

Physik für Großeltern und andere Wissbegierige

Universität Bonn, Wintersemester 2024/25

Dieter Meschede

Themenblock 1: Elektrizität und Magnetismus

1. 24.10. Ladungen, Felder und Ströme
2. 31.10. Zwei Seiten derselben Medaille: Elektromagnetismus
3. 07.11. Elektromagnetismus: Materialien, Wellen, Kontrolle

Vorbemerkung:

Wir haben gesehen

- **Ladungen** erzeugen **elektrische Felder**, die auf Ladungen **Kräfte** ausüben (V01).
- **Ströme** erzeugen **magnetische Felder**, die auf (bewegte) Ladungen **Kräfte** ausüben (V02).
- **Induktion**: veränderliche magnetische Felder rufen elektrische Felder hervor (V02).

Aber auch:

„Elektrizität“ ist die Grundlage aller Informationstechnologie (→“IT“)

„Das 20. Jhdt. war das Jahrhundert des Elektrons“

Voraussetzung: die präzise Kontrolle von Ladungen und Strömen

Vorlesung am 07.11.2024

Elektromagnetismus: Materialien, Wellen, Kontrolle

- Magnetische Materialien
- Wellen
- Kontrolle: Grundlage unserer IT-Welt

Ausschnitte aus dem Programm für heute:

- Wie hängen magnetische Materialien mit magnetischen Feldern zusammen?
- Elektrische Energie schwingen lassen
- Ein Wagnis: Was James Maxwell vermutete
- Hertz Übertragung elektromagnetischer Wellen
- Paul-Falle
- Flash-Memory, Transistor

Vorlesung am 07.11.2024

Elektromagnetismus: Materialien, Wellen, Kontrolle

- **Magnetische Materialien**
- Wellen
- Kontrolle: Grundlage unserer IT-Welt

Magnetische Materialien: Was macht einen natürlichen Magneten aus?

(Kompassnadel historisch aus Magnetit)



Magnetit oder Magneteisenstein
(Wikipedia)

seit der Antike bekannt
(Griechenland, China)

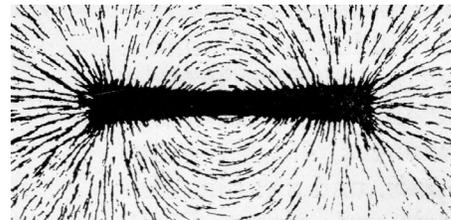
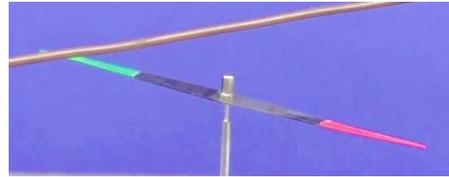
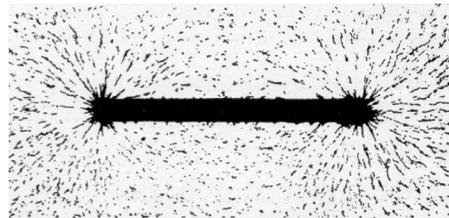
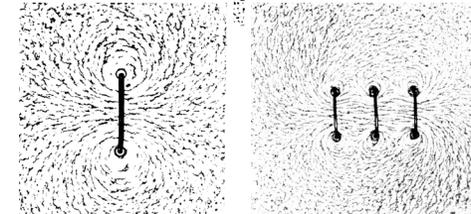
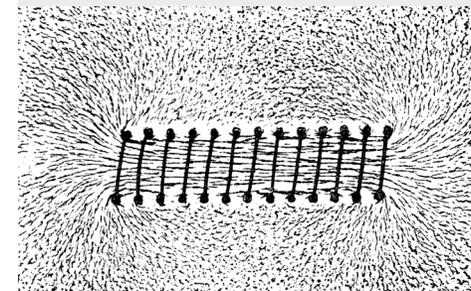
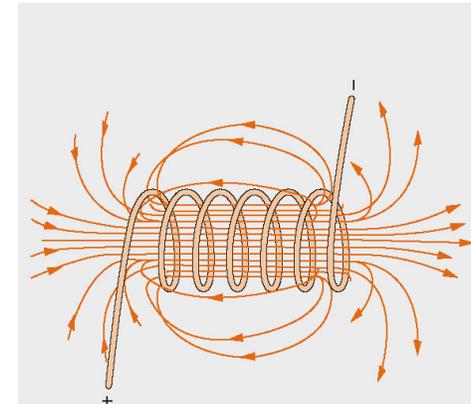


Illustration der magnetischen
Feldlinien mit Eisenfeilspänen



Sehr ähnlich der langen Spule!

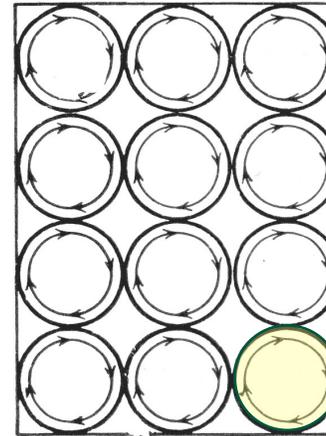
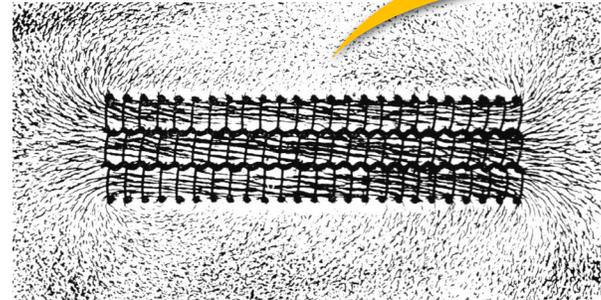
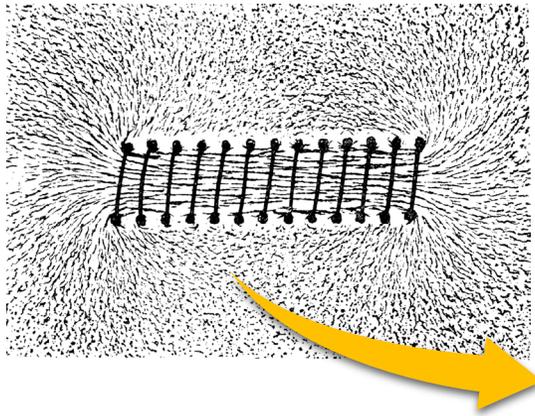


Gerthsen Physik,
© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2016

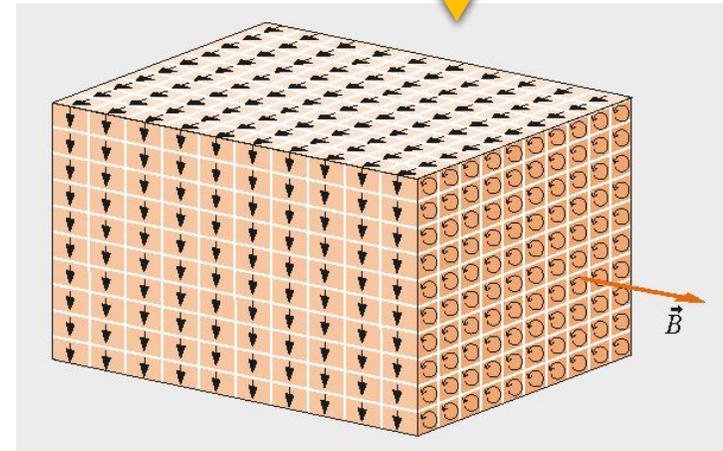
Eisenfeilicht-Bilder aus *Elektrizitätslehre* R.W. Pohl
Springer-Verlag Berlin 1927-55

Wie bringen wir Spule und Stabmagneten zusammen?

Mit dem Strombild für magnetische Materialien von Ampère:

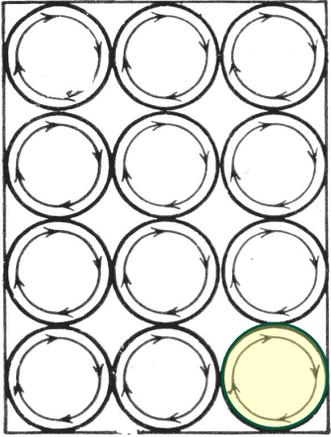


„Elementarströme“
„Elementarmagnete“



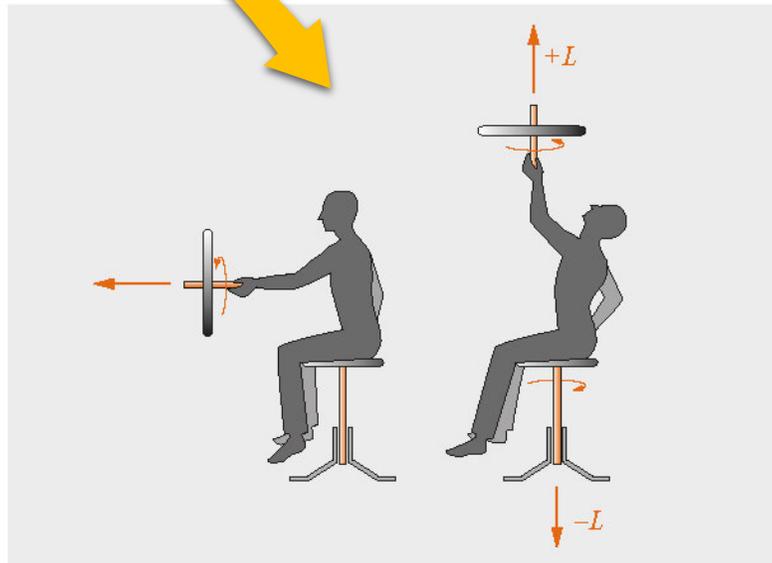
Bilder aus *Elektrizitätslehre* R.W. Pohl
Springer-Verlag Berlin 1927-55

Gerthsen Physik,
© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2016

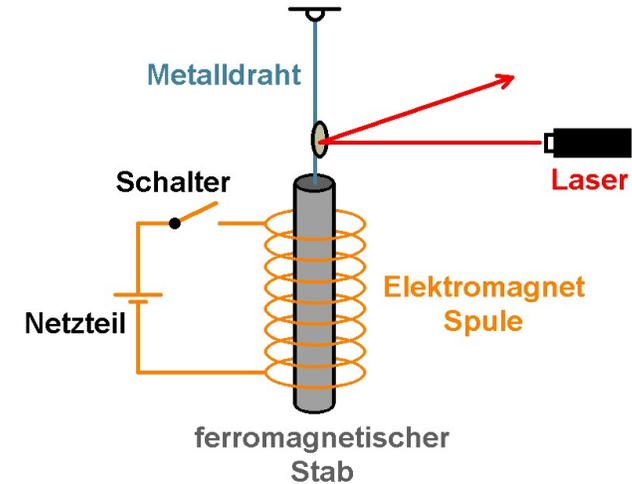


Wenn es den Ringstrom gibt, sollte er auch Kreiseigenschaften haben.

