

Elektromagnetische Feldtheorie I (EFT I) / Electromagnetic Field Theory I (EFT I)

Dr.-Ing. René Marklein

marklein@uni-kassel.de

<http://www.tet.e-technik.uni-kassel.de>

<http://www.uni-kassel.de/fb16/tet/marklein/index.html>

Universität Kassel
Fachbereich Elektrotechnik / Informatik
(FB 16)

Fachgebiet Theoretische Elektrotechnik
(FG TET)

Wilhelmshöher Allee 71

Büro: Raum 2113 / 2115

D-34121 Kassel

University of Kassel

Dept. Electrical Engineering / Computer Science
(FB 16)

Electromagnetic Theory
(FG TET)

Wilhelmshöher Allee 71

Office: Room 2113 / 2115

D-34121 Kassel

Vorlesung (V) / Lecture (L)

Dr.-Ing. René Marklein

marklein@uni-kassel.de

<http://www.tet.e-technik.uni-kassel.de>

Übung (Ü) / Exercise (E)

Dipl.-Ing. Alexander Zimmer

zimmer@uni-kassel.de

<http://www.tet.e-technik.uni-kassel.de>

Universität Kassel
Fachbereich Elektrotechnik / Informatik
(FB 16)

Fachgebiet Theoretische Elektrotechnik
(FG TET)

Wilhelmshöher Allee 71

Büro: Raum 2113 / 2115

D-34121 Kassel

University of Kassel

Dept. Electrical Engineering / Computer Science
(FB 16)

Electromagnetic Theory
(FG TET)

Wilhelmshöher Allee 71

Office: Room 2113 / 2115

D-34121 Kassel

Andere Vorlesungen / Other Lectures

Dr.-Ing. René Marklein

- Numerische Methoden der Elektromagnetische Feldtheorie I / II (NFT I/II) / Numerical Methods of Electromagnetic Field Theory I / II (NFT I/II)
- Praktikum: Numerische Methoden der Elektromagnetische Feldtheorie I / II (NFT I/II) / Practical Training: Numerical Methods Electromagnetic Field Theory I / (EFT I)

Prof. Dr. rer. nat. Karl-Jörg Langenberg

- Mathematical Foundation of Electromagnetic Field Theory I / II (Math I / II)

Deutsch oder Englisch ?

German or English ?

Beides / Both !

Wir werden es versuchen!

We will try it!

Rules for the Exam / Klausurbedingungen

Betrifft: **Geänderte Klausurbedingungen im Sommersemester 2002**

Beginnend mit der Prüfungsperiode im SS 2002 ist zu Klausuren des Fachgebietes

Theoretische Elektrotechnik als einziges Hilfsmittel nur noch eine

Handgeschriebene Formelsammlung

(1 Blatt, Vorder- und Rückseite dürfen beschrieben werden)

zugelassen. Die Formelsammlung wird am Ende der Klausur zusammen mit den Klausurunterlagen abgegeben. Neben dieser Formelsammlung sind keine weiteren

Hilfsmittel zulässig, auch kein Taschenrechner.

Subject: **Changed rules for the exams in summer semester 2002**

Starting in SS 2002, all exams at the Chair of Electromagnetic Theory will be

closed book exams.

Except of a

handwritten collection of formulas,

(1 sheet, both sides may be used)

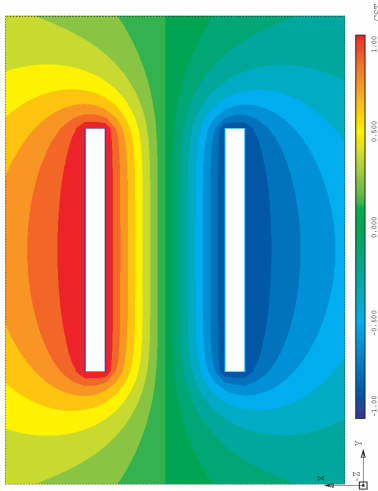
no other resources of help (e.g. pocket calculator) will be allowed. In the end of the exam, the collection of formulas must be handed in with all other documents concerning the exam.

Outline / Überblick

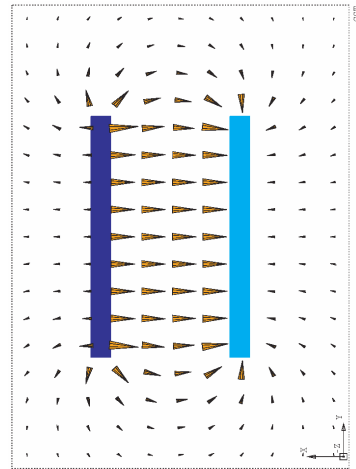
- **Governing Equations of Electromagnetic Fields and Waves / Grundgleichungen elektromagnetischer Felder und Wellen**
- **Electrostatic (ES) Fields / Elektrostatische (ES) Felder**
- **Magnetostatic (MS) Fields / Magnetostatische (MS) Felder**
- **Electroquasistatic (EQS) Fields / Elektroquasistatische (EQS) Felder**
- **Magnetoquasistatic (MQS) Fields / Magnetoquasistatische (MQS) Felder**
- **Electromagnetic (EM) Fields / Elektromagnetische (EM) Felder**
- **Introduction of Numerical Methods of Electromagnetic Fields and Waves / Einführung in die numerischen Methoden der elektromagnetischen Felder und Wellen**

