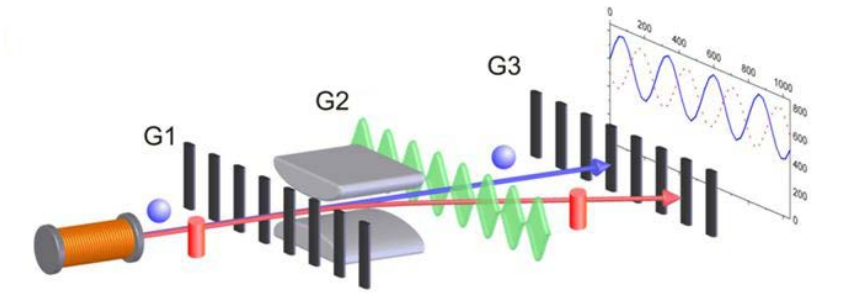
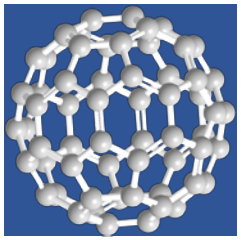
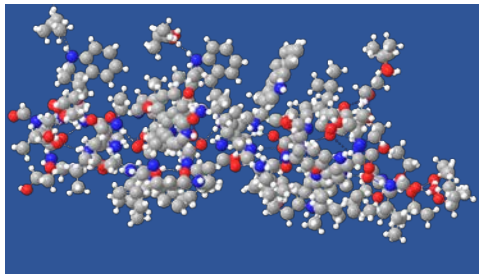
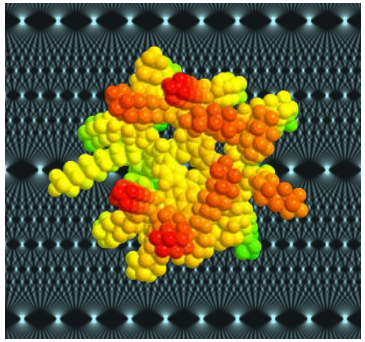
Quantenphysik mit Biomolekülen
Ein einfacher Zugang für die Schule









Markus Arndt

Universität Wien, Quantum Nanophysics Group

www.quantumnano.at

Image credits: wiki commons or University of Vienna, if not otherwise stated

Was ist Quantenphysik ?

Quantenphysik

- **Eine exzellente mathematische Beschreibung der Materie und ihrer Wechselwirkungen – mit Ausnahme der Gravitation**

- **Wortursprung:**
  - **Lateinisch: „quantum?“ = „wie viel ?“**
  - **Alltagssprache: Quantum = eine kleine Menge**

- Ursprünglich angewandt zur Beschreibung der Lichtemission von Atomen.

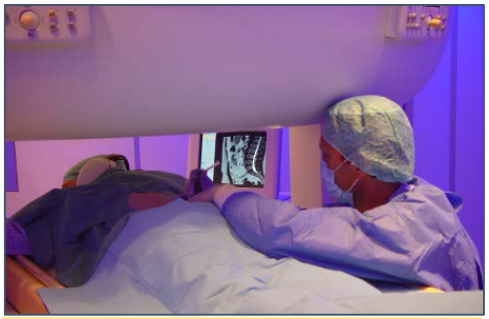
  Dabei werden wohldefinierte Energie-Pakete ausgetauscht:

  Lichtquanten = Photonen

  Klassische Physik = alle Physik vor der Quantenphysik

Warum ist Quantenphysik wichtig?

Wir nutzen Quanteneffekte – oft ohne darüber nachzudenken!



Medizindiagnostik:
Kernspin/Antimaterie

Speichermedien:
Magentismus/Spin

Laser:
Quantenstatistik

Samsung Bildschirme:
Quantenpunkte

Warum überrascht uns die Quantenphysik noch?

Alltagswelt	Quantenphysik
Objekte in definierten Zuständen	Quantensuperpositionen auch für individuelle Teilchen?
Unterscheidbarkeit	Ununterscheidbarkeit
Subjektiver Zufall	Objektiver Zufall?
Lokale Wechselwirkungen	Nicht-lokale Information ? (Aber nicht schneller als das Licht)
Realität	Potentialität ?

Sir Anthony Leggett (cited in New Scientsts 2010):

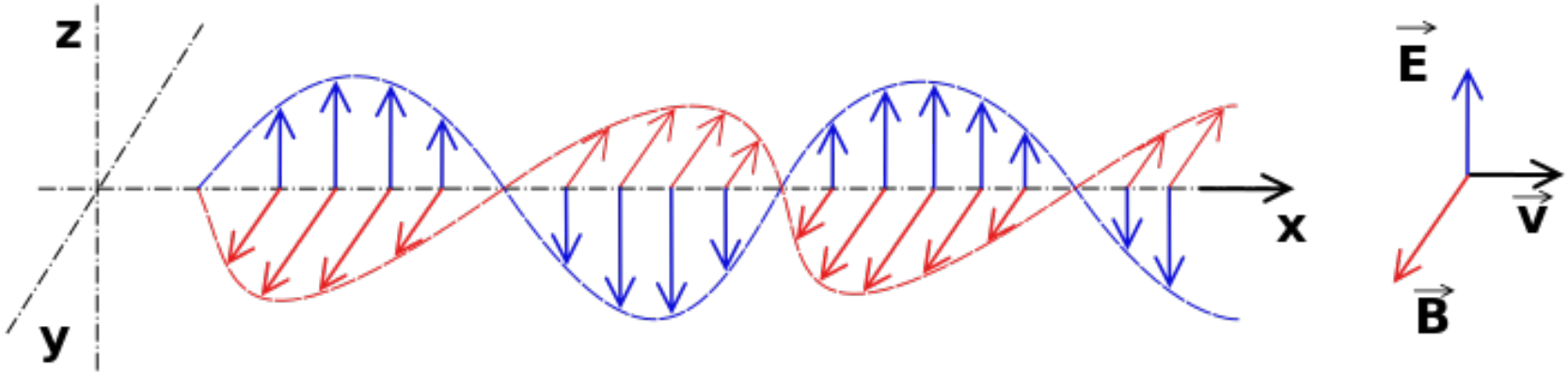
" I'm inclined to put my money on the idea that if you push quantum mechanics hard enough it will break down and something else will take over - something we can't envisage at the moment" .

1. Kann ein Quant zur gleichen Zeit an verschiedenen Orten sein?

Welche Technologien entstehen daraus?

Physik des 19. Jahrhunderts:
Licht ist eine elektromagnetische Welle

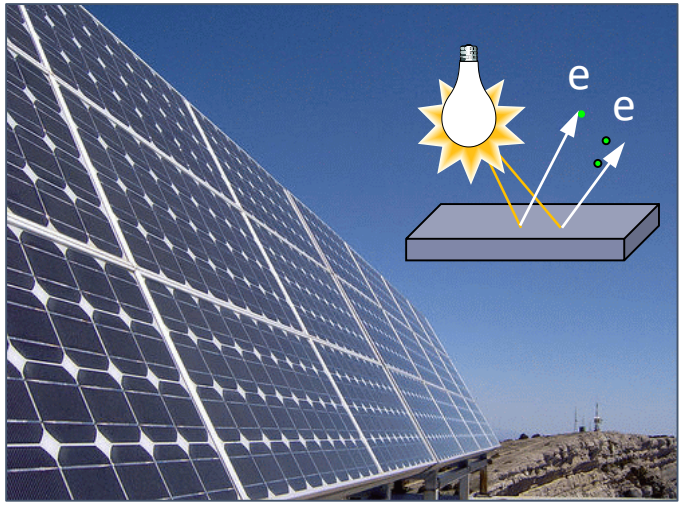
- **Thomas Young 1807:**
  Licht zeigt Beugung und Interferenz, wie alle Wellen der Physik
- **James Clark Maxwell 1864:**
  Licht hat die Geschwindigkeit elektromagnetischer Wellen.
- **Licht hat Polarisation, wie eine transversale Welle**
- **Grundlage der**
  - **Mobilfunktechnik**
  - **Lichtinterferometrie**



Die Teilchennatur des Lichts:
Licht überträgt Energie und Impuls wie ein Teilchen

Energiegewinnung: Fotovoltaik

Einstein 1921

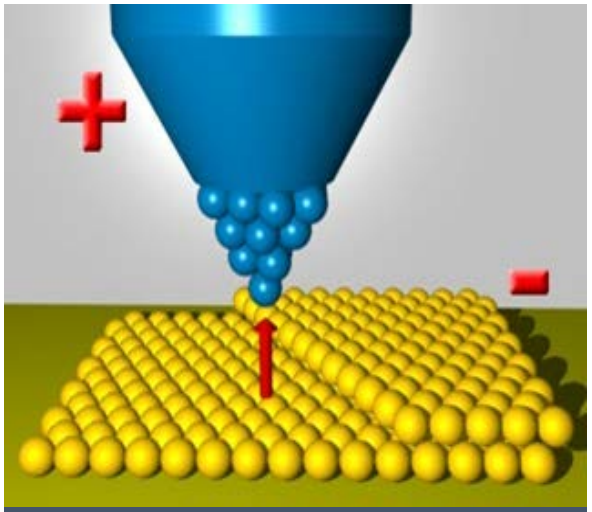


Informationstechnik: CCD Kamera

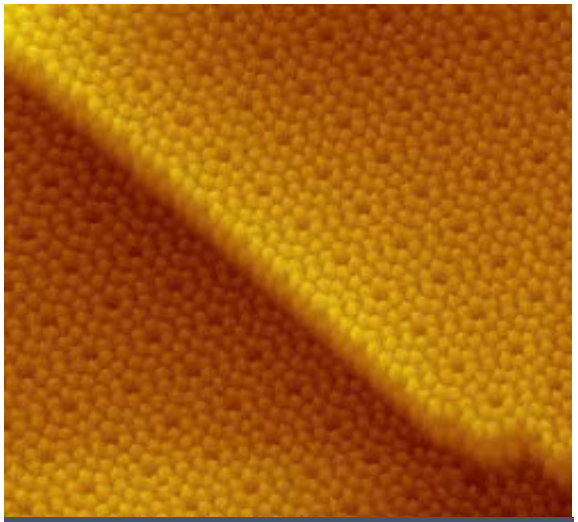
Boyle 2009

Atome und Moleküle kann man als Teilchen sichtbar machen

Binnig
& Rohrer
1986

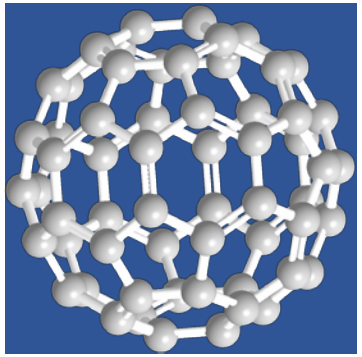


Idee der Raster-Tunnelmikroskopie (STM)