Mechanisches Analogon



Wenn man den Strom in der Spule an- oder abschaltet, sollte sich der magnetisierte Körper drehen ...



<https://stoppi-homemade-physics.de/einstein-de-haas-effekt/>

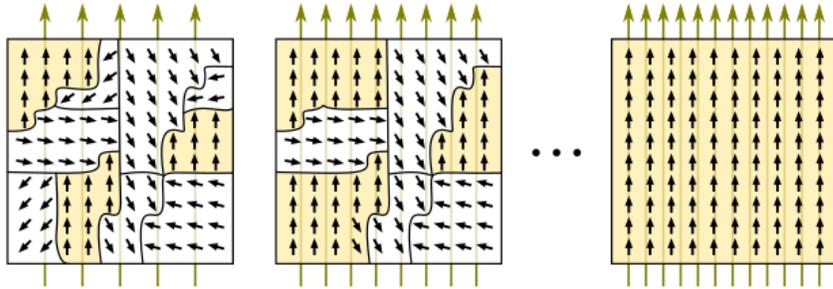
Er tuts!!

A. Einstein und W. J. de Haas 1915
Phys. Techn. Bundesanstalt Berlin
(Einsteins einziges Experiment)



Wir unterscheiden:

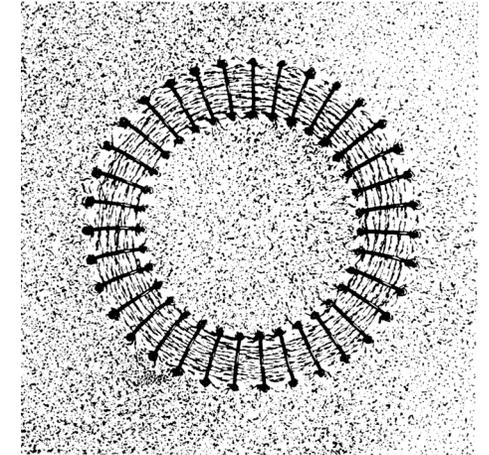
- Hartmagnetische Materialien (Neodym-Magnete u.a., starke Stabmagnete)
- **Weichmagnetische Materialien („Weicheisen“, Kobalt, etc.)**



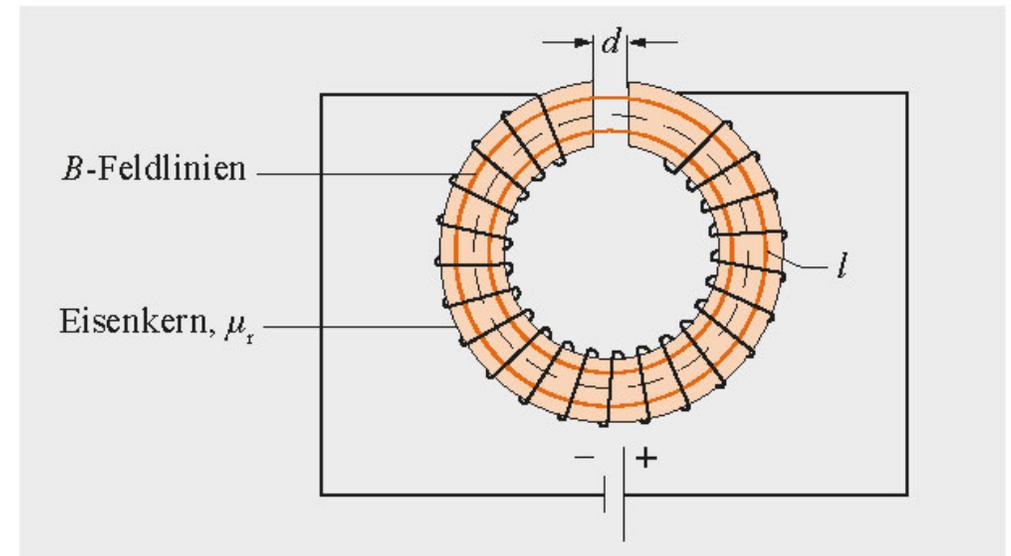
Weißsche Bezirke (Wikipedia)



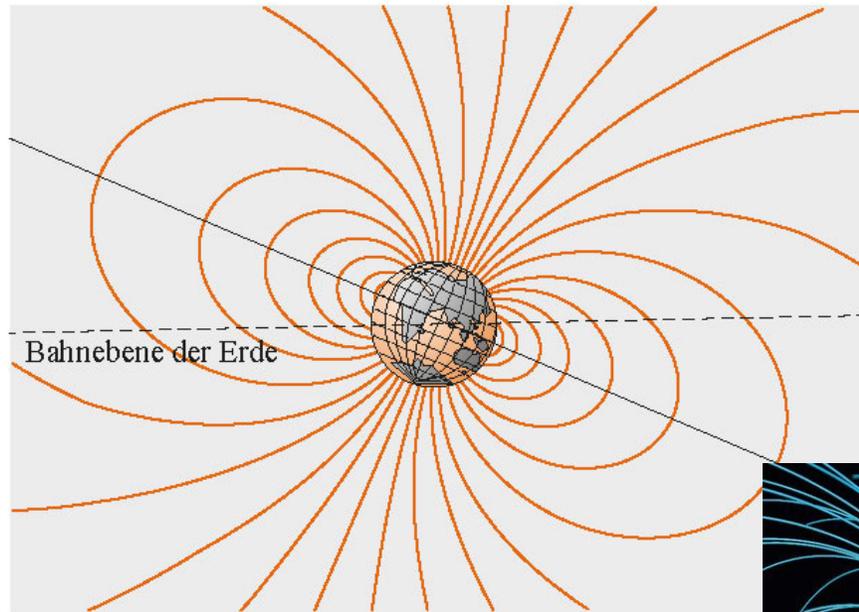
Weißsche Bezirke werden durch ein externes Magnetfeld verdrängt (Wikipedia)



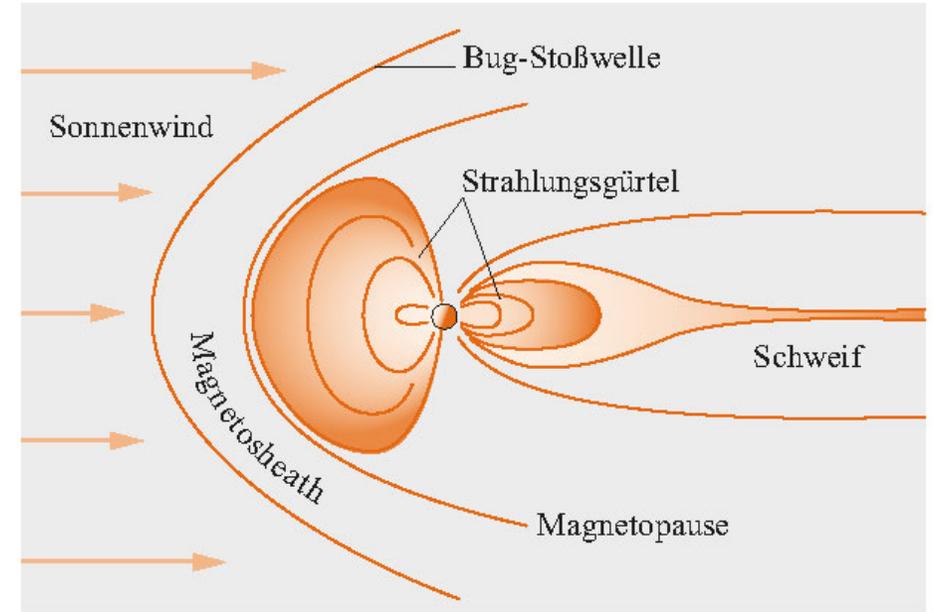
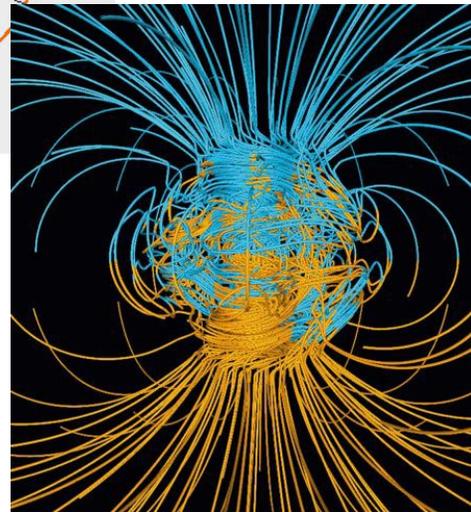
Wichtige Anwendung:
Elektromagnet
(→ Luftspalt!)



