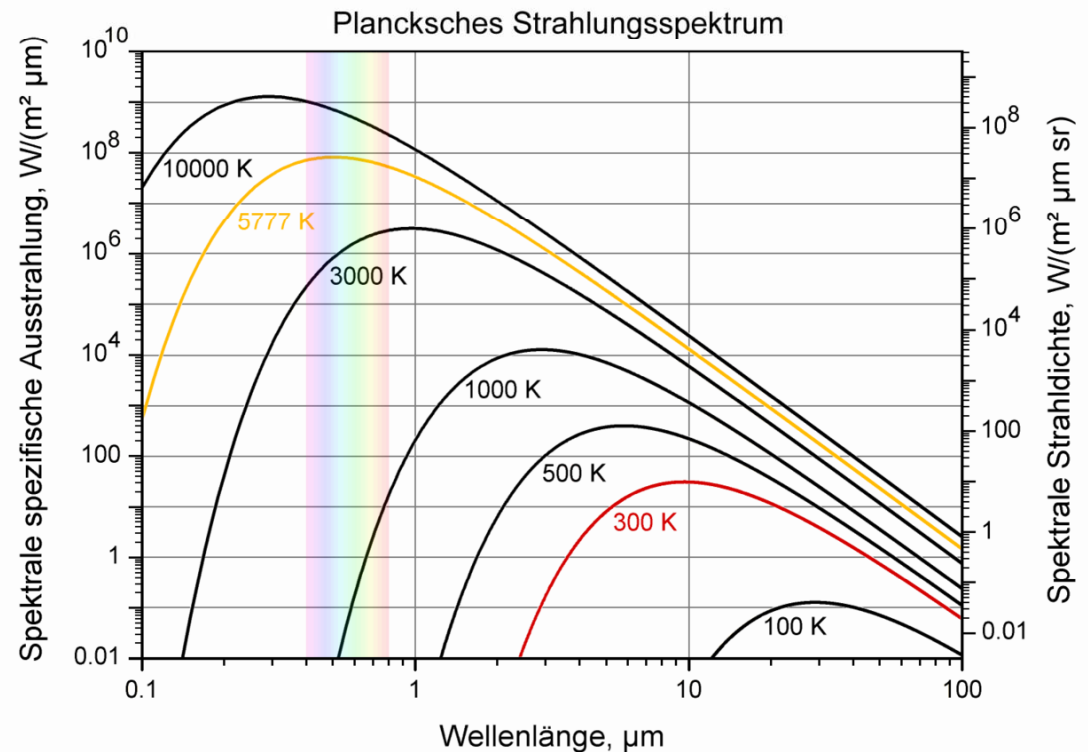
Max Planck

Plancksches Wirkungsquantum

$$h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ Js}$$

Plancksche Strahlungsformel
(spektrale Energiedichte der Schwarzkörperstrahlung)

$$u(\nu, T) = \frac{8\pi}{c^3} \frac{h\nu^3}{e^{h\nu/kT} - 1}$$



kosmischer Hintergrund

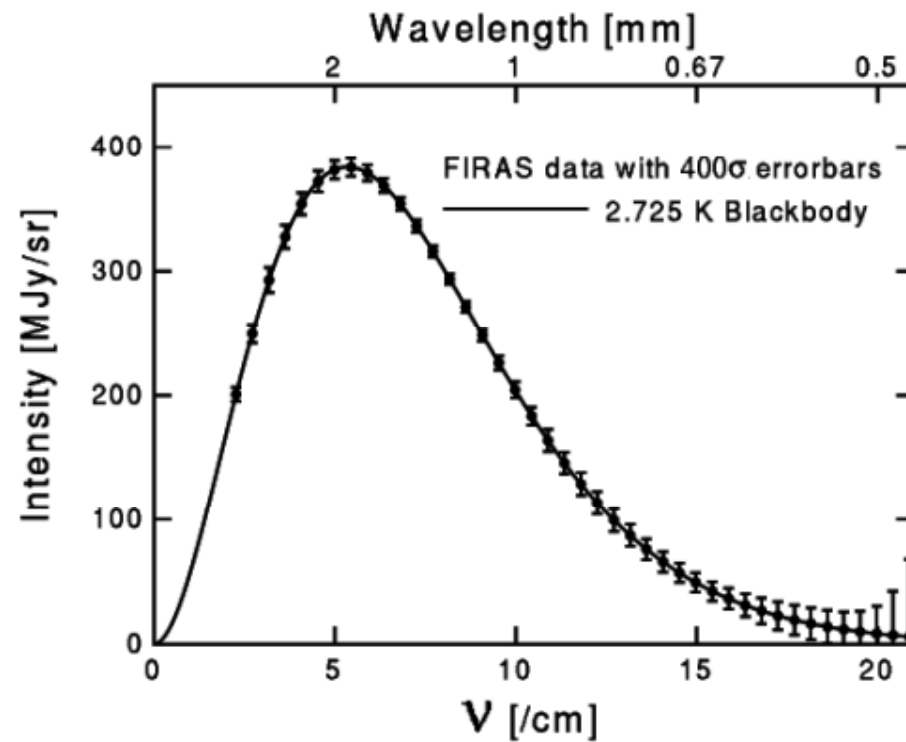
Schönenberger group www.nanoelectronics.ch



CH

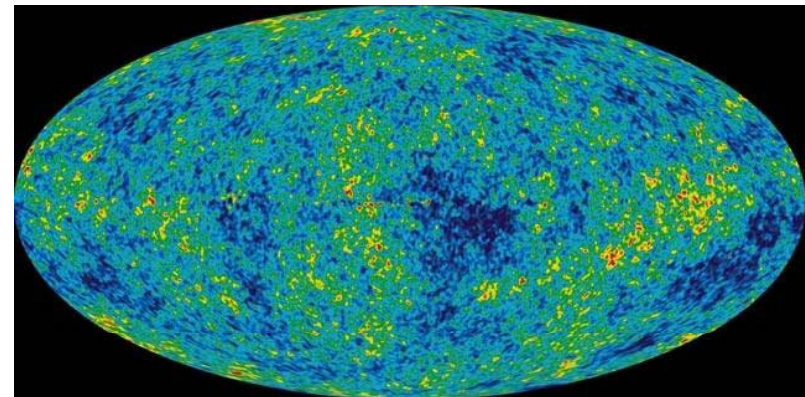


Spektrum



Temperaturvariation

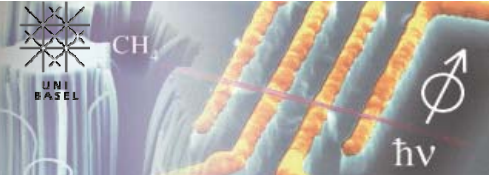
$$\Delta T/T \approx 10^{-5}$$



⇒ nahezu perfektes Schwarzkörper-Spektrum!

Stefan-Boltzmann Gesetz

Schönenberger group www.nanoelectronics.ch



Zeitgesteuerte Regelung des Strahlungshaushaltes der Erde zur Beeinflussung und Steuerung des Klimas und des Wetters

DE 102007018168 A1

ZUSAMMENFASSUNG

Die Erfindung sieht eine im Tag-/Nachtrhythmus zeitabhängig gesteuerte Regelung der Albedo (Rückstrahlvermögen) der Erdoberfläche vor. Über einer Oberfläche angeordnete, die Sonnenstrahlung stark reflektierende oder streuende Flächen (hohe Albedo, schlechte Absorber) werden in der Nacht entfernt, in ihrer Lage verändert oder verkleinert, um dem darunter liegenden Material geringer Albedo (guter Absorber) eine Abstrahlung seiner Wärme ins Weltall zu ermöglichen. Die erfindungsgemäße Vorrichtung nutzt das sogenannte Kirchhoffsche Strahlungsgesetz aus, gemäß dem Absorptionsgrad und Emissionsgrad im thermischen Gleichgewicht gleich sind. Gute Absorber sind auch gute Emittler, schlechte Absorber sind schlechte Emittler. (Das Gesetz gilt auch in sehr guter Näherung für Körper, die nicht im thermischen Gleichgewicht sind.)

Durch Anwendung des Verfahrens über großen zusammenhängenden Flächen können starke Abkühlereffekte erzielt werden. Diese Abkühlungen lassen sich darüber hinaus, im Gegensatz zu solchen, die auf eine Verminderung des Ausstoßens von Klimagasen folgen würden, sehr kurzfristig erzielen! Abgesehen von den Folgekosten, die sich aus einer Klimaerwärmung für die Menschheit insgesamt ergeben, finanziert sich die Erfindung darüber hinaus, indem sie es gestattet, unwirtliche Gegenden (Wüsten) für die Land- oder Viehwirtschaft zu erschließen.

Außerdem lassen sich erfindungsgemäß solarthermische Kraftwerke zur Gewinnung elektrischer Energie, bei denen viele Spiegel ...

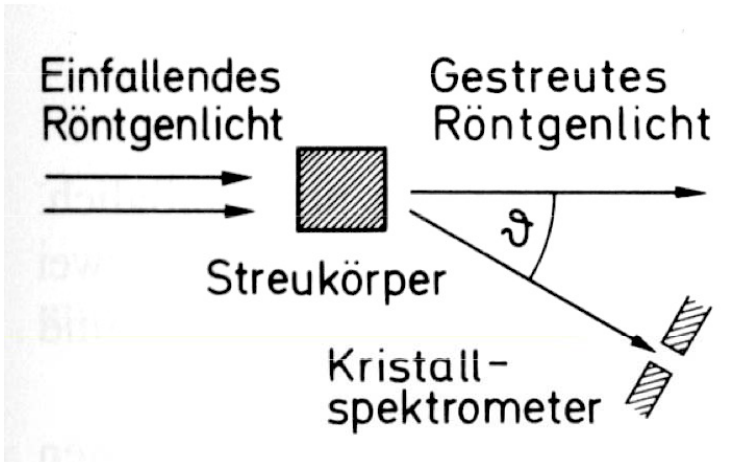
Veröffentlichungsnummer	DE102007018168 A1
Publikationstyp	Anmeldung
Anmeldenummer	DE200710018168
Veröffentlichungsdatum	4. Sept. 2008
Eingetragen	18. Apr. 2007
Prioritätsdatum	28. Febr. 2007
Auch veröffentlicht unter	WO2008104568A1
Erfinder	Stefan Brosig
Antragsteller	Brosig, Stefan, Dr.
Zitat exportieren	BiBTeX , EndNote , RefMan
Patentzitate (3), Nichtpatentzitate (1), Referenziert von (1), Klassifizierungen (3), Juristische Ereignisse (3)	

Externe Links: [DPMA](#), [Espacenet](#)

