

0. Allgemeine Informationen:

Prof. Uli Lemmer

Lichttechnisches Institut, Geb. 30.34, Raum 222

Tel: 0721-608-42530

E-Mail: uli.lemmer@kit.edu, URL: www.lti.kit.edu

Vorlesungsfolien und –skript sind vom KIT-Studierendenportal

<https://ilias.studium.kit.edu>

herunterzuladen.

Ergänzende Links ebenfalls online verfügbar

Prüfung: schriftlich 2 h

Vorkenntnisse: HM I-III, Physik A+B, Felder und Wellen

Festkörperelektronik
SS 2016
1. Foliensatz
21.04.2016

Vorlesungsbetreuung

- MSc. Manuel Koppitz
 - LTI, Geb. 30.34, R125
 - 0721 / 608 - 41669
 - manuel.koppitz@kit.edu



- MSc. Noah Strobel
 - LTI, InnovationLab Heidelberg
 - 06221/ 54 19140
 - noah.strobel@kit.edu



Materialwissenschaftliche/
bauelementorientierte Vorlesungen:

Physik A, B



Festkörperelektronik



Passive Bauelemente
Halbleiterbauelemente



Studienmodelle

Festkörperelektronik ist auch ...

...angewandte HM/WT/KAIT.

...eine Mischung aus F&W
und Hochfrequenztechnik mit
Materiewellen.

Literatur

-Folien

-Skript Festkörperelektronik (Download über Ilias)

-Skript Elektrophysik (Prof. W. Heering) (Download über Ilias)

Quantenmechanik:

Feynman Vorlesungen über Physik (Feynman, Leighton, Sands)

Physikalische Chemie (P.W. Atkins)

Experimentalphysik III (W. Demtröder)

Advanced Semiconductor Fundamentals
(Robert F. Pierret, € 26,90)

Halbleiter:

Festkörperphysik, Einführung in die Grundlagen (Ibach, Lüth)

Advanced Semiconductor Fundamentals
(Robert F. Pierret, € 26,90)

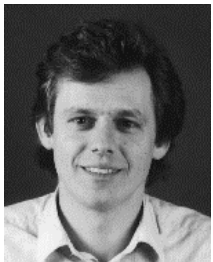
Semiconductor Device Fundamentals (deckt auch HLB ab)
(Robert F. Pierret, € 113,90)

Zur Quantenmechanik gibt es jede Menge Online-Material:

z.B. <http://www.kfunigraz.ac.at/imawww/vqm/german/qm-online.html>
<http://www.falstad.com/mathphysics.html>

Weitere Links im VAB.

Zu Halbleiterbauelementen ebenfalls sehr gute Online-Ressourcen:

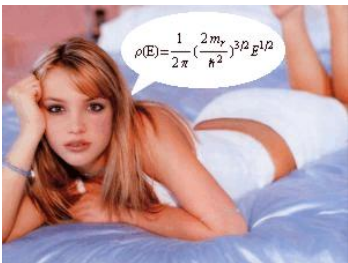


Homepage von Prof. Bart Zeghbroeck, University of Colorado, USA

<http://ecee.colorado.edu/~bart/book/book/index.html>

Online-Material an der Universität Kiel (Prof. Föll)

http://www.tf.uni-kiel.de/matwis/amat/semi_en/index.html



Britney Spears, is one of the most popular singers of all time. With her enormous hit albums, 'Baby, One More Time', 'Oops I did it Again', 'Britney' and now 'In the Zone', less attention has been paid to her ability as a semiconductor physicist. Marvel at her incredible physical talents, as we remedy this.

<http://www.britneyspears.ac/>



solid state electronics



Filter ▾

Etwa 24.100 Ergebnisse



Solid State Electronics - ECE 4570 Winter 2015

von Microfluidics and BioInstrumentation Lab @ Wayne State University

ECE 4570 Winter 2014 Lecture 1 - Syllabus 54:47

Module 0 - Introduction to Solid State Electronics 1:33:05

[Gesamte Playlist ansehen \(26 Videos\)](#)



Electronics - Solid State Devices

von nptelhrd ✓

Lecture - 1 Introduction on Solid State Devices 59:12

Lecture - 2 Evolution and Uniqueness of Semiconductor 58:12

[Gesamte Playlist ansehen \(42 Videos\)](#)



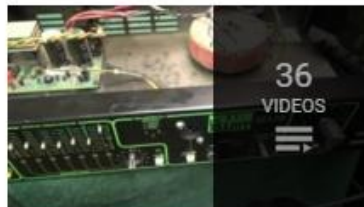
Solid State Electronic Devices

von Jack Doodle

Lecture - 1 Introduction on Solid State Devices 59:12

Lecture - 2 Evolution and Uniqueness of Semiconductor 58:12

[Gesamte Playlist ansehen \(42 Videos\)](#)



Beliebte Videos – Solid State und Gitarrenverstärker

von Solid-state electronics - Topic

Repair Trace Elliot Solid State Bass Guitar amp by D-lab Electronics 3:40

Solid State Amp Repair, Fender Frontman 15G: Basic Electronics Episode 18 Par... 6:15

[Gesamte Playlist ansehen \(36 Videos\)](#)

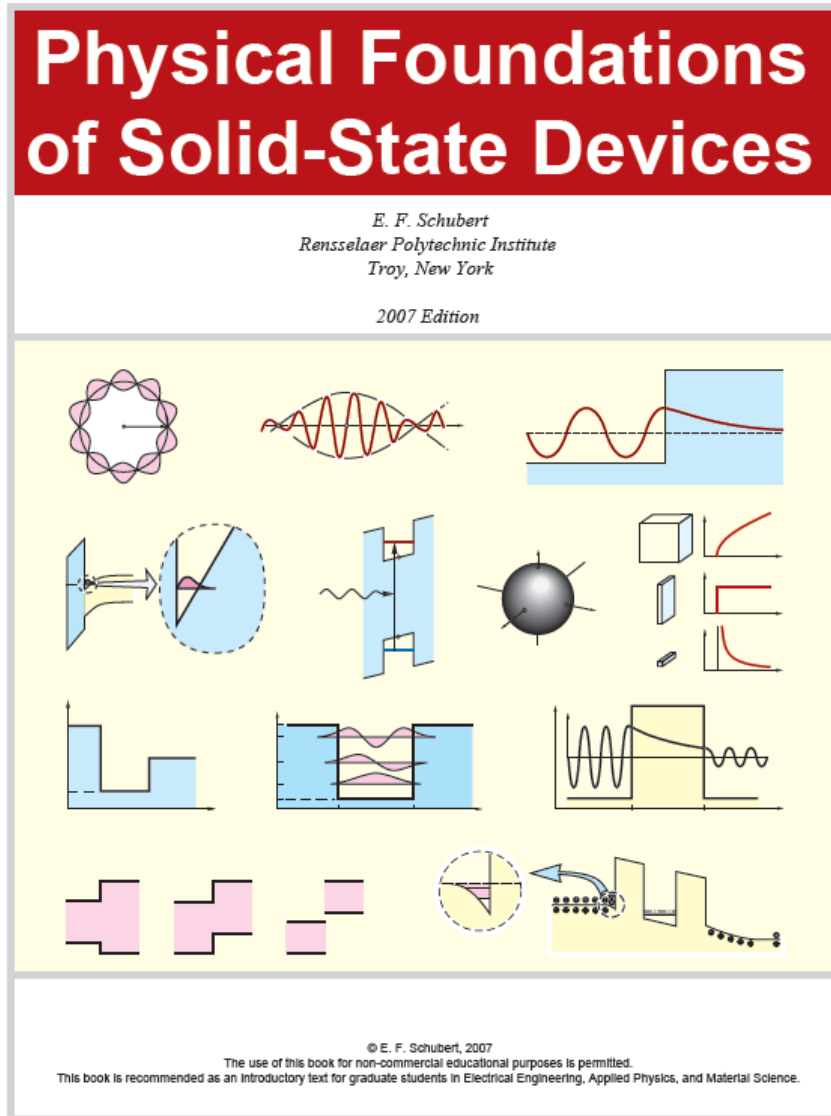


Module 0 - Introduction to Solid State Electronics

Microfluidics and BioInstrumentation Lab @ Wayne State University

vor 1 Jahr • 490 Aufrufe

ECE 4570 Winter 2015 Wayne State University Prof. Amar Basu.