Und noch ein wichtiger Magnet:



Stand der Forschung:
Das Erdmagnetfeld wird zu 95% aus
Strömen im Erdinnern (Eisenkern) erzeugt



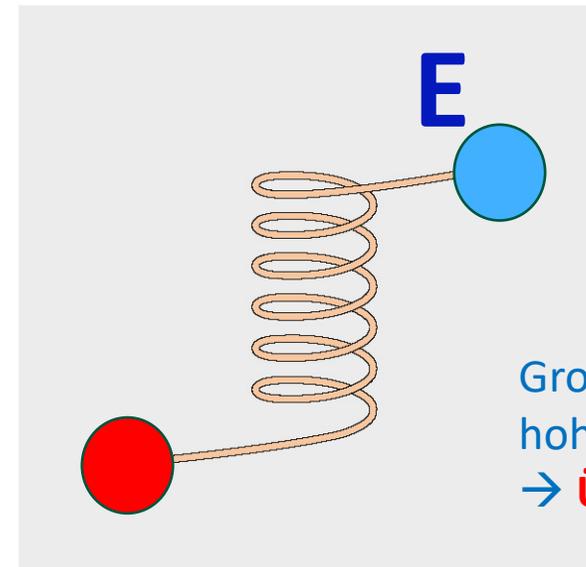
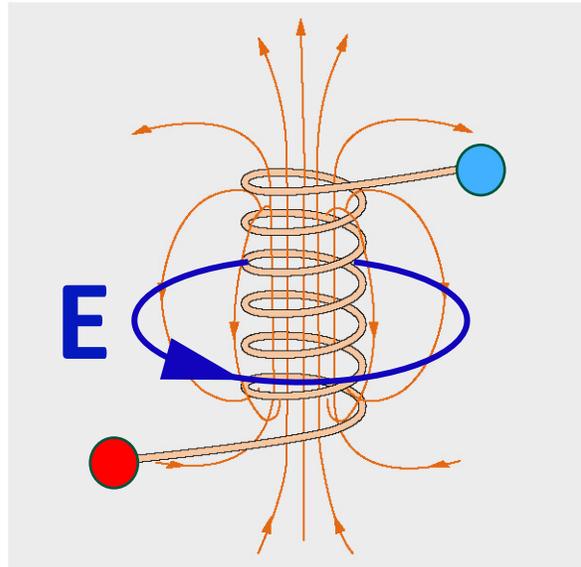
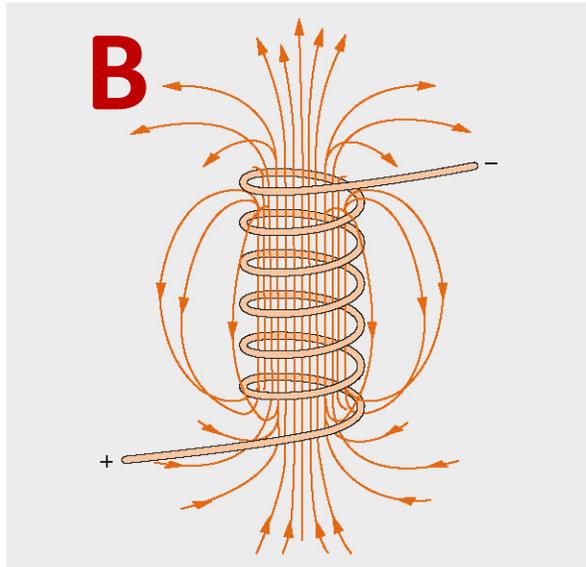
Numerische Simulation
des Geodynamos
© NASA

Vorlesung am 07.11.2024

Elektromagnetismus: Materialien, Wellen, Kontrolle

- Magnetische Materialien
- **Wellen**
- Kontrolle: Grundlage unserer IT-Welt

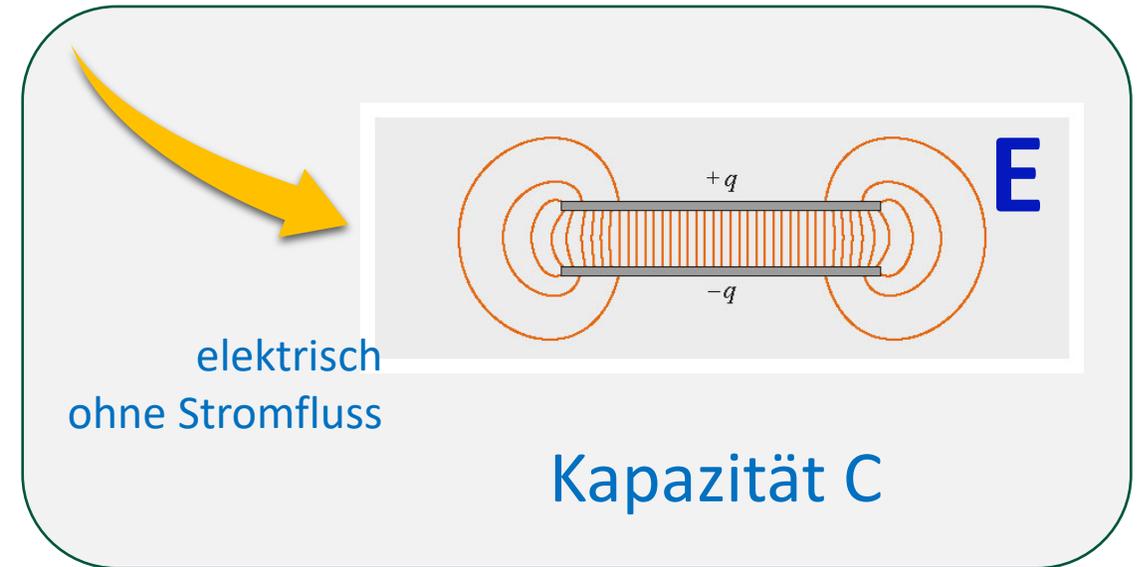
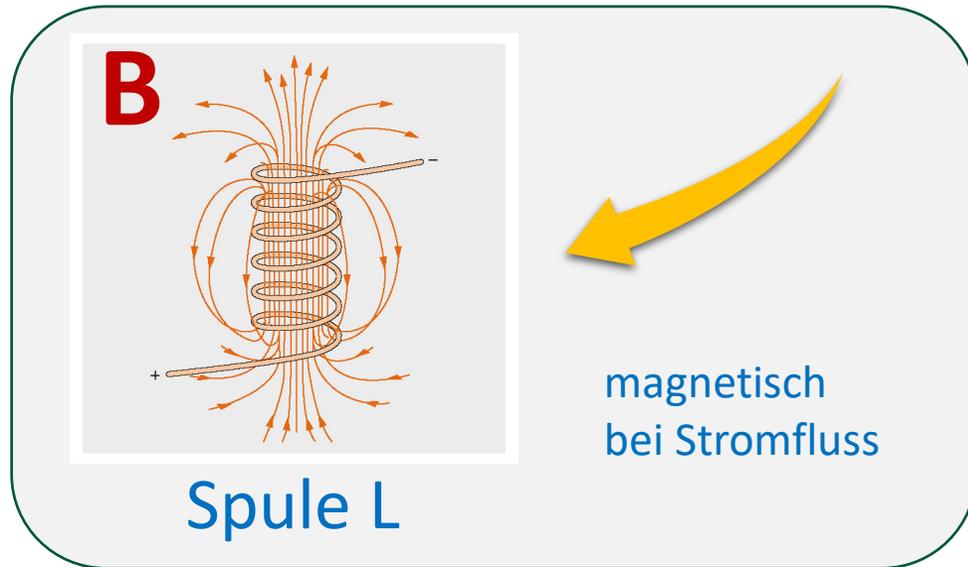
Zur Erinnerung: Abschalten eines Magnetfeldes („Funkeninduktion“)



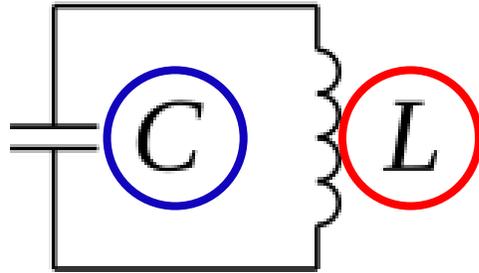
Öffnen eines Schalters lässt das Magnetfeld zusammenbrechen

Die beiden wichtigsten Bauelemente (abgesehen von Widerständen R):

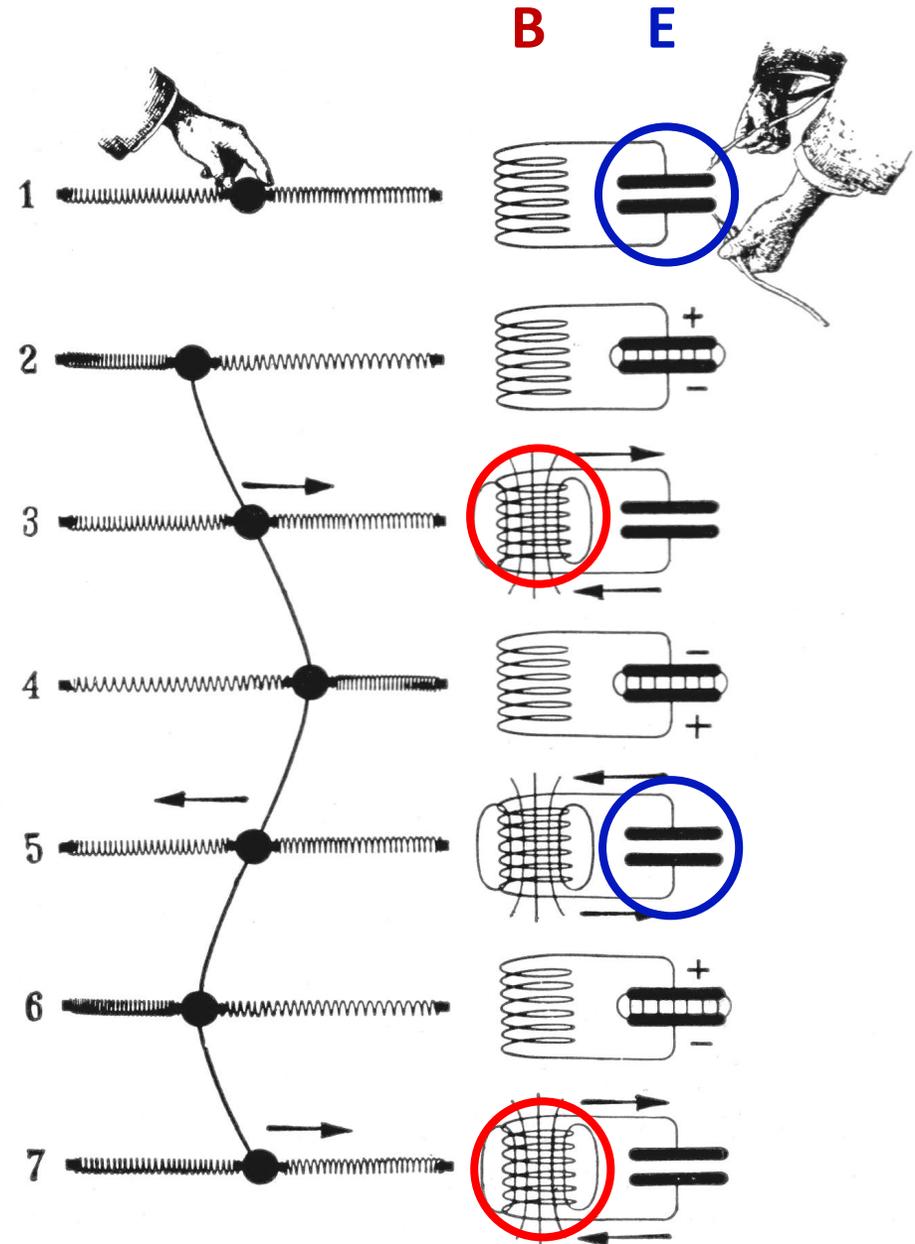
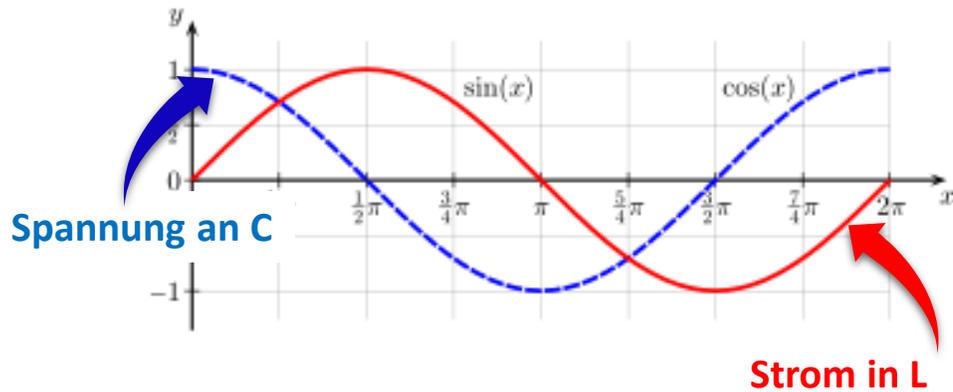
Speichern Feldenergie