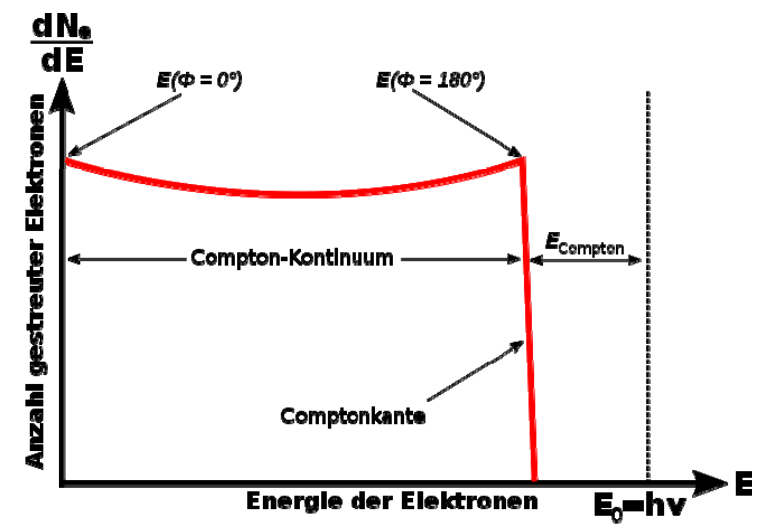
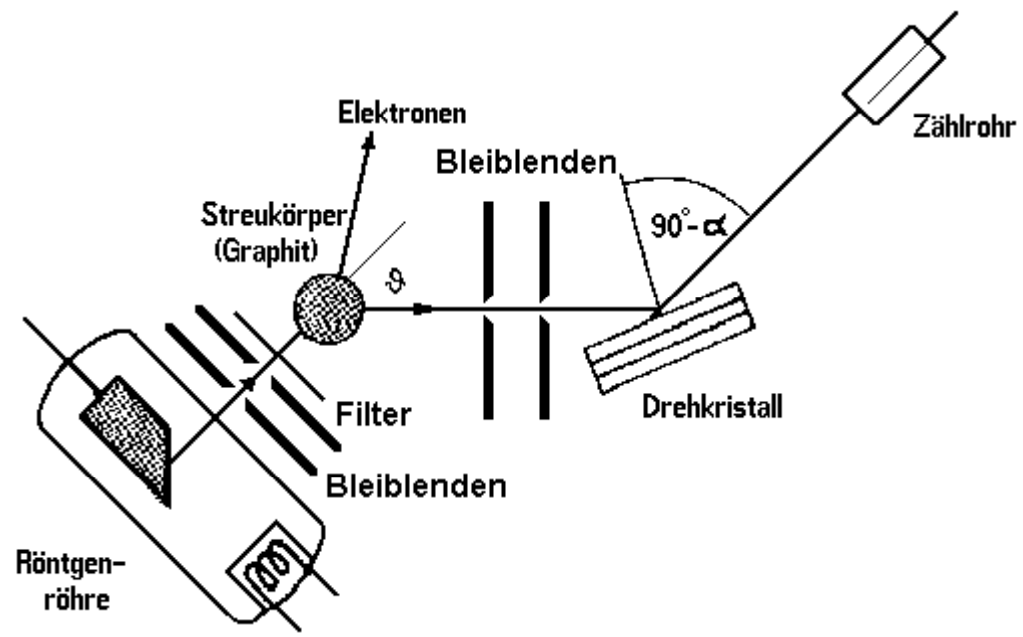
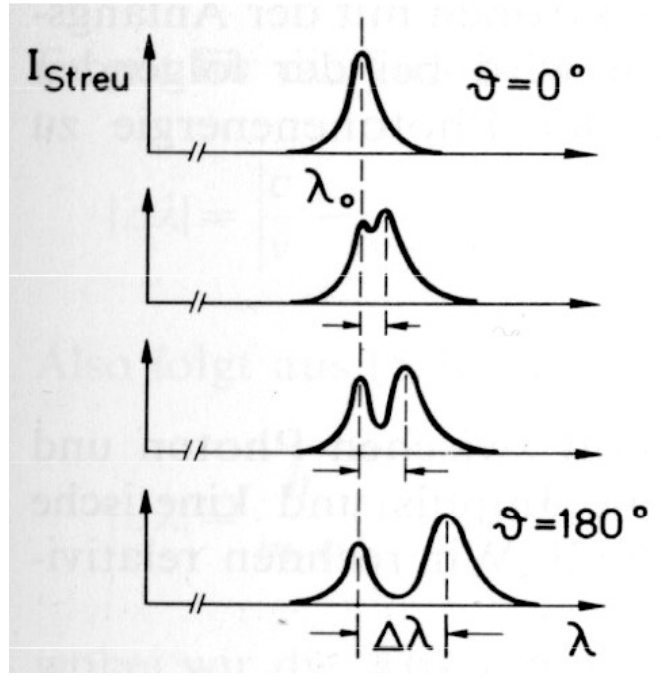
die Solarkonstante der Erde beträgt ca. 1300 W/m^2 . Daraus kann man T bestimmen.

Compton Streuung

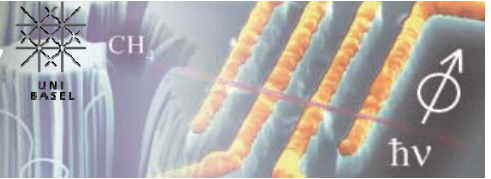
Schönenberger group www.nanoelectronics.ch



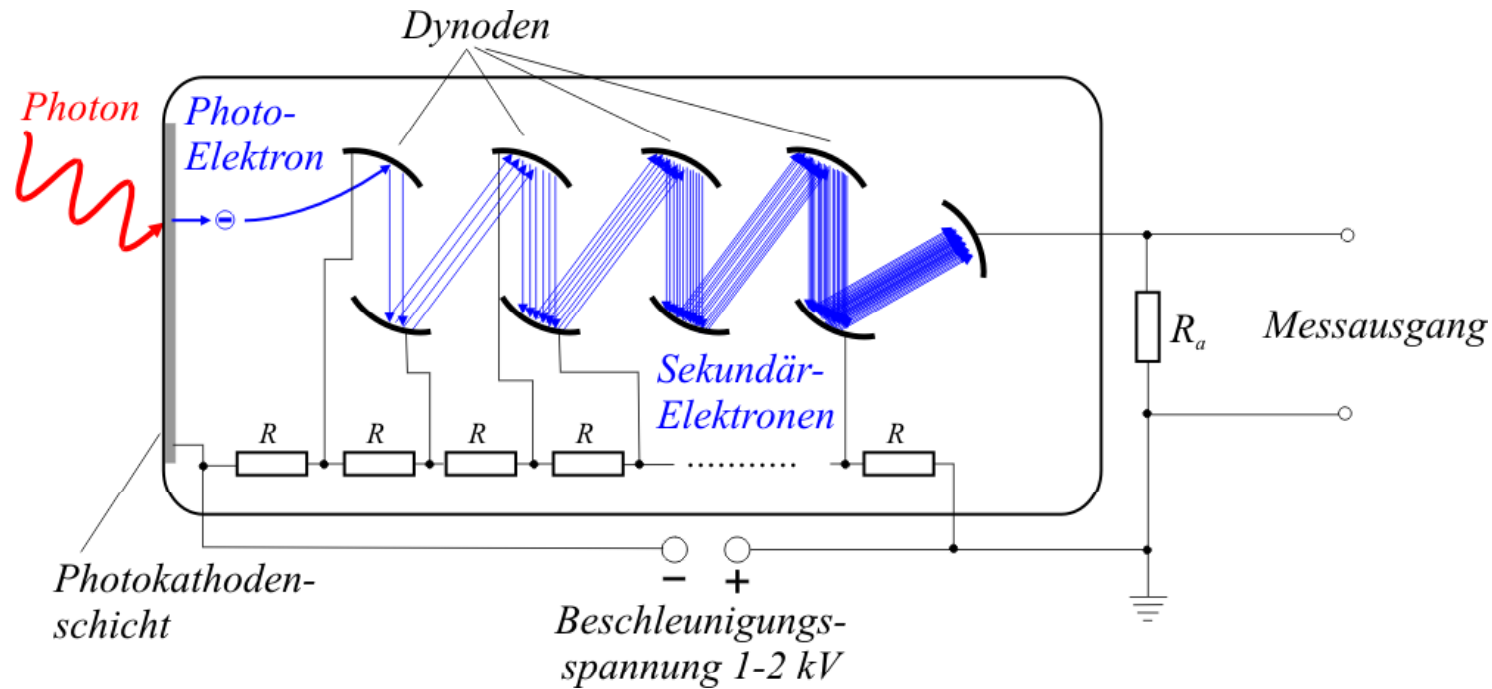
Haken-Wolf, Abb. 5.8



Einzelphotonendetektor: Photomultiplier

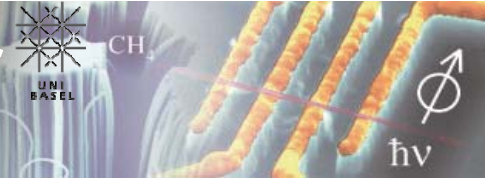


Schönenberger group www.nanoelectronics.ch

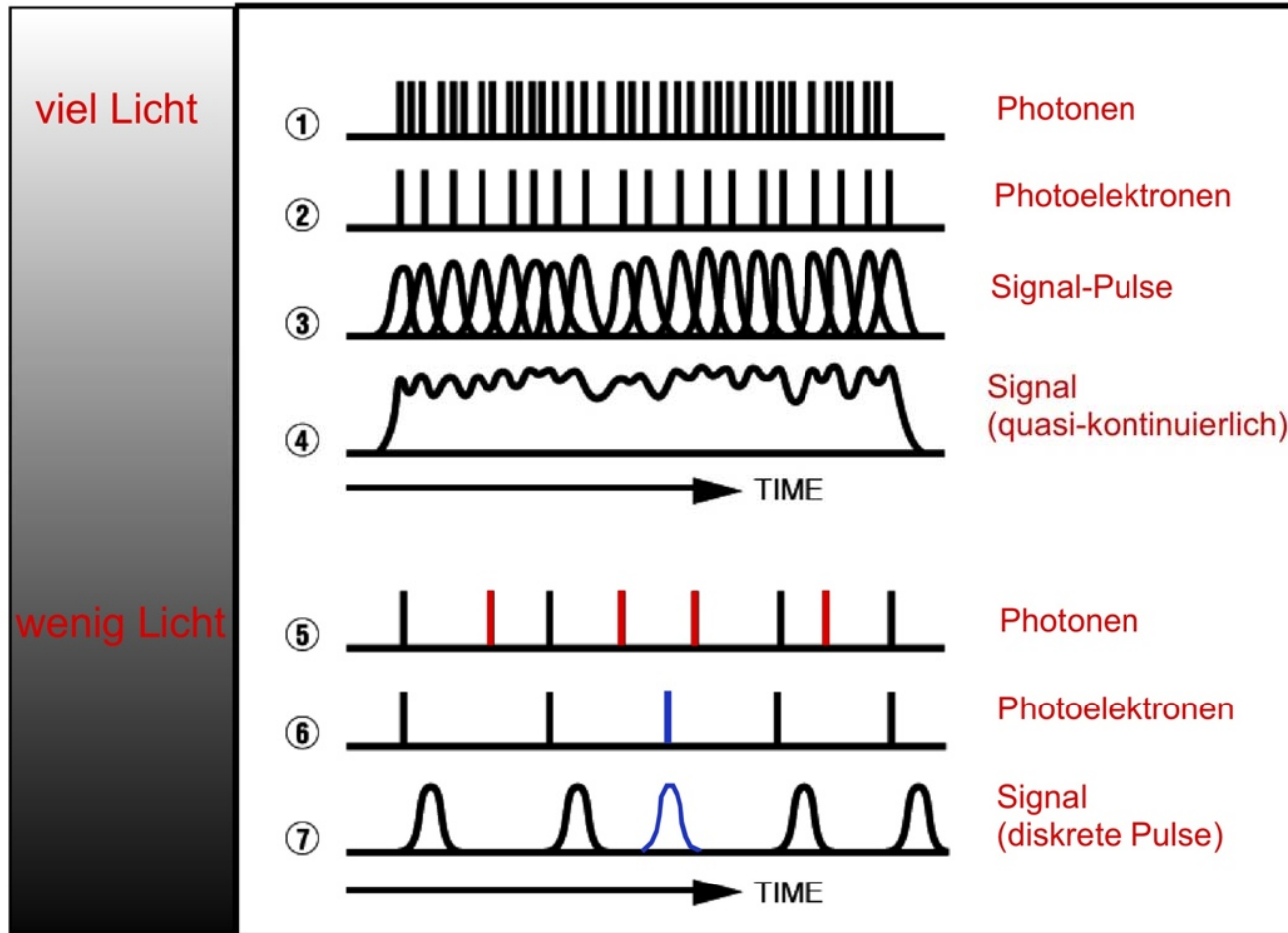


- Quanteneffizienz für sichtbares Licht typischerweise $QE = 30\%$
- Bei 10 Dynoden und 7 Sekundärelektronen pro Elektron erhält man einen Signalpuls mit 10^8 Elektronen pro detektiertem Photon