Prof. E. F. Schubert
Rensselaer Polytechnic Institute
Troy, New York



...auch im Ilias-System herunterladen !

Übersicht über die Vorlesung

1. Grundlagen der Quantenmechanik
2. Elektronische Zustände
3. Vom Wasserstoffatom zum Periodensystem der Elemente
4. Elektronen in Kristallen
5. Halbleiter
6. Quantenstatistik für Ladungsträger
7. Dotierte Halbleiter
8. Halbleiter im Nichtgleichgewicht
9. Der pn-Übergang

Übersicht über die Vorlesung

1. Grundlagen der Quantenmechanik
 - 1.1 Einleitung
 - 1.2 Historisches
 - 1.3 Die Schrödinger-Gleichung
 - 1.4 Das freie quantenmechanische Elektron
 - 1.5 Quantenmechanische Erwartungswerte
2. Elektronische Zustände
3. Vom Wasserstoffatom zum Periodensystem der Elemente
4. Elektronen in Kristallen
5. Halbleiter
6. Quantenstatistik für Ladungsträger
7. Dotierte Halbleiter
8. Halbleiter im Nichtgleichgewicht
9. Der pn-Übergang

Gliederung der Veranstaltung

SS 2016
FE 1.10

Grundlagen der Quantenmechanik



Verständnis der
festkörperphysikalischen Vorgänge
in
elektronischen Bauelementen und
Werkstoffen der Elektrotechnik



Grundlagen der Halbleiterbauelemente

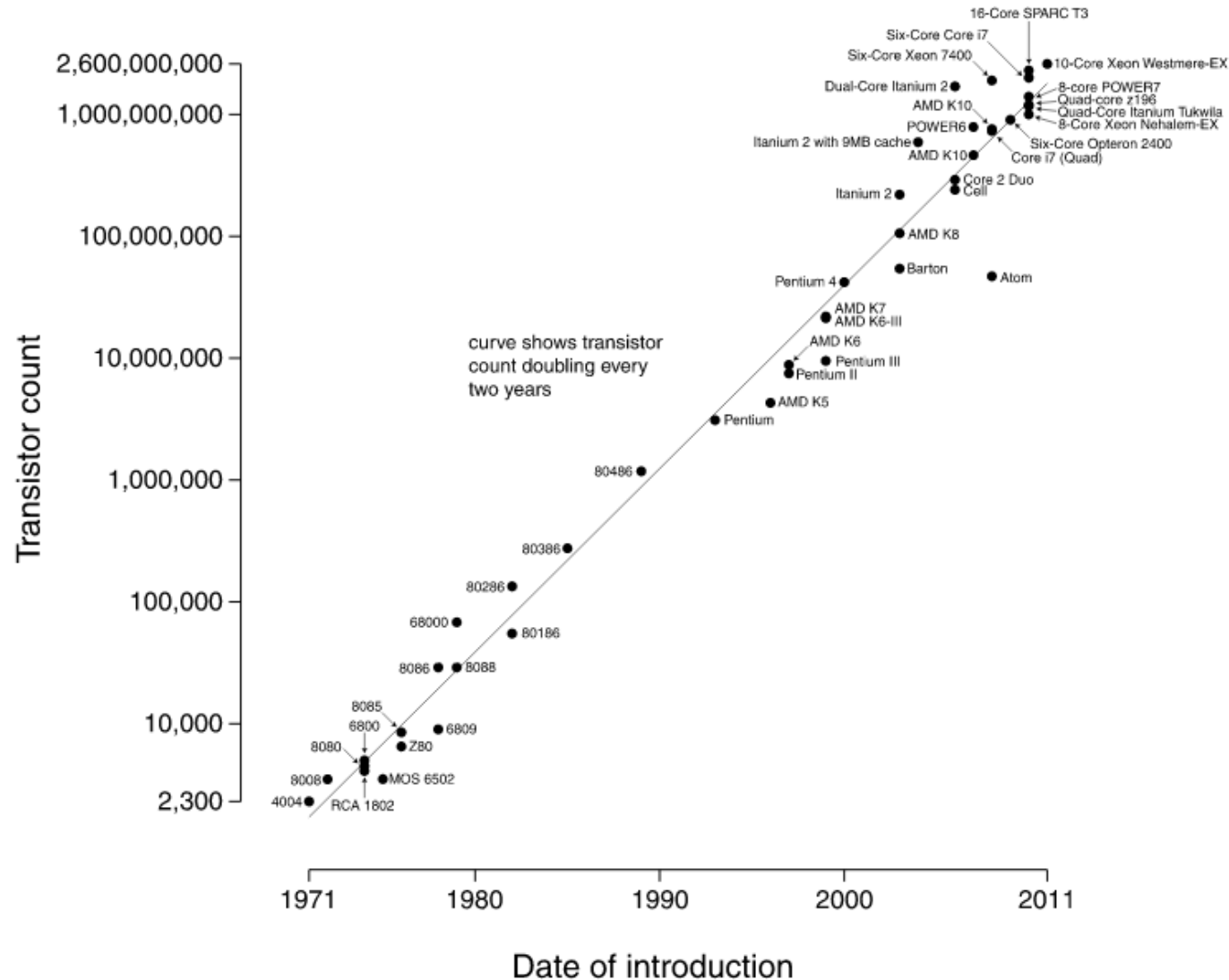
Was bringt mir die
Schrödinger-
Gleichung ?

Was ist ein Leitungsband
?

Wie funktioniert eine pn-
Diode ?

Motivationshilfen

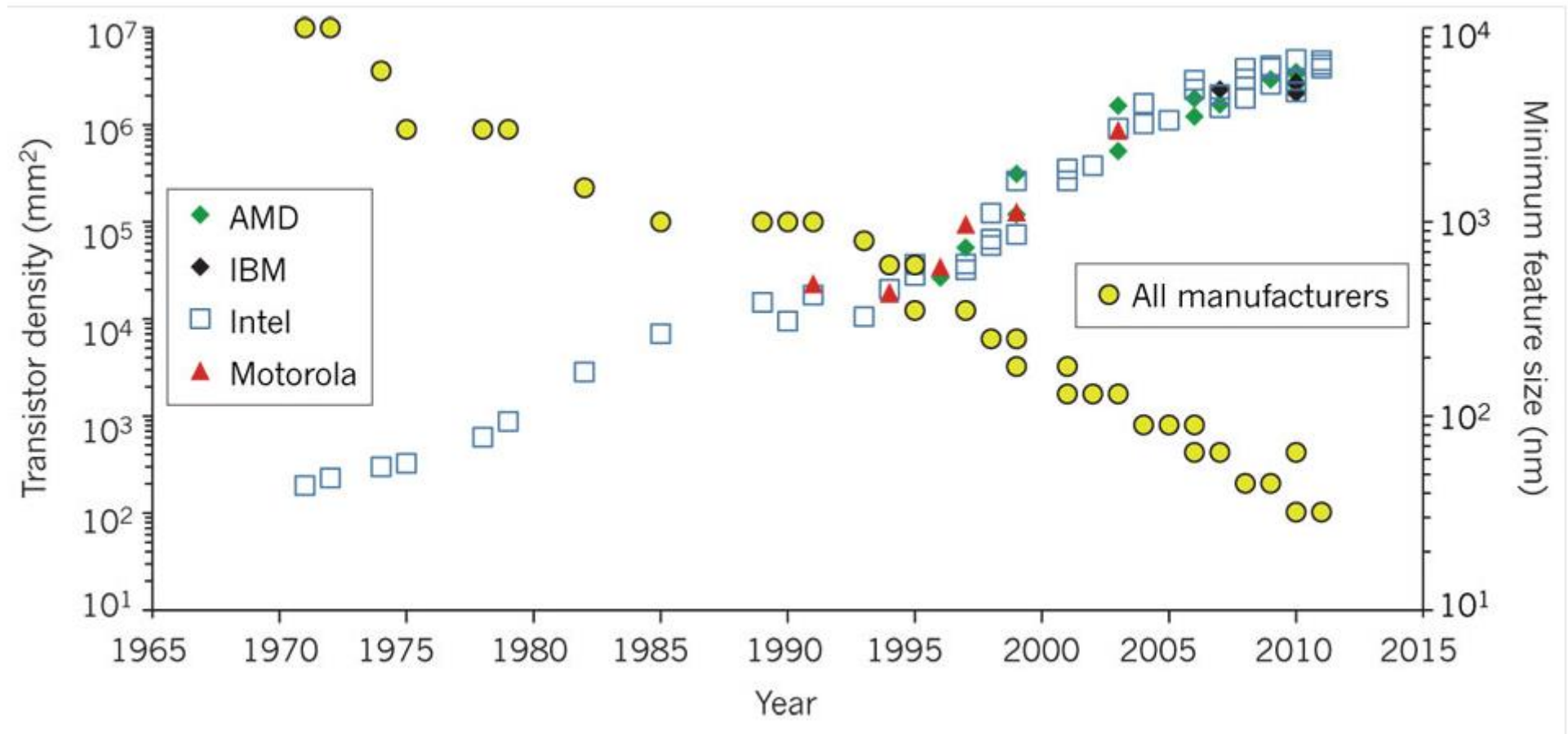
Microprocessor Transistor Counts 1971-2011 & Moore's Law