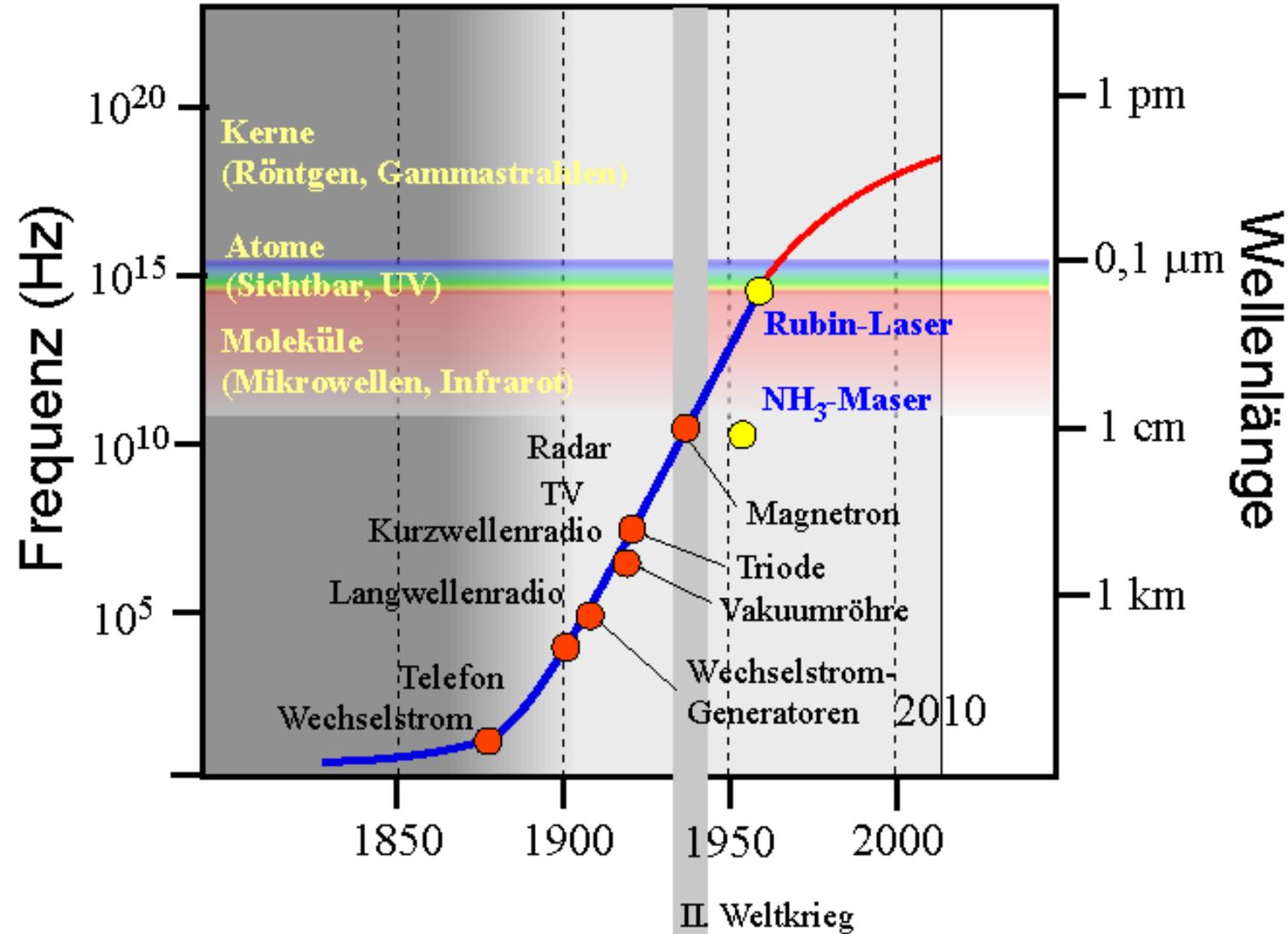
Grundlage des Schwingkreises !



Die (Feld-)Energie schwingt zwischen L und C hin und her!



Kohärente elektromagnetische Strahlung - geschichtliche Entwicklung

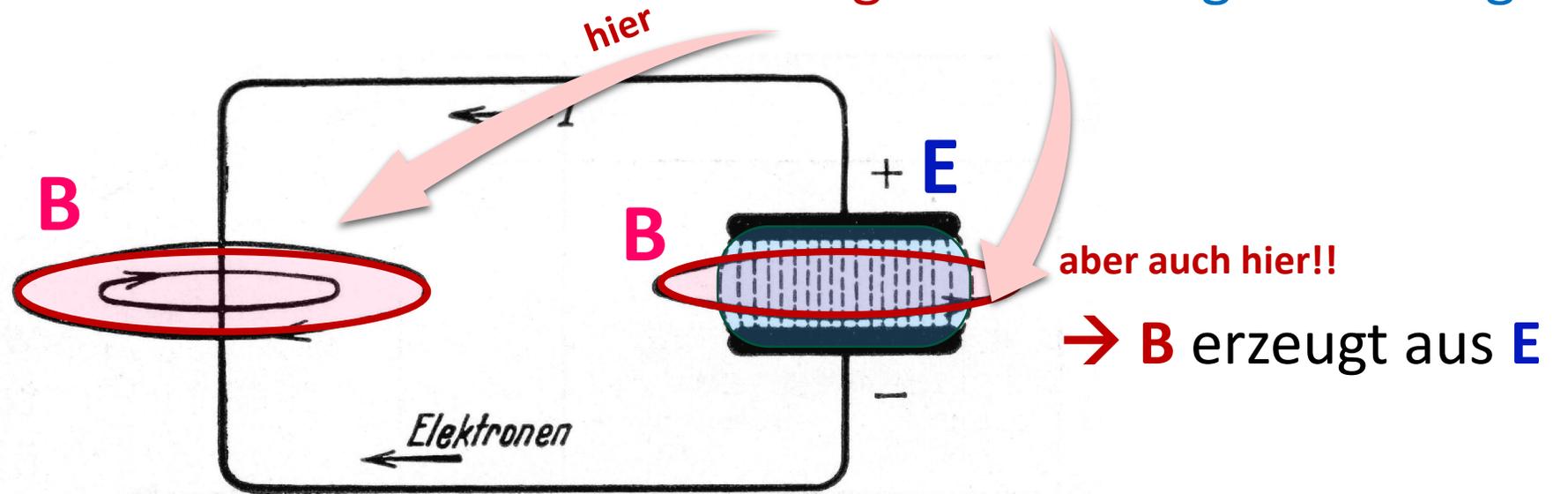




J. C. Maxwell 1831 - 1879

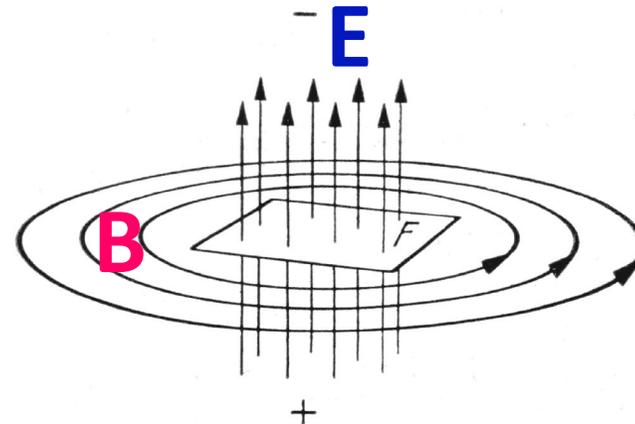
Nochmal ein Schritt zurück: Die Felder beim Entladen eines Kondensators
 (James Clerk Maxwells Überlegung)

Magn. Feld **B** trägt die Energie



Maxwells Verallgemeinerung des Induktionsgesetzes:
 Ein sich änderndes **E-Feld** erzeugt ein **B-Feld**

d.h. auch:
 Materie wird dafür nicht benötigt!



Zwei etwas irritierende Fragen:

- (i) Was fließt eigentlich im elektrischen Stromkreis?
 - Na klar, der Strom wird von Ladungen getragen, ($A=C/s$!!), wir können eine „Driftgeschwindigkeit“ definieren.
 - Aber: Wie fließt die Energie im Schwingkreis
Kondensator → Spule Kondensator → Spule → ...

**** Die Feldenergie wird von den Feldern transportiert, die die Drähte umgeben!!**

- (ii) Was passiert, wenn ich „mit dem Strom synchron mitlaufe“?
 - Dann verschwindet doch das Magnetfeld des Stroms! Widerspruch?!
 - Die Physik kann nicht vom Bezugssystem abhängen (Einstein)!!
 - Die Lösung: Der positiv geladene, ruhende Draht erfährt eine „Lorentz-Kontraktion“
→ Der Draht insgesamt wird dadurch negativ geladen und erzeugt statt B ein E-Feld!

