

Maxwell-Gleichung

Von Faraday zu Einstein

Y. Ulrich

24. Mai 2013

»das Tiefste und Fruchtbarste, das die Physik seit Newton entdeckt hat«

Inhalt I

Geschichte der Maxwell-Gleichung

Faradays Untersuchungen

Maxwells Gleichungen

Einstiens Interpretation

Maxwell'sche Gleichung und Lösungen

Einleitung

Elektrostatik

Magnetostatik

Licht

Nutzen der Maxwell-Gleichung

Quellen

Einführung

- └ Geschichte der Maxwell-Gleichung
 - └ Faradays Untersuchungen

Geschichte der Maxwell-Gleichung

Faradays Untersuchungen

- ▶ 1831-1838: Faraday untersuchte Elektrizität und Magnetismus

Einführung

└ Geschichte der Maxwell-Gleichung

 └ Faradays Untersuchungen

Geschichte der Maxwell-Gleichung

Faradays Untersuchungen

- ▶ 1831-1838: Faraday untersuchte Elektrizität und Magnetismus



Abbildung: M. Faraday

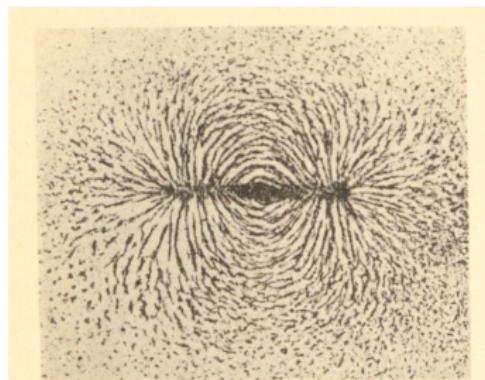
Einführung

└ Geschichte der Maxwell-Gleichung

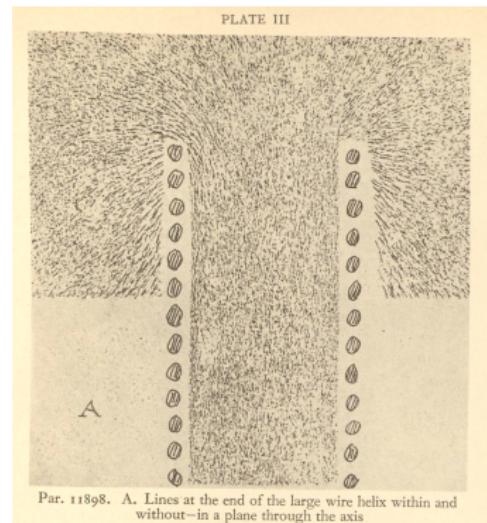
└ Faradays Untersuchungen

Geschichte der Maxwell-Gleichung

Faradays Zeichnungen



Par. 11695. No. 1. Gum water alone
(three quarter scale)



Par. 11898. A. Lines at the end of the large wire helix within and without—in a plane through the axis

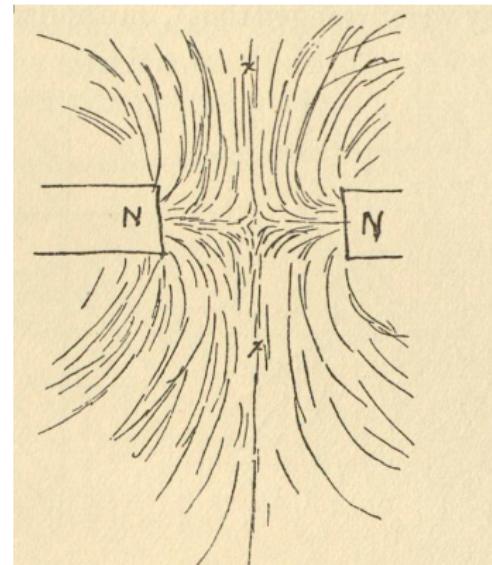
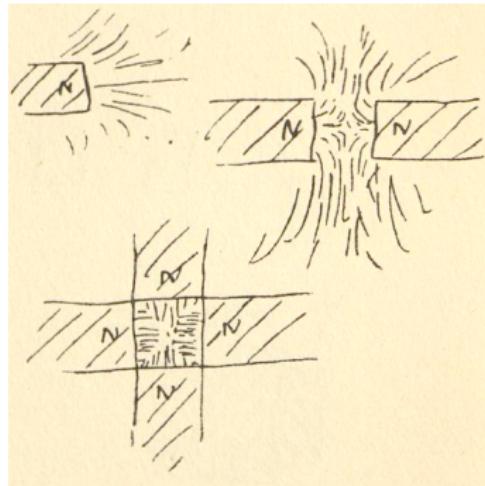
Einführung