Einzelphotonendetektor: Photomultiplier



Schönenberger group www.nanoelectronics.ch



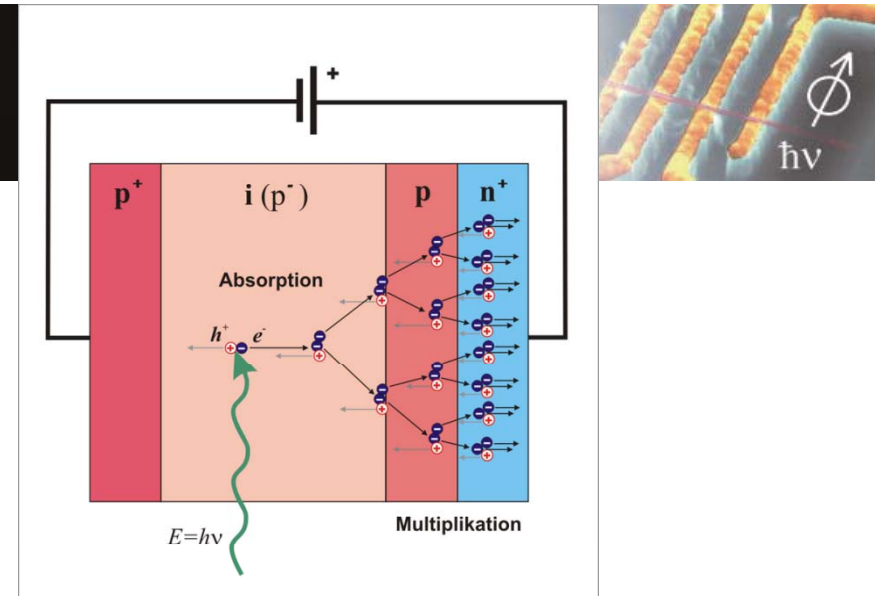
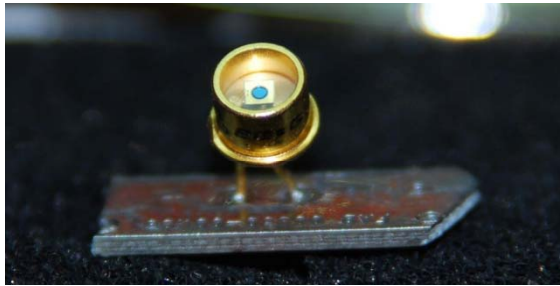
A. Hemmerich,
Uni Hamburg

Dunkelzählrate (gekühlt): < 1 Photon/s

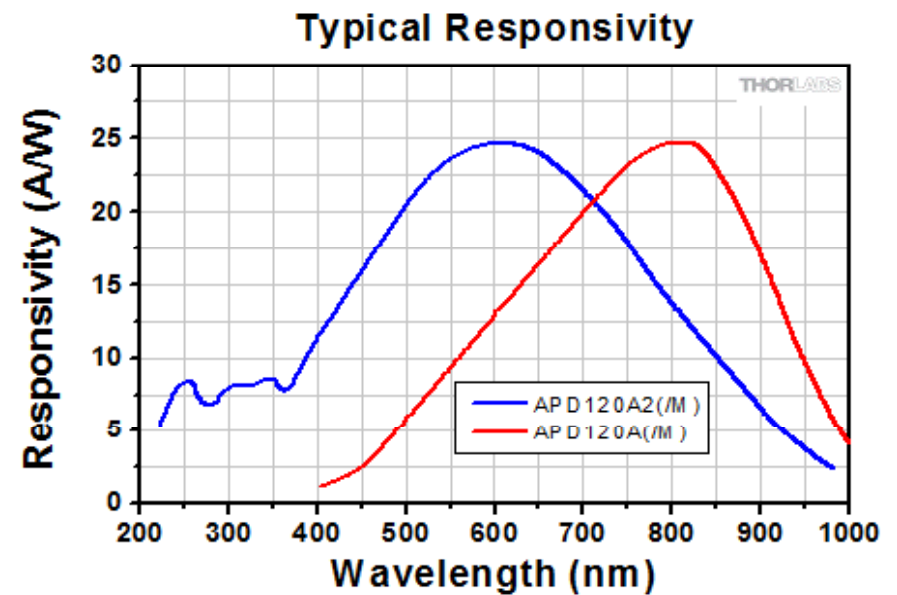
Quanteneffizienz (sichtbares Spektrum): QE = 30%

Avalanche Photodiode

Schönenberger group www.nanoelectronics.ch



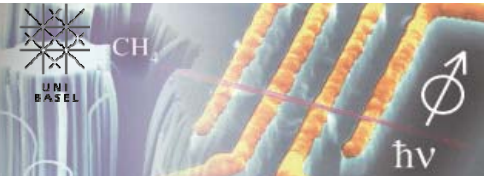
Item #	APD120A2	APD120A
Detector Type	UV Enhanced Silicon APD	Silicon APD
Wavelength Range	200 - 1000 nm	400 - 1000 nm
Typical Max Responsivity	25 A/W @ 600 nm (M = 50)	25 A/W @ 800 nm (M = 50)
Active Detector Diameter	1 mm	
Transimpedance Gain	100 kV/A 50 kV/A with 50 Ω Termination	
Maximum Conversion Gain	2.5×10^6 V/W	
Output Bandwidth (3dB)	DC - 50 MHz	
CW Saturation Power	1.5 μW	
Max Input Power ^a	1 mW	
Minimum NEP (DC - 50 MHz)	0.21 pW/√Hz ^b	0.20 pW/√Hz ^c
Integrated Noise (DC - 50 MHz)	1.4 nW (RMS)	1.5 nW (RMS)
Electrical Outputs	BNC, 50 Ω	
Max Output Voltage	3.6 V	
DC Offset Electrical Output	<±15 mV	
Power Supply	±12 V @ 200 mA (110/230 VAC Switchable)	
General		
Operating Temperature Range	0 to 40 °C	
Storage Temperature Range	-40 to 70 °C	
Device Dimensions (W x H x D)	2.0" x 2.50" x 1.08" (50.8 mm x 63.5 mm x 27.4 mm)	
Weight	< 0.1 kg	



Wellenlängenbereich, Verstärkung,
elektrische Geschwindigkeit, Rauschen

Photodetectors

Schönenberger group www.nanoelectronics.ch



Electronic Detector Spectral Sensitivities

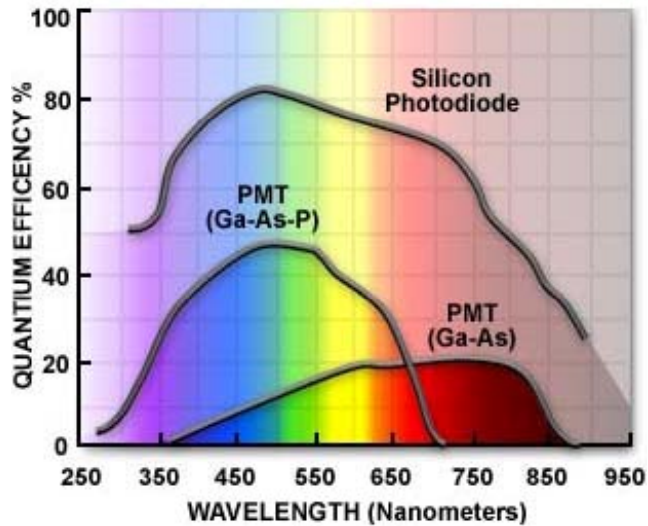


Figure 3

CCD Spectral Sensitivities

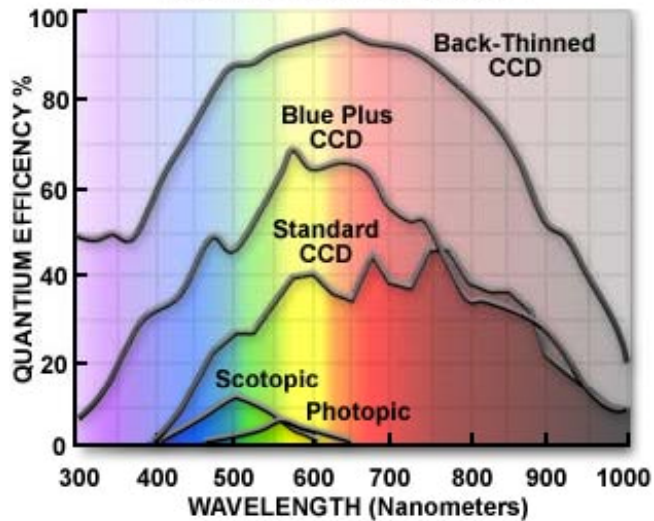
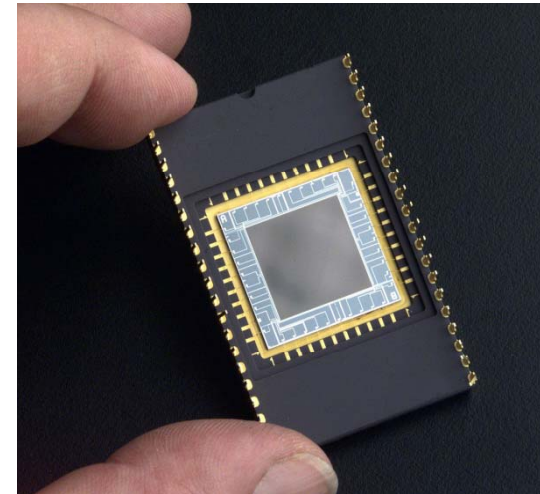


Figure 6



Wikipedia

Proximity-Focused Image Intensifier

Olympus

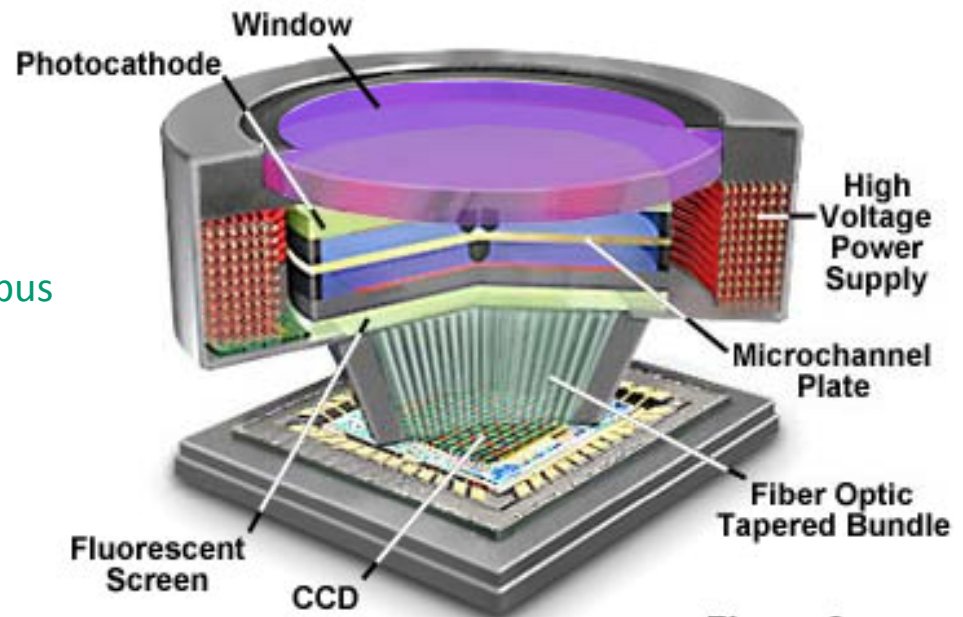


Figure 9

Rauschen / Noise

Schönenberger group www.nanoelectronics.ch



Laserstrahl der Leistung P → mittlere Photonenzahl
Detektionszeit Δt

$$\langle n \rangle = \frac{E}{h\nu} = \frac{P \Delta t}{h\nu}$$

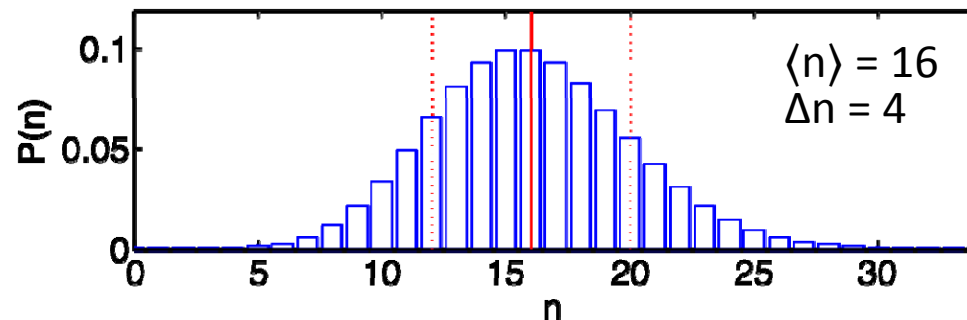
Photonenstatistik

Zahl der Photonen n im Zeitintervall Δt schwankt um Mittelwert $\langle n \rangle$