Vereinfacht kann man sagen, dass Quantenmechanik immer dann wichtig wird, wenn die Strukturen klein werden ...und genau das passiert in der Mikroelektronik.

Motivationshilfen

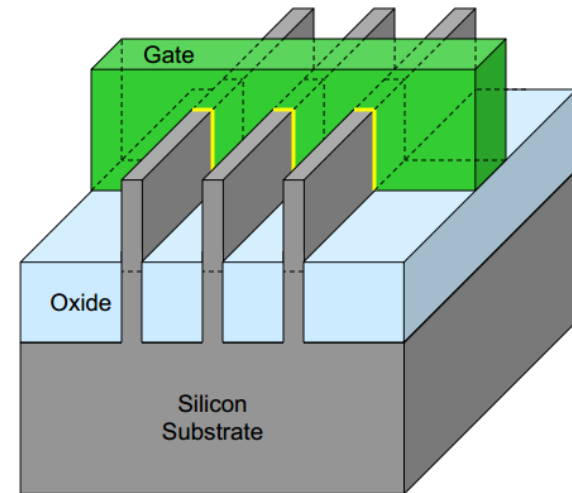
Vereinfacht kann man sagen, dass Quantenmechanik immer dann wichtig wird, wenn die Strukturen klein werden ...und genau das passiert in der Mikroelektronik.



Intel Technology Roadmap

Process Name	<u>P1266</u>	<u>P1268</u>	<u>P1270</u>	<u>P1272</u>	<u>P1274</u>
Lithography	45 nm	32 nm	22 nm	14 nm	10 nm
1 st Production	2007	2009	2011	2013	2015

22 nm Tri-Gate Transistor



Intel continues our cadence of introducing a new technology generation every two years



...die ETIT wird u. a. getrieben von Fortschritten in der Nanotechnologie/Materialwissenschaft. Eine Weiterentwicklung der Strukturen und ein Verständnis der Bauelemente erfordert Kenntnisse der Quantenmechanik.

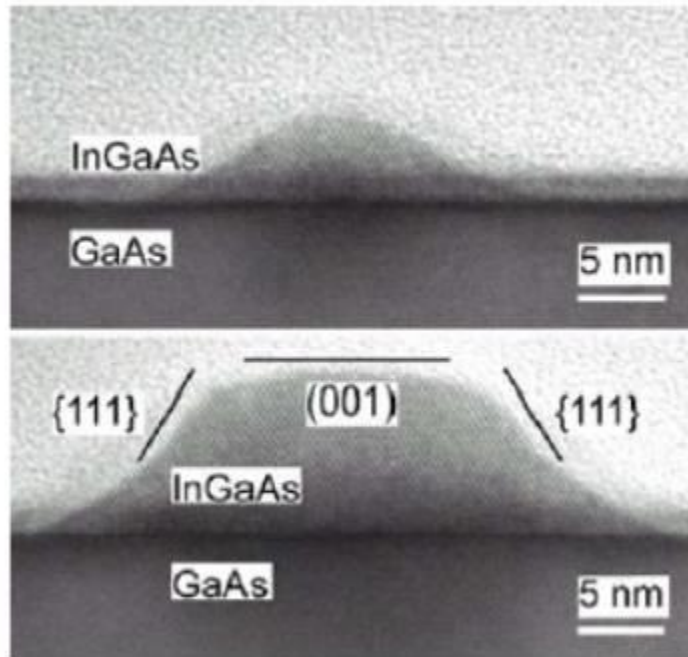


Abb: Elektronenmikroskopische Aufnahme sogenannter Quantenpunkte.

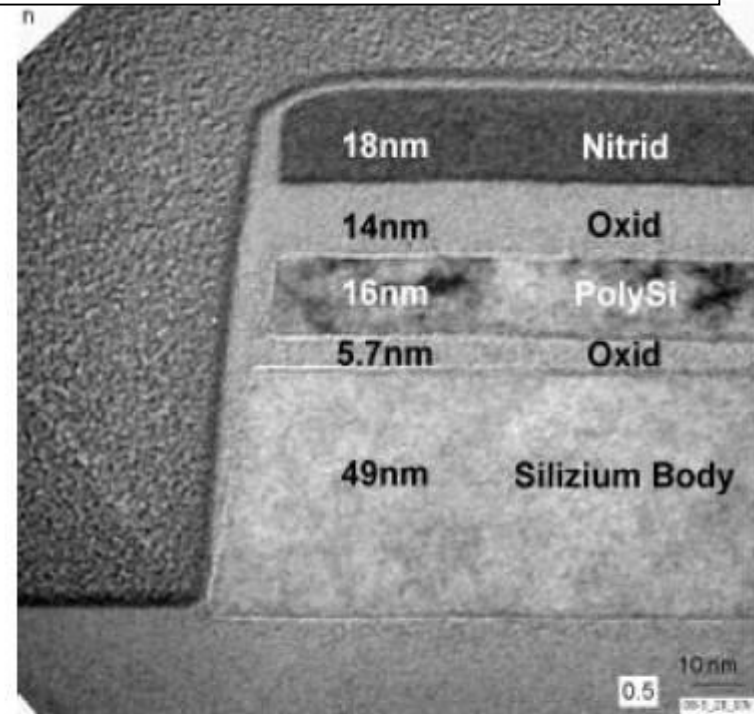


Fig. 9: TEM picture of a floating gate memory cell: Cross section of the Silicon channel with a 5.7nm thick SiO_2 tunnel oxide and a 16nm poly Si floating gate. On top is a Nitride dielectric serving as a hard mask for etching the floating gate and Si-body.