└ Geschichte der Maxwell-Gleichung

└ Faradays Untersuchungen

Geschichte der Maxwell-Gleichung

Faradays Zeichnungen



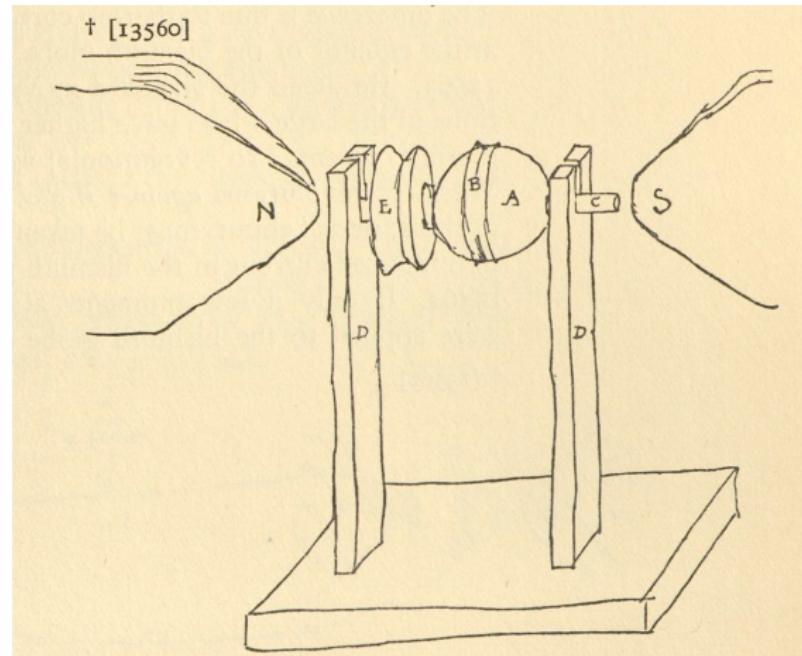
Einführung

└ Geschichte der Maxwell-Gleichung

└ Faradays Untersuchungen

Geschichte der Maxwell-Gleichung

Faradays Zeichnungen



Einführung

└ Geschichte der Maxwell-Gleichung

└ Maxwells Gleichungen

Geschichte der Maxwell-Gleichung

Maxwells Gleichungen

- ▶ Erarbeitet von 1861-1864

Einführung

└ Geschichte der Maxwell-Gleichung

└ Maxwells Gleichungen

Geschichte der Maxwell-Gleichung

Maxwells Gleichungen

- ▶ Erarbeitet von 1861-1864



Abbildung: J. C. Maxwell

Einführung

- └ Geschichte der Maxwell-Gleichung
- └ Maxwells Gleichungen

Geschichte der Maxwell-Gleichung

Maxwells Gleichungen

Equation of Free Electricity

$$e + \frac{df}{dx} + \frac{dg}{dy} + \frac{dh}{dz} = 0. \quad (\text{G})$$

Equations of Magnetic Force

$$\left. \begin{array}{l} \mu\alpha = \frac{dH}{dy} - \frac{dG}{dz} \\ \mu\beta = \frac{dF}{dz} - \frac{dH}{dx} \\ \mu\gamma = \frac{dG}{dx} - \frac{dF}{dy} \end{array} \right\}. \quad (\text{B})$$

Einführung

└ Geschichte der Maxwell-Gleichung

└ Maxwells Gleichungen

Geschichte der Maxwell-Gleichung

Maxwells Gleichungen

Equations of Electromotive Force

$$\left. \begin{aligned} P &= \mu \left(\gamma \frac{dy}{dt} - \beta \frac{dz}{dt} \right) - \frac{dF}{dt} - \frac{d\psi}{dx} \\ Q &= \mu \left(\alpha \frac{dz}{dt} - \gamma \frac{dx}{dt} \right) - \frac{dG}{dt} - \frac{d\psi}{dy} \\ R &= \mu \left(\beta \frac{dx}{dt} - \alpha \frac{dy}{dt} \right) - \frac{dH}{dt} - \frac{d\psi}{dz} \end{aligned} \right\}. \quad (\text{D})$$