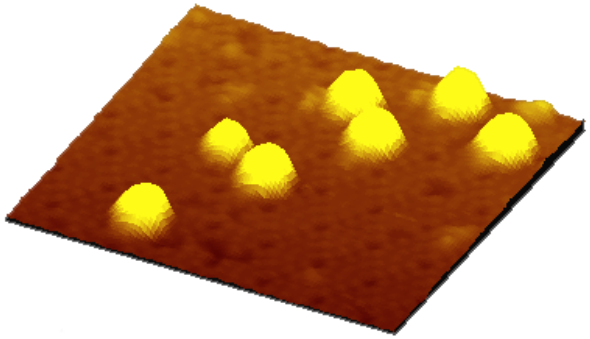


Atomar aufgelöstes STM-Bild einer Silizium-Oberfläche

STM Bild
QNP
Vienna Lab



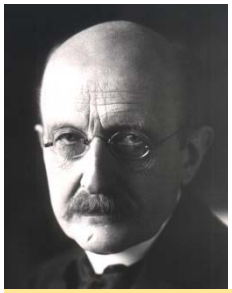
Modell eines C_{60} Moleküls



STM Bild einzelner C_{60} Moleküle auf Silizium

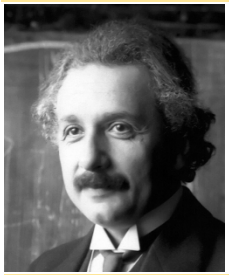
STM Bild
QNP
Vienna Lab

7. Materiewellen in der Quantenphysik
Überlagerung von Positionen im Raum



Quantenbeziehung: $\boldsymbol{E = h\,\nu}$

Max Planck, 1900



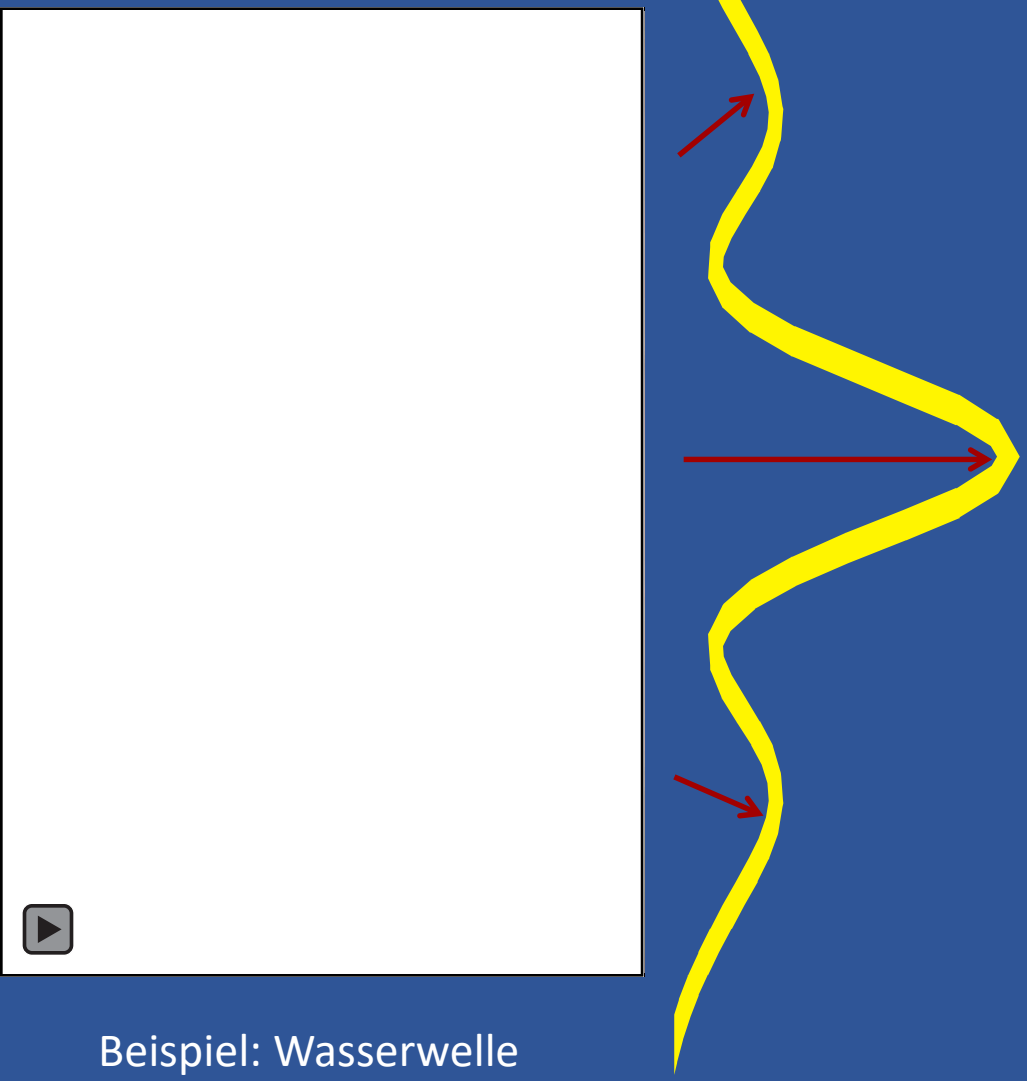
Relativitätstheorie: $\boldsymbol{E = m\,c^2}$

Albert Einstein, 1905

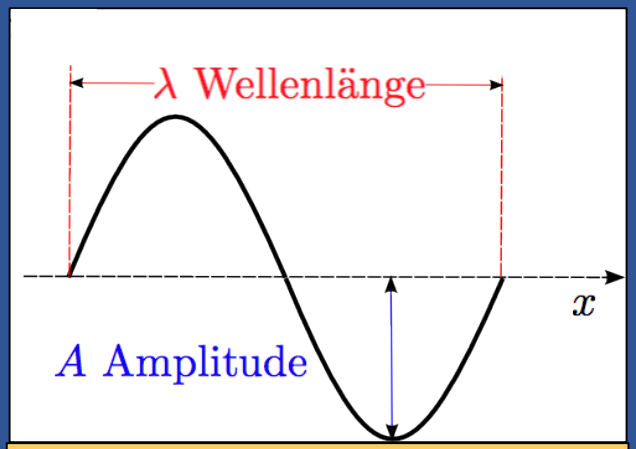
→ Materiewellen: $\boldsymbol{\lambda = h/mv}$

Louis de Broglie, 1923

Eine Signatur der Wellenphysik:
Beugung & Interferenz

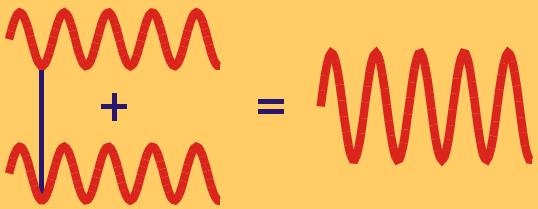


Beispiel: Wasserwelle



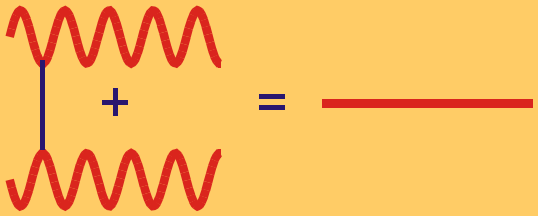
Maximum auf Maximum

→ Verstärkung

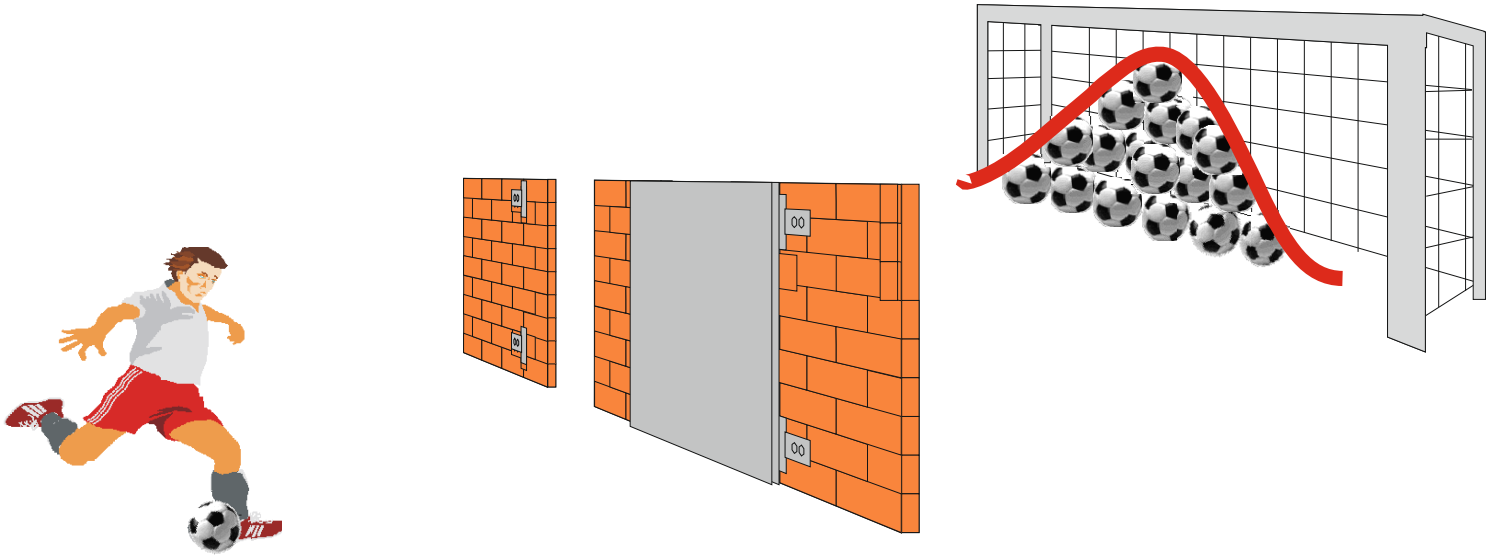


Maximum auf Minimum

→ Auslöschung



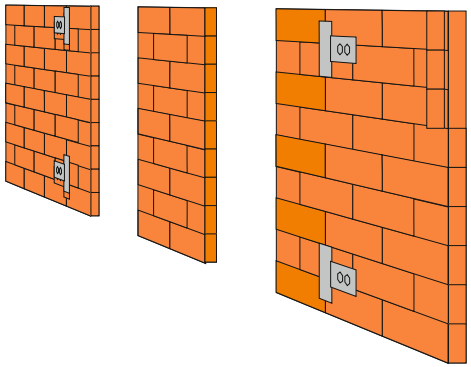
Quanten können wie Wellen an verschiedenen Orten zugleich sein: Ein Gedankenexperiment am Doppelspalt

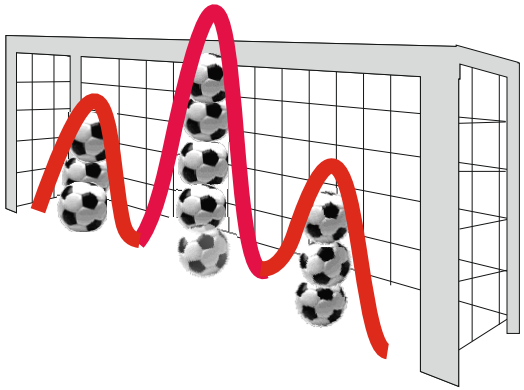


Ein Spalt offen: Eine Verteilung von Bällen im Tor

Quantenfußbälle
können an verschiedenen Orten zugleich sein !

Warum werden **nun** bestimmte Positionen im Tor nicht mehr getroffen?