Laser: **Poissonverteilung**

$$P(n) = \frac{\langle n \rangle^n}{n!} e^{-\langle n \rangle}$$

Mittelwert: $\sum_{n=0}^{\infty} nP(n) = \langle n \rangle$



Standardabweichung:

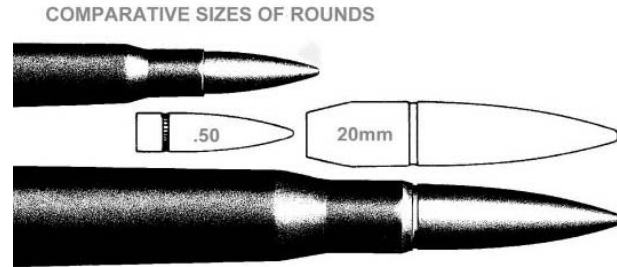
$$\Delta n = \left(\sum_{n=0}^{\infty} (n - \langle n \rangle)^2 P(n) \right)^{\frac{1}{2}} = \sqrt{\langle n \rangle}$$

→ Intensitätsrauschen wegen “Körnigkeit” des Lichts (Schrotrauschen)

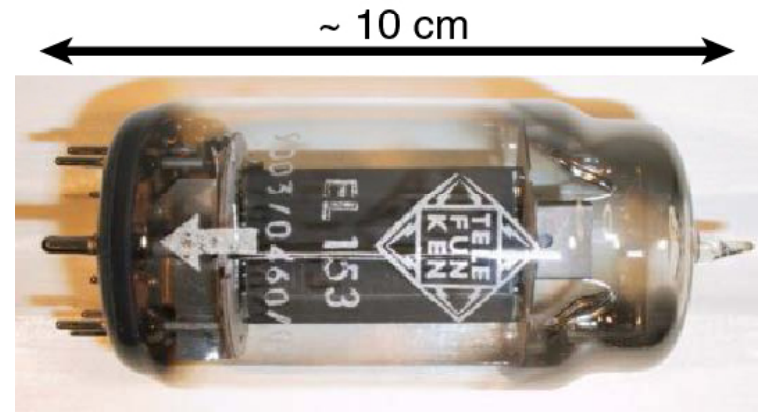
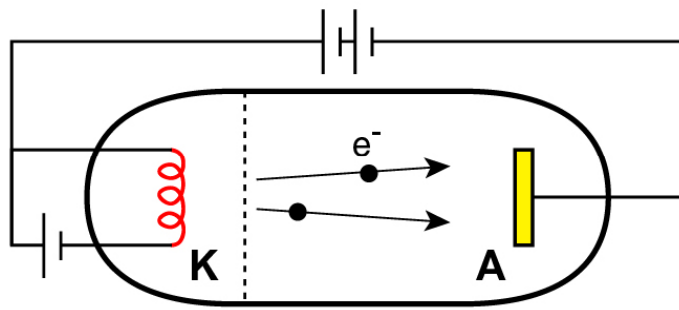
$$\frac{\Delta n}{\langle n \rangle} = \frac{1}{\sqrt{\langle n \rangle}} \xrightarrow{\langle n \rangle \rightarrow \infty} 0 \quad \text{relative Schwankung für hohe Leistung vernachlässigbar}$$

Schrotrauschen im Strom

Schönenberger group www.nanoelectronics.ch



electrons (quantized charge)
as bullets, i.e. as shots → **shot noise**



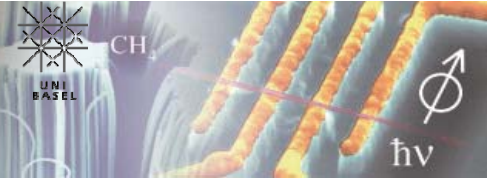
theory by Schottky 1918, i.e. current noise $\Delta I \propto \sqrt{I}$

analog zu Laserlichtquelle

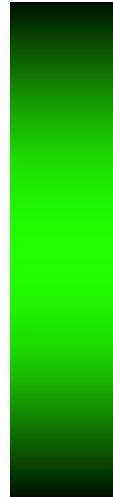
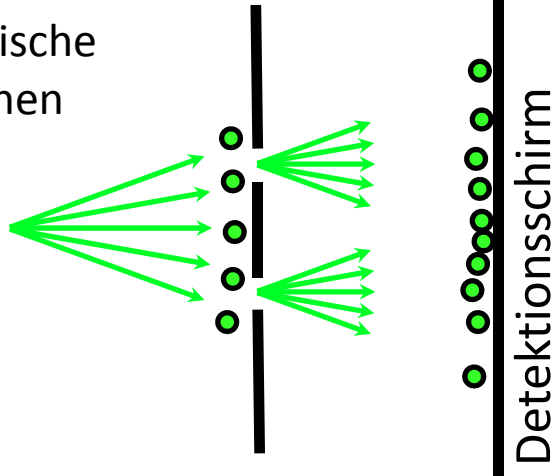
confirmed by: Hull and Williams, Phys.Rev. 25, 147 (1925)

Doppelspaltexperiment

Schönenberger group www.nanoelectronics.ch



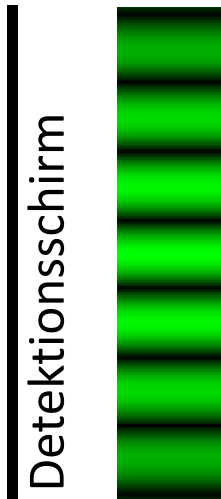
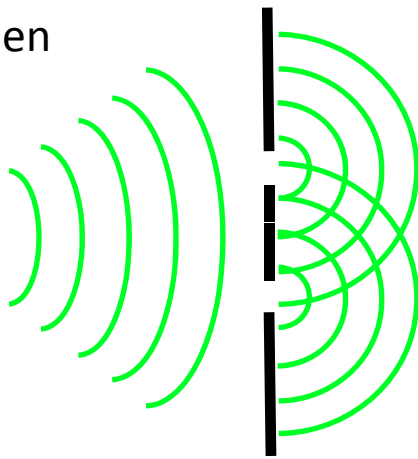
klassische
Teilchen



$$I = I_1 + I_2$$

Intensitätsverteilung zeigt
keine Interferenz

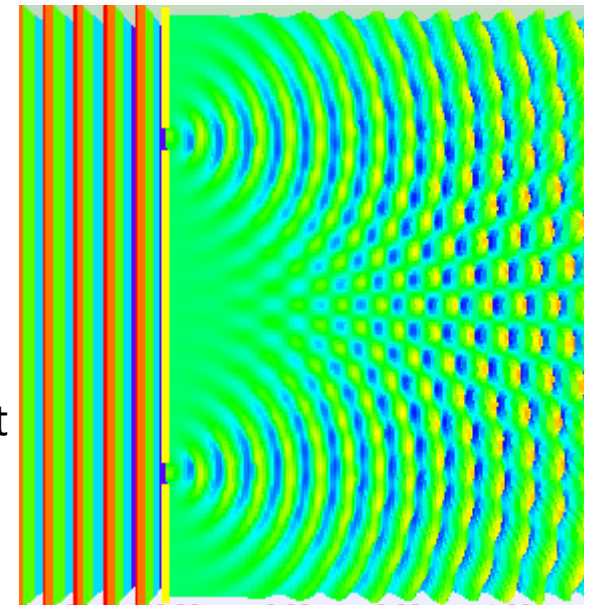
Wellen



Amplituden addieren
(Superpositionsprinzip)

$$I = |E_1 + E_2|^2$$

Intensitätsverteilung zeigt
Interferenzmuster



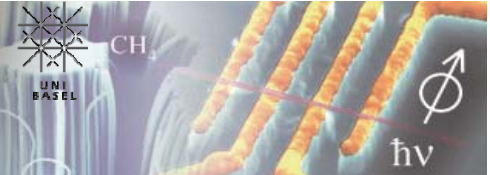
Doppelspalt für einzelne Photonen



- zu jedem Zeitpunkt befindet sich **maximal ein Photon** in der Apparatur
- führe Experiment mit vielen Photonen **nacheinander** durch
- beobachte entstehende Verteilung der Photonen auf dem Detektionsschirm

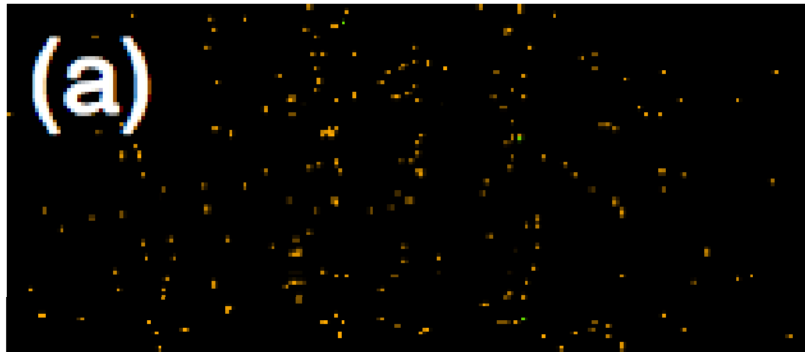
...für einzelne Photonen

Schönenberger group www.nanoelectronics.ch

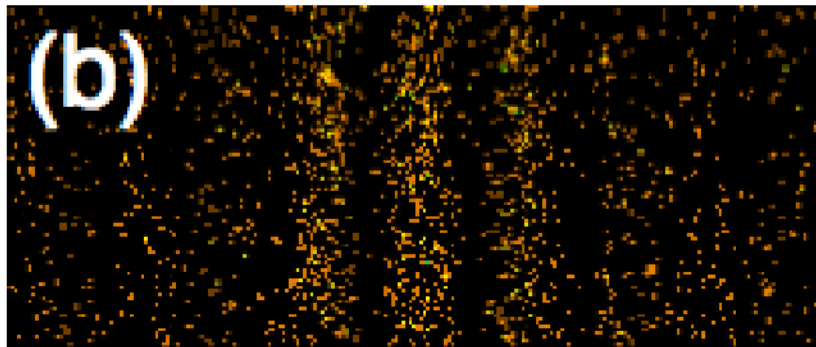
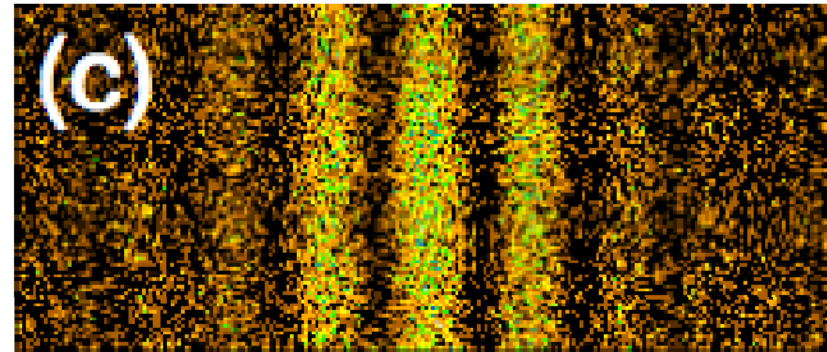