Einführung

- └ Geschichte der Maxwell-Gleichung
- └ Maxwells Gleichungen

Geschichte der Maxwell-Gleichung

Maxwells Gleichungen

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\gamma}{dy} - \frac{d\beta}{dz} &= 4\pi p' \\ \frac{d\alpha}{dz} - \frac{d\gamma}{dx} &= 4\pi q' \\ \frac{d\beta}{dx} - \frac{d\alpha}{dy} &= 4\pi r' \end{aligned} \right\}. \quad (\text{C})$$

$$\left. \begin{aligned} p' &= p + \frac{df}{dt} \\ q' &= q + \frac{dg}{dt} \\ r' &= r + \frac{dh}{dt} \end{aligned} \right\}. \quad (\text{A})$$

Einführung

- └ Geschichte der Maxwell-Gleichung
- └ Maxwells Gleichungen

Geschichte der Maxwell-Gleichung

Die Gleichung

$$\operatorname{div} \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad \operatorname{div} \vec{B} = 0$$

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\dot{\vec{B}} \quad \operatorname{rot} \vec{B} = \mu_0 \vec{j} + \epsilon_0 \mu_0 \dot{\vec{E}}$$

Einführung

└ Geschichte der Maxwell-Gleichung

└ Einsteins Interpretation

Geschichte der Maxwell-Gleichung

Einsteins Interpretation

- ▶ Erarbeitet im Annus mirabilis 1905

Einführung

└ Geschichte der Maxwell-Gleichung

└ Einsteins Interpretation

Geschichte der Maxwell-Gleichung

Einsteins Interpretation

- ▶ Erarbeitet im Annus mirabilis 1905

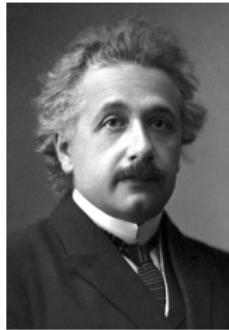


Abbildung: A. Einstein

Einführung

└ Geschichte der Maxwell-Gleichung

└ Einsteins Interpretation

Geschichte der Maxwell-Gleichung

Einsteins Interpretation

3. Zur Elektrodynamik bewegter Körper; von A. Einstein.

Daß die Elektrodynamik Maxwells — wie dieselbe gegenwärtig aufgefaßt zu werden pflegt — in ihrer Anwendung auf bewegte Körper zu Asymmetrien führt, welche den Phänomenen nicht anzuhafenden scheinen, ist bekannt. Man denke z. B. an

$$\tau = t \sqrt{1 - \left(\frac{v}{V}\right)^2}$$

Einführung

- └ Maxwell'sche Gleichung und Lösungen
 - └ Einleitung

Einleitung

Anwendungsbereiche

- ▶ Die Maxwell'schen Gleichungen bieten mehrere Lösungen:

Einführung

- └ Maxwell'sche Gleichung und Lösungen
 - └ Einleitung

Einleitung

Anwendungsbereiche

- ▶ Die Maxwell'schen Gleichungen bieten mehrere Lösungen:
 - ▶ Elektrostatik (Coulomb-Gesetz)

Einführung

- └ Maxwell'sche Gleichung und Lösungen
 - └ Einleitung

Einleitung

Anwendungsbereiche

- ▶ Die Maxwell'schen Gleichungen bieten mehrere Lösungen:
 - ▶ Elektrostatik (Coulomb-Gesetz)
 - ▶ Magnetostatik

Einführung

- └ Maxwell'sche Gleichung und Lösungen
 - └ Einleitung

Einleitung

Anwendungsbereiche

- ▶ Die Maxwell'schen Gleichungen bieten mehrere Lösungen:
 - ▶ Elektrostatik (Coulomb-Gesetz)
 - ▶ Magnetostatik
 - ▶ Elektrodynamik

Einführung

- └ Maxwell'sche Gleichung und Lösungen
 - └ Einleitung

Einleitung

Anwendungsbereiche

- ▶ Die Maxwell'schen Gleichungen bieten mehrere Lösungen:
 - ▶ Elektrostatik (Coulomb-Gesetz)
 - ▶ Magnetostatik
 - ▶ Elektrodynamik
 - ▶ Licht