Example: Parallel Plate Capacitor – Electrostatic Field Problem / Beispiel: Paralleler Plattenkondensator – Elektrostatishes Feldproblem

Scalar Field: Electrostatic Potential /
Skalarfeld: Elektrostatishes Potenzial

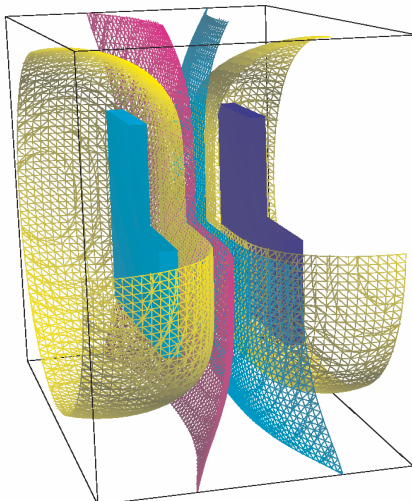


Vector Field: Electrostatic Field Strength /
Vektorfeld: Elektrostatishes Feldstärke

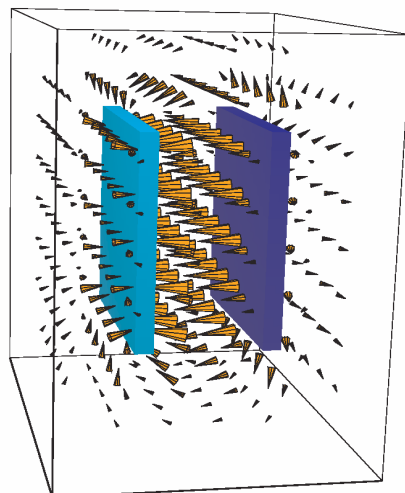


Example: Parallel Plate Capacitor – Electrostatic Field Problem / Beispiel: Paralleler Plattenkondensator – Elektrostatishes Feldproblem

Scalar Field: Electrostatic Potential /
Skalarfeld: Elektrostatishes Potenzial



Vector Field: Electrostatic Field Strength /
Vektorfeld: Elektrostatishes Feldstärke



Governing Equations of Electromagnetic Fields and Waves / Grundgleichungen elektromagnetischer Felder und Wellen

Governing Equations in Integral Form / Grundgleichungen in Integralform

$$\oint_{C=\partial S} \underline{E}(\underline{R}, t) \cdot d\underline{R} = - \iint_S \frac{\partial}{\partial t} \underline{B}(\underline{R}, t) \cdot d\underline{S} - \iint_S \underline{J}_m(\underline{R}, t) \cdot d\underline{S}$$

$$\oint_{C=\partial S} \underline{H}(\underline{R}, t) \cdot d\underline{R} = \iint_S \frac{\partial}{\partial t} \underline{D}(\underline{R}, t) \cdot d\underline{S} + \iint_S \underline{J}_c(\underline{R}, t) \cdot d\underline{S}$$

$$\oiint_{S=\partial V} \underline{D}(\underline{R}, t) \cdot d\underline{S} = \iiint_V \rho_c(\underline{R}, t) dV$$

$$\oiint_{S=\partial V} \underline{B}(\underline{R}, t) \cdot d\underline{S} = \iiint_V \rho_m(\underline{R}, t) dV$$

$$\oiint_{S=\partial V} \underline{J}_c(\underline{R}, t) \cdot d\underline{S} = - \iiint_V \frac{\partial}{\partial t} \rho_c(\underline{R}, t) dV$$

$$\oiint_{S=\partial V} \underline{J}_m(\underline{R}, t) \cdot d\underline{S} = - \iiint_V \frac{\partial}{\partial t} \rho_m(\underline{R}, t) dV$$

Governing Equations in Differential Form / Grundgleichungen in Differentialform

$$\nabla \times \underline{E}(\underline{R}, t) = - \frac{\partial}{\partial t} \underline{B}(\underline{R}, t) - \underline{J}_m(\underline{R}, t)$$

$$\nabla \times \underline{H}(\underline{R}, t) = \frac{\partial}{\partial t} \underline{D}(\underline{R}, t) + \underline{J}_c(\underline{R}, t)$$

$$\nabla \cdot \underline{D}(\underline{R}, t) = \rho_c(\underline{R}, t)$$


$$\nabla \cdot \underline{B}(\underline{R}, t) = \rho_m(\underline{R}, t)$$

$$\nabla \cdot \underline{J}_c(\underline{R}, t) = - \frac{\partial}{\partial t} \rho_c(\underline{R}, t)$$

$$\nabla \cdot \underline{J}_m(\underline{R}, t) = - \frac{\partial}{\partial t} \rho_m(\underline{R}, t)$$