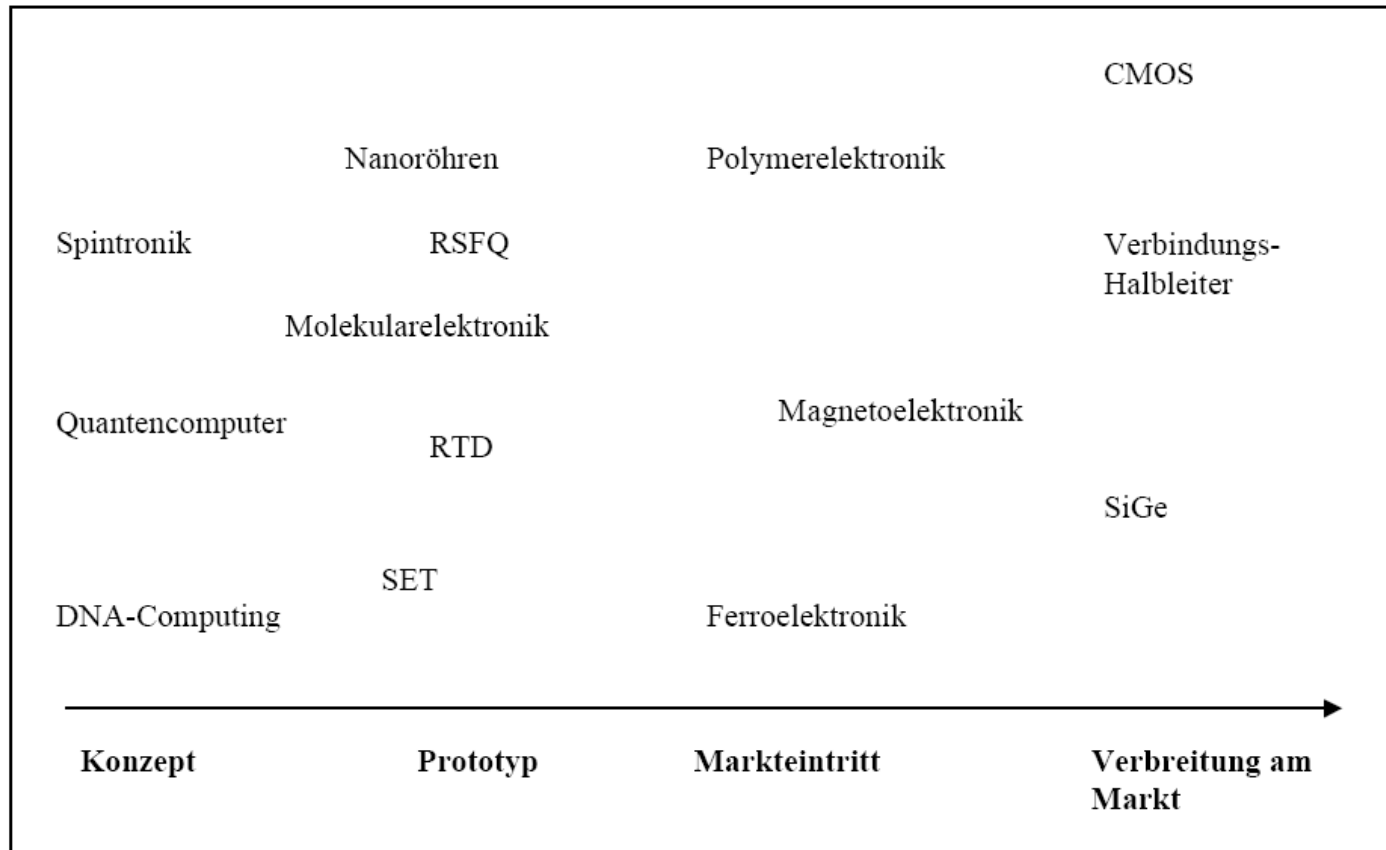


Abb. 2. 2: Schematische Darstellung des Entwicklungsstandes der Technologien

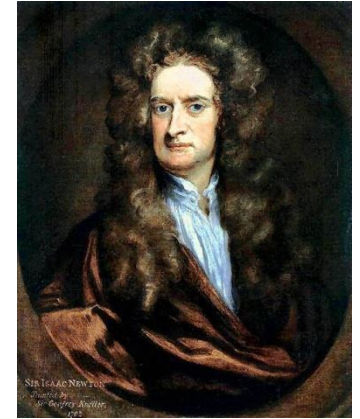
ETIT ist auch eine Materialschlacht ...
daher sollte man diese einigermaßen verstehen.

Übersicht über die Vorlesung

1. Grundlagen der Quantenmechanik
 - 1.1 Einleitung
 - 1.2 Historisches
 - 1.3 Die Schrödinger-Gleichung
 - 1.4 Das freie quantenmechanische Elektron
 - 1.5 Quantenmechanische Erwartungswerte
2. Elektronische Zustände
3. Vom Wasserstoffatom zum Periodensystem der Elemente
4. Elektronen in Kristallen
5. Halbleiter
6. Quantenstatistik für Ladungsträger
7. Dotierte Halbleiter
8. Halbleiter im Nichtgleichgewicht
9. Der pn-Übergang

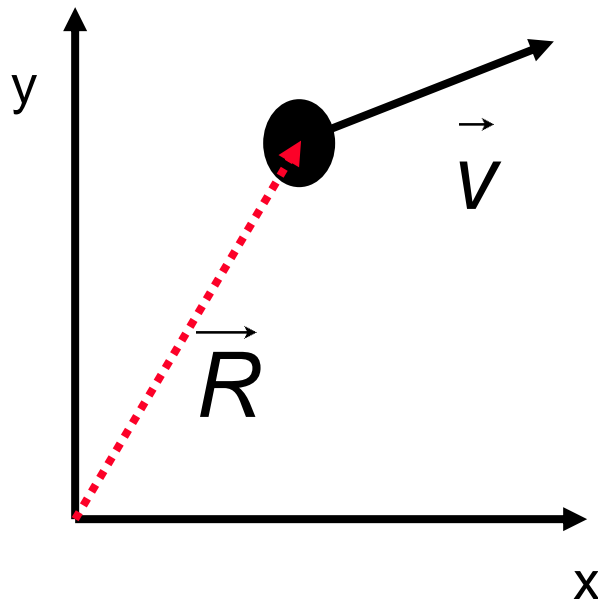
1.2.1: Physikalische Theorien

- Beschreibung der Mechanik durch idealisierte Teilchen
- idealerweise als punktförmige Teilchen



Sir Isaac Newton
(1643-1727)

Was heisst eigentlich Teilchen ?



Zum Zeitpunkt t befindet sich das Teilchen der Masse m am Ort \vec{R} und bewegt sich mit der Geschwindigkeit \vec{v} . Sein Impuls beträgt $\vec{p} = m\vec{v}$.

Die Bewegung der Massenpunkte wird durch die Newton'schen Gesetze beschrieben.

Stand der Wissenschaft vor 1900: Elektrodynamik: Maxwell-Gleichungen

SS 2016
FE 1.18

$$\operatorname{div} \vec{D} = \rho$$

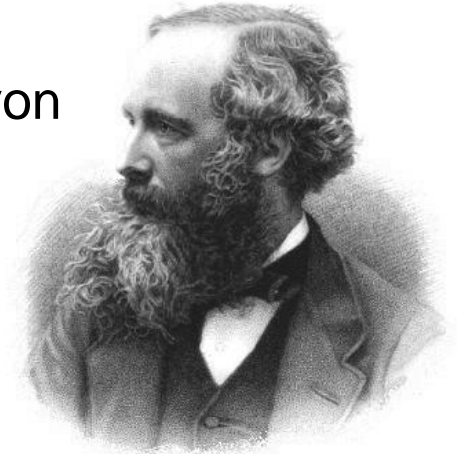
$$\operatorname{div} \vec{B} = 0$$

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$$

Erlauben eine Vorhersage der zeitlichen und räumlichen Entwicklung von

elektrischer Flussdichte \vec{D}
magnetischer Flussdichte \vec{B}
elektrischer Feldstärke \vec{E}
magnetischer Feldstärke \vec{H}