Maxwells Erkenntnis:

B erzeugt aus **E**

E erzeugt aus **B**

$$\begin{aligned}\nabla \cdot \mathbf{E} &= \frac{\rho}{\epsilon_0} \\ \nabla \cdot \mathbf{B} &= 0 \\ \nabla \times \mathbf{E} &= -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \\ \nabla \times \mathbf{B} &= \mu_0 \mathbf{j} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}\end{aligned}$$

Ladungen

Ströme

Ohne Ladungen und Ströme:

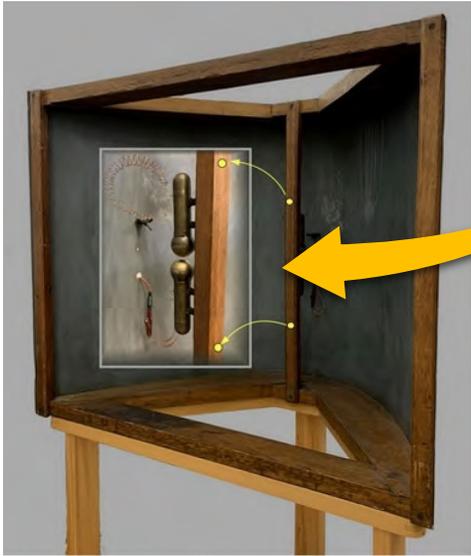
$$\nabla \cdot \mathbf{E} = 0$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

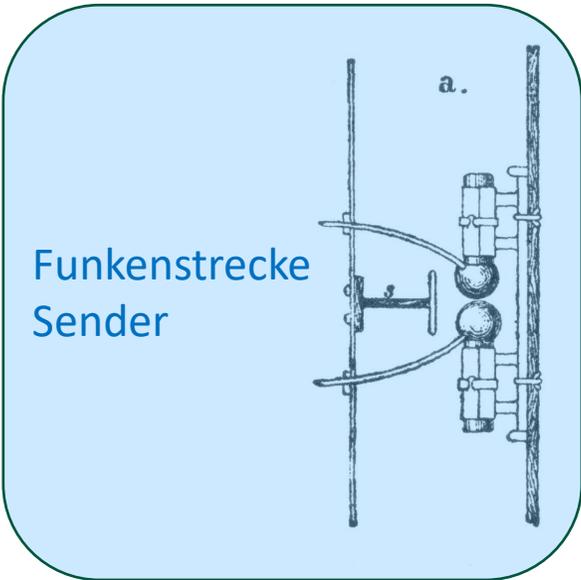
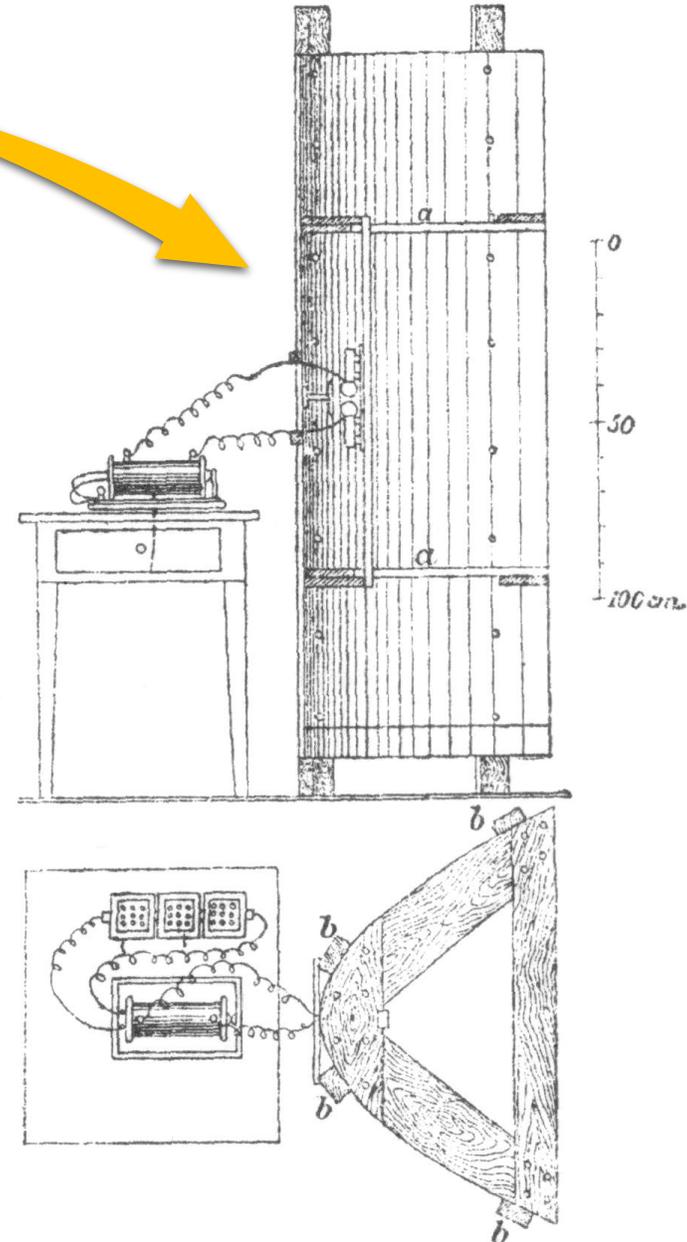
$$\nabla \times \mathbf{B} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$$

- vollkommene Symmetrie **E** und **B**
- sagt Wellenbewegung mit der **Lichtgeschwindigkeit c** vorher!!

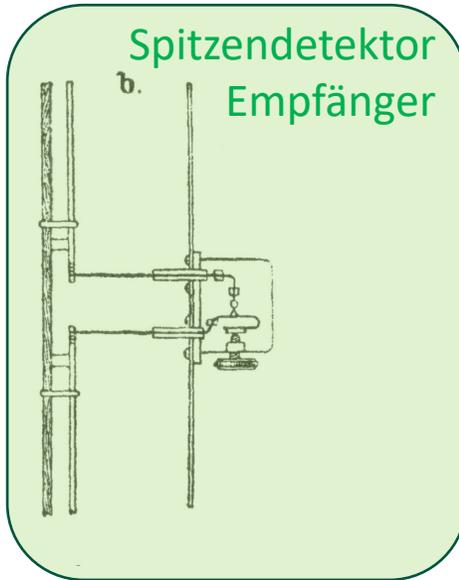


Die Apparatur von Heinrich Hertz

1. Fassung: TH Karlsruhe (1887)
Hörsaalsammlung Universität Bonn (~ 1890)



Funkenstrecke
Sender



Spitzendetektor
Empfänger



Die Apparatur von Heinrich Hertz (~ 1890)

Hörsaalsammlung Universität Bonn

1. Fassung: TH Karlsruhe 1887

Senden



Sendedipol

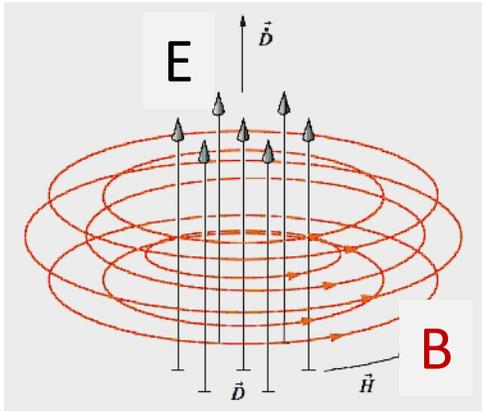
Empfangsdipol

Parabolspiegel

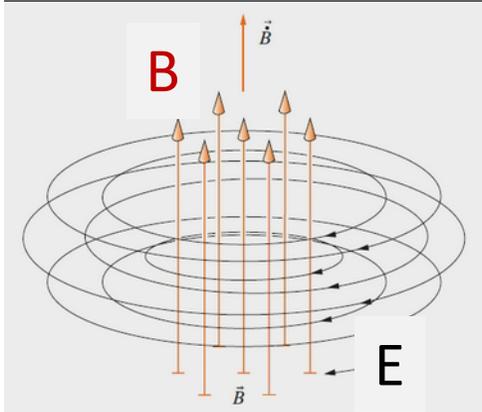


Funkeninduktor

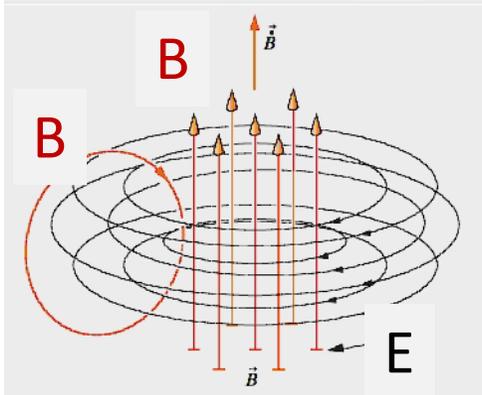
Nachweis, z. B.
Funkenstrecke



E ändert sich,
B wird generiert



B ändert sich
E wird generiert

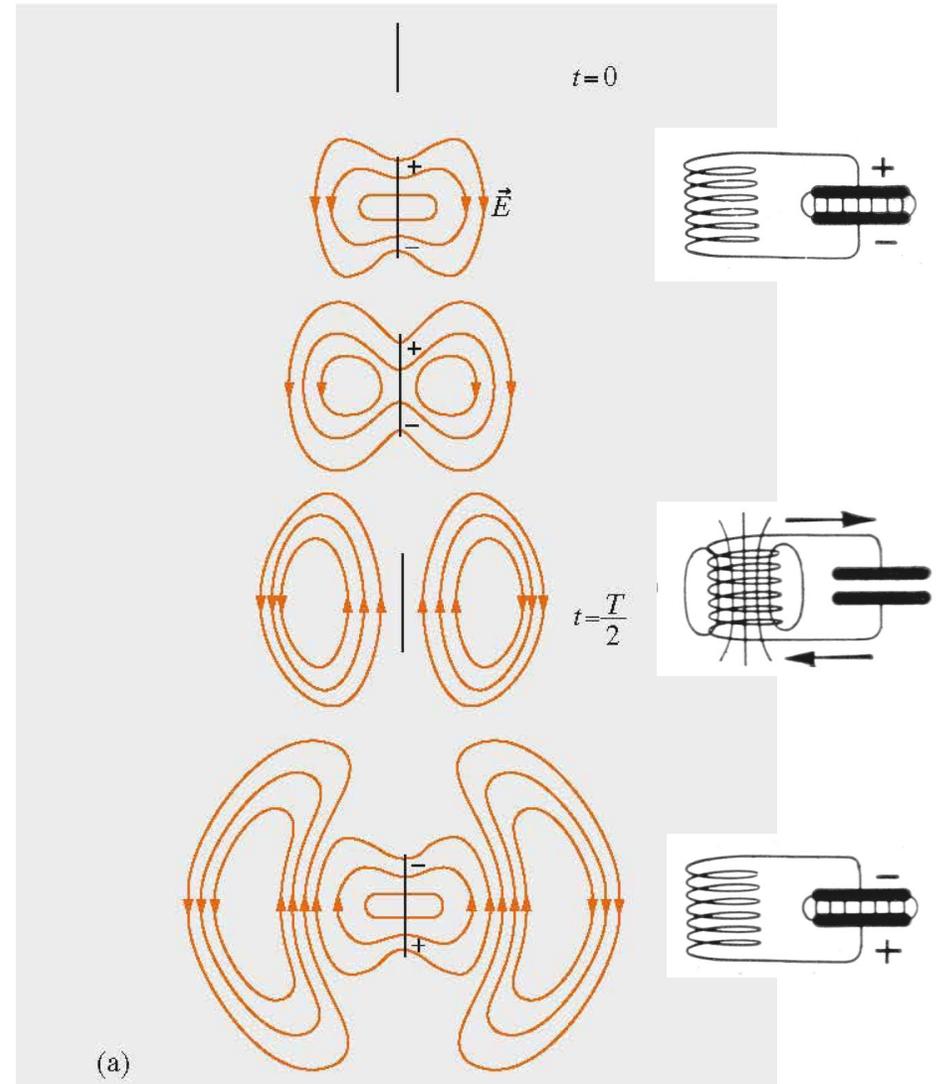


B ändert sich
E wird generiert
E ändert sich
B wird generiert

...

