minærva

PL 3

SKRIPT

Elektrizitätslehre

Erklärskript

Die Aufgaben 37–61 zu diesem Skript stehen im Aufgabenskript, die Lösungen im Lösungsskript. Verweise auf Aufgaben sind Links.

Physik-LK – Abitur 2027

Pirmin Gohn

Nutzungshinweis: Dieses Skript darf nur im Rahmen des Unterrichts und der Abiturvorbereitung verwendet werden; insbesondere ist die eigenständige Weitergabe untersagt.

Skriptreihe PL · Physik-Leistungsfach zum Abitur 2027

Lernen mit minærva

Dieses Skript ist ein Teil von minærva. Alles gehört zusammen: Jedes Thema führt von der Erklärung zum Üben, zum Ausprobieren und ins große Bild.

minaerva.de

Skripte Verstehen
Der Stoff zum Nachlesen: Erklärungen, Herleitungen, Beispiele und typische Fehler.
minaerva.de

noctua Üben
Fragen und Aufgaben zu jedem Abschnitt, Formeltraining und Aufgaben im Stil des Abiturs, mit sofortiger Rückmeldung.
noctua.minaerva.de

fabrica Ausprobieren
Versuche und Anschauungen zum Selbermessen und Anfassen, ohne Konto, auch auf dem iPad.
fabrica.minaerva.de

tela Vernetzen
Das Wissensnetz: worauf ein Thema aufbaut und wohin es führt.
tela.minaerva.de

So greifen die Skripte ineinander

Erklärskripte	Physik PL1–PL5, das Lernskript PL-Σ und Mathe ML1–ML3 enthalten den Stoff, aber keine Aufgaben.
Aufgabenskripte	Je Fach eines mit den Übungsaufgaben. Die Erklärskripte verweisen darauf; jede Aufgaben-, Abbildungs- und Tabellennummer gibt es je Fach nur einmal.
Abi-ähnlich	Je Fach eine Sammlung mit Aufgaben, wie sie im Abitur vorkommen könnten.
Lösungsskripte	Zu den Aufgabenskripten und zu den Abi-ähnlichen Aufgaben, jeweils je Fach.
Kompakt	Formeln und Abbildungen zum schnellen Wiederholen: PL-K für Physik, ML-K für Mathe, dazu die Formelsammlung.

Am Ende vieler Abschnitte stehen Links zur passenden Übung, zum Versuch und ins Wissensnetz. In der PDF-Datei lassen sie sich direkt antippen.

Inhaltsverzeichnis

Symbolverzeichnis ... 5
Was ist abiturrelevant? ... 6
1 Wiederholung: Ladung, Strom, Spannung ... 8
1.1 Ladung und Stromstärke Abi ... 8
1.2 Spannung, Widerstand und Schaltungen Abi ... 8
2 Das elektrische Feld ... 9
2.1 Kräfte zwischen Ladungen, Influenz Abi ... 9
2.2 Feldlinienbilder Abi ... 9
2.3 Die elektrische Feldstärke Abi ... 10
2.4 Das Coulombsche Gesetz IQB-Pool ... 10
2.5 Der elektrische Fluss Zusatz · nicht Abi ... 11
3 Spannung und Potential ... 12
3.1 Arbeit im homogenen Feld Abi ... 12
3.2 Potential und Spannung Abi ... 12
3.3 Äquipotentiallinien Abi ... 12
3.4 Energie in Elektronenvolt Abi ... 13
3.5 Potential einer Punktladung IQB-Pool ... 13
4 Der Kondensator ... 14
4.1 Kapazität Abi ... 14
4.2 Der Plattenkondensator Abi ... 14
4.3 Das Dielektrikum Abi ... 14
4.4 Energie im Kondensator Abi ... 15
4.5 Kondensatoren schalten Zusatz · nicht Abi ... 15
5 Auf- und Entladen eines Kondensators ... 16
5.1 Der Entladevorgang Abi ... 16
5.2 Diagramme auswerten Abi ... 17
6 Geladene Teilchen im elektrischen Feld ... 18
6.1 Beschleunigung längs der Feldlinien Abi ... 18
6.2 Ablenkung quer zum Feld Abi ... 18
6.3 Schwebende Teilchen Abi ... 19
7 Das magnetische Feld ... 20
7.1 Dauermagnete und Feldlinien Abi ... 20
7.2 Ströme erzeugen Magnetfelder Abi ... 20
7.3 Kraft auf einen stromdurchflossenen Leiter Abi ... 21
7.4 Das Feld einer schlanken Spule Abi ... 21
8 Bewegte Ladungen im Magnetfeld ... 22
8.1 Die Lorentzkraft Abi ... 22
8.2 Die Kreisbahn Abi ... 22
8.3 Der Massenspektrograph Abi ... 23
8.4 Gekreuzte Felder: der Wien-Filter Abi ... 23
8.5 Der Hall-Effekt Zusatz · nicht Abi ... 23
9 Drei Felder im Vergleich ... 25
9.1 Gravitationsfeld, elektrisches und magnetisches Feld Abi ... 25
10 Elektromagnetische Induktion ... 26
10.1 Induktion im bewegten Leiter Abi ... 26
10.2 Der Leiterrahmen im begrenzten Feld Abi ... 26
10.3 Magnetischer Fluss und Induktionsgesetz Abi ... 26
10.4 Die Lenzsche Regel Abi ... 27
10.5 Generator und Wechselspannung Abi ... 27
10.6 Transformator und Induktionsladen Abi teilweise ... 28
10.7 Wirbelströme Abi ... 28
11 Selbstinduktion ... 30