Interferenzmuster baut sich Photon für Photon auf

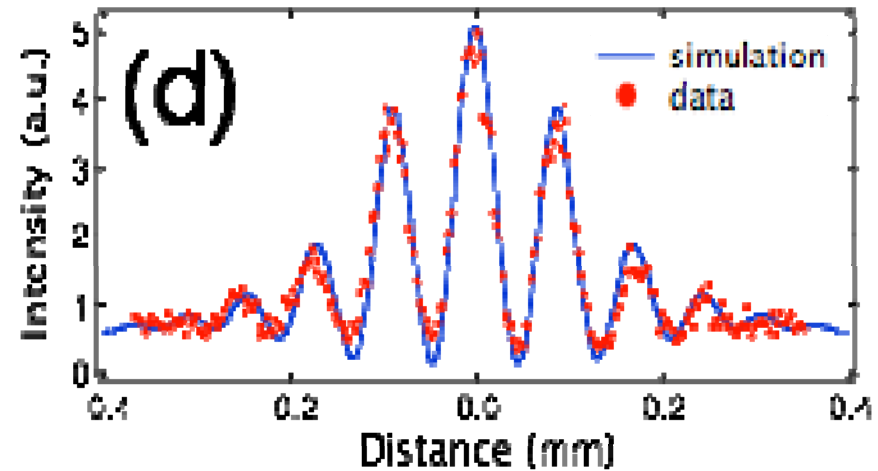
272 Photonen



19773 Photonen



2240 Photonen



Vergleich mit Wellentheorie

Aufbau Experiment

Schönenberger group www.nanoelectronics.ch

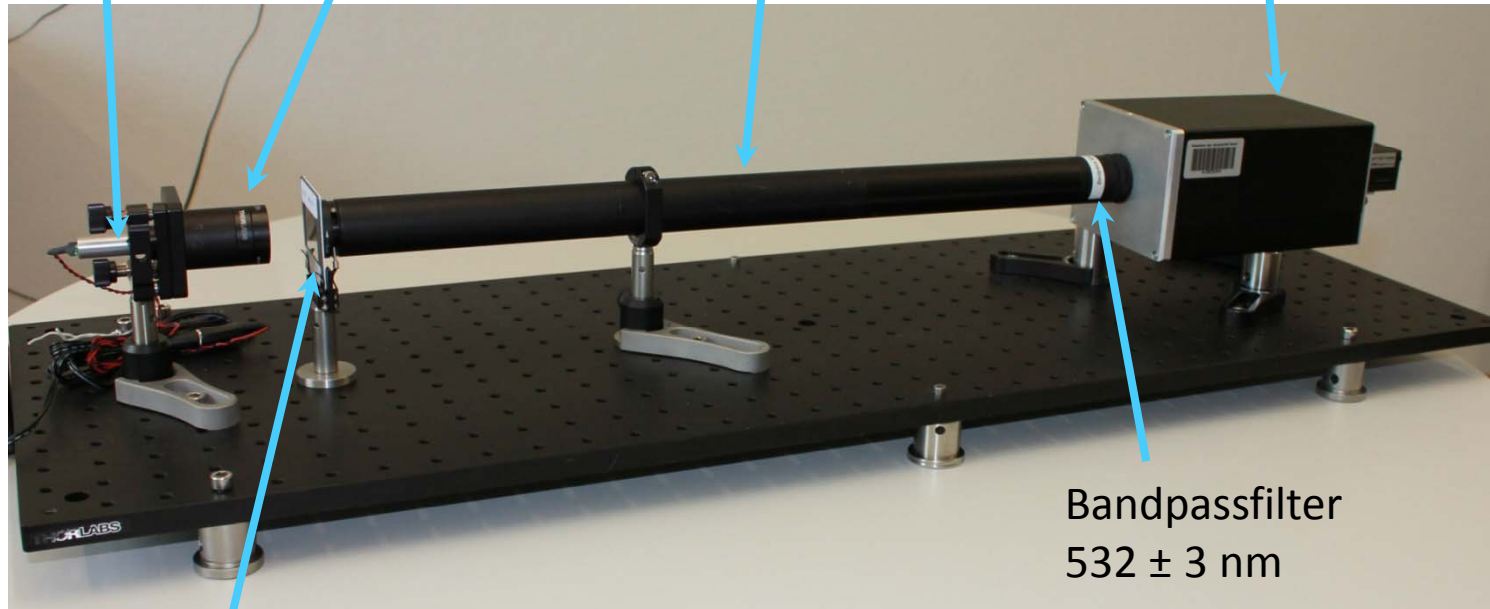


Laserdiode
($\lambda=532$ nm)

Abschwächer
($T=10^{-9}$)

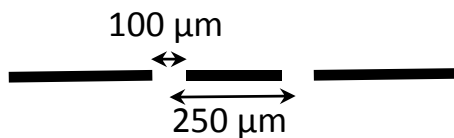
Rohr zur Abschirmung
von Streulicht

Einzelphotonen-
Kamera



Bandpassfilter
 532 ± 3 nm

Doppelspalt
(verschiedene
Abmessungen)



Gruppe P. Treutlein

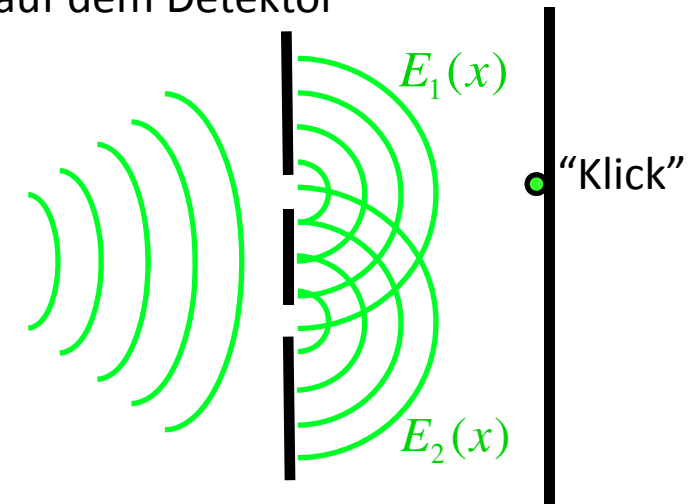
Wellen-Teilchen Dualismus

Schönenberger group www.nanoelectronics.ch



Beobachtung:

- Jedes Photon erzeugt einen einzelnen lokalisierten Klick auf dem Detektor
- Interferenzmuster baut sich Photon für Photon auf
- gemittelt über viele Photonen ergibt sich das von der Wellentheorie vorhergesagte Interferenzbild



Erklärung: Welle-Teilchen-Dualismus

- Photon propagiert durch die Apparatur als Welle
- Photon wird als Teilchen detektiert
- Wellentheorie gibt die **Wahrscheinlichkeit** für die Detektion eines Teilchens (Photons) am Ort x an:
- Der genaue Ort an dem ein Photon auftrifft kann **nicht** vorhergesagt werden
- Jedes Photon interferiert mit sich selbst
- **Komplementarität:** Welle und Teilchen sind komplementäre Konzepte, die sich gegenseitig ausschliessen und doch ergänzen. Zur Beschreibung von Quantenobjekten (Photonen, Atomen, ...) werden beide Konzepte benötigt.

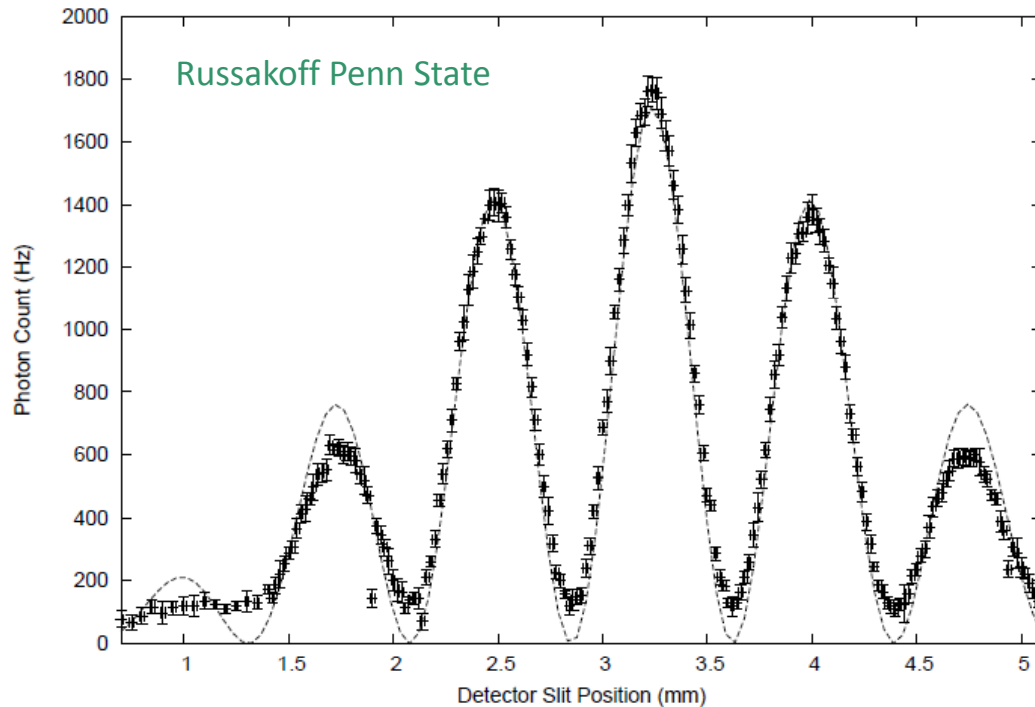
$$p(x) : I(x) = |E_1(x) + E_2(x)|^2$$

...für einzelne Photonen

Schönenberger group www.nanoelectronics.ch

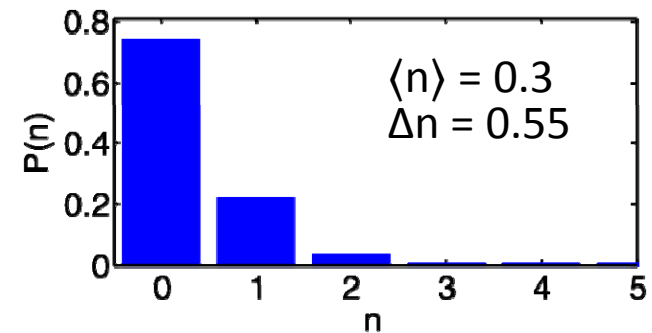


Double Slit Interference Pattern

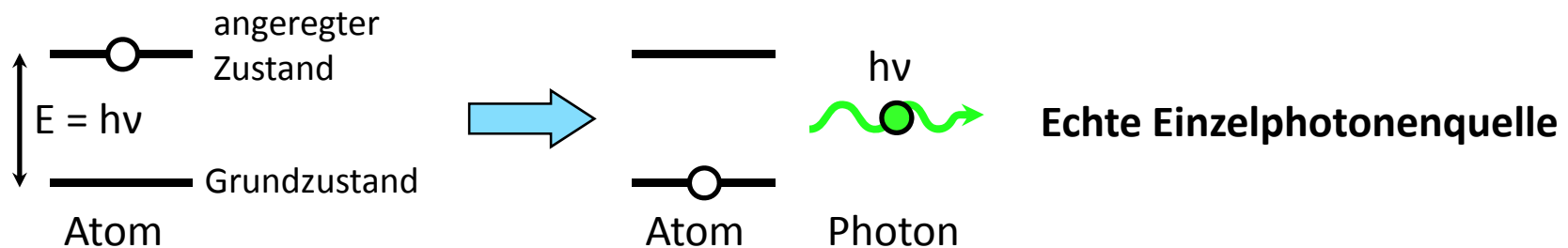


reduced beam intensity to the "single" photon level

ist nur näherungsweise eine Einzelphotonquelle

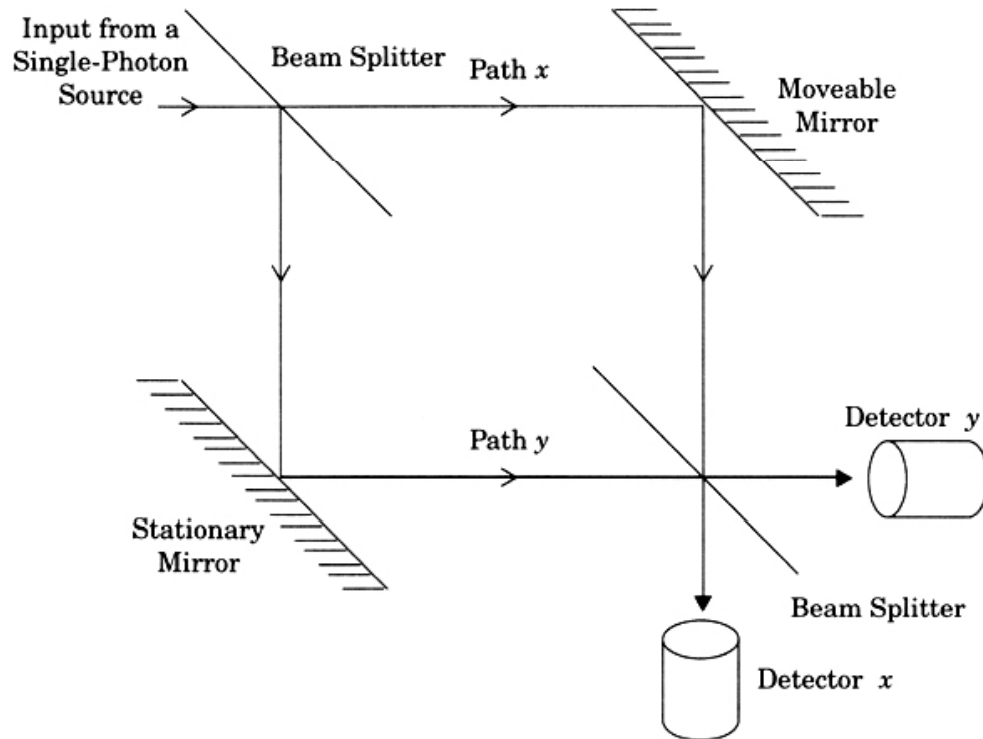


besser wäre echte Einzelphotonquelle:



...für echte "single-photon-source"

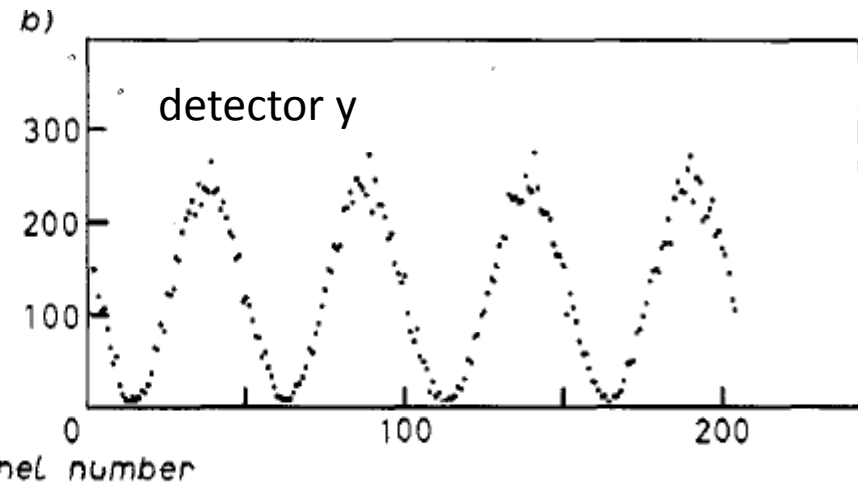
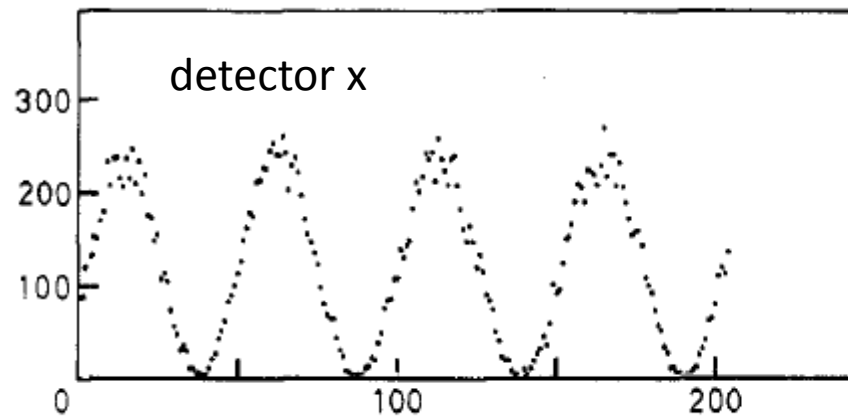
Schönenberger group www.nanoelectronics.ch



Mach-Zehnder Interferometer
mit einer echten Einzelphotonquelle

Granchier et al. *Europhys. Lett.*
1, 173 (1986)

other experiment: move second mirror
in or out after photon entered apparatus,
i.e. delayed choice



Komplementarität

Schönenberger group www.nanoelectronics.ch

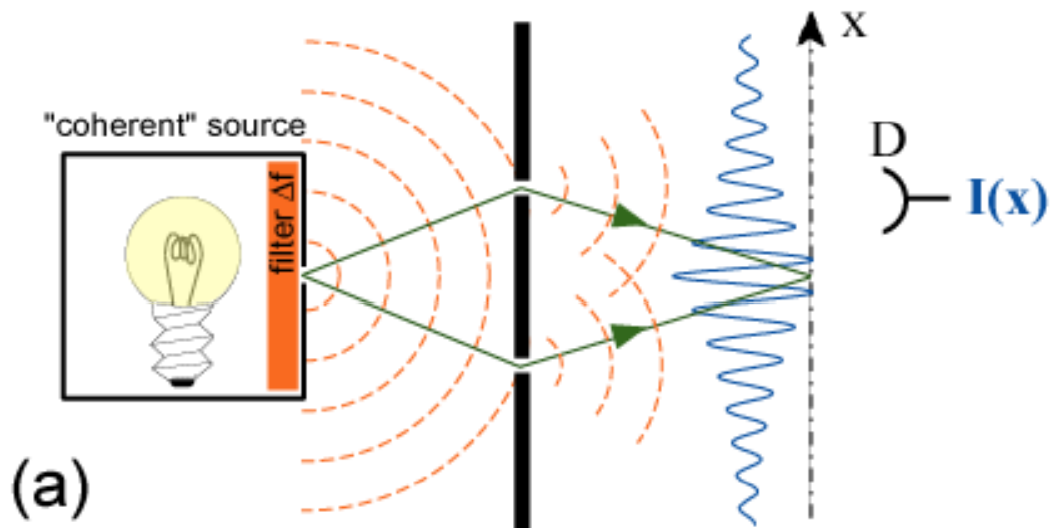
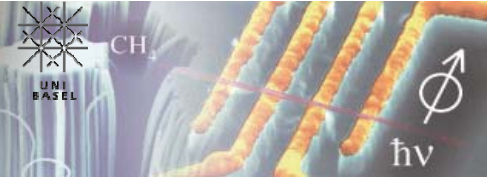


Komplementarität

- Interferenz nur dann, wenn der Weg unbekannt ist
- Weginformation und Interferenz schliessen sich gegenseitig aus

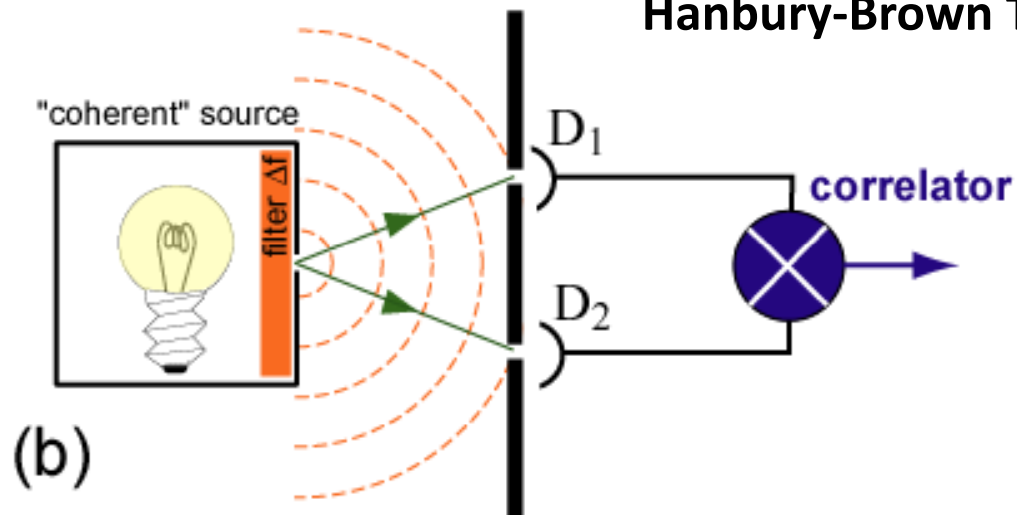
Hanbury-Brown Experiment

Schönenberger group www.nanoelectronics.ch



Young's Doppelspaltexperiment

Hanbury-Brown Twiss Intensitäts-Korrelations-Messung



Messe P_1 und P_2 , Wahrscheinlichkeiten, dass D_1 oder D_2 klicken.

Bestimme zusätzlich die **Koinzidenzwahrscheinlichkeit**, dass bei Detektoren "gleichzeitig" klicken

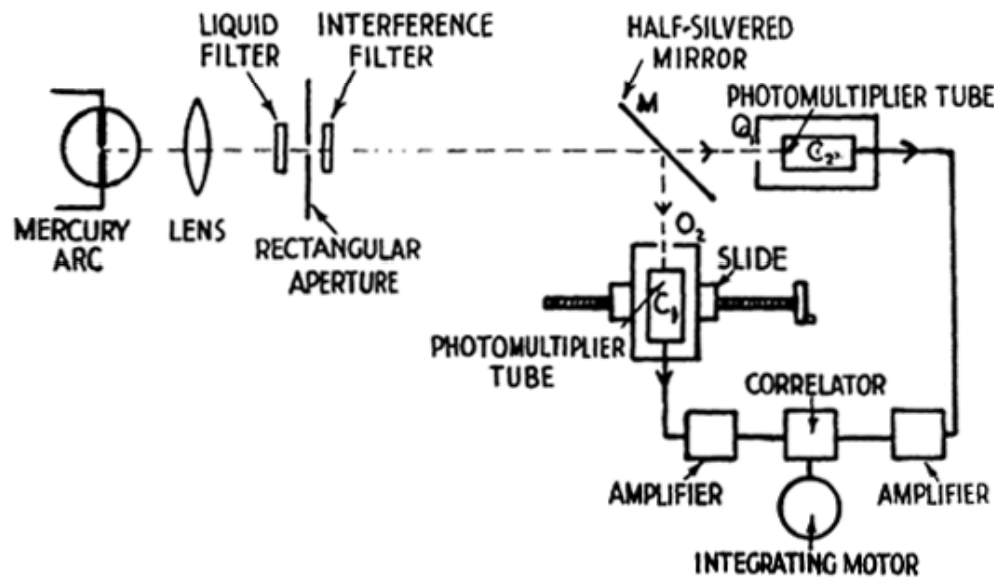
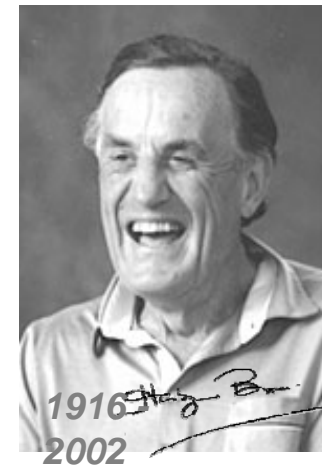
Hanbury-Brown Experiment

Schönenberger group www.nanoelectronics.ch



Radio stars: R. Hanbury Brown and R. Q. Twiss, "A New Type of Interferometer for Use in Radio Astronomy", *Philosophical Magazine* (7) **45** p663 (1954)

Optical: R. Hanbury Brown and R. Q. Twiss, "A Test of a New Type of Stellar Interferometer on Sirius", *Nature* **178** p1046 (1956)



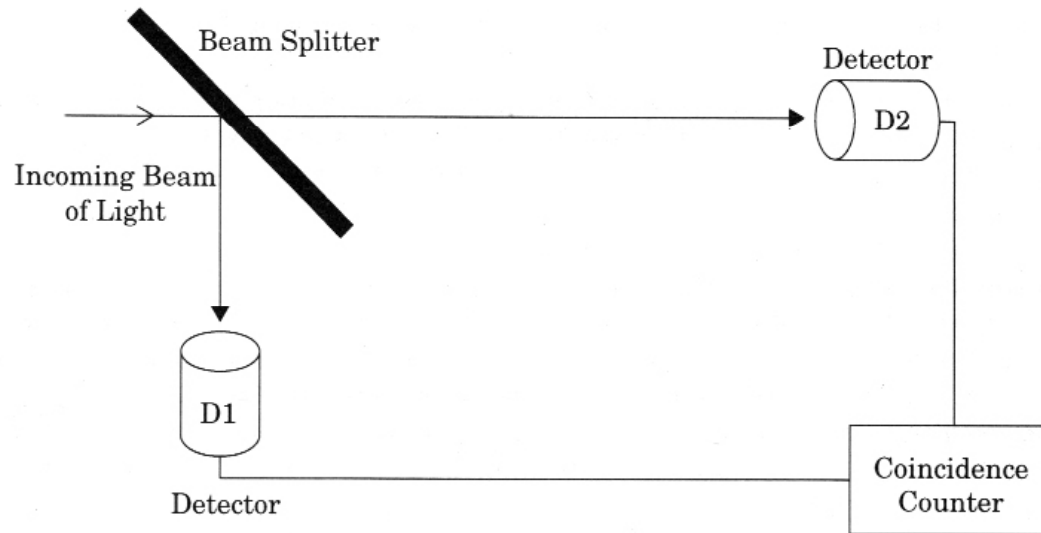
Cathodes superimposed
($d = 0$)