Die E/B-Feldlinien
lösen sich von der
Antenne ab!

Dieses Bild stammt
bereits von
Heinrich Hertz





Heinrich Hertz 1857 - 1894

- 1878 Promotion bei Helmholtz
- 1883 Privatdozent in Kiel
- 1885-89 Professor TH Karlsruhe
- 1889-94 Professor Uni Bonn



Vorlesung am 07.11.2024

Elektromagnetismus: Materialien, Wellen, Kontrolle

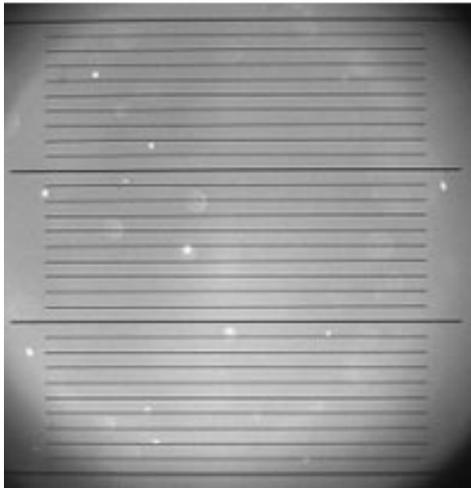
- Magnetische Materialien
- Wellen
- **Kontrolle: Grundlage unserer IT-Welt**

Meilensteine der Informationstechnologie:

- Elementarladung bestimmen
- Ladungen Kontrollieren:
Ionen und Elektronen speichern
- Halbleiter
- Flash-Speicher

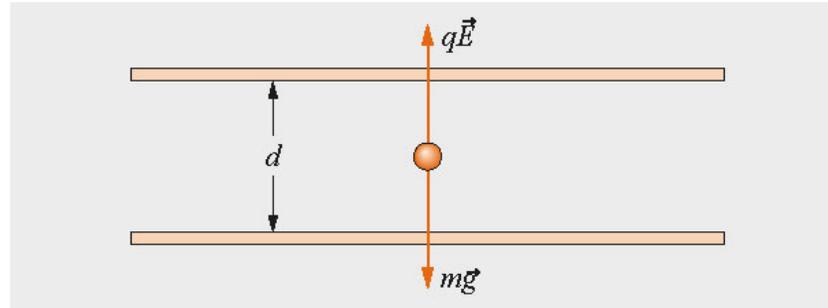
Schlüsselexperiment 1911: Die quantisierte Ladung:

Millikan-Versuch



Die Gesamthöhe der Skala ist knapp 1 mm. Die hellen Flecken sind die Öltröpfchen.

© Wikipedia



- Im Kondensator sinken kleine Öltröpfchen (Ladung q) langsam durch die Schwerkraft $F_S = mg$ nach unten. Die Masse m kann aus dem Reibungsgesetz bestimmt werden (Luftreibung begrenzt die Fallgeschw.).
- Auf das Tröpfchen wirkt die elektrische Kraft $F_E = qE = q \cdot (U/d)$.

Ergebnis:

- Aus $F_S = F_E$ folgt $q = mgd/U$
- Es treten nur Werte auf $q = n \cdot q_0$



Robert Millikan 1868 – 1953
Nobelpreis 1924

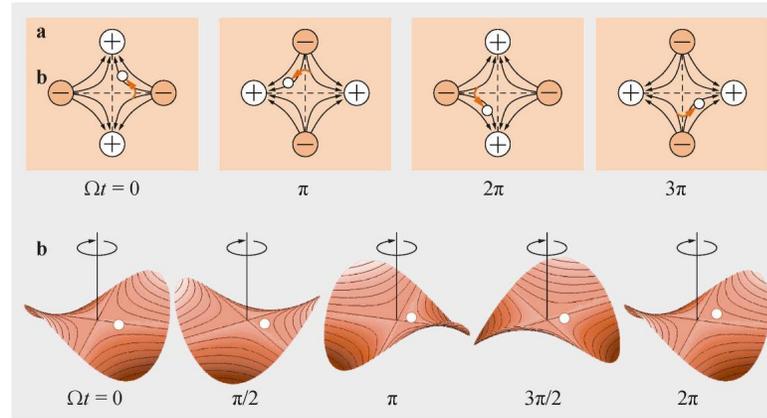
Die Elementarladung
hat den Wert

$$q_0 = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

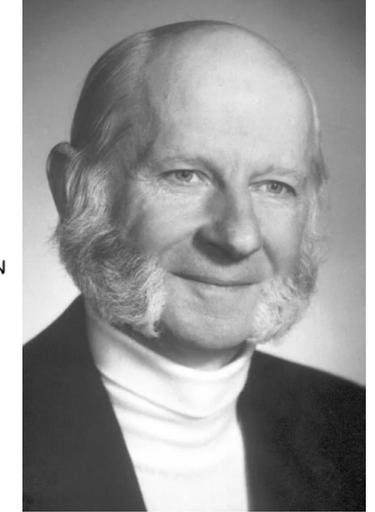
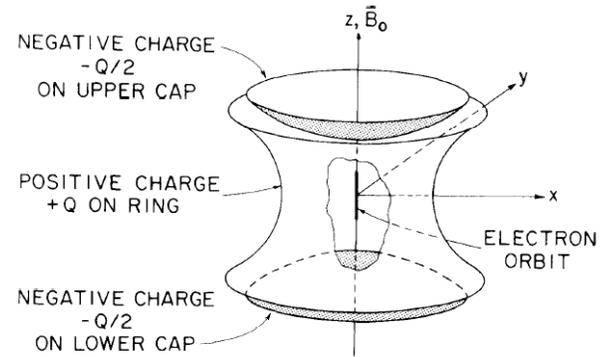
Eine einzelne Ladung kontrollieren



Wolfgang Paul
1913-1993



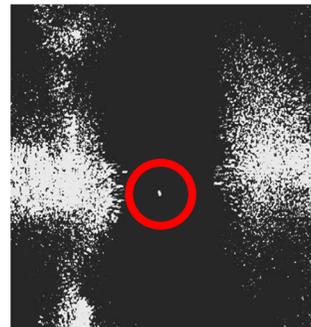
Das Konzept: die Paul-Falle



Hans Dehmelt
1922 - 2017

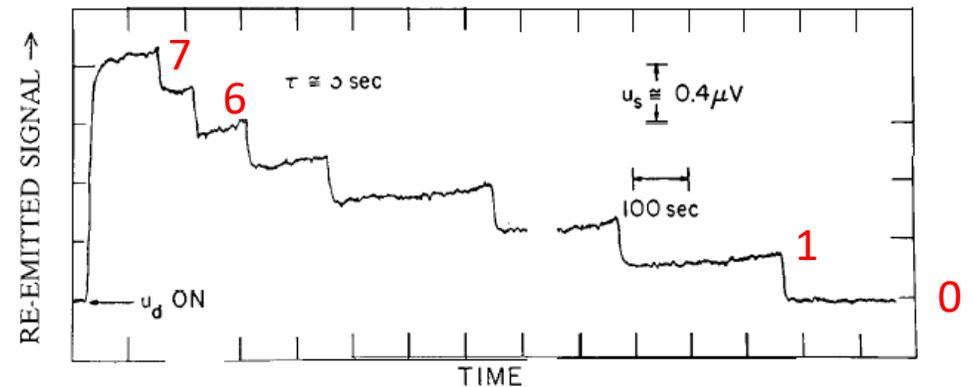
Das **erste** Bild eines fluoreszierenden Barium-Ions (**1980**)

© Werner Neuhauser



Grundlage des Quantencomputer mit gespeicherten Ionen

der Elektronen



H. Dehmelt, Nobelpreis-Vortrag

Zwischenbemerkung:

Wir hatten gesehen

- → Erzeugung von „Elektrizität“ ist Grundlage der Industrie seit ~ 1890
(Starkstrom-, Hochspannungstechnik; Ströme sind wie ein kontinuierliches Medium)
- → Das mikroskopische Verständnis der Elektrizität (Ladungen, Bewegung von Ladungen in geeigneten Materialien) hat den Weg zur Informationstechnik geöffnet

Deshalb auch:

„Elektrizität“ ist die Grundlage aller Informationstechnologie (→“IT“)