11.1 Ein- und Ausschalten einer Spule Abi ... 30
11.2 Induktivität Abi ... 30
11.3 Energie im Magnetfeld Abi ... 31
12 Der elektromagnetische Schwingkreis ... 32
12.1 Wie die Schwingung entsteht Abi ... 32
12.2 Die Differentialgleichung Abi ... 32
12.3 Vergleich mit dem Federpendel Abi ... 33
12.4 Dämpfung und Entdämpfung Abi teilweise ... 33
13 Vom Schwingkreis zur elektromagnetischen Welle ... 35
13.1 Der Hertzsche Dipol Abi ... 35
13.2 Eigenschaften elektromagnetischer Wellen Abi ... 36
13.3 Das elektromagnetische Spektrum Abi ... 37
13.4 Die Maxwell-Gleichungen im Überblick Abi ... 37
14 Das Wichtigste auf einen Blick ... 39

Symbolverzeichnis

Symbol	Bedeutung	Einheit	Typischer Bereich / Hinweis
Q, q	Ladung (felderzeugend bzw. Probeladung)	$\mathrm{C} = \mathrm{A\,s}$	$e = 1{,}60 \cdot 10^{-19}\ \mathrm{C}$
I	Stromstärke	A	$I = \dot{Q}$
U	Spannung	$\mathrm{V} = \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{C}}$	–
R	ohmscher Widerstand	$\Omega = \frac{\mathrm{V}}{\mathrm{A}}$	–
$\vec{E}$, E	elektrische Feldstärke	$\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{C}} = \frac{\mathrm{V}}{\mathrm{m}}$	–
φ	elektrisches Potential	V	Bezugspunkt frei wählbar
ε_0	elektrische Feldkonstante	$\frac{\mathrm{A\,s}}{\mathrm{V\,m}}$	$8{,}85 \cdot 10^{-12}\ \frac{\mathrm{A\,s}}{\mathrm{V\,m}}$
ε_r	Dielektrizitätszahl (relative Permittivität)	–	Luft 1,0006, Papier $\approx 3{,}7$
C	Kapazität	$\mathrm{F} = \frac{\mathrm{C}}{\mathrm{V}}$	pF bis F
A	Plattenfläche bzw. Querschnittsfläche	$\mathrm{m^2}$	–
d	Plattenabstand	m	–
τ	Zeitkonstante, $\tau = RC$ bzw. $\tau = \frac{L}{R}$	s	–
E_{el}, E_{mag}	Energie im elektrischen bzw. magnetischen Feld	J	–
$\vec{B}$, B	magnetische Flussdichte	$\mathrm{T} = \frac{\mathrm{V\,s}}{\mathrm{m^2}}$	Erdfeld $\approx 50\ \mu\mathrm{T}$
μ_0	magnetische Feldkonstante	$\frac{\mathrm{V\,s}}{\mathrm{A\,m}}$	$1{,}26 \cdot 10^{-6}\ \frac{\mathrm{V\,s}}{\mathrm{A\,m}}$
μ_r	Permeabilitätszahl	–	Luft 1, Eisen bis einige Tausend
n	Windungszahl einer Spule	–	Formelsammlung: N
l, s	Länge einer Spule bzw. wirksame Länge eines Leiters im Feld	m	Formelsammlung: ℓ, s
Φ	magnetischer Fluss	$\mathrm{Wb} = \mathrm{V\,s}$	$\Phi = BA\cos(\alpha)$
L	Induktivität	$\mathrm{H} = \frac{\mathrm{V\,s}}{\mathrm{A}}$	mH bis H
F_{el}, F_L	elektrische Kraft, Lorentzkraft	N	–
m_e, m_p	Masse des Elektrons, des Protons	kg	$9{,}11 \cdot 10^{-31}$ kg, $1{,}67 \cdot 10^{-27}$ kg

Was ist abiturrelevant?