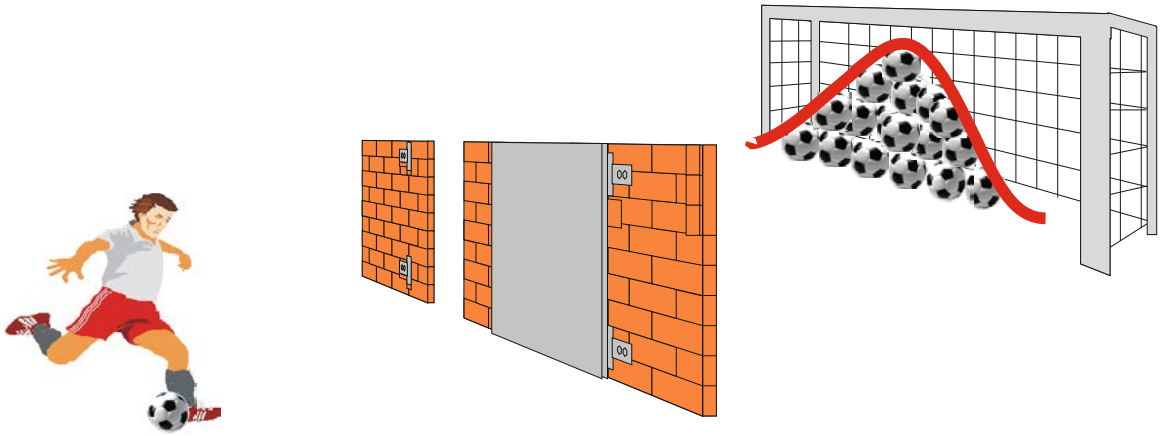


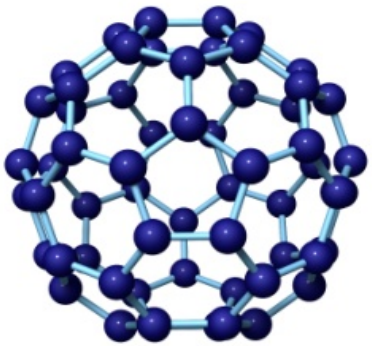
$$\lambda_{\mathrm{dB}} = \frac{h}{m \cdot \mathrm{v}}$$

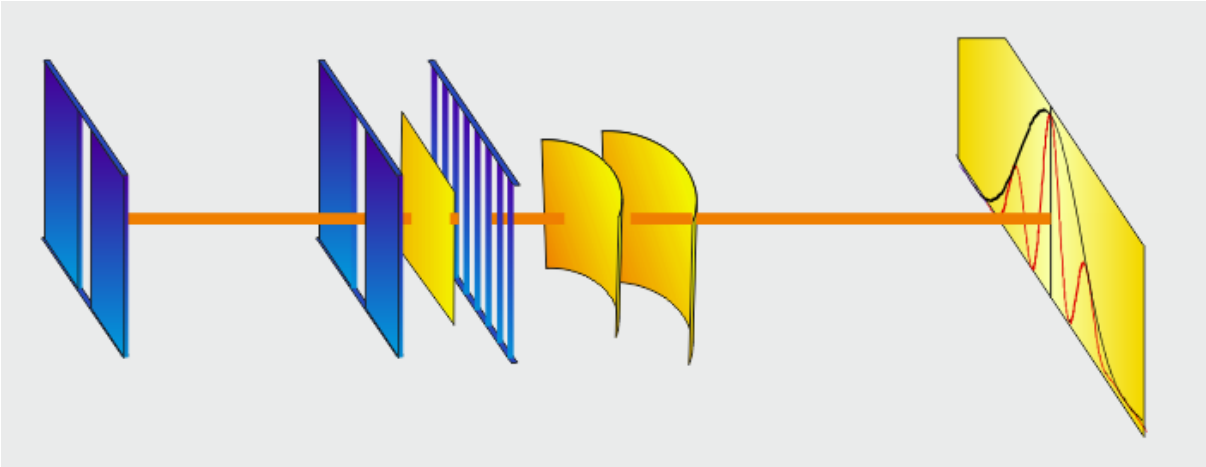
Die philosophische Frage:
Wie kann es sein, dass ein Ball wie ein Teilchen detektiert wird, aber **nicht-lokale** Information über entfernte Raumbereiche hat?

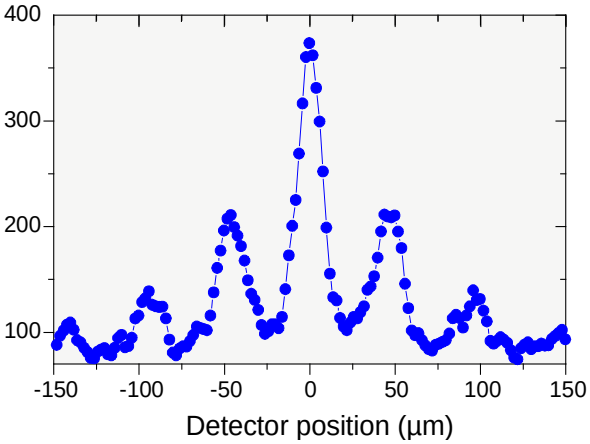
Die Wellennatur des kleinsten Fußballs der Welt

Das Kohlenstoffmolekül C_{60}





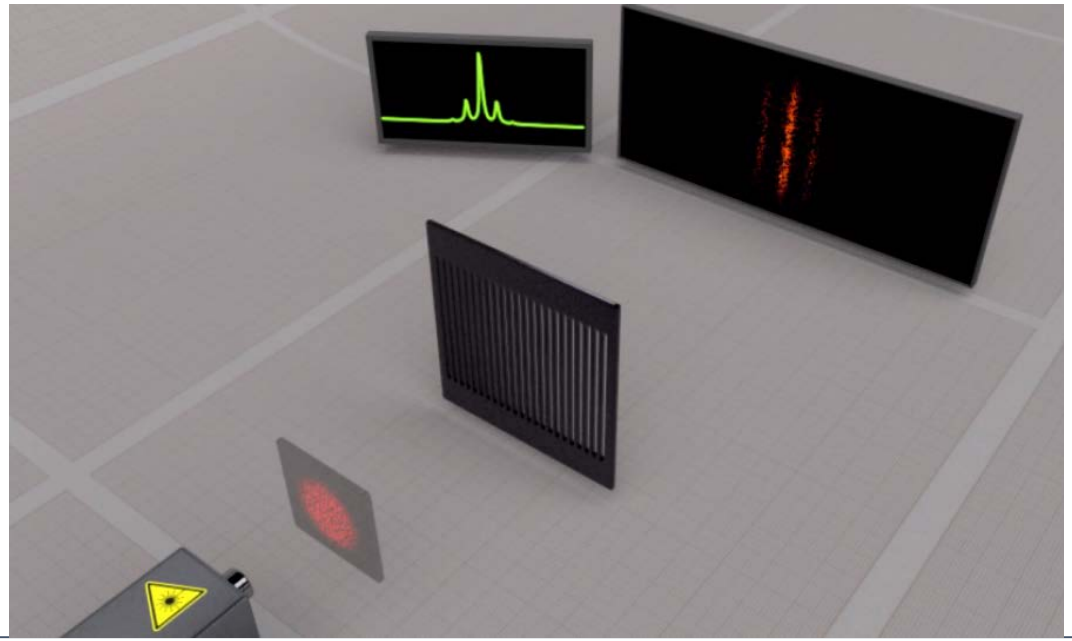


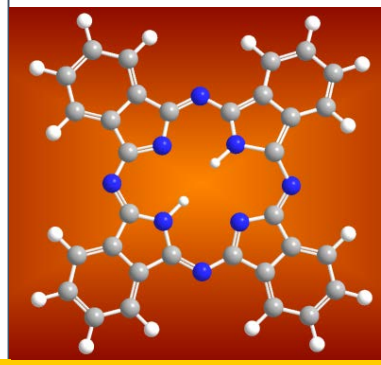


M. Arndt, O. Nairz, J. Voss−Andreae, C. Keller, G. van der Zouw, A. Zeilinger, ***Wave−particle duality of C60 molecules*, Nature 401, 680−682 (1999).**

O. Nairz, M. Arndt, & A. Zeilinger, *Am. J. Phys.* **71**, 319-325 (2003).

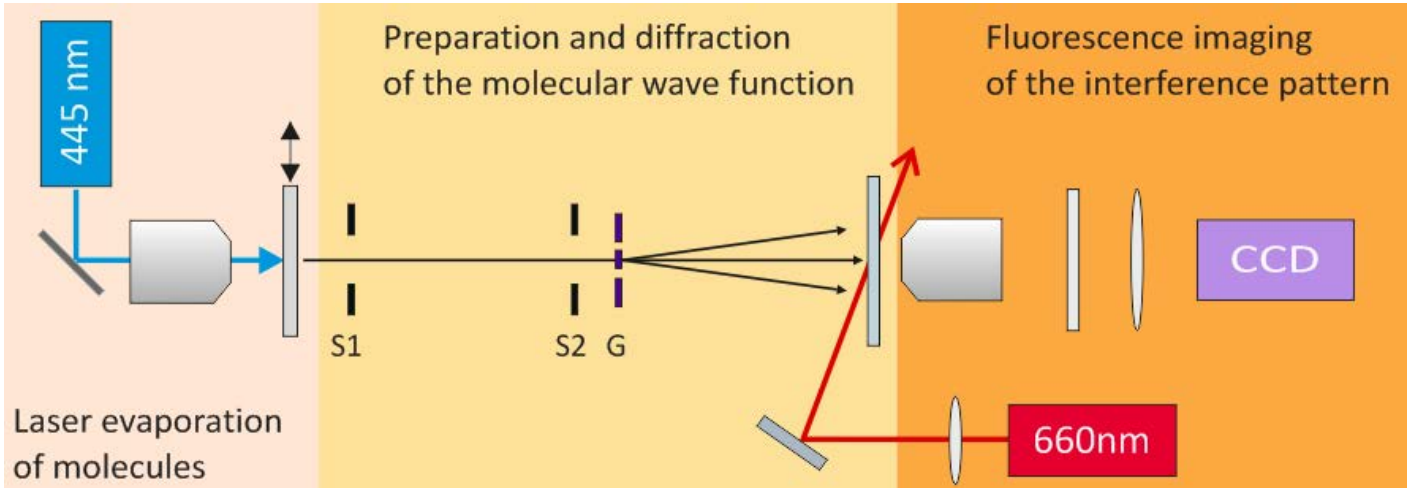
Wie kann man Molekülinterferenz visuell sichtbar machen

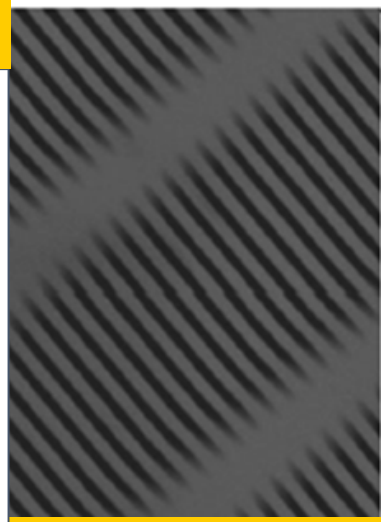




Phthalocyanin

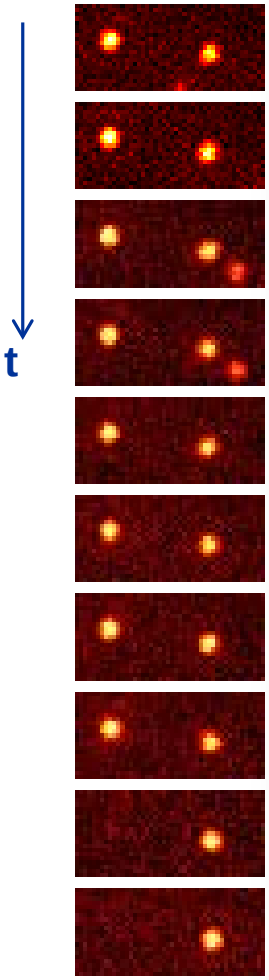
$m = 514\ \mathrm{amu}$
$v = 100\ \mathrm{m/s}$
$\lambda_{dB} = 5\ \mathrm{pm}$