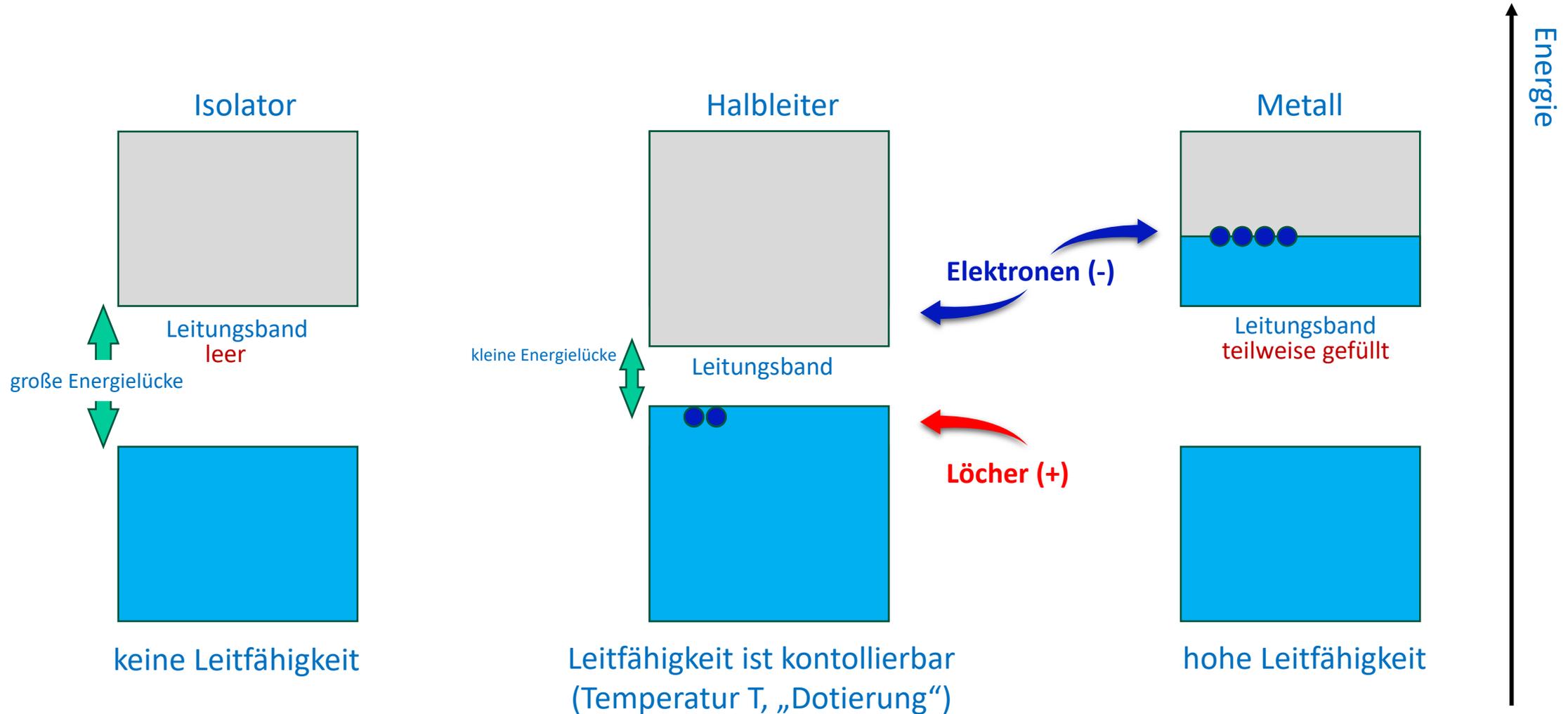
„Das 20. Jhdt. war das Jahrhundert des Elektrons“

Voraussetzung: die präzise Kontrolle von Ladungen und Strömen

Was ist ein Halbleiter?

Einfaches Modell: das Bändermodell

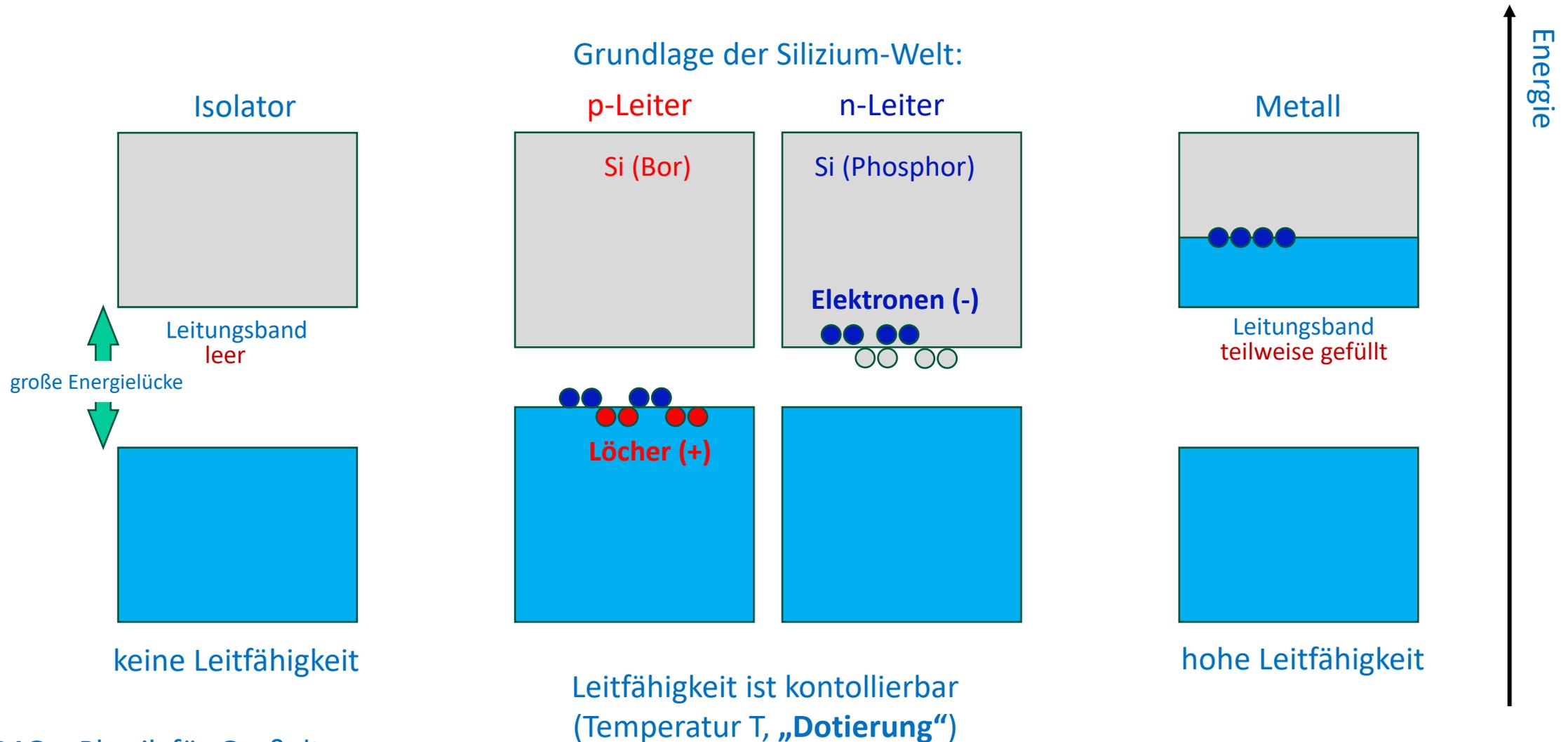
(Band: Ein Kasten, in dem sich Ladungen bewegen können)



Was ist ein Halbleiter?

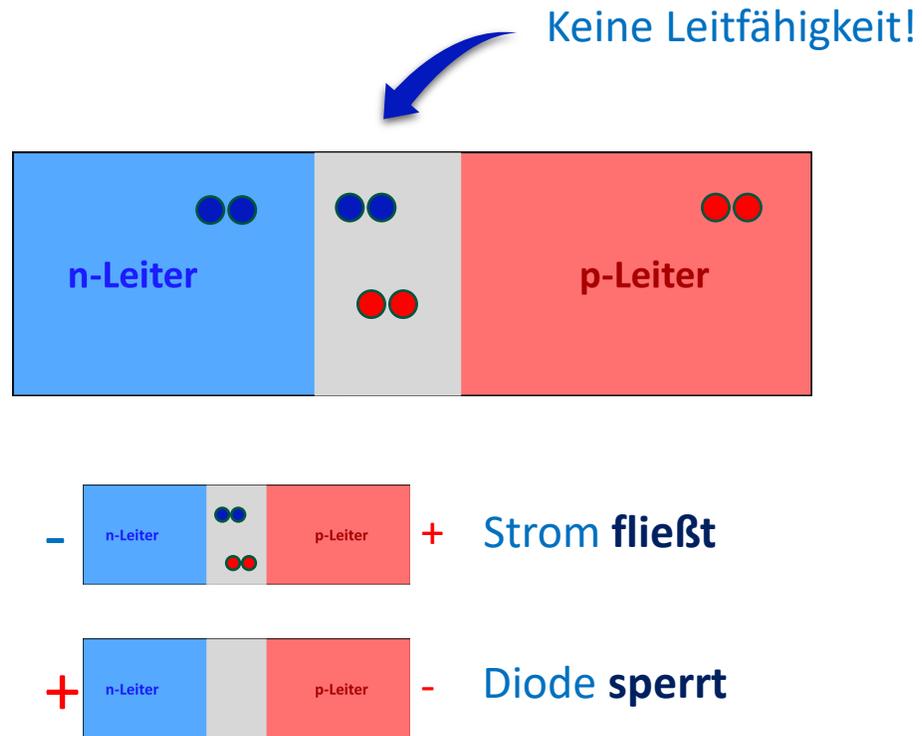
Einfaches Modell: das Bändermodell

(Band: Ein Kasten, in dem sich Ladungen bewegen können)