Einführung

- └ Maxwell'sche Gleichung und Lösungen
- └ Einleitung

Einleitung

Anwendungsbereiche

- ▶ Die Maxwell'schen Gleichungen bieten mehrere Lösungen:
 - ▶ Elektrostatik (Coulomb-Gesetz)
 - ▶ Magnetostatik
 - ▶ Elektrodynamik
 - ▶ Licht
 - ▶ Relativitätstheorie

Einführung

└ Maxwell'sche Gleichung und Lösungen

└ Einleitung

Einleitung

Anwendungsbereiche

- ▶ Die Maxwell'schen Gleichungen bieten mehrere Lösungen:
 - ▶ Elektrostatik (Coulomb-Gesetz)
 - ▶ Magnetostatik
 - ▶ Elektrodynamik
 - ▶ Licht
 - ▶ Relativitätstheorie

Einführung

└ Maxwell'sche Gleichung und Lösungen

└ Elektrostatik

Elektrostatik

Die Gleichung

$$\operatorname{div} \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

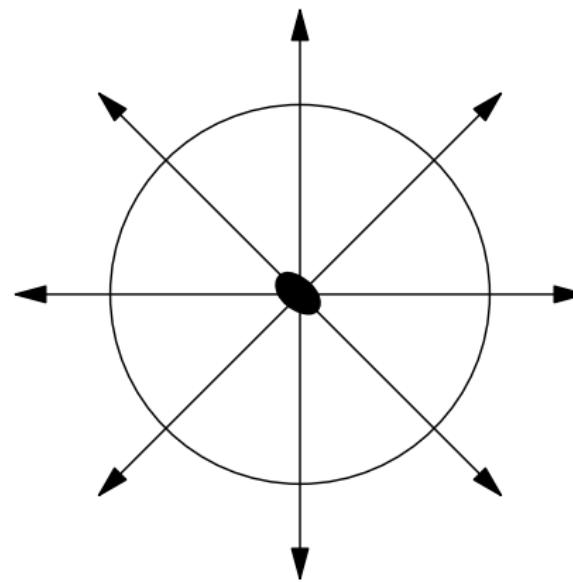
Einführung

└ Maxwell'sche Gleichung und Lösungen

└ Elektrostatik

Elektrostatik

Veranschaulichung



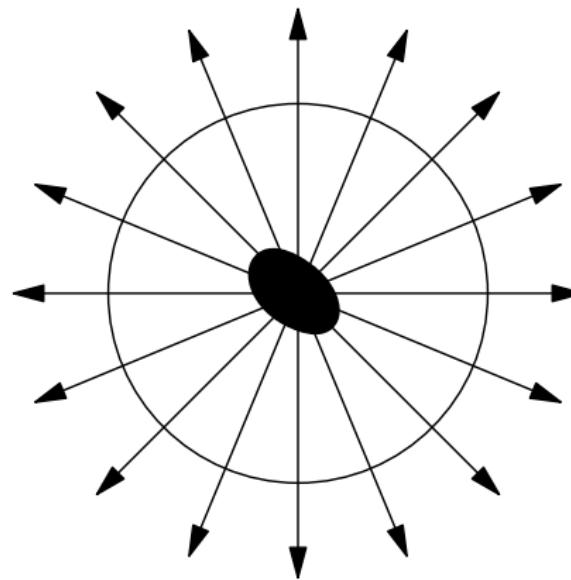
Einführung

└ Maxwell'sche Gleichung und Lösungen

└ Elektrostatik

Elektrostatik

Veranschaulichung



Einführung

└ Maxwell'sche Gleichung und Lösungen

└ Elektrostatik

Elektrostatik

Die Lösung

$$\operatorname{div} \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \rightarrow ?? \rightarrow E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2}$$