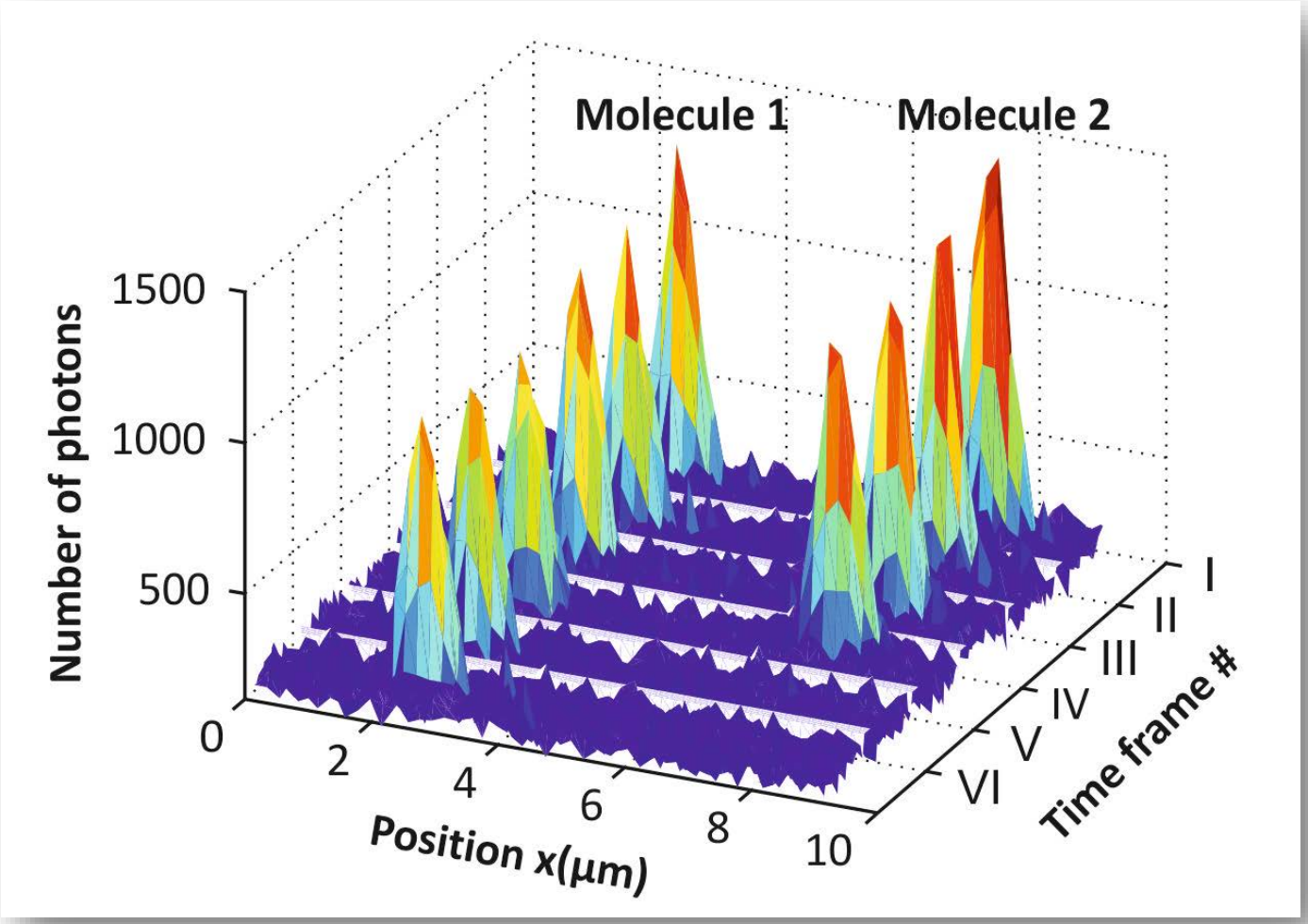




Nanogitter, SiN
d=100 nm,
s=50 nm, t=10 nm

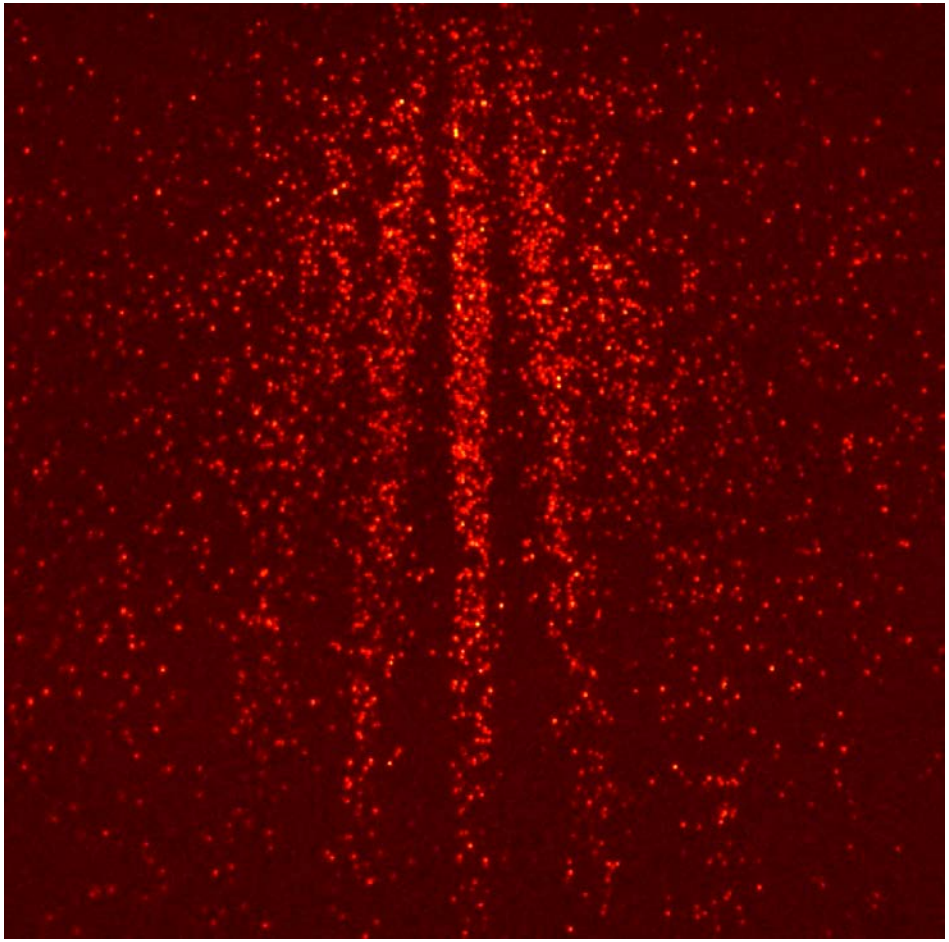
Fluoreszenzmikroskopie erlaubt die Detektion einzelner Moleküle mit 10 nm Ortsgenauigkeit





NA=0.9	$\lambda_{exc} = 661$ nm	Time / frame=24 sec	
P=50 mW	I=280 W/cm²	N ~ 10^5 phot/molec.	SNR ~ 20

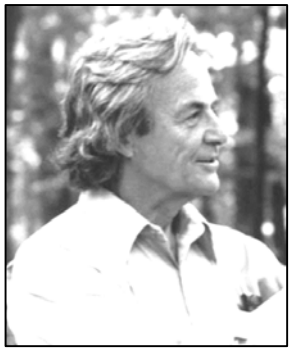
Welle & Teilchen
Delokalisierte Ausbreitung & lokalisierter Nachweis
Determinismus & Objektiver Zufall



T. Juffmann, A. Milic, M. Müllneritsch, P. Asenbaum, A. Tsukernik, J. Tüxen, M. Mayor, O. Cheshnovsky, M. Arndt, *Real-time single-molecule imaging of quantum interference* Nature Nanotechnology 7, 297 - 300 (2012).

Was sagen die Gründerväter der Quantenphysik?

- **Erwin Schrödinger 1952**
  "We never experiment with just one electron or atom or (small) molecule.
  In thought experiments, we sometimes assume that we do; this invariably entails ridiculous consequences…"



- **Richard Feynman 1963**
  "We choose to examine a phenomenon which is impossible, absolutely impossible, to explain in any classical way, and which has in it the heart of quantum mechanics. In reality, it contains the only mystery."

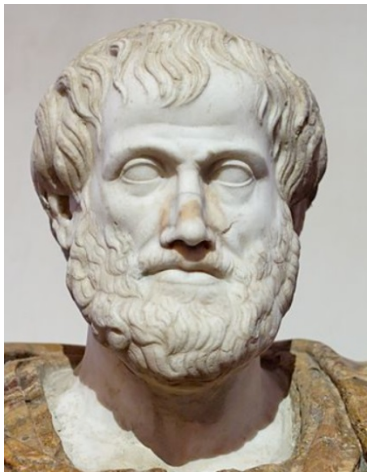
Wir haben Beweise für die Delokalisierung der Materie. Wie passt das zu Aristoteles ‚Satz des Widerspruchs' ?

„Dasselbe kann demselben unter demselben Gesichtspunkt nicht zugleich zukommen und nicht zukommen."

„Es ist unmöglich, dass sich widersprechende Aussagen zugleich wahr sind."

Aristoteles, Metaphysik, IV, 3-6,8 (384 -322 v. Chr.)

Aristoteles



http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Aristotle_Altemps_Inv8575.jpg

1. Was bedeutet ein Materiewellenexperiment für unser Verständnis von Raum, Zeit oder Realität ?

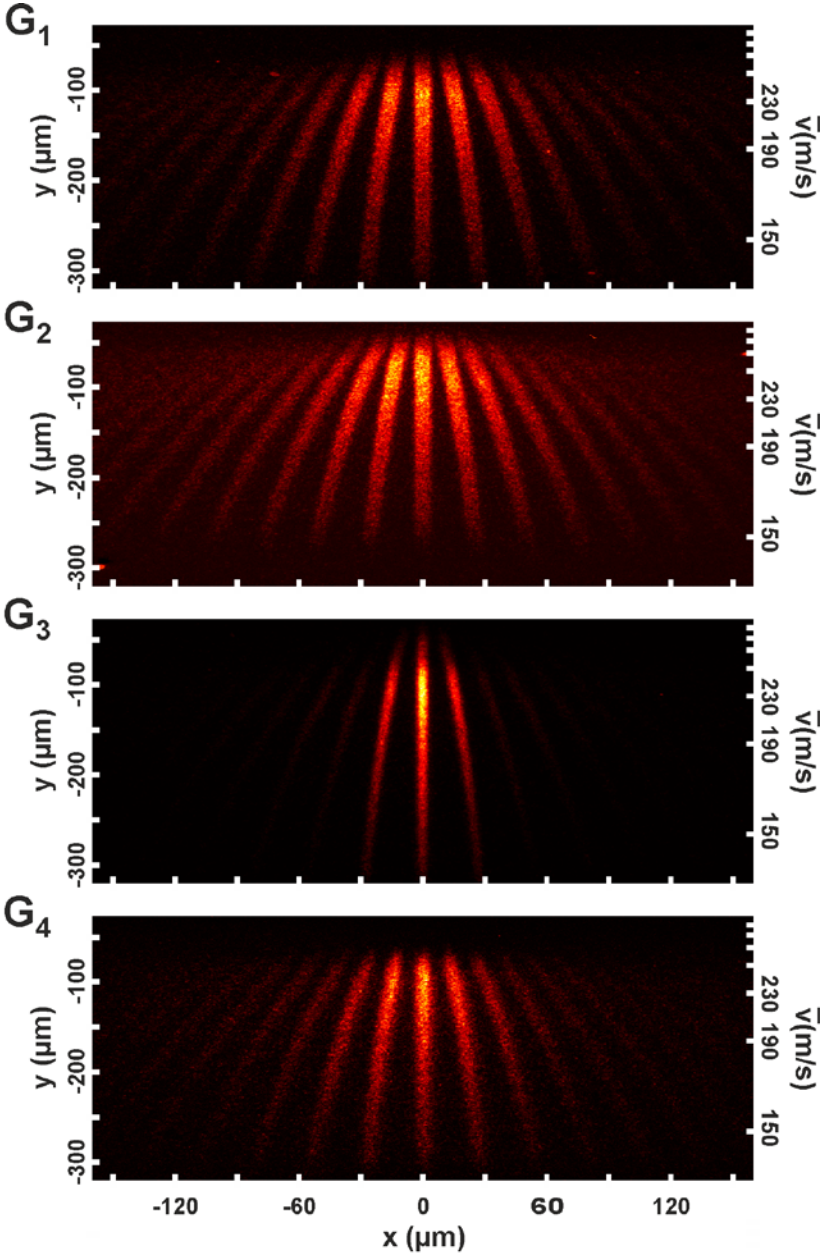
2. Kann es sein, dass die Quantenregeln nur im Mirkokosmos gelten?

