

Elektrodynamik — Geschichte

Daniel Grumiller

Institut für Theoretische Physik (FH, 10. Stock)
TU Wien

http://www.itp.tuwien.ac.at/index.php/Elektrodynamik_I

Sommersemester 2017



grumil@hep.itp.tuwien.ac.at



Geschichte der Elektrodynamik

Vorgeschichte und Frühgeschichte:

-10^6 Blitze

Geschichte der Elektrodynamik

Vorgeschichte und Frühgeschichte:

- 10⁶ Blitze
- 2800 Elektrische Schocks entdeckt durch Zitteraal/-rochen in Ägypten
- 2600 Magnetkompass in China

Geschichte der Elektrodynamik

Vorgeschichte und Frühgeschichte:

- 10⁶ Blitze
- 2800 Elektrische Schocks entdeckt durch Zitteraal/-rochen in Ägypten
- 2600 Magnetkompass in China
- 800 Magnetit (magnetische Wirkung auf Eisen) in Europa (Plinius)
- 600 Thales v. Milet: elektrostatische Aufladung von Bernstein (altgriechisch: "Bernstein" = "elektron")
- 100 erste Batterie (in der Nähe von Bagdad): Eisenstab mit Kupferzylinder und Traubensaft als Elektrolyt

Geschichte der Elektrodynamik

Vorgeschichte und Frühgeschichte:

- 10⁶ Blitze
- 2800 Elektrische Schocks entdeckt durch Zitteraal/-rochen in Ägypten
- 2600 Magnetkompass in China
- 800 Magnetit (magnetische Wirkung auf Eisen) in Europa (Plinius)
- 600 Thales v. Milet: elektrostatische Aufladung von Bernstein (altgriechisch: "Bernstein" = "elektron")
- 100 erste Batterie (in der Nähe von Bagdad): Eisenstab mit Kupferzylinder und Traubensaft als Elektrolyt
- 1100 Kompass kommt nach Europa

Geschichte der Elektrodynamik

Vorgeschichte und Frühgeschichte:

- 10⁶ Blitze
- 2800 Elektrische Schocks entdeckt durch Zitteraal/-rochen in Ägypten
- 2600 Magnetkompass in China
- 800 Magnetit (magnetische Wirkung auf Eisen) in Europa (Plinius)
- 600 Thales v. Milet: elektrostatische Aufladung von Bernstein (altgriechisch: "Bernstein" = "elektron")
- 100 erste Batterie (in der Nähe von Bagdad): Eisenstab mit Kupferzylinder und Traubensaft als Elektrolyt
- 1100 Kompass kommt nach Europa
- 1269 Petrus Peregrinus: Entdeckung von Magnetpolen

Geschichte der Elektrodynamik

Vorgeschichte und Frühgeschichte:

- 10⁶ Blitze
- 2800 Elektrische Schocks entdeckt durch Zitteraal/-rochen in Ägypten
- 2600 Magnetkompass in China
- 800 Magnetit (magnetische Wirkung auf Eisen) in Europa (Plinius)
- 600 Thales v. Milet: elektrostatische Aufladung von Bernstein (altgriechisch: "Bernstein" = "elektron")
- 100 erste Batterie (in der Nähe von Bagdad): Eisenstab mit Kupferzylinder und Traubensaft als Elektrolyt
- 1100 Kompass kommt nach Europa
- 1269 Petrus Peregrinus: Entdeckung von Magnetpolen
- 1600 William Gilbert: erste Wissenschaftliche Veröffentlichung zu Magnetismus; Reibungselektrizität

Geschichte der Elektrodynamik

Vorgeschichte und Frühgeschichte:

- 10⁶ Blitze
- 2800 Elektrische Schocks entdeckt durch Zitteraal/-rochen in Ägypten
- 2600 Magnetkompass in China
- 800 Magnetit (magnetische Wirkung auf Eisen) in Europa (Plinius)
- 600 Thales v. Milet: elektrostatische Aufladung von Bernstein (altgriechisch: "Bernstein" = "elektron")
- 100 erste Batterie (in der Nähe von Bagdad): Eisenstab mit Kupferzylinder und Traubensaft als Elektrolyt
- 1100 Kompass kommt nach Europa
- 1269 Petrus Peregrinus: Entdeckung von Magnetpolen
- 1600 William Gilbert: erste Wissenschaftliche Veröffentlichung zu Magnetismus; Reibungselektrizität
- 1629 Nicolo Cabeo: elektrisch geladene Körper können einander abstossen

Geschichte der Elektrodynamik

Vorgeschichte und Frühgeschichte:

- 10⁶ Blitze
- 2800 Elektrische Schocks entdeckt durch Zitteraal/-rochen in Ägypten
- 2600 Magnetkompass in China
- 800 Magnetit (magnetische Wirkung auf Eisen) in Europa (Plinius)
- 600 Thales v. Milet: elektrostatische Aufladung von Bernstein (altgriechisch: "Bernstein" = "elektron")
- 100 erste Batterie (in der Nähe von Bagdad): Eisenstab mit Kupferzylinder und Traubensaft als Elektrolyt
- 1100 Kompass kommt nach Europa
- 1269 Petrus Peregrinus: Entdeckung von Magnetpolen
- 1600 William Gilbert: erste Wissenschaftliche Veröffentlichung zu Magnetismus; Reibungselektrizität
- 1629 Nicolo Cabeo: elektrisch geladene Körper können einander abstossen
- 1729 Stephen Gray: Unterschied zwischen Leitern und Isolatoren

Geschichte der Elektrodynamik

Vorgeschichte und Frühgeschichte:

- 10⁶ Blitze
- 2800 Elektrische Schocks entdeckt durch Zitteraal/-rochen in Ägypten
- 2600 Magnetkompass in China
- 800 Magnetit (magnetische Wirkung auf Eisen) in Europa (Plinius)
- 600 Thales v. Milet: elektrostatische Aufladung von Bernstein (altgriechisch: "Bernstein" = "elektron")
- 100 erste Batterie (in der Nähe von Bagdad): Eisenstab mit Kupferzylinder und Traubensaft als Elektrolyt
- 1100 Kompass kommt nach Europa
- 1269 Petrus Peregrinus: Entdeckung von Magnetpolen
- 1600 William Gilbert: erste Wissenschaftliche Veröffentlichung zu Magnetismus; Reibungselektrizität
- 1629 Nicolo Cabeo: elektrisch geladene Körper können einander abstossen
- 1729 Stephen Gray: Unterschied zwischen Leitern und Isolatoren
- 1734 Charles Francois de Cisternay du Fay: es gibt zwei Arten von Ladungen



Geschichte der Elektrodynamik

Klassische Periode:

1747 Benjamin Franklin: positive/negative Ladungen; Ladungserhaltung;
keine elektrostatischen Kräfte im Leiter

Geschichte der Elektrodynamik

Klassische Periode:

- 1747 Benjamin Franklin: positive/negative Ladungen; Ladungserhaltung; keine elektrostatischen Kräfte im Leiter
- 1767 Joseph Priestly: Experimente mit geladenen Kugeln: $F \sim 1/r^2$

Geschichte der Elektrodynamik

Klassische Periode:

- 1747 Benjamin Franklin: positive/negative Ladungen; Ladungserhaltung; keine elektrostatischen Kräfte im Leiter
- 1767 Joseph Priestly: Experimente mit geladenen Kugeln: $F \sim 1/r^2$
- 1785 Charles-Augustin Coulomb: Präzisionsmessung obigen Kraftgesetzes

Geschichte der Elektrodynamik

Klassische Periode:

- 1747 Benjamin Franklin: positive/negative Ladungen; Ladungserhaltung; keine elektrostatischen Kräfte im Leiter
- 1767 Joseph Priestly: Experimente mit geladenen Kugeln: $F \sim 1/r^2$
- 1785 Charles-Augustin Coulomb: Präzisionsmessung obigen Kraftgesetzes
- 1791 Luigi Galvani: Froschschenkelversuche; Georg Simon Ohm: Ohmsches Gesetz

Geschichte der Elektrodynamik

Klassische Periode:

- 1747 Benjamin Franklin: positive/negative Ladungen; Ladungserhaltung; keine elektrostatischen Kräfte im Leiter
- 1767 Joseph Priestly: Experimente mit geladenen Kugeln: $F \sim 1/r^2$
- 1785 Charles-Augustin Coulomb: Präzisionsmessung obigen Kraftgesetzes
- 1791 Luigi Galvani: Froschschenkelversuche; Georg Simon Ohm: Ohmsches Gesetz
- 1799 Alessandro Volta: Voltasche Batterie

Geschichte der Elektrodynamik

Klassische Periode:

- 1747 Benjamin Franklin: positive/negative Ladungen; Ladungserhaltung; keine elektrostatischen Kräfte im Leiter
- 1767 Joseph Priestly: Experimente mit geladenen Kugeln: $F \sim 1/r^2$
- 1785 Charles-Augustin Coulomb: Präzisionsmessung obigen Kraftgesetzes
- 1791 Luigi Galvani: Froschschenkelversuche; Georg Simon Ohm: Ohmsches Gesetz
- 1799 Alessandro Volta: Voltasche Batterie
- 1819 Christian Oersted: elektrische Ströme sind Wirbel für Magnete
Heinrich Friedrich Lenz: Induktionsstrom

Geschichte der Elektrodynamik

Klassische Periode:

- 1747 Benjamin Franklin: positive/negative Ladungen; Ladungserhaltung; keine elektrostatischen Kräfte im Leiter
- 1767 Joseph Priestly: Experimente mit geladenen Kugeln: $F \sim 1/r^2$
- 1785 Charles-Augustin Coulomb: Präzisionsmessung obigen Kraftgesetzes
- 1791 Luigi Galvani: Froschschenkelversuche; Georg Simon Ohm: Ohmsches Gesetz
- 1799 Alessandro Volta: Voltasche Batterie
- 1819 Christian Oersted: elektrische Ströme sind Wirbel für Magnete
Heinrich Friedrich Lenz: Induktionsstrom
- 1821 Andre Marie Ampere: Amperesches Gesetz

Geschichte der Elektrodynamik

Klassische Periode:

- 1747 Benjamin Franklin: positive/negative Ladungen; Ladungserhaltung; keine elektrostatischen Kräfte im Leiter
- 1767 Joseph Priestly: Experimente mit geladenen Kugeln: $F \sim 1/r^2$
- 1785 Charles-Augustin Coulomb: Präzisionsmessung obigen Kraftgesetzes
- 1791 Luigi Galvani: Froschschenkelversuche; Georg Simon Ohm: Ohmsches Gesetz
- 1799 Alessandro Volta: Voltasche Batterie
- 1819 Christian Oersted: elektrische Ströme sind Wirbel für Magnete
Heinrich Friedrich Lenz: Induktionsstrom
- 1821 Andre Marie Ampere: Amperesches Gesetz
- 1824 Amperesche Kreisströme: alle magnetischen Ströme sind elektrischen Ursprungs

Geschichte der Elektrodynamik

Klassische Periode:

- 1747 Benjamin Franklin: positive/negative Ladungen; Ladungserhaltung; keine elektrostatischen Kräfte im Leiter
- 1767 Joseph Priestly: Experimente mit geladenen Kugeln: $F \sim 1/r^2$
- 1785 Charles-Augustin Coulomb: Präzisionsmessung obigen Kraftgesetzes
- 1791 Luigi Galvani: Froschschenkelversuche; Georg Simon Ohm: Ohmsches Gesetz
- 1799 Alessandro Volta: Voltasche Batterie
- 1819 Christian Oersted: elektrische Ströme sind Wirbel für Magnete
Heinrich Friedrich Lenz: Induktionsstrom
- 1821 Andre Marie Ampere: Amperesches Gesetz
- 1824 Amperesche Kreisströme: alle magnetischen Ströme sind elektrischen Ursprungs
- 1830 Joseph Henry, Michael Faraday: Induktionsgesetz

Geschichte der Elektrodynamik

Klassische Periode:

- 1747 Benjamin Franklin: positive/negative Ladungen; Ladungserhaltung; keine elektrostatischen Kräfte im Leiter
- 1767 Joseph Priestly: Experimente mit geladenen Kugeln: $F \sim 1/r^2$
- 1785 Charles-Augustin Coulomb: Präzisionsmessung obigen Kraftgesetzes
- 1791 Luigi Galvani: Froschschenkelversuche; Georg Simon Ohm: Ohmsches Gesetz
- 1799 Alessandro Volta: Voltasche Batterie
- 1819 Christian Oersted: elektrische Ströme sind Wirbel für Magnete
Heinrich Friedrich Lenz: Induktionsstrom
- 1821 Andre Marie Ampere: Amperesches Gesetz
- 1824 Amperesche Kreisströme: alle magnetischen Ströme sind elektrischen Ursprungs
- 1830 Joseph Henry, Michael Faraday: Induktionsgesetz
- 1846 Wilhelm Weber (+Gauss): Messung des Erdmagnetfeldes

Geschichte der Elektrodynamik

Klassische Periode:

- 1747 Benjamin Franklin: positive/negative Ladungen; Ladungserhaltung; keine elektrostatischen Kräfte im Leiter
- 1767 Joseph Priestly: Experimente mit geladenen Kugeln: $F \sim 1/r^2$
- 1785 Charles-Augustin Coulomb: Präzisionsmessung obigen Kraftgesetzes
- 1791 Luigi Galvani: Froschschenkelversuche; Georg Simon Ohm: Ohmsches Gesetz
- 1799 Alessandro Volta: Voltasche Batterie
- 1819 Christian Oersted: elektrische Ströme sind Wirbel für Magnete
Heinrich Friedrich Lenz: Induktionsstrom
- 1821 Andre Marie Ampere: Amperesches Gesetz
- 1824 Amperesche Kreisströme: alle magnetischen Ströme sind elektrischen Ursprungs
- 1830 Joseph Henry, Michael Faraday: Induktionsgesetz
- 1846 Wilhelm Weber (+Gauss): Messung des Erdmagnetfeldes
- 1850 Michael Faraday: es gibt E und B Feld

And God Said

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

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho_v$$

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

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial D}{\partial t}$$

and then there was light.

Geschichte der Elektrodynamik

Moderne:

1865 James Clark Maxwell: Maxwellgleichungen

$$\text{Gauss/Coulomb:} \quad \operatorname{div} E = 4\pi \rho$$

$$\text{Ampere/Maxwell:} \quad \operatorname{rot} B - \frac{\partial}{\partial t} E = \frac{4\pi}{c} j$$

$$\text{Faraday/Lenz/Maxwell:} \quad \operatorname{rot} E + \frac{\partial}{\partial t} B = 0$$

$$\text{Gauss:} \quad \operatorname{div} B = 0$$

18xx Ludwig Boltzmann: "War es ein Gott, der diese Zeichen schrieb,
Die mit geheimnissvoll verborg'nem Trieb
Die Kräfte der Natur um mich enthüllen
Und mir das Herz mit stiller Freude füllen."