Hertzian Dipole Antenna in Free-Space / Hertzische Dipolantenne im Freiraum (1)

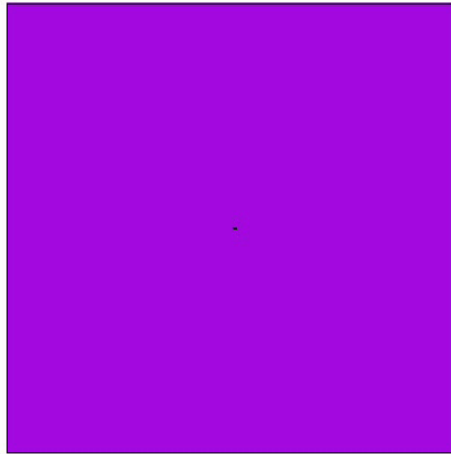
$$\underline{J}_c(\underline{R}, t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ I_0 \sin(\omega_0 t) \delta(\underline{R}) \underline{e}_z & t \geq 0 \end{cases}$$


 $\underline{J}_c(\underline{R}, t) \sim I_0 \sin(\omega_0 t) \underline{e}_z$

Hertzian Dipole Antenna in Free-Space / Hertzische Dipolantenne im Freiraum (2)

Monofrequent/Monochromatic Excitation /
Monofrequente/Monochromatische Anregung:

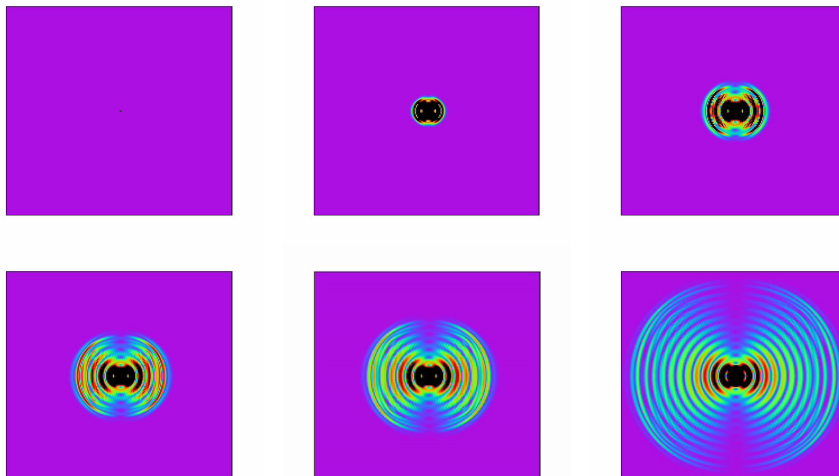
$$J_{ez}(\underline{\mathbf{R}}, t) \sim \sin(\omega_0 t)$$



Hertzian Dipole Antenna in Free-Space / Hertzische Dipolantenne im Freiraum (3)

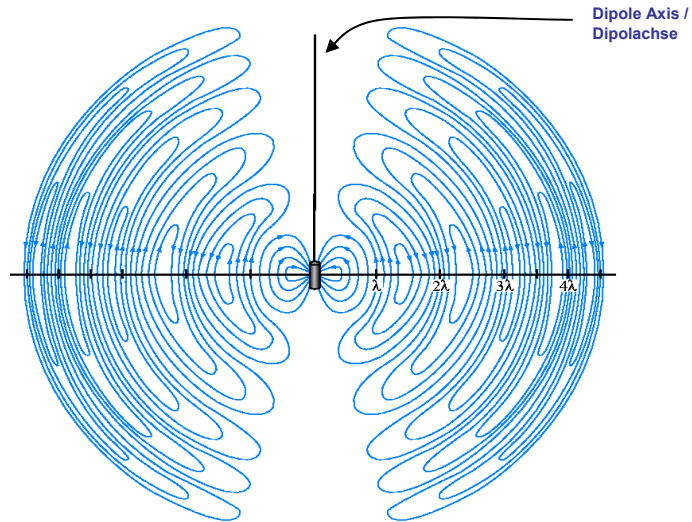
Monochromatic Excitation / Monochromatische Anregung:

$$J_{ez}(\underline{\mathbf{R}}, t) \sim \sin(\omega_0 t)$$



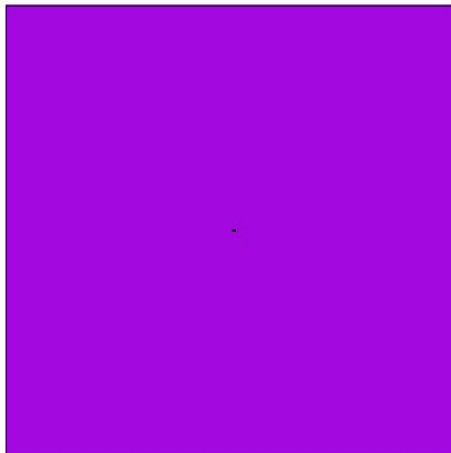
Hertzian Dipole Antenna in Free-Space / Hertzische Dipolantenne im Freiraum (4)