Kann man Nanogitter für alle Teilchen verwenden ?

Die elektrischen Eigenschaften spielen eine Rolle: van der Waals Potenziale!!

SiN	Gitter Dicke	Öffnungs-Verhältnis
G1	10 nm	0.5
G2	46 nm	0.45
G3	10 nm	0.75
G4	87 nm	0.65

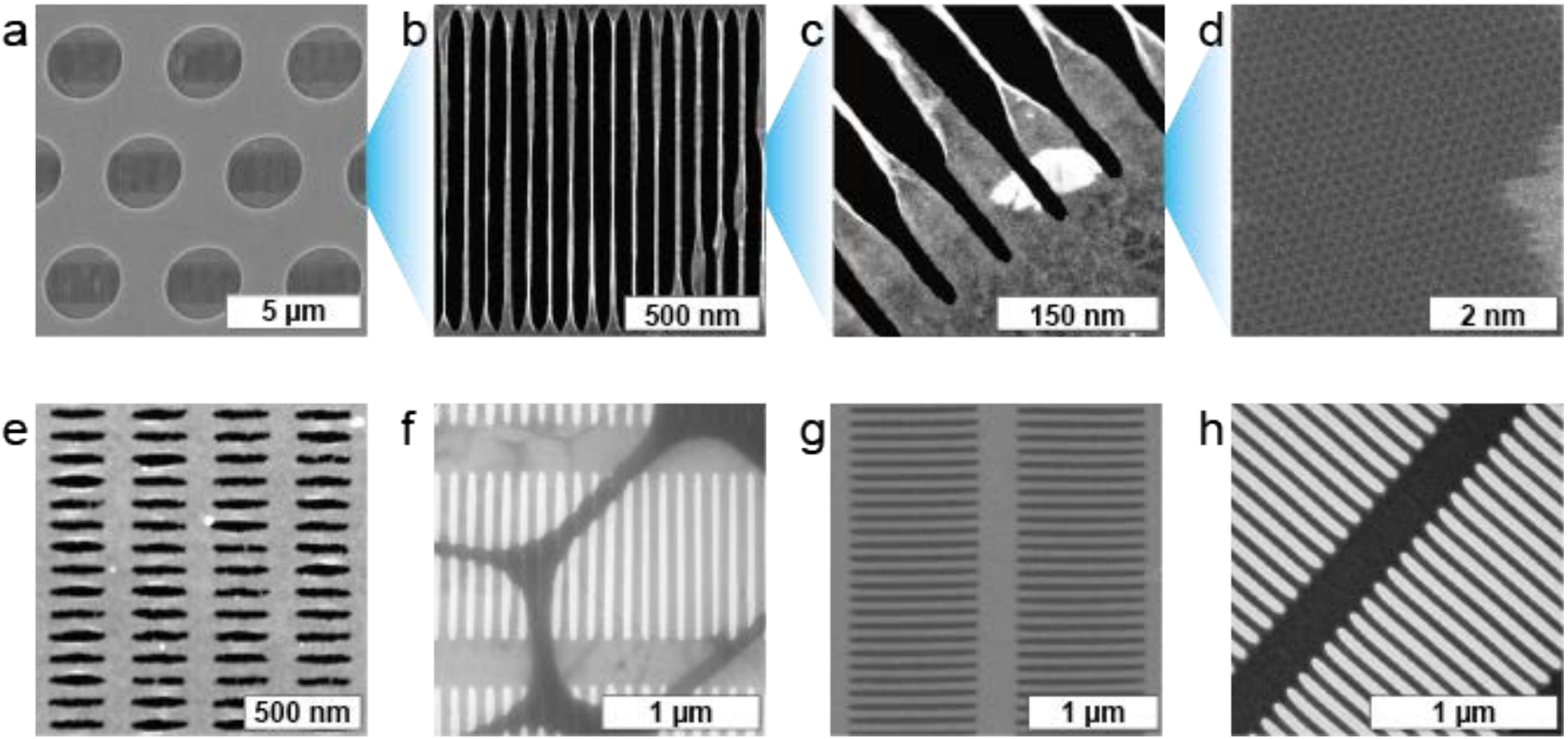
- Die Ladung der Moleküle fluktuiert auf der fs-Zeitskala
- Spontane Dipolmomente erzeugen Spiegeldipole in den Gitterwänden
- Die Dipole ziehen sich an: van der Waals Potenzial!
- Das verändert das Muster, aber reduziert nicht den Interferenzkontrast.



Wie dünn kann ein Beugungsgitter sein?
Single-Layer Graphene!

Carbon nanoscrolls
Aus Graphene Bändern gewachsen

Single layer
graphene



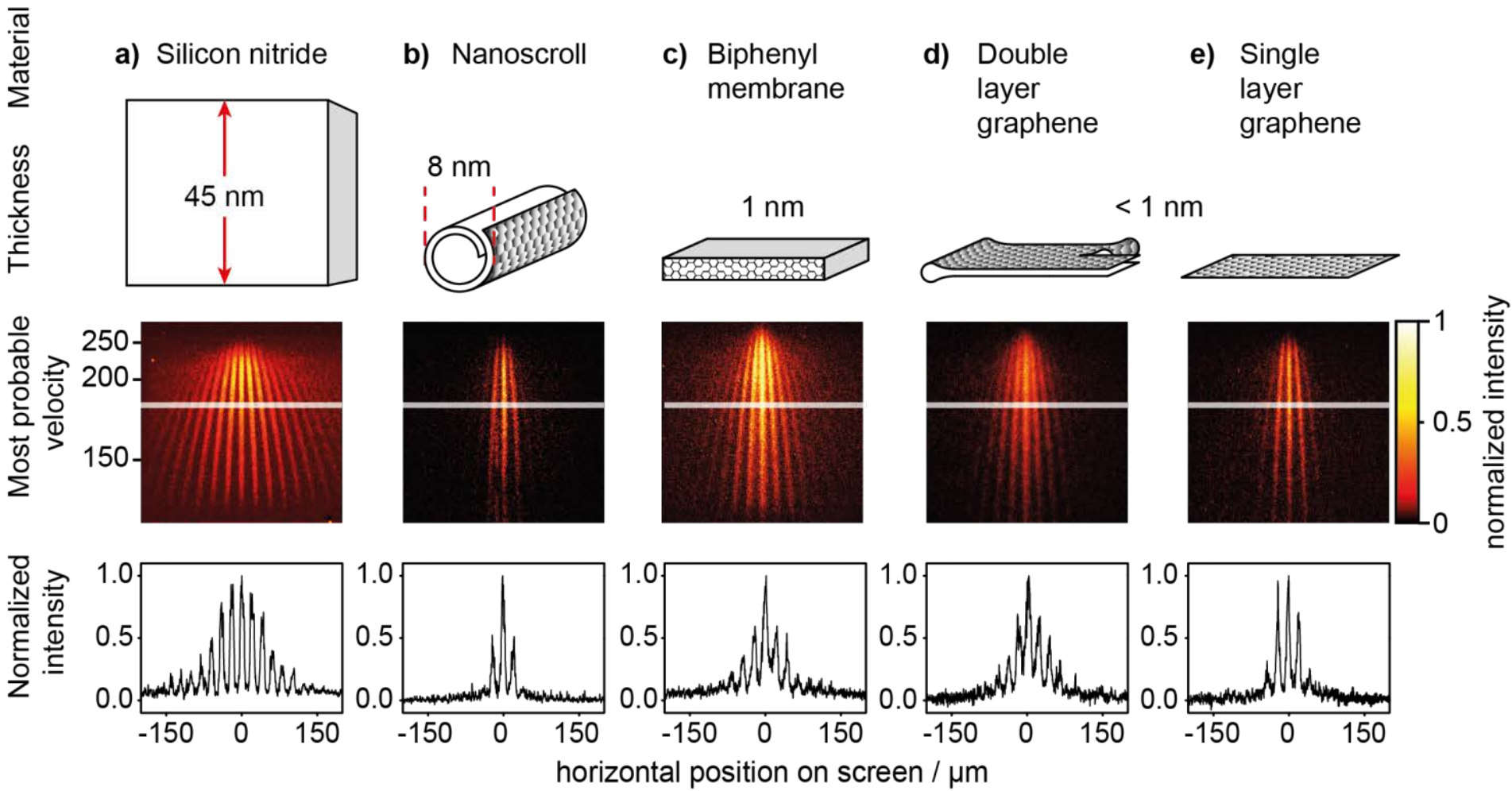
Single layer
graphene

double layer

SL biphenyl
molecules

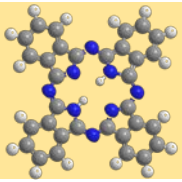
SiN 10 nm

Beugung an monatomarem Graphen und molekularen Gittern

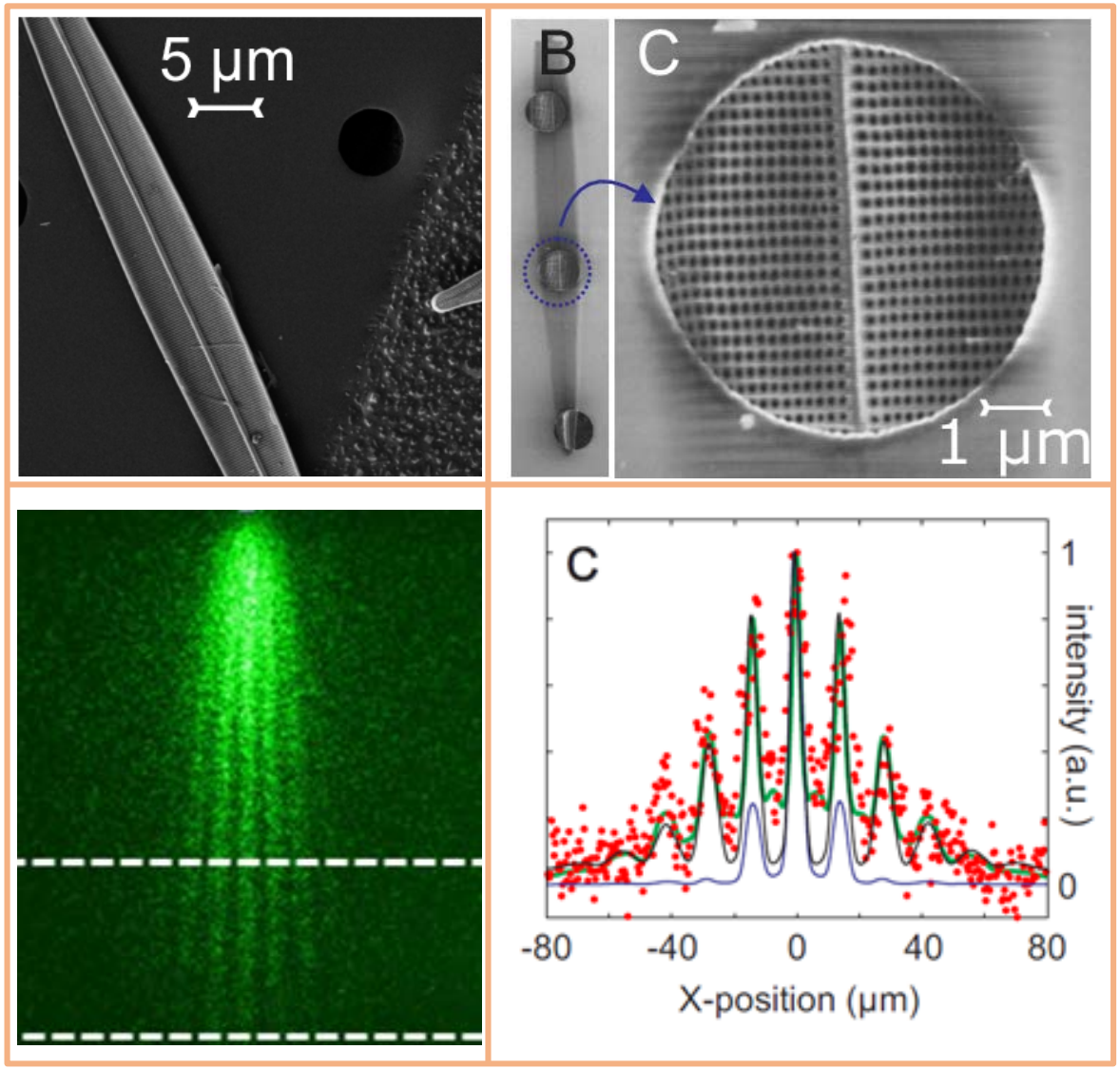


Brand, C. *et al. An atomically thin matter-wave beamsplitter*. ***Nature Nanotechnology 10, 845-848 (2015).***