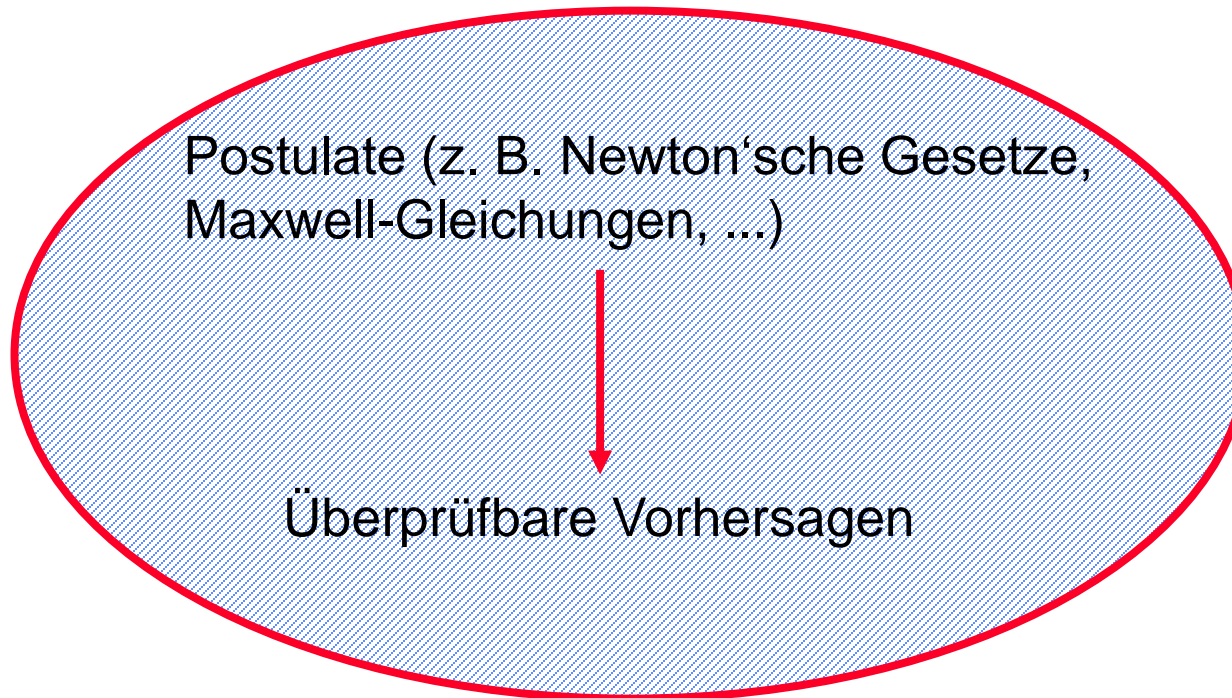
James Clerk Maxwell.


(1831-1879)

„Felder“: Dinge, die ganze Raumbereiche erfüllen, im Gegensatz zum Teilchen NICHT lokalisiert.

Die „Bewegung“ (zeitliche Entwicklung) der Felder wird durch die Maxwell-Gleichungen beschrieben.

Der Theoriebegriff



 : Gültigkeitsbereich (z. B. $v \ll c$ für die Newton'sche Mechanik)

-Quantenmechanik können wir uns sparen, wenn
Energie * Zeit $\gg h = 6.626 \cdot 10^{-34}$ Js

h ist das *Planck'sche* Wirkungsquantum

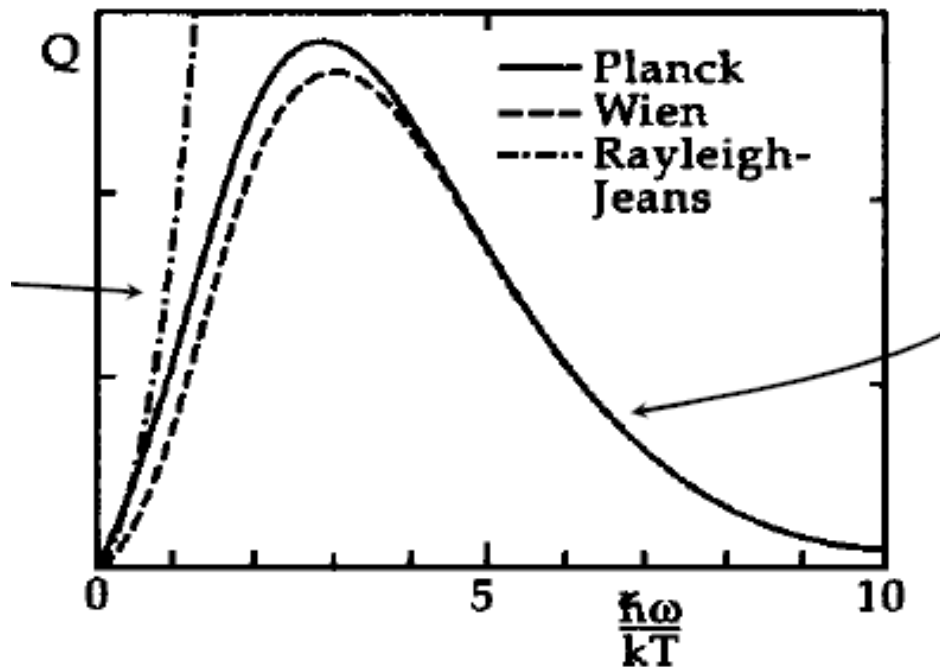
Historisches zur Quantenmechanik: Schwarzkörperstrahlung

SS 2016
FE 1.20

1.2.2: Der Beginn der Quantenmechanik

Zusammenbruch der klassischen Physik

1. Erklärung des Schwarzkörperstrahlungsspektrums durch Planck (1900)



Planck'sche
Quantenhypothese
(1900):

„Energien im System sind gemäß $E=h\nu$ „gequantelt“
 h ist das Planck'sche Wirkungsquantum

2. Photoeffekt (Einstein 1905, 1917)

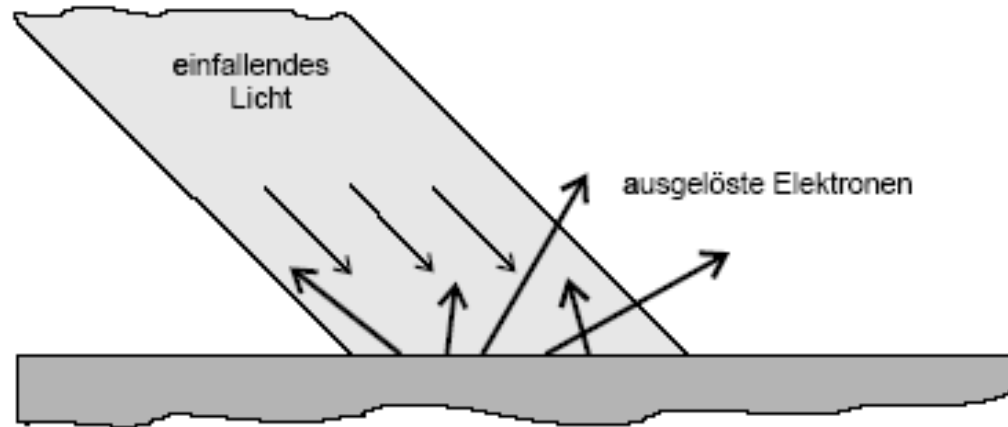


Abbildung 1.2: Licht löst Elektronen aus Metalloberflächen

-Elektronenenergie hängt nicht von der Intensität des Lichtes sondern von der Frequenz ν ab. Licht als Schauer von Lichtteilchen (Photonen) mit einer Energie $E=h\nu$

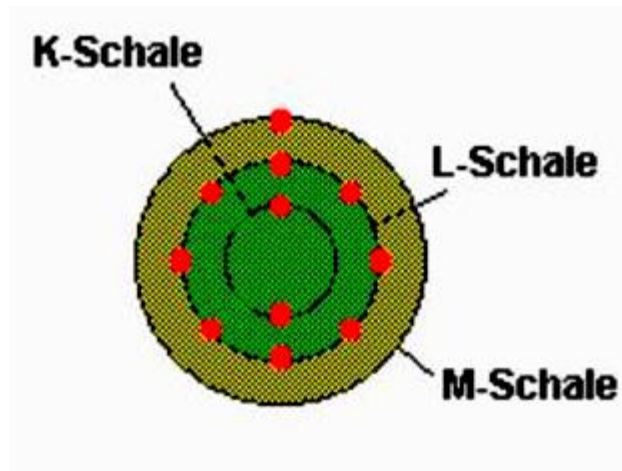
„Felder treten auch als Teilchen auf“

Historisches zur Quantenmechanik:

Bohr'sches Atommodell

SS 2016
FE 1.22

3. Nichtbeobachteter Atomzerfall und Spektrallinien Versuch der Erklärung durch das Bohr'sche Atommodell (1913)



- I. Das Elektron bewegt sich auf Kreisbahnen um den Kern. Diese sind stationär und das Elektron strahlt keine Energie ab.
- II. Unter allen Kreisbahnen sind nur diejenigen erlaubt, auf denen der Drehimpuls des Elektrons ein ganzzahliges Vielfaches von $h/2\pi$ ist.
- III. Strahlung wird nur beim Übergang zwischen 2 stationären Zuständen emittiert oder absorbiert.