Electric Field Lines Surrounding an Oscillating Dipole at a Given Instant /
Elektrische Feldlinien, die einen oszillierenden Dipol zu einem festen Zeitpunkt umgeben



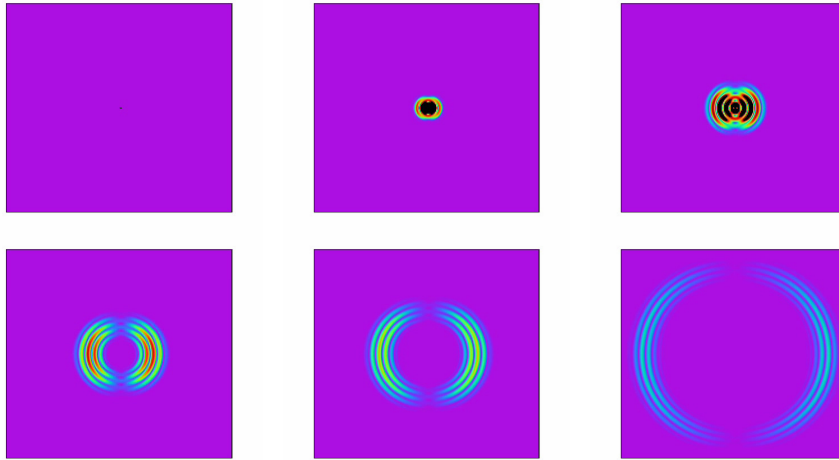
Hertzian Dipole Antenna in Free-Space / Hertzische Dipolantenne im Freiraum (5)

Broadband Pulse Excitation / Breitbandige Impulsanregung: $J_{ez}(\underline{\mathbf{R}}, t) \sim RC_2(t)$



Hertzian Dipole Antenna in Free-Space / Hertzsche Dipolantenne im Freiraum (6)

Broadband Pulse Excitation / Breitbandige Impulsanregung: $J_{ez}(\underline{\mathbf{R}}, t) \sim RC_2(t)$



Overview / Überblick (2)

Governing Equations of Electromagnetic Fields and Waves / Grundgleichungen elektromagnetischer Felder und Wellen

- Maxwell's Equations in Integral and Differential Form / Maxwell'sche Gleichungen in Integral- und Differentialform
- Continuity Equations in Integral and Differential Form / Kontinuitätsgleichungen in Integral- und Differentialform
- Classification of Maxwell's Equations: ES, MS, EQS, MQS, and EM Fields / Klassifizierung der Maxwell'schen Gleichungen: ES, MS, EQS, MQS und EM Felder
- Faraday's Induction Law / Faradaysches Induktionsgesetz
- Ampère-Maxwell's Circuital Law / Ampère-Maxwell'sches Durchflutungsgesetz
- Gauss' Electric and Magnetic Law / Gauß'sches elektrisches und magnetisches Gesetz
- Gauss' and Stokes' Integral Theorem / Gauß'scher und Stokesscher Satz
- Nabla / Del-Operator; Gradient, Divergence, and Curl Operator / Nabla / Del-Operator, Gradient, Divergenz und Rotation
- Lorentz Force Law; Poynting Vector / Lorentz'sches Kraftgesetz; Poynting Vektor
- Constitutive Equations / Materialgleichungen
- Transition and Boundary Conditions / Übergangs- und Randbedingungen

Overview / Überblick (3)

Electrostatic (ES) Fields / Elektrostatische (ES) Felder

- **Governing Equations / Grundgleichungen**
- **Method of Gauss' Electric Law / Methode des Gaußschen elektrischen Gesetzes**
- **Scalar Electric Potential; Laplace's Equation and Poisson's Equation; Delta-Operator / Skalares Potential; Laplace- und Poisson-Gleichung; Delta-Operator**
- **Separation of Variables / Separation der Variablen**
- **Point Charge Concept / Konzept der Punktladung**
- **Coulomb Integral; Electrostatic Green's Function / Coulomb-Integral; Elektrostatische Greensche Funktion**
- **Electric Moments; Electric Polarization; Relative Permittivity / Elektrische Momente; Elektrische Polarisation; Relative Permittivität**

Overview / Überblick (4)