Quanteninterferenz von Molekülen am Skelett der Meeresalge *‚Amphipleura Pellucida'*



M. Sclafani, T. Juffmann, C. Knobloch, M.Arndt., New J. Physics 15, 083004 (2013)

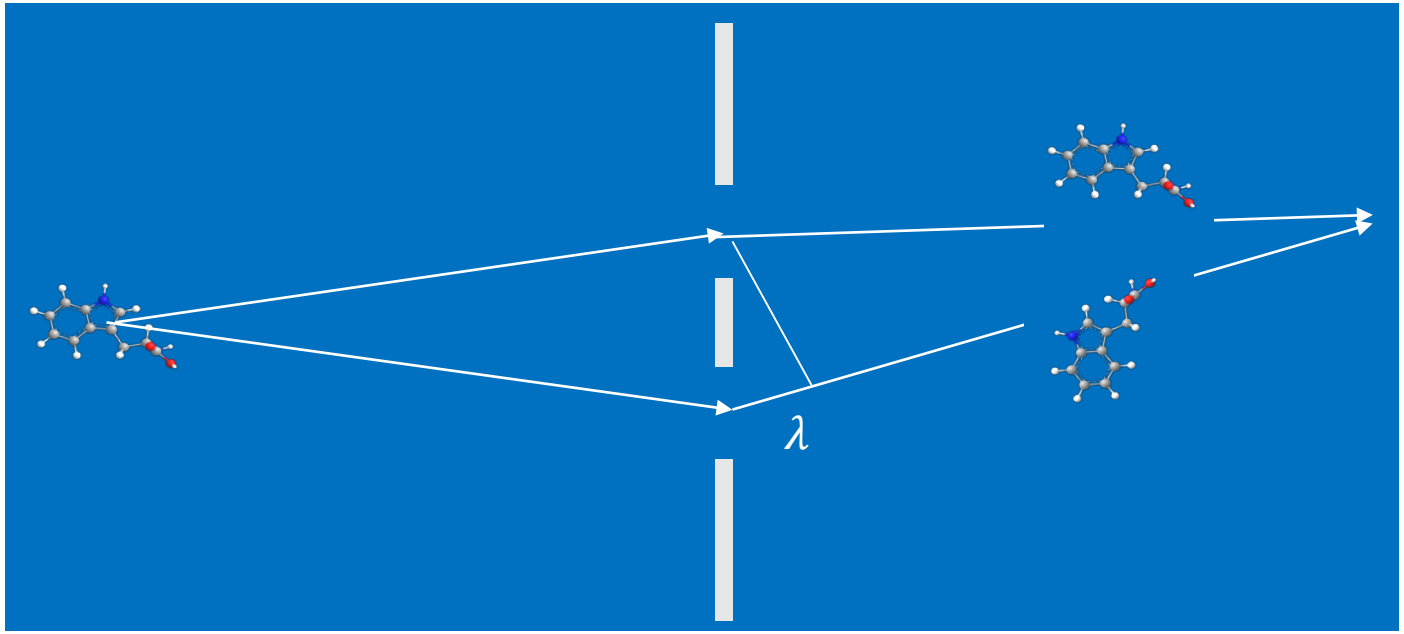


Das billigste Beugungsgitter kommt aus der Natur.

Leistbar in Schulen !

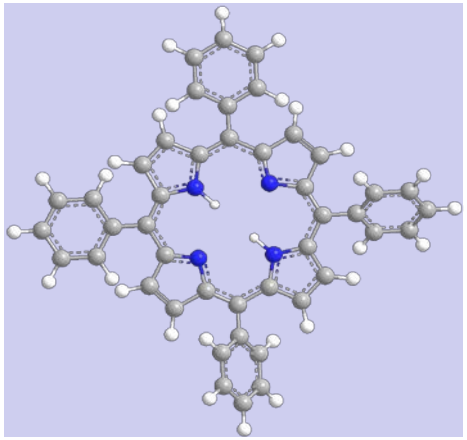
Kann eine interne Uhren den Interferenzkontrast zerstören ?

- **Ist ein rotierendes Molekül eine „Uhr mit Zeiger“**
- Kann es passieren, dass die **de Broglie Phasen konstruktiv** zusammenlaufen, aber die **innere Uhr** entlang der beiden Pfade eine andere „Zeit“ zeigt **(destruktiv)?**
- Kann das die Interferenz der Gesamtwellenfunktion zerstören?

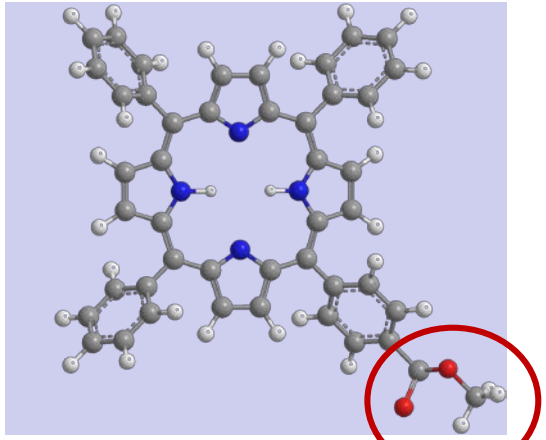


M. Arndt, O. Nairz, A. Zeilinger,
Interferometry with macromolecules: Quantum paradigms in the mesoscopic world
in: ***Quantum (Un)speakables*** R. Bertlmann and A. Zeilinger, Springer **(2001).**

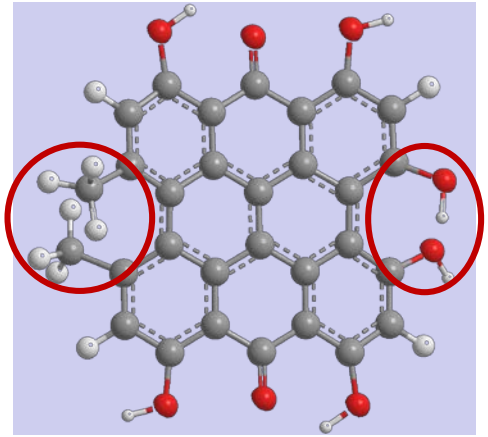
Bobachtung: Ein elektrisches Dipolmoment
dephasisert tatsächlich das Quanteninterferogramm ….



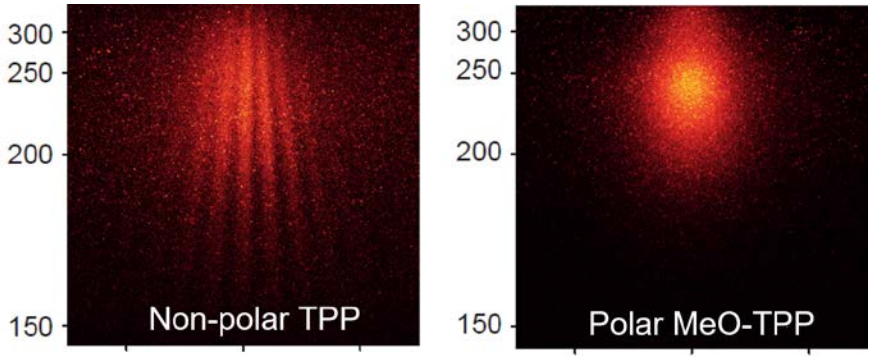
TPP (non-polar)



MeO-TPP (polar)



Hypericine (polar)

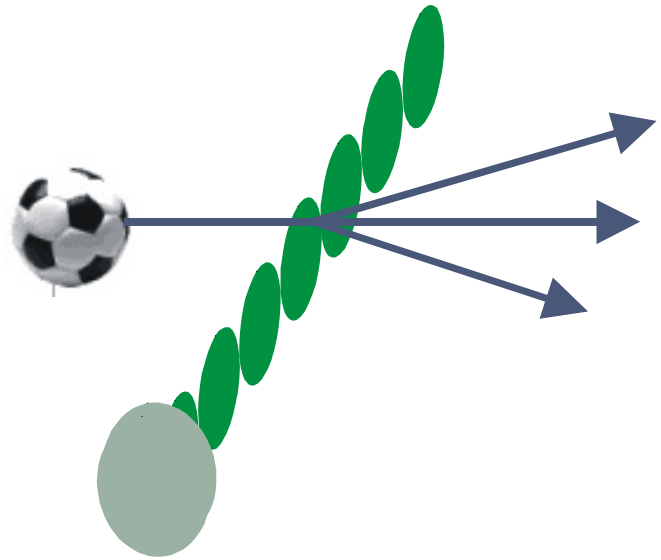


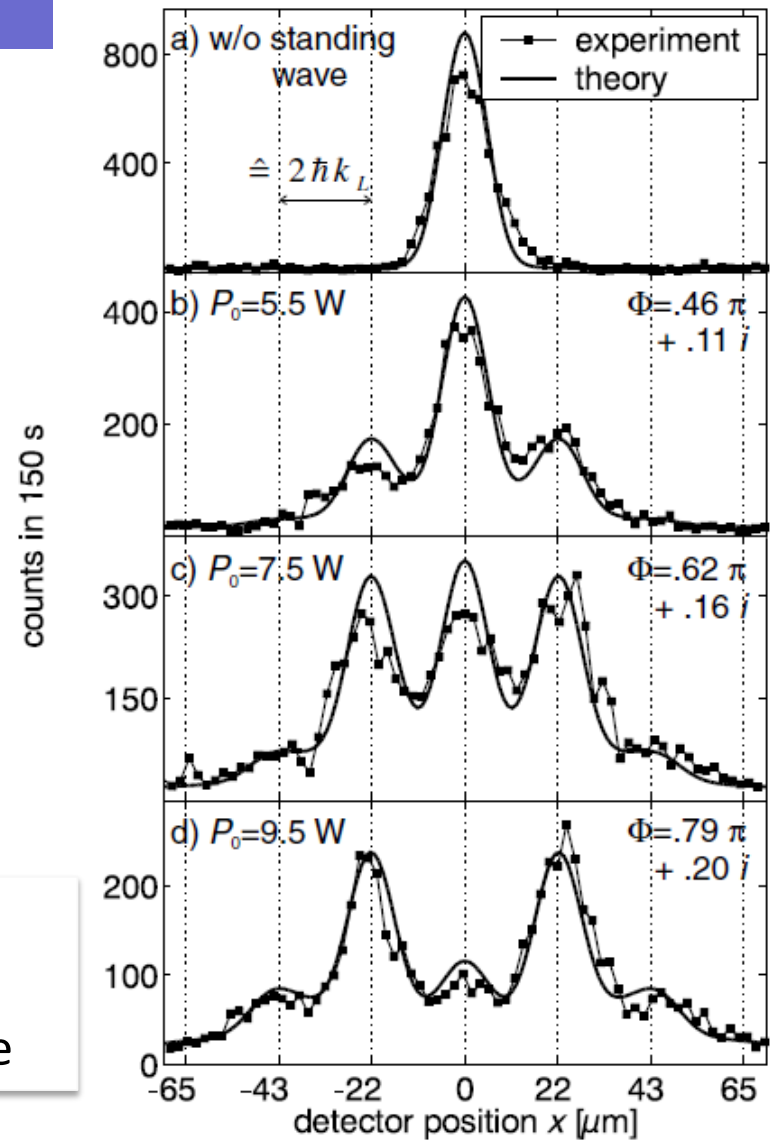
Aber: das hat
einen anderen Grund

Ladungen im Gitter

Knobloch, C. *et al. On the role of the electric dipole moment in the diffraction of biomolecules at nanomechanical gratings.*
Prog. Phys., 1–8 doi:DOI 10.1002/prop.201600025 (2016).