Cathodes separated
($d = 2a = 1.8\text{cm}$)

	Experimental ratio of correlation to r.m.s. deviation $S_e(0)/N_e$	Theoretical ratio of correlation to r.m.s. deviation $S(0)/N$	Experimental ratio of correlation to r.m.s. deviation $S_e(d)/N_e$	Theoretical ratio of correlation to r.m.s. deviation $S(d)/N$
1	+ 7.4	+8.4	-0.4	~ 0
2	+ 6.6	+8.0	+0.5	~ 0
3	+ 7.6	+8.4	+1.7	~ 0
4	+ 4.2	+5.2	-0.3	~ 0

HBT Experiment

Schönenberger group www.nanoelectronics.ch



Korelationsparameter

$$C = \frac{P_c}{P_1 P_2} - 1$$

$$P_i = \frac{\langle N_i \rangle_{\Delta t}}{\langle N \rangle_{\Delta t}} \quad P_c = \frac{\langle N_1 N_2 \rangle_{\Delta t}}{(\langle N \rangle_{\Delta t})^2}$$

$$C = \frac{\langle \Delta N_1 \cdot \Delta N_2 \rangle}{\langle N_1 \rangle \cdot \langle N_2 \rangle} \propto \langle \Delta N^2 \rangle - \langle N \rangle$$

drei Fälle:

$\Delta N=0$, d.h. man hat keine Fluktuation in der Anzahl der ankommenden Teilchen, z.B.

single-photon source. In diesem Fall ist $C < 0$: **sub-Poisson**

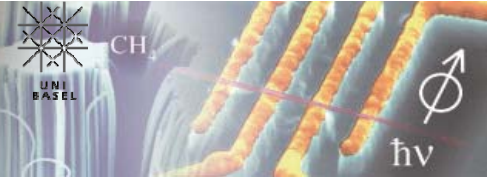
klassische Quelle --> $C=0$. Der **Laser** hat so eine Statistik: **Poisson-Statistik**

thermische Quelle (**Hohlraumstrahlung**) --> HBT die Photonen sind "eher" zusammen:

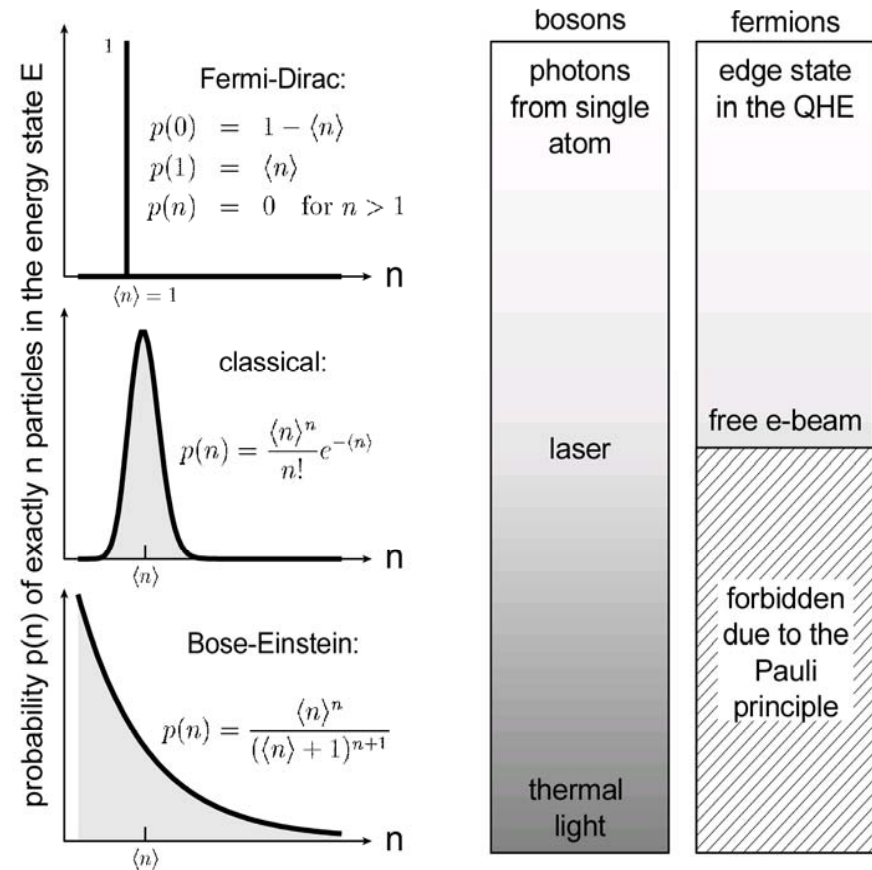
super-Poisson

HBT Experiment

Schönenberger group www.nanoelectronics.ch

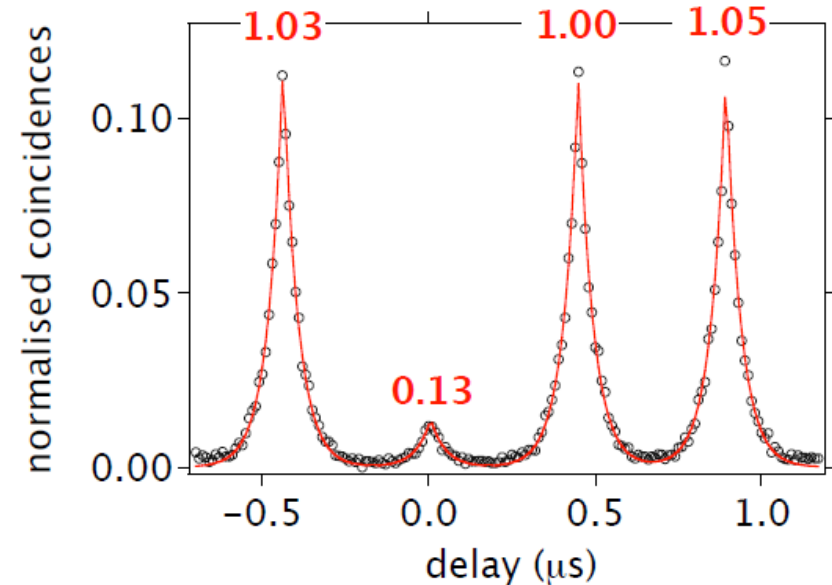
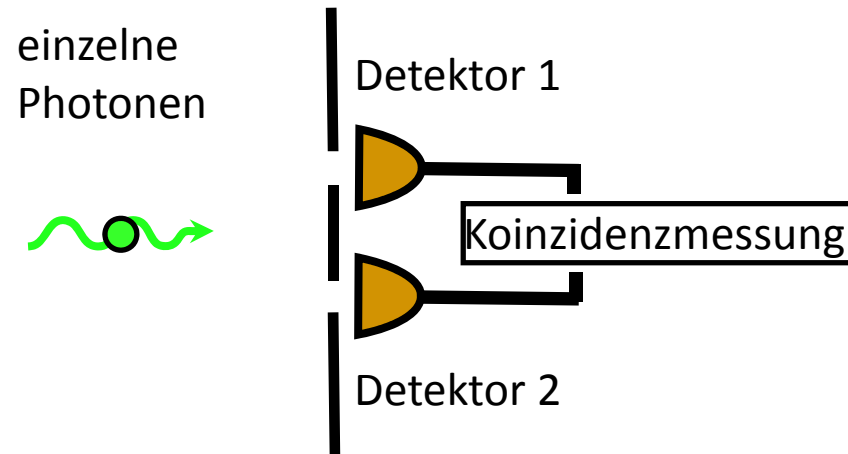
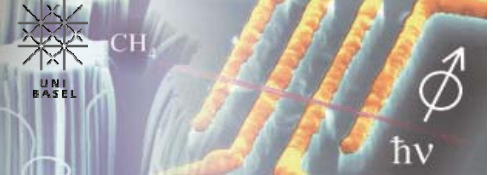


<i>sub-Poissonian</i>	$C < 0$	$\langle \Delta n^2 \rangle < \langle n \rangle$
<i>Poissonian</i>	$C = 0$	$\langle \Delta n^2 \rangle = \langle n \rangle$
<i>super-Poissonian</i>	$C > 0$	$\langle \Delta n^2 \rangle > \langle n \rangle$



Antibunching of Photons

Schönenberger group www.nanoelectronics.ch

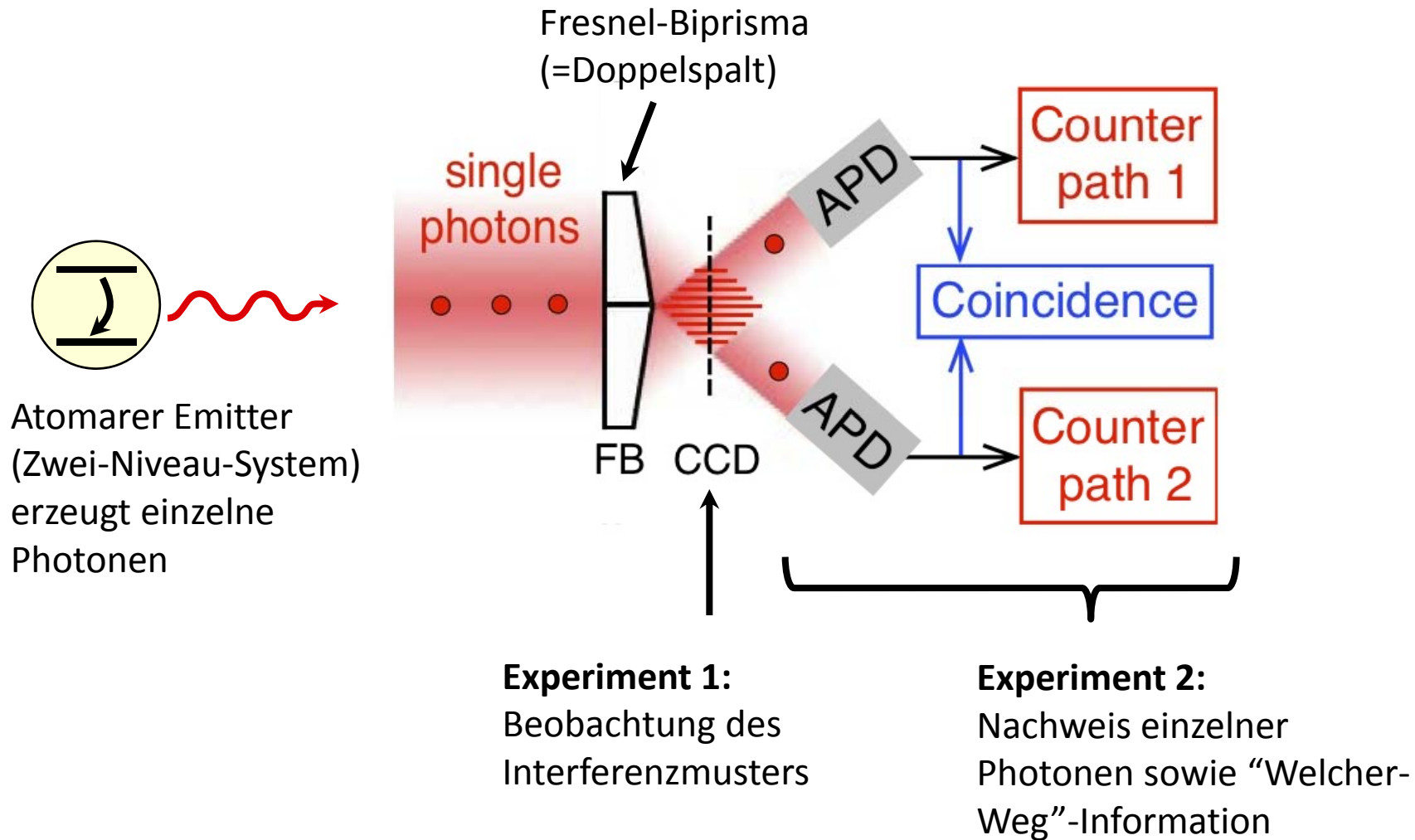
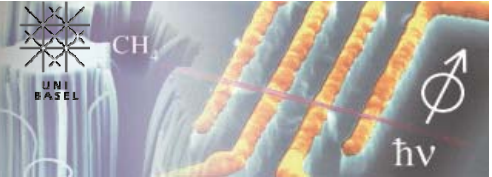


V. Jacques et al., *Eur. Phys. J. D* **35**, 561 (2005).

- es “klickt” immer nur einer der beiden Detektoren
- es befindet sich immer nur ein Photon in der Apparatur
- “Welcher-Weg-Messung”: das Photon wird in einem der Spalte registriert
- Falls die Detektoren entfernt werden, sieht man wieder Interferenz
→ “jedes Photon interferiert mit sich selbst” (Dirac)
- Interferenzmessung und Welcher-Weg-Messung schliessen sich gegenseitig aus!