Magnetostatic (MS) Fields / Magnetostatische (MS) Felder

- **Governing Equations / Grundgleichungen**
- **Magnetic Vector Potential; Laplace's Equation and Poisson's Equation / Magnetisches Vektorpotential; Vektorielle Laplace- und Poisson-Gleichung**
- **Biot-Savart Law / Biot-Savartsches Gesetz**
- **Magnetic Moments; Magnetization, Magnetic Polarization; Relative Permeability / Magnetische Momente; Magnetisierung; Magnetische Polarisation; Relative Permeabilität**

Overview / Überblick (5)

Electroquasistatic (EQS) Fields / Elektroquasistatische (EQS) Felder

- Governing Equations / Grundgleichungen
- Applications / Anwendungen

Magnetoquasistatic (MQS) Fields / Magnetoquasistatische (MQS) Felder

- Governing Equations / Grundgleichungen
- Applications / Anwendungen

Overview / Überblick (6)

Electromagnetic (EM) Fields / Elektromagnetische (EM) Felder

- Governing Equations / Grundgleichungen
- Wave Equations / Wellengleichungen
- Fourier Transform in Respect to Time /
Fourier-Transformation bezüglich der Zeit
- Helmholtz Equations /
Helmholtzsche Schwingungsgleichungen
- Plane Wave; TEM Wave /
Ebene Welle; TEM Welle

Introduction of Numerical Methods of Electromagnetic Fields and Waves / Einführung in die numerischen Methoden der elektromagnetischen Felder und Wellen

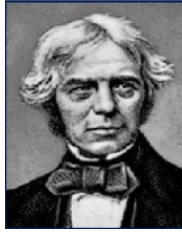
- Finite Difference-Time Domain (FD-TD) Method / Methode der Finiten
Differenzen im Zeitbereich (FD-TD)
- Finite Integration Technique (FIT) / Finite Integrationstechnik (FIT))

Maxwell's Equations / Maxwell'sche Gleichungen

1.



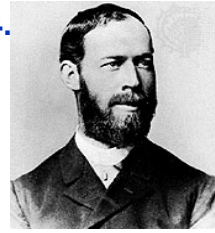
2.



3.



4.



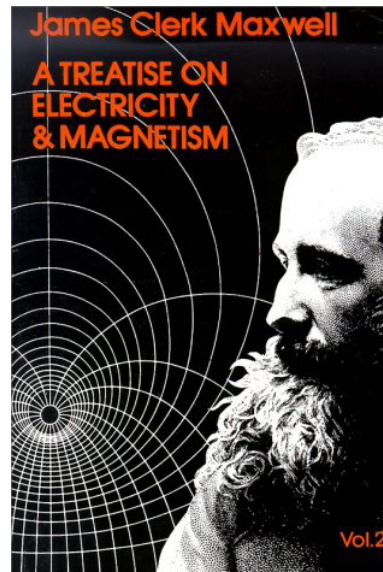
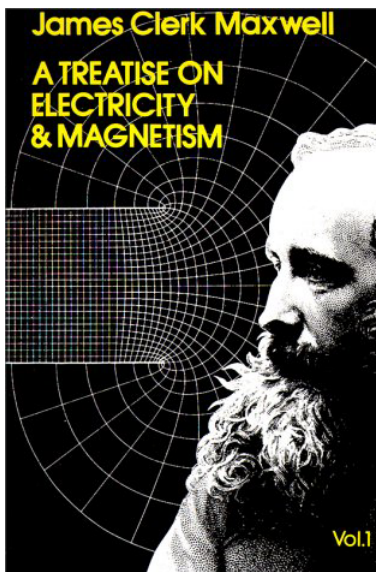
1. André Marie Ampère (1775-1836) 1827: Ampère presented the first mathematical theory of electrodynamics and discovered the magnetic effect of electric currents. / Ampère stellte die erste mathematisch fundierte elektrodynamische Theorie vor und entdeckte die magnetische Wirkung elektrischer Ströme.

2. Michael Faraday (1791-1867) 1831: Faraday discovers electromagnetic induction. / Faraday entdeckt die elektromagnetische Induktion.