Eine stehende Laserwelle als Phasengitter für C_{60}-Moleküle



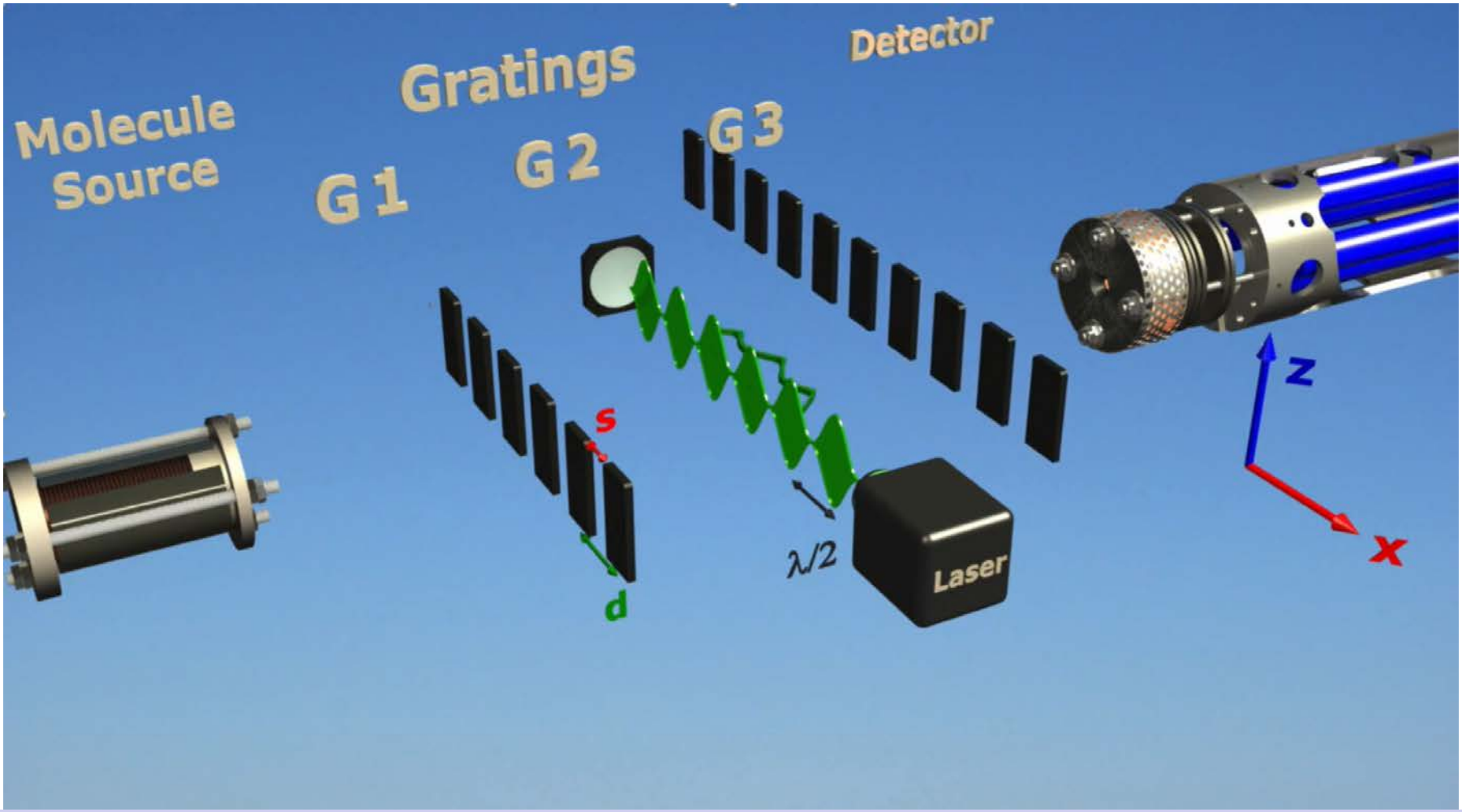


- Licht ist „unzerstörbar“
- Keine dephasierende Ww mit Wänden
- Präzise Lichtfrequenz → Genaue Gitterperiode

O. Nairz, B. Brezger, M. Arndt, A. Zeilinger, *Diffraction of Complex Molecules by Structures Made of Light*, **Phys. Rev. Lett.** 87, 160401 (2001)

Kapitza-Dirac Talbot Lau Interferometer (KDTLI)

Ein Materiewellenexperiment für sehr massive (Bio)Moleküle



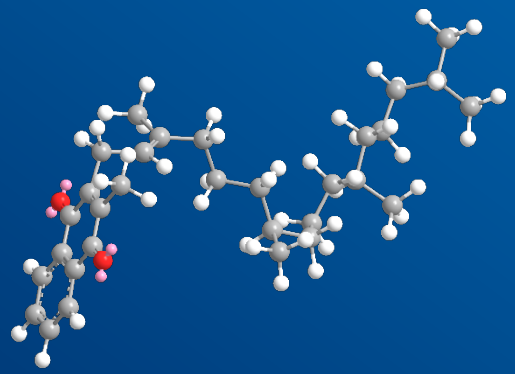
[1] S. Gerlich, L. Hackermüller, K. Hornberger, A. Stibor, H. Ulbricht, M. Gring, F. Goldfarb, T. Savas, M. Müri, M. Mayor, M. Arndt, ***Nature Physics 3, 711-715 (2007).***

[2] S. Gerlich, M. Gring, H. Ulbricht, K. Hornberger, J. Tüxen, M. Mayor, M. Arndt, ***Angew. Chem. Int. Ed. Engl. 47, 6195-6198 (2008).***

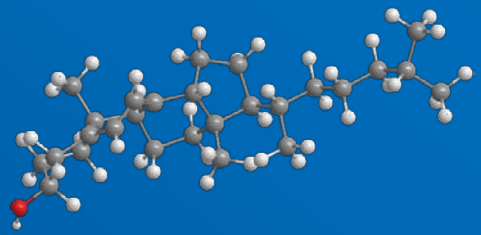
[3] S. Gerlich, S. Eibenberger, M. Tomandl, S. Nimmrichter, K. Hornberger, P. Fagan, J. Tüxen, M. Mayor, M. Arndt, ***Nature Communs 2, 263 (2011).***

Quanteninterferenz wurde mit diesen Vitaminen beobachtet

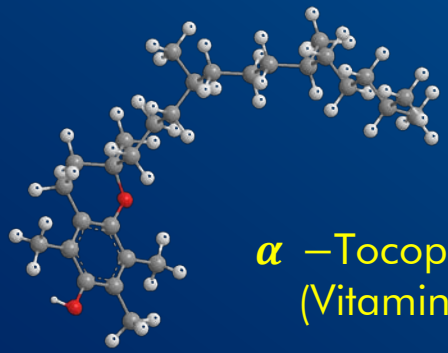
Phylloquinone
(Vitamin K1)



Resveratrol
(Antioxidanz im Rotwein)

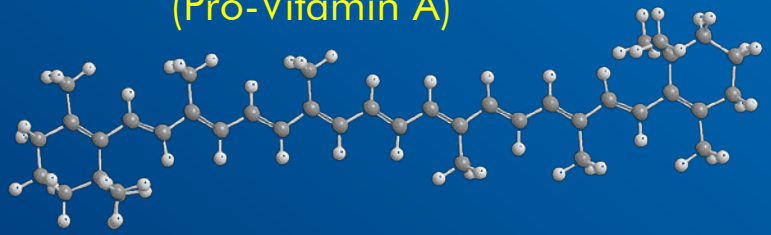


7-Dehydrocholesterol
(Pro-Vitamin D3)



α –Tocopherol
(Vitamin E)

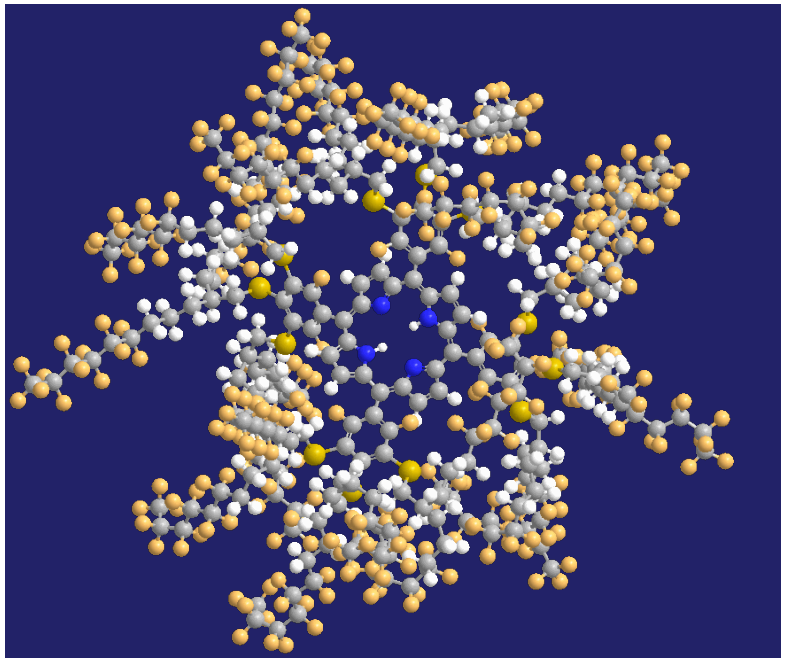
Beta carotene
(Pro-Vitamin A)



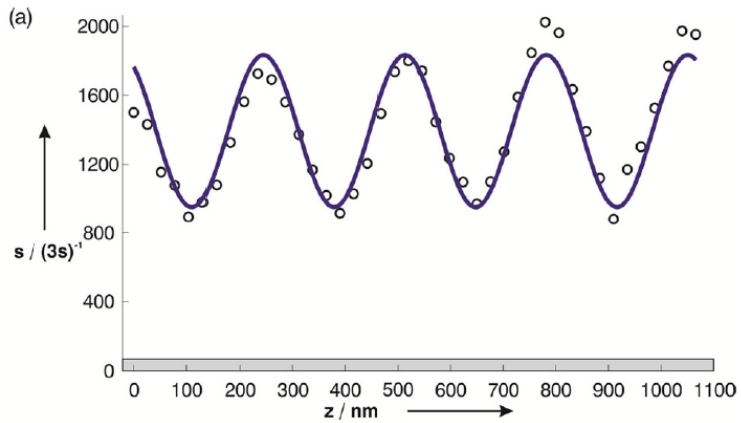
L. Mairhofer, S. Eibenberger, J.P. Cotter, M. Romirer, A. Shayeghi, M. Arndt,
Quantum-assisted metrology of neutral vitamins in the gas-phase,
Angew. Chem. Int. Ed. adv. online pub. (2017).