... an sich O.K., nur warum ist das so ? Wir haben doch gelernt, dass beschleunigte Ladungen als Quelle einer elektromagnetischen Wellen fungieren ?

Historisches zur Quantenmechanik: Interferenz

SS 2016
FE 1.23

Interferenz ist ein typisches Wellenphänomen. Experimente hierzu können z.B. in der Badewanne erfolgen.

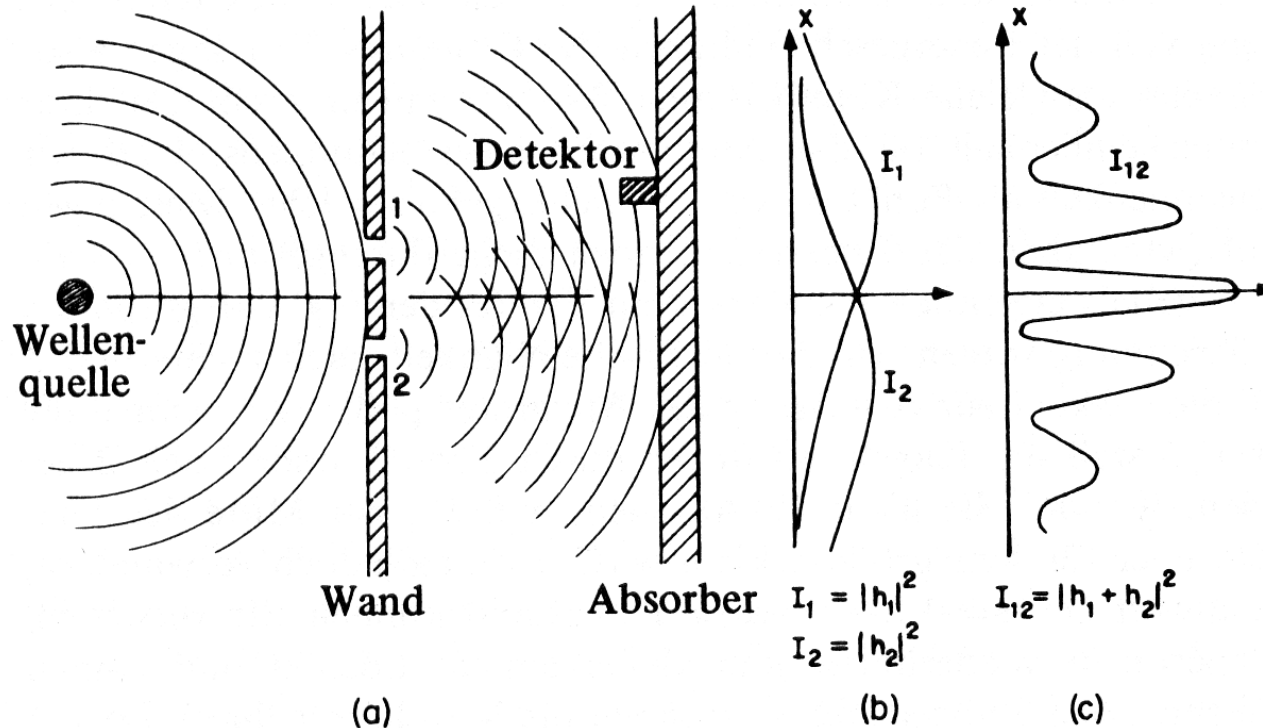


Fig. 1–2. Interferenzexperiment mit Wasserwellen.

Quelle: Feynman Lectures

Viele Interferenzphänomen sind auch im Bereich der Optik bekannt. Hier kommt es zu einer Überlagerung von elektromagnetischen Wellen.