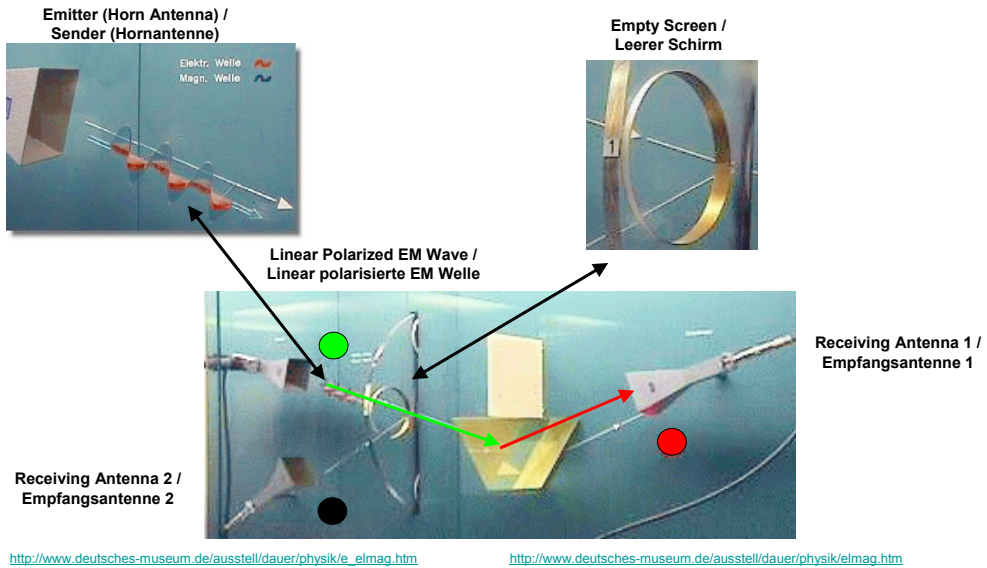
3. James Clerk Maxwell (1831-1879) 1864: Maxwell presents his theory of electromagnetism. / Maxwell präsentiert seine Theorie des Elektromagnetismus.

4. Heinrich Rudolf Hertz (1857-1894) 1885: Hertz demonstrates the electromagnetic wave propagation in a series of experiments in a period through 1897. / Hertz demonstriert in einer Periode bis 1897 die Ausbreitung von elektromagnetischen Wellen.

Maxwell's Equations / Maxwell'sche Gleichungen



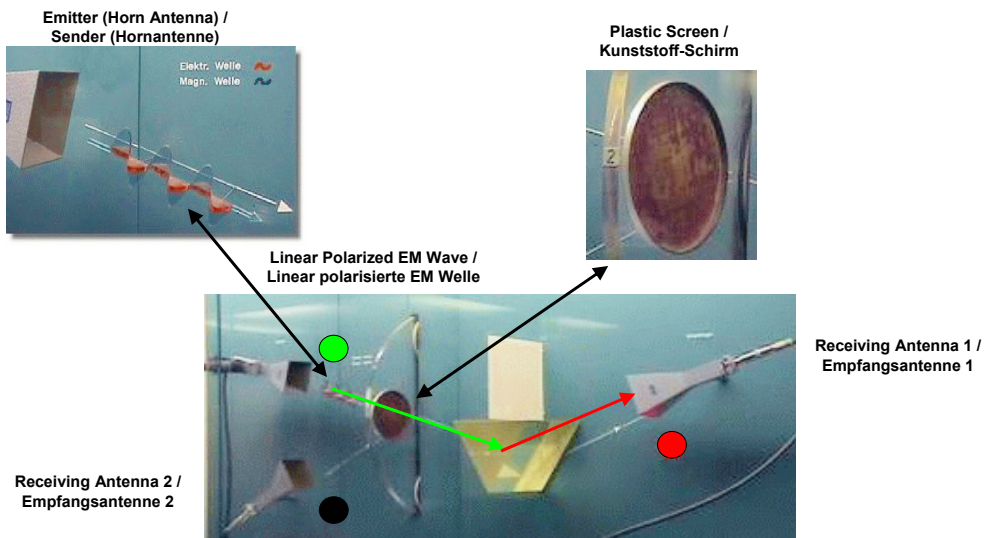
Experiment of Heinrich Hertz (1888/89): Transmission, Reflection, and Diffraction of a Linear Polarized Electromagnetic Wave / Experiment von Heinrich Hertz (1888/89): Transmission, Reflexion und Beugung einer linear polarisierten elektromagnetischen Welle (1)



http://www.deutsches-museum.de/ausstell/dauer/physik/e_elmag.htm

<http://www.deutsches-museum.de/ausstell/dauer/physik/elmag.htm>

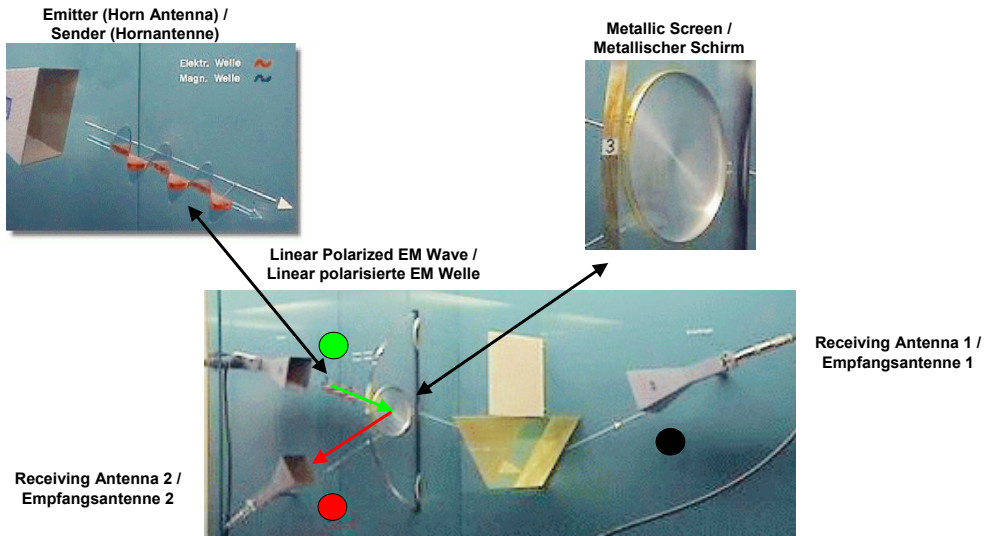
Experiment of Heinrich Hertz (1888/89): Transmission, Reflection, and Diffraction of a Linear Polarized Electromagnetic Wave / Experiment von Heinrich Hertz (1888/89): Transmission, Reflexion und Beugung einer linear polarisierten elektromagnetischen Welle (2)