Das komplexeste Teilchen, mit dem Materiewelleninterferenz beobachtet wurde

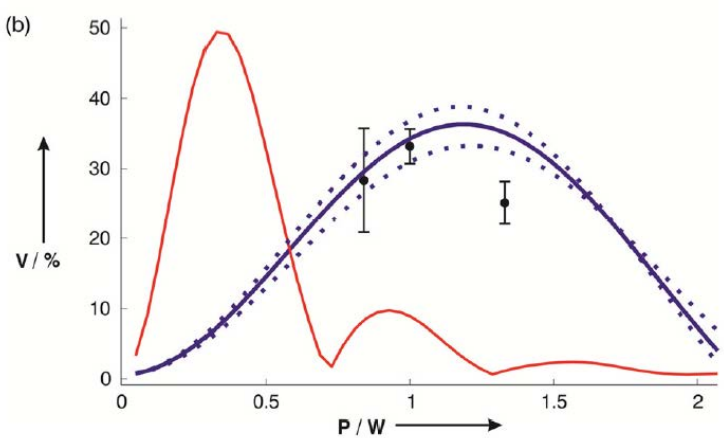
$C_{284}H_{190}F_{320}N_4S_{12}$
m=10'123 amu, N = 810 Atome



Molekülinterferogramm



Interferenzkontrast vs. Laserleistung



S. Gerlich, S. Eibenberger, M. Tomandl, S. Nimmrichter, K. Hornberger, P. Fagan, J. Tüxen, M. Mayor, M. Arndt, **Nature Comm. 2, 263 (2011)**
S. Eibenberger, S. Gerlich, M. Arndt, M. Mayor, J. Tüxen, **Phys. Chem. Chem. Phys. 15, 14696 (2013).**

Qualifiziert sich ein Makromolekül als Schrödinger‘s Katze?

Schrödinger‘s Gedanken-Experiment ist ein Beispiel für …

- ein ‚klassisches‘ Objekt: **makroskopisch, komplex** und **warm**
- das zugleich **zwei widersprüchliche Zustände** besetzt
- Das aus einer **Verschränkung** mit einem atomaren Zustand hervorgeht

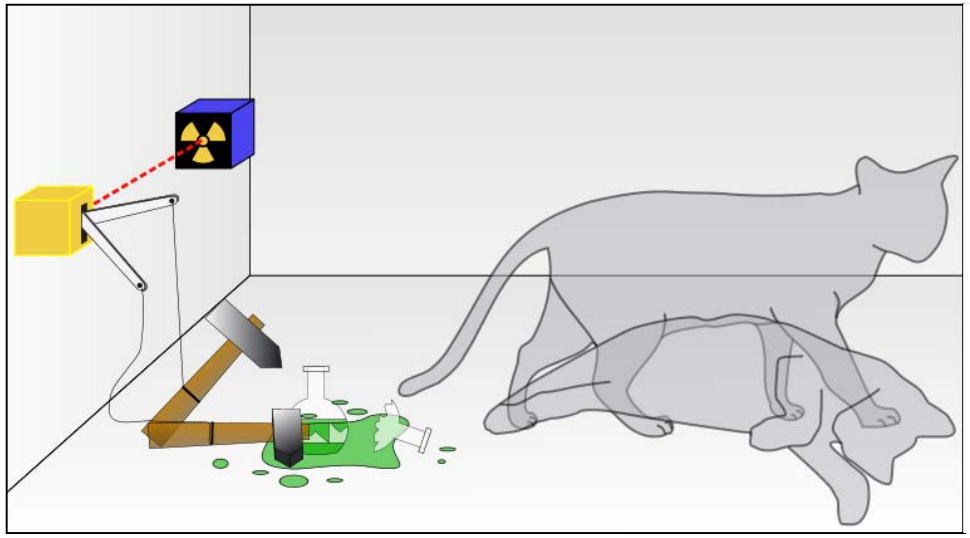


Image: Wikipedia

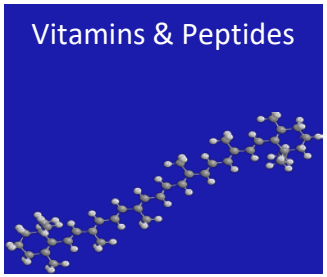
Erwin Schrödinger,
Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik,
Naturwissenschaften, 23 (1935)

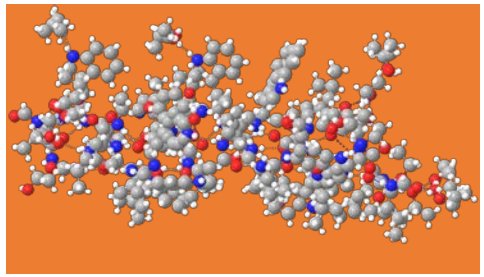
- 810 Atome!
- Heißer als jede lebende Katze: 500 K (!)
- An verschiedenen Orten: Trennung > 266 nm
- !! Teilung von ψ , keine Molekül-Teilung !!

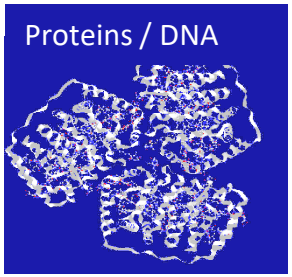
Anwendung biomolekulare Materiewellen

- Grundlagen:
  - Gilt die Quantenphysik auf allen Größenskalen ?
  - Kann „lebendige“ Materie in Quantensuperpositionen sein?

- Technologie:
  - Vermesse molekulare Eigenschaften mit Quantenmethoden
  - Optische Spektroskopie mit einzelnen Photonen
  - Deflektometrie mit Yocto-Newton Kräften



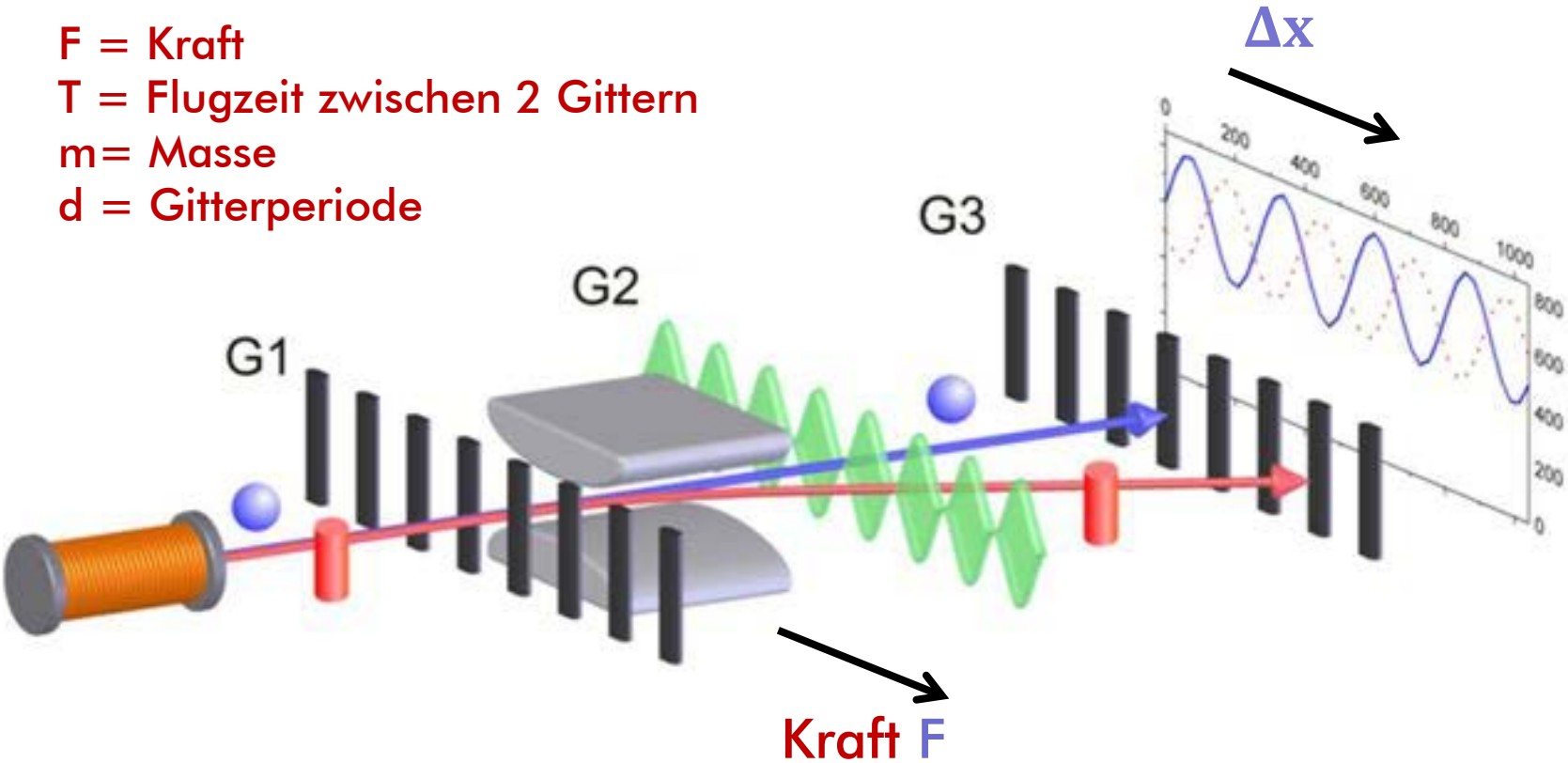




Molekülinterferometer als hochempfindliche Kraftmesser

$$\Delta x \propto \frac{2\pi}{d} \cdot \frac{F}{m} \cdot T^2$$

F = Kraft
T = Flugzeit zwischen 2 Gittern
m= Masse
d = Gitterperiode



Phys. Rev A 76, 013607 (2007).
Angew. Chem. Int. Ed. 47, 6195 (2008)
Chem. Comm. 46, 4145 (2010) …

Hier können Sie mit Ihren SchülerInnen unsere Experimente nachspielen

interactive.quantumnano.at

oder

http://www.quantumnano.at/popular-science/quantum-games-training/

Quantum Nanophysics Group

universität wien

FWF

erc
European Research Council

Team today:

Far-field:
- Christian Brand
- Cristian Knobloch

OTIMA
- Georg Richter
- Jonas Rodewald
- Armin Shayeghi

CAVITY
- Stefan Kuhn
- James Millen
- Franz-Ferdinand Wieser

LD/ ESI Source
- Moritz Kriegleder
- Maxime Debiossac
- Sebastian Pedalino
- Ugur Sezer
- Philipp Geyer

KDTLI & LUMI
- Yaakov Fein
- Philipp Geyer
- Lukas Mairhofer
- Stefan Gerlich
- Marion Romirer

Former coworkers:

Far-field:
- Thomas Juffmann
- Michele Sclafani

OTIMA
- Andrea Grimaldi
- Nadine Dörre
- Philipp Haslinger

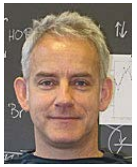
CAVITY
- Peter Asenbaum

KDTLI
- Sandra Eibenberger
- Joe Cotter
- Hendrik Ulbricht

THEORY
- Stefan Nimmrichter

Collaborations

Klaus Hornberger


Marcel Mayor

Ori Cheshnovsky

Benjamin Stickler

Angelo Bassi

Fernando Patolsky

Uzi Even

Michael Trupke