Historisches zur Quantenmechanik: Interferenz

SS 2016
FE 1.24

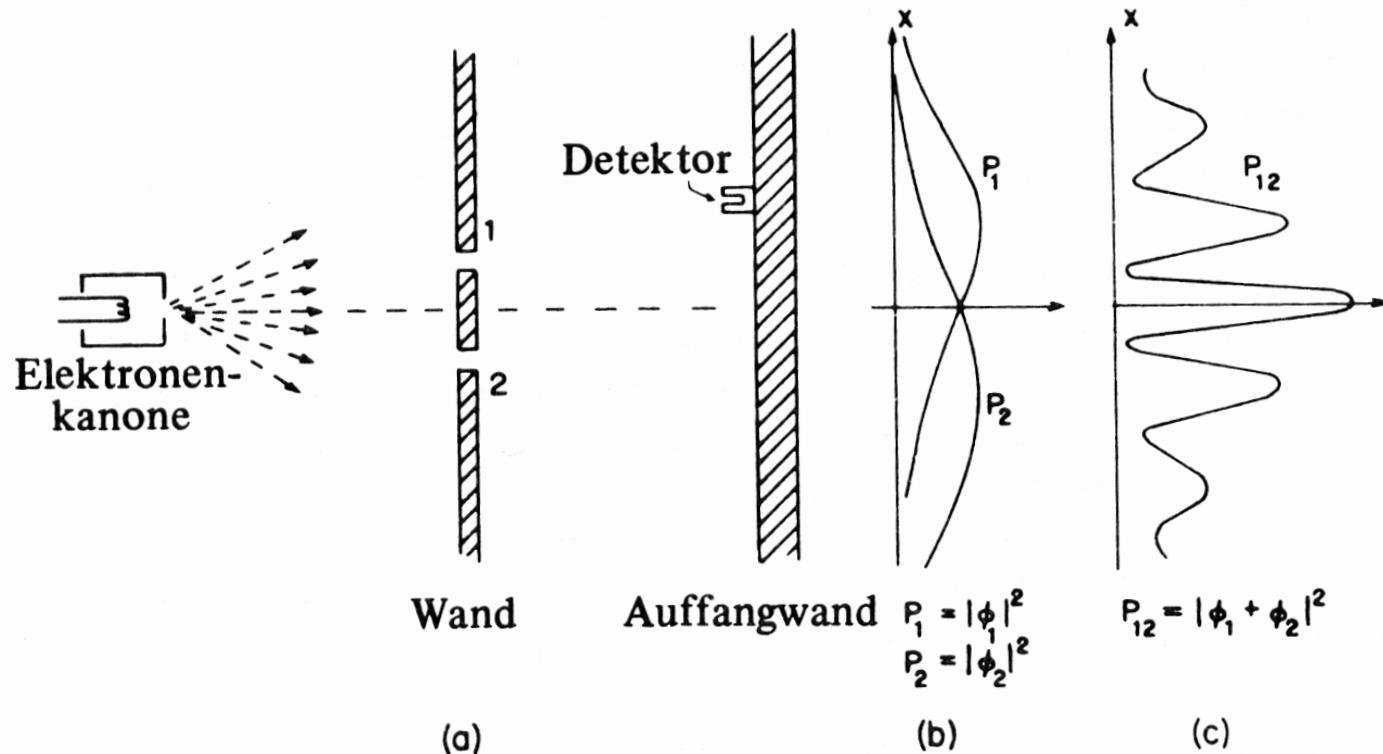


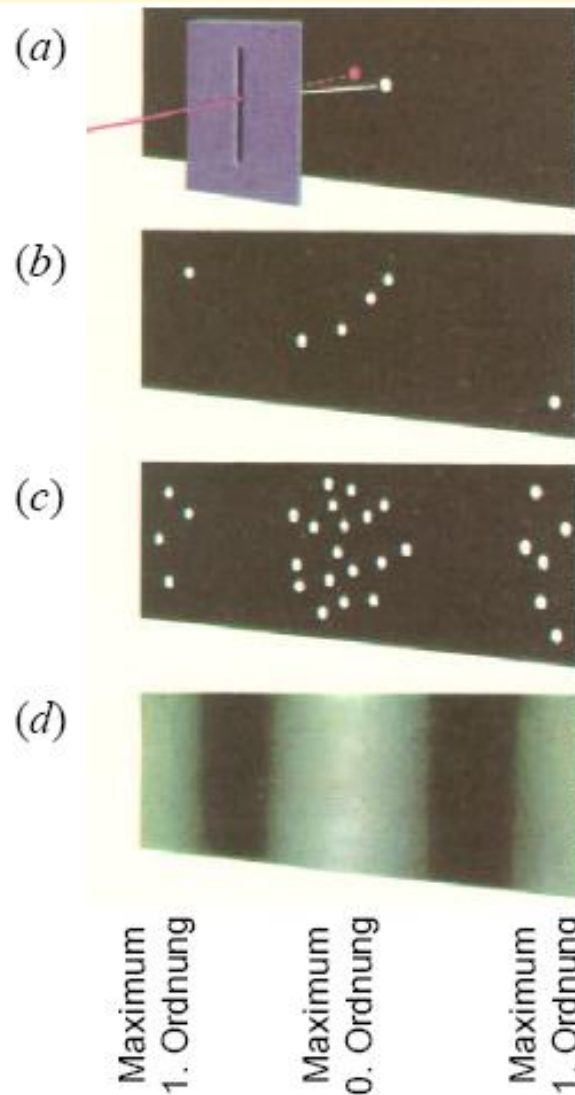
Fig. 1–3. Interferenzexperiment mit Elektronen.

Quelle: Feynman Lectures

Mit einem ähnlichen Experiment konnten Davisson und Germer 1927 erstmals die Interferenz von Elektronen nachweisen.

Teilchen treten auch als Felder (Wellen) auf.

Teilchen als Wellen



Beugung im Teilchenbild.

- (a) Die Flugbahn des einzelnen Teilchens weicht von der geraden Richtung ab.
- (b) Die Auftreffpunkte mehrerer Teilchen sind scheinbar regellos verteilt.
- (c) Häufung an bestimmten Stellen.
- (d) Gesamtes Erscheinungsbild.

- Flugbahn des einzelnen Teilchens nicht bekannt
- Wahrscheinlichkeitsaussagen

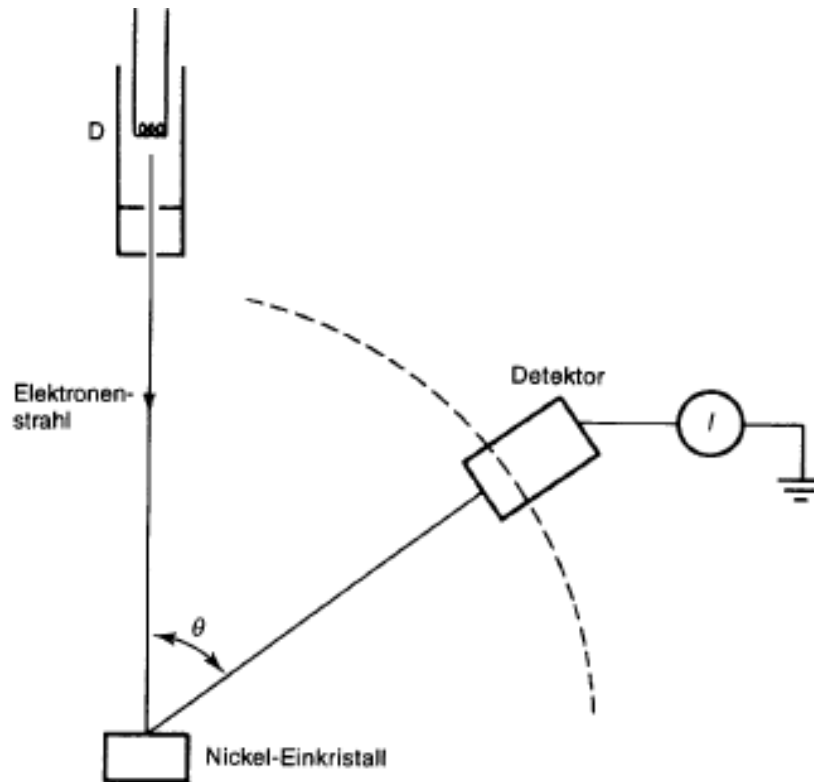
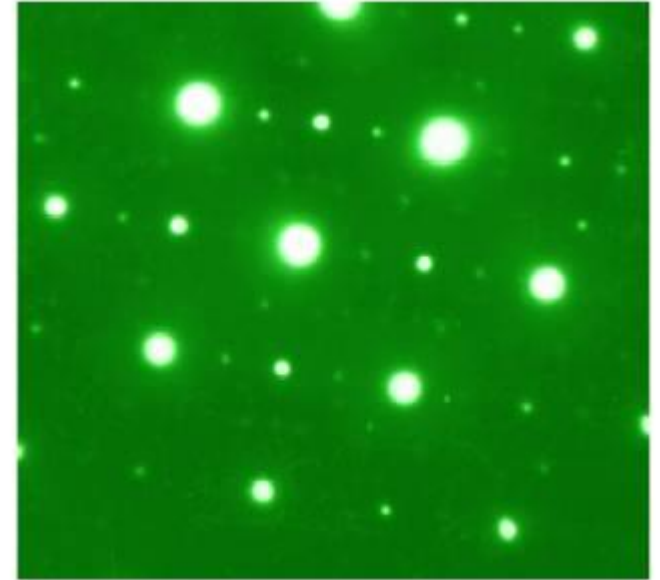


Abb: Interferenz von Elektronen an GaAs



Quelle: H. Leipner, U Halle

Das ist alles im Einklang mit den schon von Louis de Broglie im Jahre 1923 postulierten Materiewellen mit der Wellenlänge

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

„Teilchen treten auch als Felder (Wellen) auf (z.B. Elektronenbeugung/-interferenz)“
„Felder treten auch als Teilchen auf (z.B. Photoeffekt)“

Übersicht über die Vorlesung

1. Grundlagen der Quantenmechanik
 - 1.1 Einleitung
 - 1.2 Historisches
 - 1.3 Die Schrödinger-Gleichung
 - 1.4 Das freie quantenmechanische Elektron
 - 1.5 Quantenmechanische Erwartungswerte
2. Elektronische Zustände
3. Vom Wasserstoffatom zum Periodensystem der Elemente
4. Elektronen in Kristallen
5. Halbleiter
6. Quantenstatistik für Ladungsträger
7. Dotierte Halbleiter
8. Halbleiter im Nichtgleichgewicht
9. Der pn-Übergang

Der Zustandsbegriff

Zustand eines Systems: Minimaler Satz von physikalischen Größen, aus dem sich maximale Information ableiten lässt.