Einführung

- └ Maxwell'sche Gleichung und Lösungen
- └ Magnetostatik

Magnetostatik

Die Gleichung

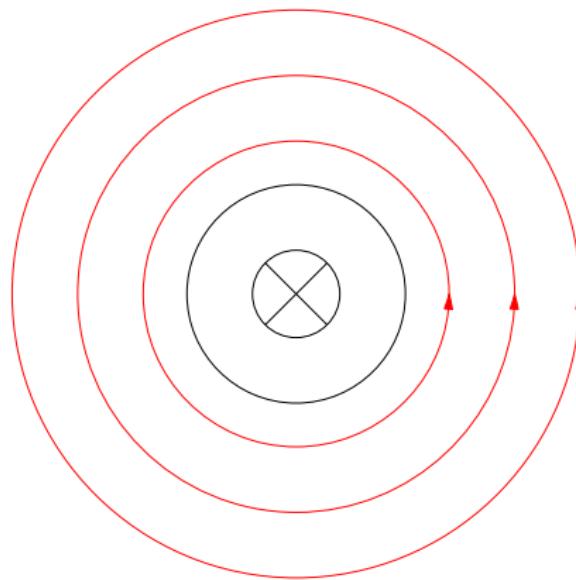
$$\operatorname{rot} \vec{B} = \mu_0 \vec{j}$$

Einführung

- └ Maxwell'sche Gleichung und Lösungen
- └ Magnetostatik

Magnetostatik

Veranschaulichung



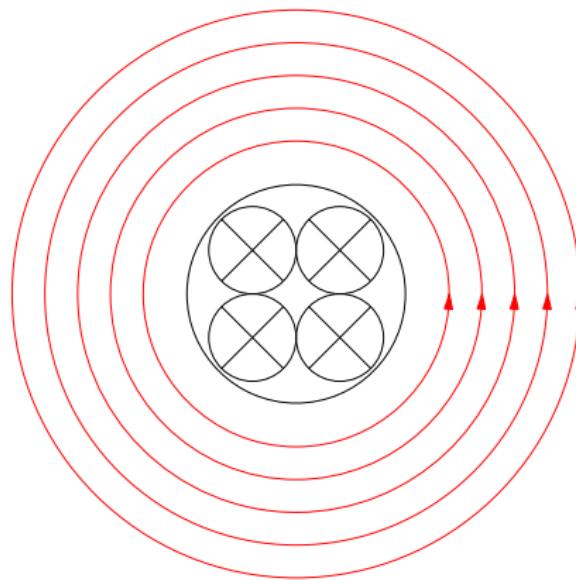
Einführung

└ Maxwell'sche Gleichung und Lösungen

└ Magnetostatik

Magnetostatik

Veranschaulichung



Einführung

- └ Maxwell'sche Gleichung und Lösungen
- └ Magnetostatik

Magnetostatik

Die Lösung

$$\text{rot } \vec{B} = \mu_0 \vec{j} \rightarrow \boxed{\text{??}} \rightarrow B = \mu_0 I \frac{1}{r}$$

Einführung

└ Maxwell'sche Gleichung und Lösungen

└ Licht

Licht

Die Gleichung

$$\square \vec{B} = 0$$

$$\square \vec{E} = 0$$

Einführung

└ Maxwell'sche Gleichung und Lösungen

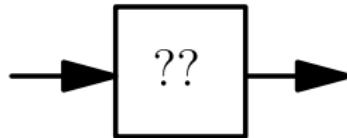
└ Licht

Licht

Die Lösung

$$\square \vec{E} = 0$$

$$\square \vec{B} = 0$$



$$E = E_0 \sin \left(2\pi c \frac{t}{\lambda} + 2\pi \frac{x}{\lambda} \right)$$

$$B = B_0 \sin \left(2\pi c \frac{t}{\lambda} + 2\pi \frac{x}{\lambda} \right)$$

Einführung

└ Maxwell'sche Gleichung und Lösungen

└ Licht

Licht

Veranschaulichung

JAVA-Veranschaulichung

Einführung

└ Nutzen der Maxwell-Gleichung

Nutzen der Maxwell-Gleichung

Überblick

Nutzen der Maxwell-Gleichung

Überblick

- ▶ Ladungserhaltung

Nutzen der Maxwell-Gleichung

Überblick

- ▶ Ladungserhaltung
- ▶ Licht

Nutzen der Maxwell-Gleichung

Überblick

- ▶ Ladungserhaltung
- ▶ Licht
- ▶ Relativitätstheorie

Nutzen der Maxwell-Gleichung

Überblick

- ▶ Ladungserhaltung
- ▶ Licht
- ▶ Relativitätstheorie
- ▶ Generator

Quellen

Quellen

- ▶ Vorlesung Einführung in die theo. Physik II
- ▶ Faradays diary
- ▶ A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field
- ▶ Wikipedia
- ▶ <http://www.mathematik.tu-darmstadt.de/~bruhn/Original-MAXWELL.htm>