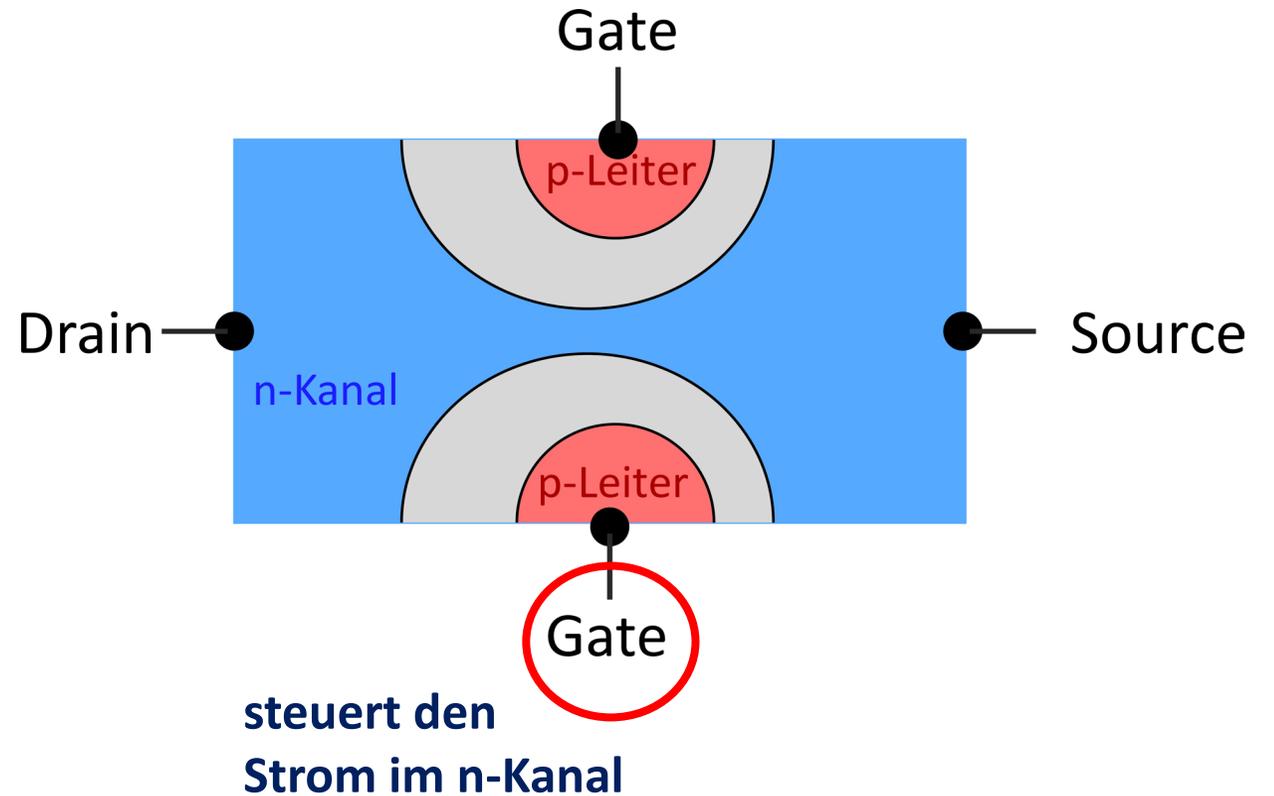


Zwei der wichtigsten Bauelemente:

Diode



Feldeffekt-Transistor (FET)



So geht es milliardenfach (!!) in Ihrem **USB-Stick** zu:

(ein Gbyte großes Feld mit 0 und 1)

Konzept:
wie Feldeffekt-Transistor
(„Flash“- , „SSD“-Speicher)

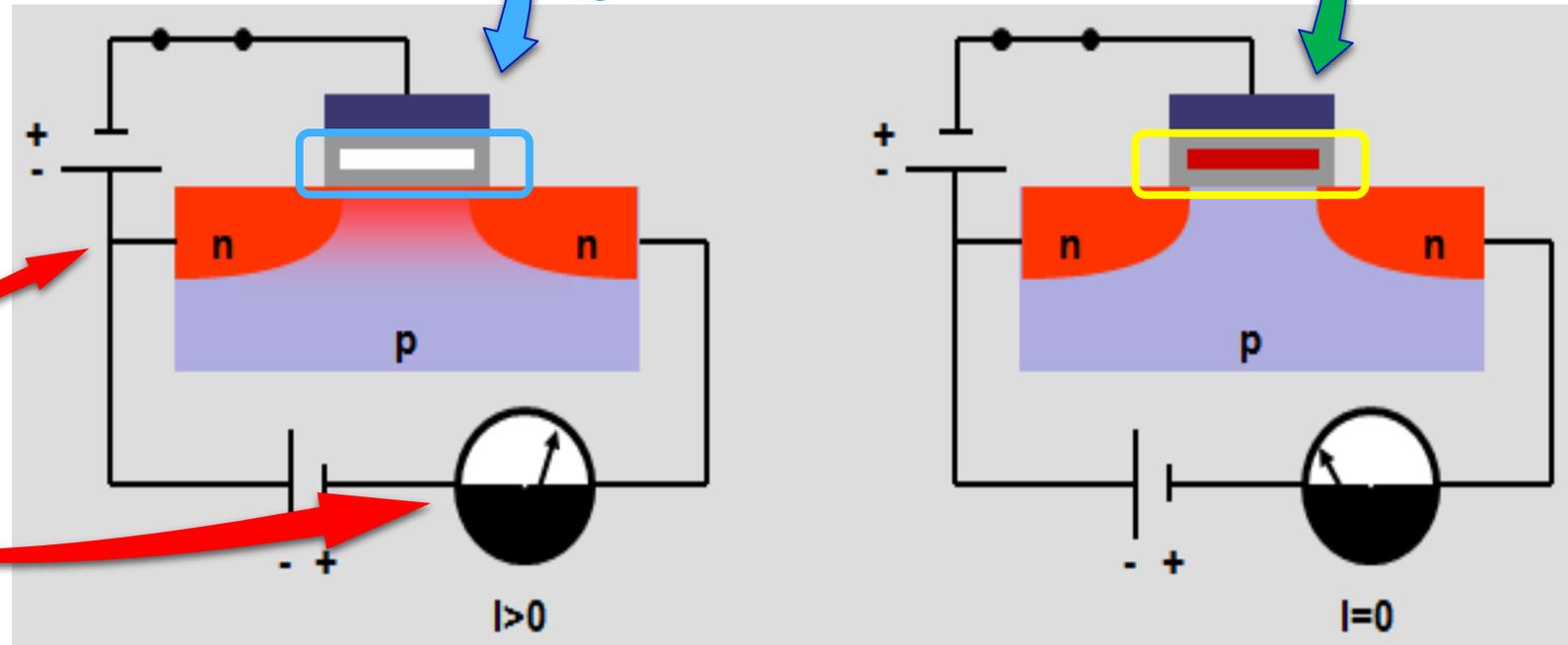
„0“

ohne Ladung,
„gelöscht“

„1“

mit Ladung
(~ 10.000-100.000 e)

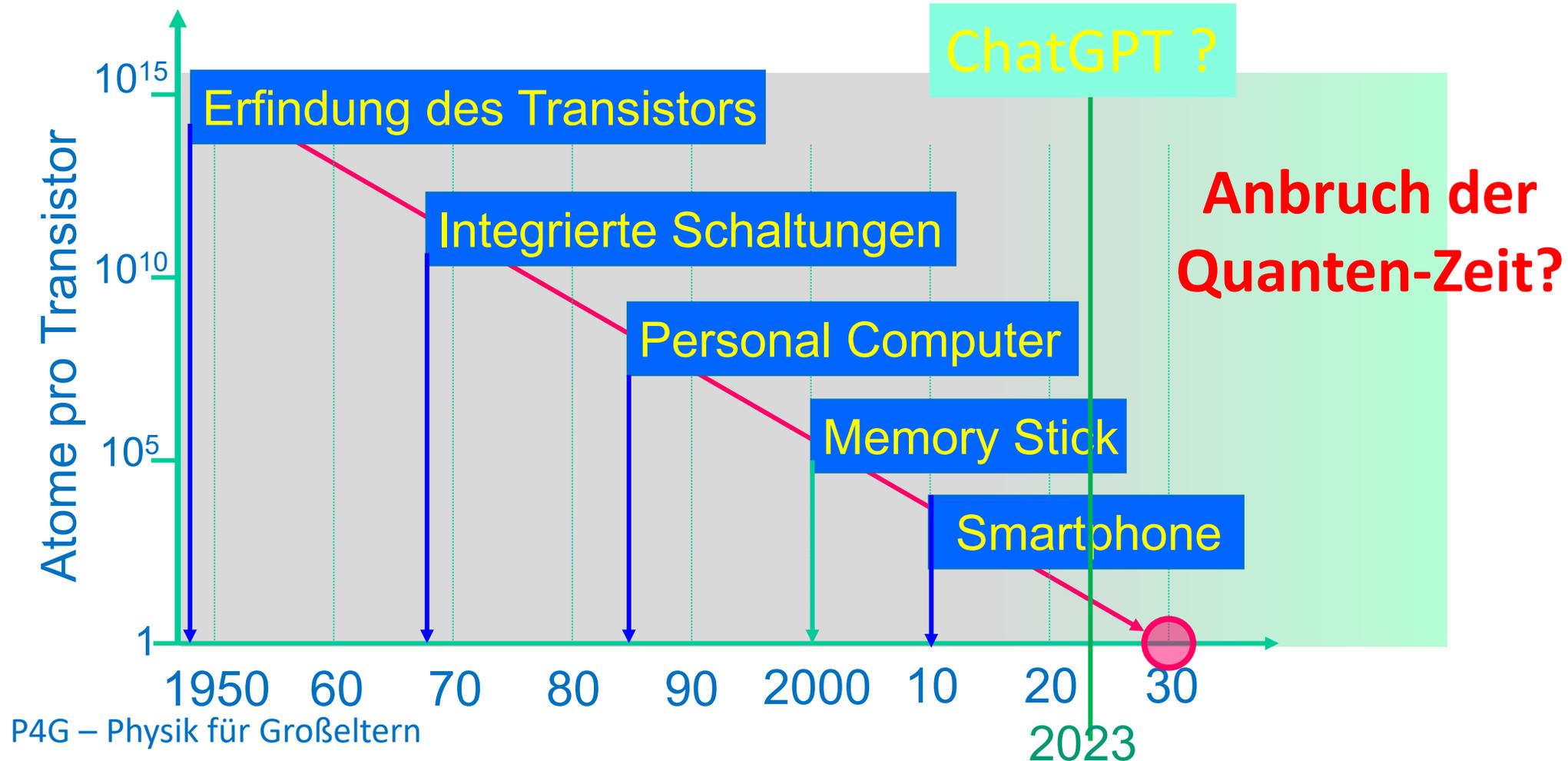
Hier fließt der
(n-)Auslestrom



www.digicammuseum.de/technik/speicher/flash-speicher/

An der Grenze zur Quantentechnologie? Wo kommen wir her?

Gordon Moores Gesetz: Immer näher an das Quanten-Limit!



Damit sind die drei Vorlesungen zum Thema Elektrizität abgeschlossen!

Was wir alles nicht besprochen haben:

- Plasmaphysik (im All, im Fusionsreaktor ...)
- jede Menge interessante und effiziente Sensoren/Messgeräte
- Ladungen an Oberflächen (Spiegel!)
- Gewitterphänomene, Ladungen in der Atmosphäre
- ...

Aber vielleicht haben Sie die gar nicht zu überschätzende Bedeutung für unsere technische Welt in jeder Hinsicht erfassen können.

Und: Physikalisch wird diese „Welt“ vollständig* durch die Maxwell-Gleichungen beschrieben.