- eindeutige Vorhersage über den Zustand zum Zeitpunkt t aus der Kenntnis des Zustandes zum Zeitpunkt t_0

Beispiel: Impuls und Ort eines klassischen Massepunktes

Mathematisch:

$$\frac{dZ(t)}{dt} = F[Z(t)]$$

- Zeitliche Änderung des Zustandes wird beschrieben durch Differentialgleichung 1. Ordnung (Evolutionsgleichung)

Vorhersage eines Zustandes aus Anfangszustand

SS 2016
FE 1.29

Lösung der DGL



Akrobat schön: Neuer hält den Elfmeter von Ronaldo

© DAPD

1. Postulat der Quantenmechanik:

Der quantenmechanische Zustand eines Teilchens der Masse m , das sich in einem Kraftfeld mit dem Potential $V(x,t)$ befindet, lässt sich als komplexwertige Funktion $\psi(x,t)$ des Ortes und der Zeit beschreiben. Seine Zeitentwicklung gehorcht der zeitabhängigen **Schrödingergleichung**:

$$j\hbar \frac{\partial \psi(x,t)}{\partial t} = \left\{ -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2}{\partial x^2} + V(x,t) \right\} \psi(x,t)$$



Erwin Schrödinger
(1887-1961)

mit $\hbar = h/2\pi = 1.055 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$; $j^2 = -1$

$\psi(x,t)$ heißt **Wellenfunktion** des Teilchen

Die Schrödingergleichung

$$j\hbar \frac{\partial \psi(\mathbf{x}, t)}{\partial t} = \left\{ -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2}{\partial \mathbf{x}^2} + V(\mathbf{x}, t) \right\} \psi(\mathbf{x}, t)$$

Direkte Folgerungen:

Ist $\psi(\mathbf{x}, t_0)$ bekannt, so folgt eindeutig $\psi(\mathbf{x}, t)$ für alle $t > t_0$
(Lösung des Anfangswertproblems)

- keine Differentialgleichung mit konstanten Koeffizienten

—→ mathematisch eher hässlich und eine allgemeine analytische Lösung ist unmöglich

-sieht ähnlich aus wie eine Diffusionsgleichung, z.B. Wärme: $\frac{\partial T(\mathbf{x}, t)}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T(\mathbf{x}, t)}{\partial \mathbf{x}^2}$

—→ aber komplett andere (wellenartige) Lösungen durch das imaginäre j

Linearität der Schrödingergleichung

$$j\hbar \frac{\partial \psi(\mathbf{x}, t)}{\partial t} = \left\{ -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2}{\partial \mathbf{x}^2} + V(\mathbf{x}, t) \right\} \psi(\mathbf{x}, t)$$

Wenn $\psi_1(\mathbf{x}, t)$ und $\psi_2(\mathbf{x}, t)$ Lösung der S-Glg.,
dann auch $\psi(\mathbf{x}, t) = \alpha\psi_1(\mathbf{x}, t) + \beta\psi_2(\mathbf{x}, t)$

$$\alpha j\hbar \frac{\partial \psi_1(\mathbf{x}, t)}{\partial t} + \beta j\hbar \frac{\partial \psi_2(\mathbf{x}, t)}{\partial t} = \alpha \left\{ -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2}{\partial \mathbf{x}^2} + V(\mathbf{x}, t) \right\} \psi_1(\mathbf{x}, t) + \beta \left\{ -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2}{\partial \mathbf{x}^2} + V(\mathbf{x}, t) \right\} \psi_2(\mathbf{x}, t)$$

→ wir können Lösungen überlagern (Superpositionsprinzip)
gleiches Spiel wie bei elektromagnetischen Feldern und Wellen

...und was bringt uns jetzt die Wellenfunktion ????

2. Postulat der Quantenmechanik:

Die Wellenfunktion ist nicht observabel (=keine Meßgröße); ihr Absolutquadrat

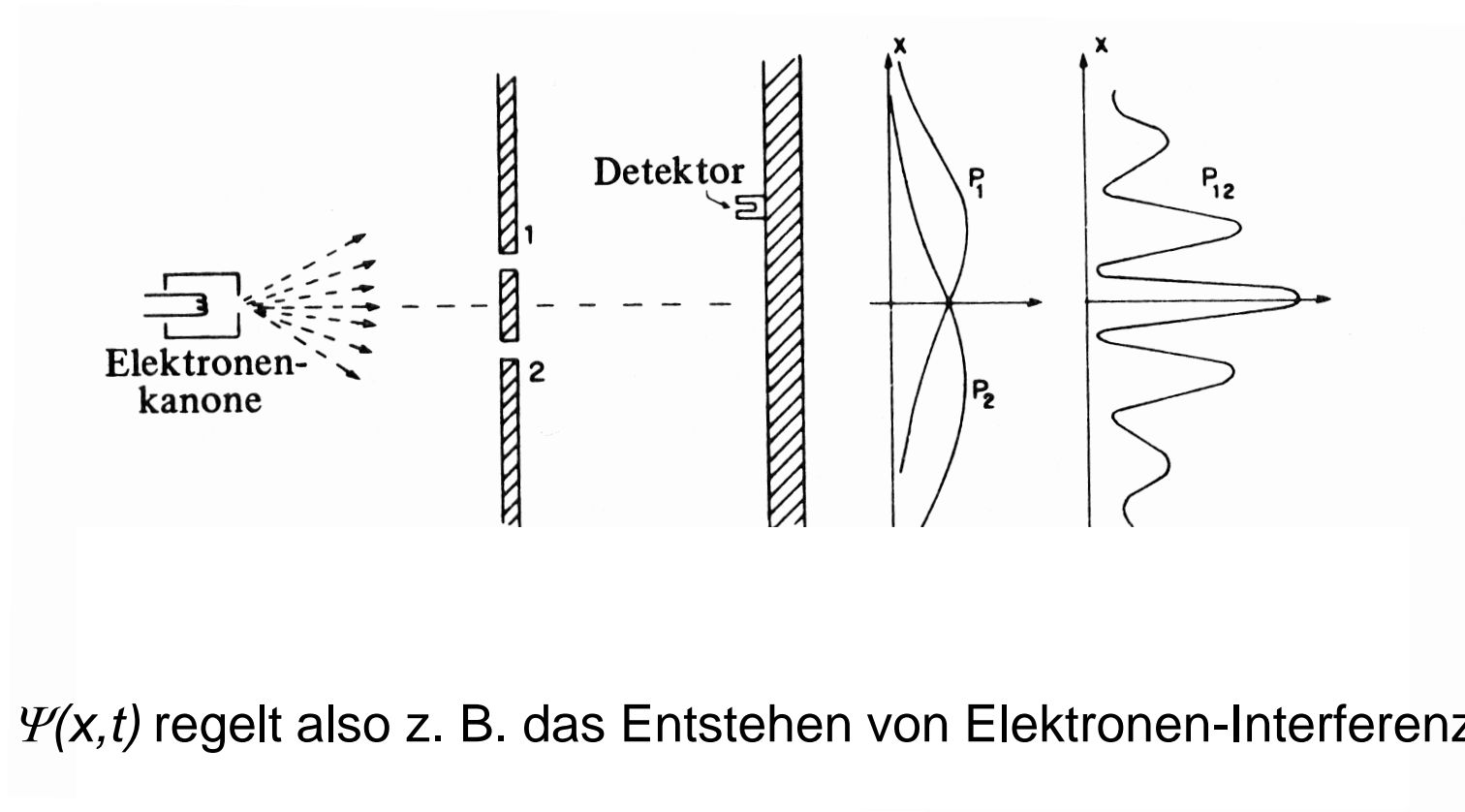
$$\rho(\mathbf{x}, t) = |\psi(\mathbf{x}, t)|^2 = \psi^*(\mathbf{x}, t)\psi(\mathbf{x}, t)$$

ist proportional zur Dichte der Aufenthaltswahrscheinlichkeit des Teilchens im Raum.

... nehmen wir als Meßgröße den Ort:

Die Wellenfunktion $\Psi(x,t)$

SS 2016
FE 1.34



... aha, $\Psi(x,t)$ regelt also z. B. das Entstehen von Elektronen-Interferenzmustern

$\rho(x,t)$ ist messbar, $\Psi(x,t)$ selbst aber NICHT !