http://www.deutsches-museum.de/ausstell/dauer/physik/e_elmag.htm

<http://www.deutsches-museum.de/ausstell/dauer/physik/elmag.htm>

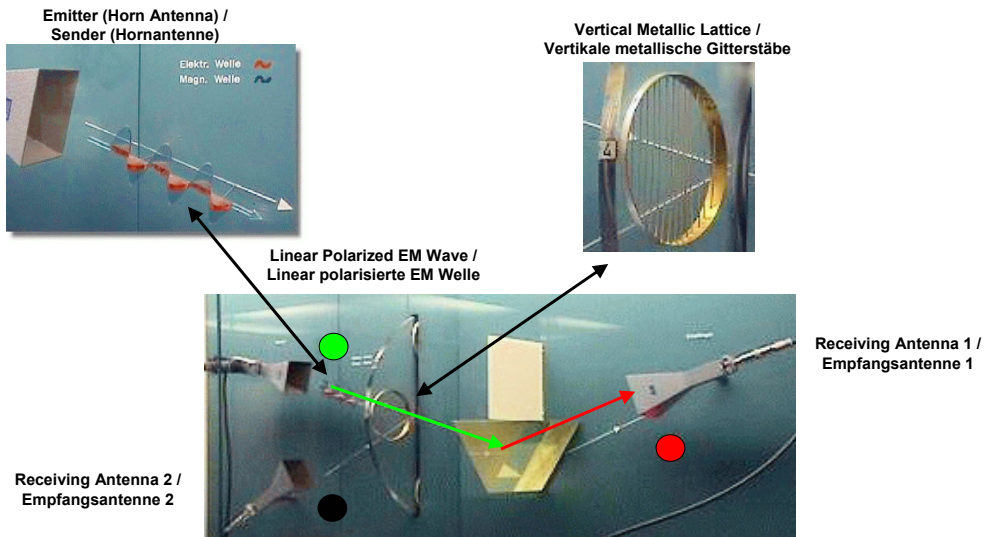
Experiment of Heinrich Hertz (1888/89): Transmission, Reflection, and Diffraction of a Linear Polarized Electromagnetic Wave / Experiment von Heinrich Hertz (1888/89): Transmission, Reflexion und Beugung einer linear polarisierten elektromagnetischen Welle (3)



http://www.deutsches-museum.de/ausstell/dauer/physik/e_elmag.htm

<http://www.deutsches-museum.de/ausstell/dauer/physik/elmag.htm>

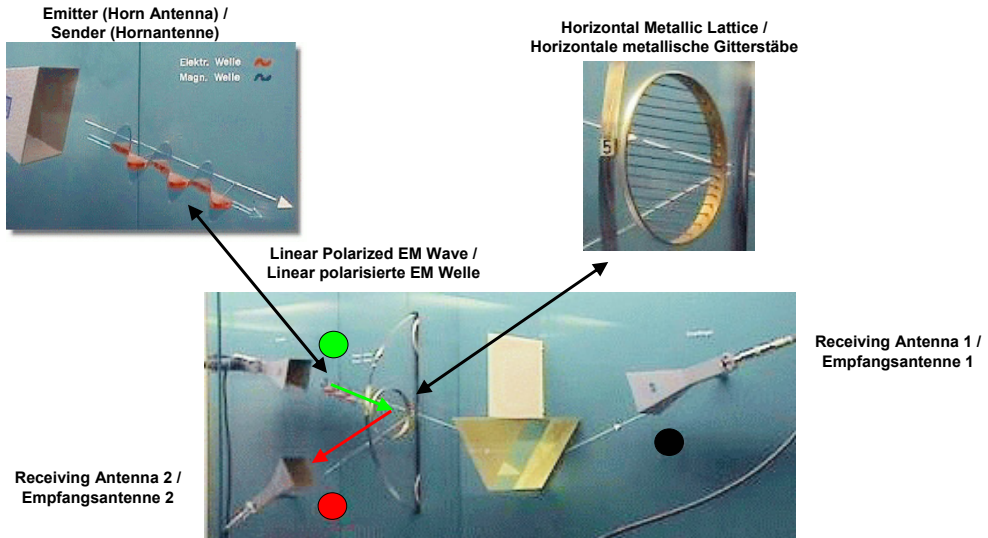
Experiment of Heinrich Hertz (1888/89): Transmission, Reflection, and Diffraction of a Linear Polarized Electromagnetic Wave / Experiment von Heinrich Hertz (1888/89): Transmission, Reflexion und Beugung einer linear polarisierten elektromagnetischen Welle (4)