Antibunching of Photons

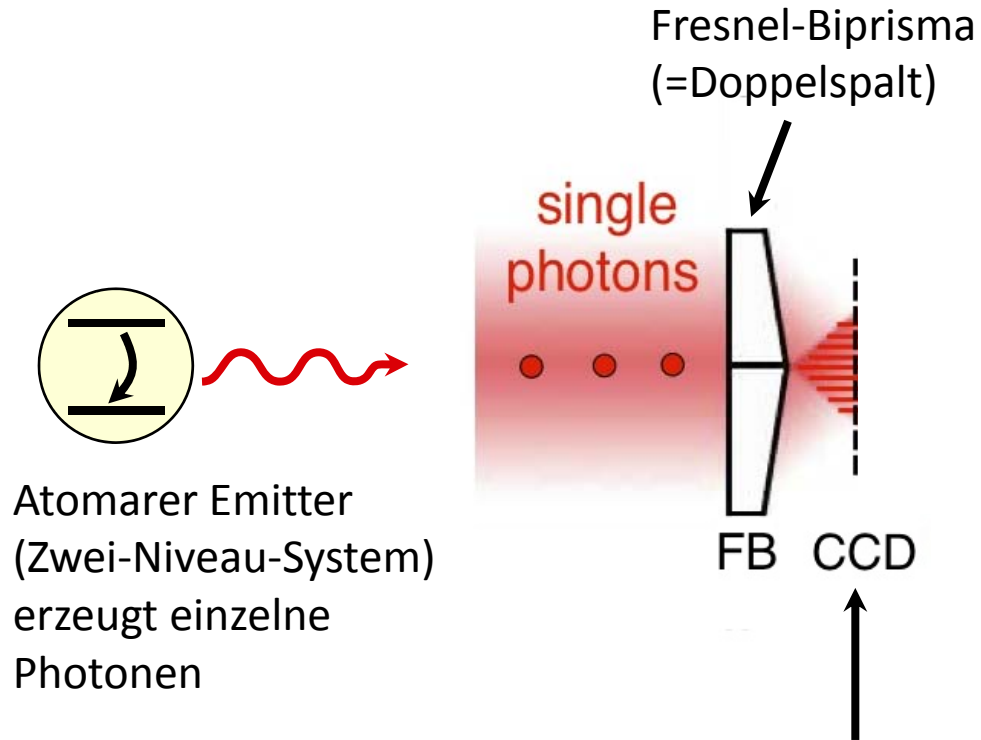
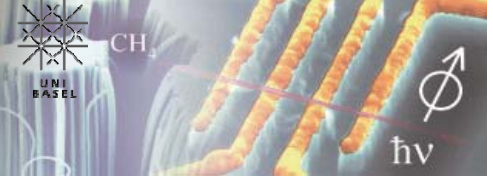
Schönenberger group www.nanoelectronics.ch



V. Jacques et al., Eur. Phys. J. D **35**, 561 (2005).

Antibunching of Photons

Schönenberger group www.nanoelectronics.ch

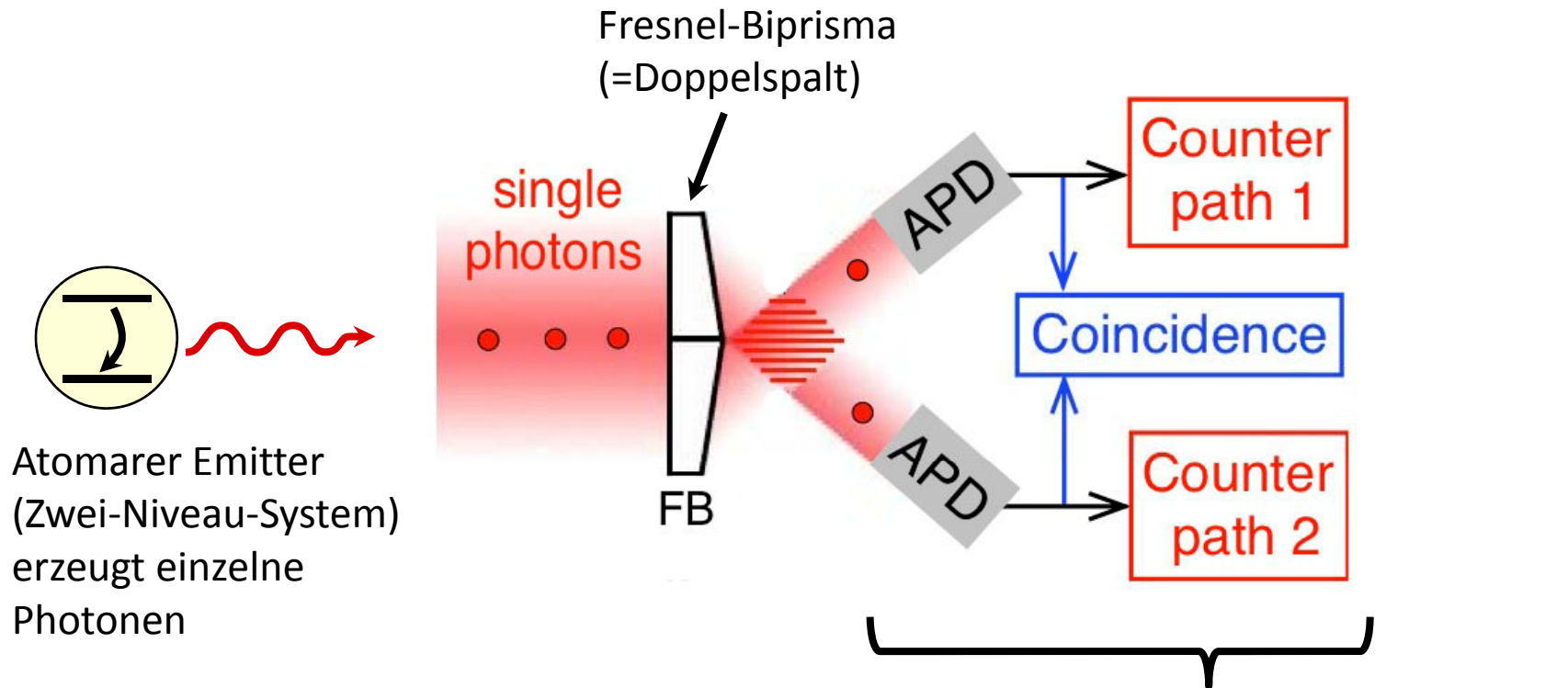
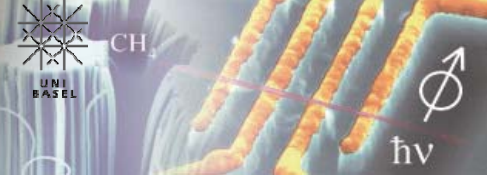


Experiment 1:
Beobachtung des
Interferenzmusters

V. Jacques et al., Eur. Phys. J. D **35**, 561 (2005).

Antibunching of Photons

Schönenberger group www.nanoelectronics.ch

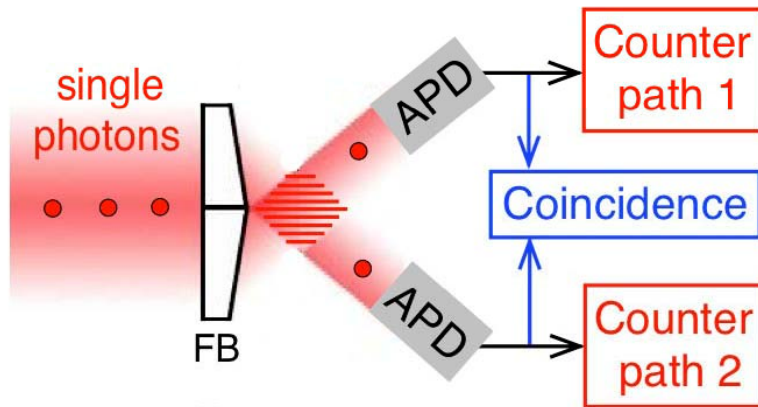
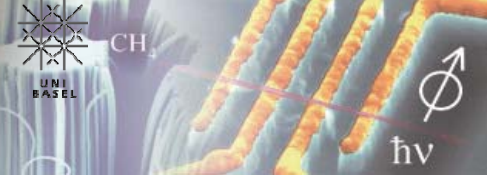


Experiment 2:
Nachweis einzelner
Photonen sowie “Welcher-
Weg”-Information

V. Jacques et al., Eur. Phys. J. D **35**, 561 (2005).

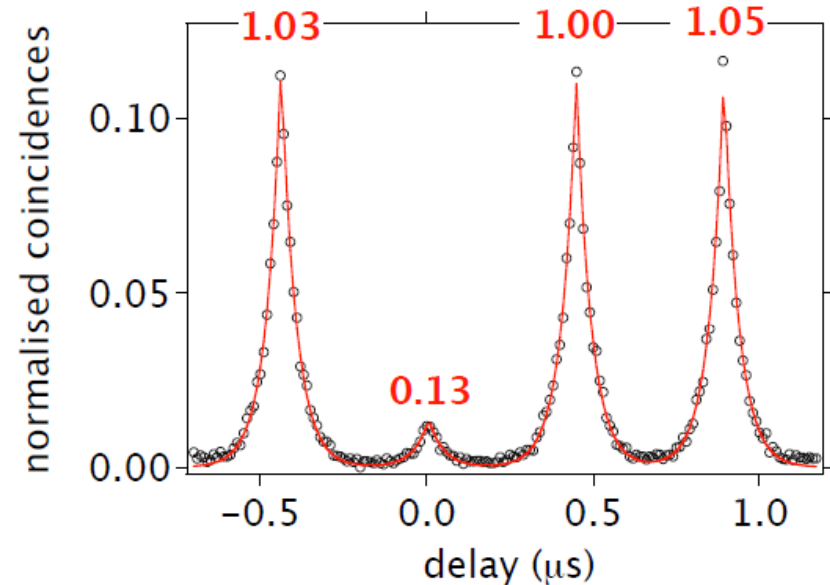
Antibunching of Photons

Schönenberger group www.nanoelectronics.ch



Einzel-Photonen-Detektor:
avalanche photodiode (APD)

V. Jacques et al., *Eur. Phys. J. D* **35**, 561 (2005).



die beiden APDs klicken nicht gleichzeitig
→ jeweils nur ein Photon in der Apparatur
(Nachweis Teilchencharakter)

Komplementarität von Interferenz und Welcher-Weg-Information:

- entweder Beobachtung des Interferenzmusters mit dem CCD
- oder Information darüber, welche APD klickt (welchen Weg das Photon genommen hat)

Die beiden Messungen schliessen sich gegenseitig aus!

Antibunching of Fermions

Schönenberger group www.nanoelectronics.ch