Geschichte der Elektrodynamik

Moderne:

1865 James Clark Maxwell: Maxwellgleichungen

$$\text{Gauss/Coulomb:} \quad \operatorname{div} E = 4\pi \rho$$

$$\text{Ampere/Maxwell:} \quad \operatorname{rot} B - \frac{\partial}{\partial t} E = \frac{4\pi}{c} j$$

$$\text{Faraday/Lenz/Maxwell:} \quad \operatorname{rot} E + \frac{\partial}{\partial t} B = 0$$

$$\text{Gauss:} \quad \operatorname{div} B = 0$$

18xx Ludwig Boltzmann: "War es ein Gott, der diese Zeichen schrieb,
Die mit geheimnissvoll verborg'nem Trieb
Die Kräfte der Natur um mich enthüllen
Und mir das Herz mit stiller Freude füllen."

1887 Heinrich Hertz: experimentelle Verifizierung elektromagnetischer
Wellen

Geschichte der Elektrodynamik

Moderne:

1865 James Clark Maxwell: Maxwellgleichungen

$$\text{Gauss/Coulomb:} \quad \operatorname{div} E = 4\pi \rho$$

$$\text{Ampere/Maxwell:} \quad \operatorname{rot} B - \frac{\partial}{\partial t} E = \frac{4\pi}{c} j$$

$$\text{Faraday/Lenz/Maxwell:} \quad \operatorname{rot} E + \frac{\partial}{\partial t} B = 0$$

$$\text{Gauss:} \quad \operatorname{div} B = 0$$

18xx Ludwig Boltzmann: "War es ein Gott, der diese Zeichen schrieb,
Die mit geheimnissvoll verborg'nem Trieb
Die Kräfte der Natur um mich enthüllen
Und mir das Herz mit stiller Freude füllen."

1887 Heinrich Hertz: experimentelle Verifizierung elektromagnetischer Wellen

1895 Hendrik Anton Lorentz: Maxwellsche Theorie in Materie

Geschichte der Elektrodynamik

Moderne:

1865 James Clark Maxwell: Maxwellgleichungen

$$\text{Gauss/Coulomb:} \quad \operatorname{div} E = 4\pi \rho$$

$$\text{Ampere/Maxwell:} \quad \operatorname{rot} B - \frac{\partial}{\partial t} E = \frac{4\pi}{c} j$$

$$\text{Faraday/Lenz/Maxwell:} \quad \operatorname{rot} E + \frac{\partial}{\partial t} B = 0$$

$$\text{Gauss:} \quad \operatorname{div} B = 0$$

18xx Ludwig Boltzmann: "War es ein Gott, der diese Zeichen schrieb,
Die mit geheimnissvoll verborg'nem Trieb
Die Kräfte der Natur um mich enthüllen
Und mir das Herz mit stiller Freude füllen."

1887 Heinrich Hertz: experimentelle Verifizierung elektromagnetischer Wellen

1895 Hendrik Anton Lorentz: Maxwellsche Theorie in Materie

1905 Albert Einstein: Zur Elektrodynamik bewegter Körper (SRT)

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho$$

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

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

$$\nabla \times \mathbf{H} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \mathbf{J}$$

Geschichte der Elektrodynamik

Post-Moderne:

19xx zahlreiche technische Entwicklungen; Elektromagnetismus, Optik, elektromagnetische Wellen werden Alltag

Geschichte der Elektrodynamik

Post-Moderne:

19xx zahlreiche technische Entwicklungen; Elektromagnetismus, Optik, elektromagnetische Wellen werden Alltag

1920 Hermann Weyl: Eichinvarianz

Geschichte der Elektrodynamik

Post-Moderne:

19xx zahlreiche technische Entwicklungen; Elektromagnetismus, Optik, elektromagnetische Wellen werden Alltag

1920 Hermann Weyl: Eichinvarianz

1946 Tomonaga, Schwinger, Feynman, Dyson: Quantenelektrodynamik

Geschichte der Elektrodynamik

Post-Moderne:

19xx zahlreiche technische Entwicklungen; Elektromagnetismus, Optik, elektromagnetische Wellen werden Alltag

1920 Hermann Weyl: Eichinvarianz

1946 Tomonaga, Schwinger, Feynman, Dyson: Quantenelektrodynamik

19xx Maxwellgleichungen in einfacherer Notation:

$$*d*F = \frac{4\pi}{c} j \quad dF = 0$$

Geschichte der Elektrodynamik

Post-Moderne:

19xx zahlreiche technische Entwicklungen; Elektromagnetismus, Optik, elektromagnetische Wellen werden Alltag

1920 Hermann Weyl: Eichinvarianz

1946 Tomonaga, Schwinger, Feynman, Dyson: Quantenelektrodynamik

19xx Maxwellgleichungen in einfacherer Notation:

$$*d*F = \frac{4\pi}{c} j \quad dF = 0$$

2008 gyromagnetischer Faktor des Elektrons (Experiment):

$$\frac{g_e^{\text{ex}}}{2} = 1.00115965218073 \pm 0.000000000000028$$

Geschichte der Elektrodynamik

Post-Moderne:

19xx zahlreiche technische Entwicklungen; Elektromagnetismus, Optik, elektromagnetische Wellen werden Alltag

1920 Hermann Weyl: Eichinvarianz

1946 Tomonaga, Schwinger, Feynman, Dyson: Quantenelektrodynamik

19xx Maxwellgleichungen in einfacherer Notation:

$$*d*F = \frac{4\pi}{c} j \quad dF = 0$$

2008 gyromagnetischer Faktor des Elektrons (Experiment):

$$\frac{g_e^{\text{ex}}}{2} = 1.00115965218073 \pm 0.000000000000028$$

2009 Fermi-LAT bestätigt Lorentz-Invarianz bis $E > 3E_{\text{Planck}}$

Geschichte der Elektrodynamik

Post-Moderne:

19xx zahlreiche technische Entwicklungen; Elektromagnetismus, Optik, elektromagnetische Wellen werden Alltag

1920 Hermann Weyl: Eichinvarianz

1946 Tomonaga, Schwinger, Feynman, Dyson: Quantenelektrodynamik

19xx Maxwellgleichungen in einfacherer Notation:

$$*d*F = \frac{4\pi}{c} j \quad dF = 0$$

2008 gyromagnetischer Faktor des Elektrons (Experiment):

$$\frac{g_e^{\text{ex}}}{2} = 1.00115965218073 \pm 0.000000000000028$$

2009 Fermi-LAT bestätigt Lorentz-Invarianz bis $E > 3E_{\text{Planck}}$

2012 gyromagnetischer Faktor des Elektrons (Theorie):

$$\frac{g_e^{\text{th}}}{2} = 1.00115965218178 \pm 0.000000000000077$$

Geschichte der Elektrodynamik

Post-Moderne:

19xx zahlreiche technische Entwicklungen; Elektromagnetismus, Optik, elektromagnetische Wellen werden Alltag

1920 Hermann Weyl: Eichinvarianz

1946 Tomonaga, Schwinger, Feynman, Dyson: Quantenelektrodynamik

19xx Maxwellgleichungen in einfacherer Notation:

$$*d*F = \frac{4\pi}{c} j \quad dF = 0$$

2008 gyromagnetischer Faktor des Elektrons (Experiment):

$$\frac{g_e^{\text{ex}}}{2} = 1.00115965218073 \pm 0.000000000000028$$

2009 Fermi-LAT bestätigt Lorentz-Invarianz bis $E > 3E_{\text{Planck}}$

2012 gyromagnetischer Faktor des Elektrons (Theorie):

$$\frac{g_e^{\text{th}}}{2} = 1.00115965218178 \pm 0.000000000000077$$

2016 Entdeckung v. Gravitationswellen (LIGO), spin-2 Analogon d. Photons