http://www.deutsches-museum.de/ausstell/dauer/physik/e_elmag.htm

<http://www.deutsches-museum.de/ausstell/dauer/physik/elmag.htm>

Experiment of Heinrich Hertz (1888/89): Transmission, Reflection, and Diffraction of a Linear Polarized Electromagnetic Wave / Experiment von Heinrich Hertz (1888/89): Transmission, Reflexion und Beugung einer linear polarisierten elektromagnetischen Welle (5)



http://www.deutsches-museum.de/ausstell/dauer/physik/e_elmag.htm

<http://www.deutsches-museum.de/ausstell/dauer/physik/elmag.htm>

Dr. R. Marklein - EFT I - SS 2003

27

Faraday's Induction Law in Integral Form / Faradaysches Induktionsgesetz in Integralform (1)

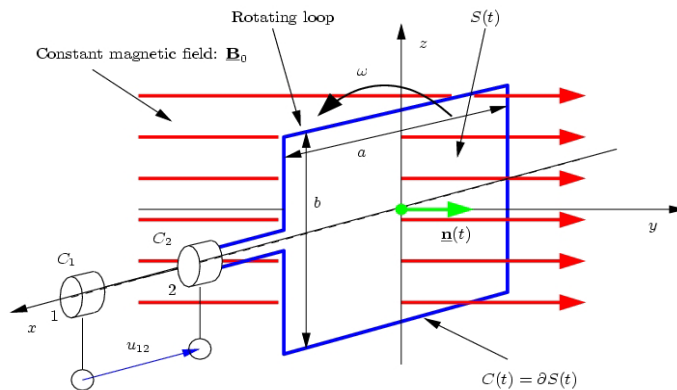
Faraday's Induction Law / Faradaysches Induktionsgesetz

$$\oint_{C(t)=\partial S(t)} \underline{E}(\underline{R}, t) \cdot d\underline{R} = - \frac{d}{dt} \iint_{S(t)} \underline{B}(\underline{R}, t) \cdot d\underline{S} - \iint_{S(t)} \underline{J}_m(\underline{R}, t) \cdot d\underline{S}$$

Time Dependent Surface / Zeitabhängige Fläche

$S(t)$ $C(t) = \partial S(t)$

Time Dependent Contour / Zeitabhängige Kontur



Dr. R. Marklein - EFT I - SS 2003

28

Faraday's Induction Law in Integral Form / Faradaysches Induktionsgesetz in Integralform (2)

Faraday's Induction Law / Faradaysches Induktionsgesetz

$$\oint_{C(t)=\partial S(t)} \underline{\mathbf{E}}(\underline{\mathbf{R}}, t) \cdot \underline{\mathbf{dR}} = -\frac{d}{dt} \iint_{S(t)} \underline{\mathbf{B}}(\underline{\mathbf{R}}, t) \cdot \underline{\mathbf{dS}} - \iint_{S(t)} \underline{\mathbf{J}}_m(\underline{\mathbf{R}}, t) \cdot \underline{\mathbf{dS}}$$

$\oint_{C(t)=\partial S(t)} [\circ] \cdot \underline{\mathbf{dR}}$	[m]	Closed Contour Integral / Geschlossenes Kurvenintegral
$\underline{\mathbf{E}}(\underline{\mathbf{R}}, t)$	[V/m]	Electric Field Strength / Elektrische Feldstärke
$\underline{\mathbf{dR}}$	[m]	Vectorial Differential Line Element / Vektoriell differenzielles Linienelement
$\underline{\mathbf{E}}(\underline{\mathbf{R}}, t) \cdot \underline{\mathbf{dR}}$	[V]	Scalar Product of E and dR = tangential projection of E onto dR / Skalarprodukt von E auf dR = Tangentialprojektion von E auf dR

Vectorial Differential Line Element / Vektoriell differenzielles Linienelement

$$\underline{\mathbf{dR}} = \underline{\mathbf{s}} \, dR$$

↑

Tangential Unit Vector /
Tangentialer Einheitsvektor

↑

Scalar Differential Line Element / Skalares
differenzielles Linienelement

End of Lecture 1 /
Ende der 1. Vorlesung