Dieses Skript geht an einigen Stellen über den Prüfungsstoff hinaus. Maßgeblich für das Abitur 2027 in Baden-Württemberg ist der **Bildungsplan 2016, Leistungsfach**, Abschnitt 3.6.2 (Elektromagnetische Felder) mit den Teilen elektrisches Feld, magnetisches Feld und Elektrodynamik. Dazu kommen der elektromagnetische Schwingkreis aus 3.6.3 und der Hertzsche Dipol mit dem elektromagnetischen Spektrum aus 3.6.4, weil sie Kondensator und Spule voraussetzen. Jede Abschnittsüberschrift trägt eine Marke – auch im Inhaltsverzeichnis:

Abi	**Prüfungsstoff.** Verstehen, erklären und rechnen können.
Abi teilweise	**Teilweise Prüfungsstoff.** Was genau dazugehört, steht in einem Hinweis direkt unter der Überschrift.
IQB-Pool	**Nicht im Bildungsplan, aber in den bundesweiten Bildungsstandards.** Kann über eine Aufgabe aus dem gemeinsamen Aufgabenpool der Länder im Abitur vorkommen (seit 2026 übernimmt Baden-Württemberg solche Aufgaben). Qualitativ erklären und mit den Formeln der Formelsammlung rechnen können.
Zusatz · nicht Abi	**Geht über Bildungsplan und Bildungsstandards hinaus.** Hilft beim Verstehen, wird im Abitur aber nicht vorausgesetzt.

Die graue Marke steht außerdem an Aufgaben im Aufgabenskript, die über den Prüfungsstoff hinausgehen. **Aufgaben ohne Marke gehören zum Prüfungsstoff.**

Die Skriptreihe zum Abitur 2027

Fünf Skripte decken zusammen den gesamten schriftlich prüfbaren Stoff des Leistungsfachs ab. Dieses Skript ist farbig hinterlegt. Für die letzten Wochen vor der Prüfung fasst das Lernskript PL-Σ **Abiturvorbereitung** alles in Kurzform zusammen (rechte Spalte: Kapitel dort); seine Formelübersicht gibt es auch als eigene Formelsammlung. Ganz zum Schluss: das Kompaktskript PL-K mit allen Formeln, Abbildungen und Merkpunkten der fünf Skripte auf wenigen Seiten, ohne Erklärungen.

Nr.	Skript	Bildungsplan 3.6 …	zusätzlich IQB-Pool	im Lernskript PL-Σ
PL1	Schwingungen	3.6.3 (1)–(5), (9); Gravitationsfeld als Grundlage für den Feldvergleich in 3.6.2	Resonanz bei erzwungenen Schwingungen	3; 5.5
PL2	Wellen	3.6.4 (1)–(7)	–	4
PL3	Elektrizitätslehre	3.6.2 (elektrisches und magnetisches Feld, Elektrodynamik), 3.6.3 (6)–(8) (Schwingkreis), 3.6.4 (8), (9) (Hertzscher Dipol, Spektrum)	Coulomb'sches Gesetz, Feld einer Punktladung	5–9
PL4	Wellenoptik	3.6.5; das Licht betreffende Teile von 3.6.4 (Huygens, Brechung, Polarisation)	Interferometer, Gesetz von Malus	10
PL5	Quantenphysik	3.6.6	Koinzidenzmethode, Weltbild, Spektren und Energieniveaus, Atommodell, Potentialtopf, Laser	11

Die Denk- und Arbeitsweisen (3.6.1) ziehen sich durch alle Skripte: Modelle von Licht und Materie in 4 und 5, Naturkonstanten wie G, ε_0, μ_0, e und h in 1, 3 und 5. Das vertiefende Themengebiet (3.6.7) wird 2027 nicht schriftlich geprüft.

Was im Abitur gegeben ist

Im Abitur 2027 sind die **mathematisch-naturwissenschaftliche Formelsammlung des IQB** und der wissenschaftliche Taschenrechner erlaubt (Facherlass 2027, 26.1.3). Zur Elektrizitätslehre steht darin sehr viel: $E = \frac{F}{q}$, $E = \frac{U}{d}$, das Coulombsche Gesetz und das Radialfeld, Potential und Spannung, Flächenladungsdichte, $C = \frac{Q}{U}$, $C =$

$\frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r A}{d}$, $E_{\text{el}} = \frac{1}{2} C U^2$, Auf- und Entladen mit Differentialgleichungen, Reihen- und Parallelschaltung von Kondensatoren, $B = \frac{F}{Is}$, das Feld der langen Spule und des geraden Leiters, die Lorentzkraft, die Hall-Spannung, magnetischer Fluss und Induktionsgesetz, $U_{\text{ind}} = B\ell v$, der ideale Transformator, $L = \frac{\mu_0 \mu_r N^2 A}{\ell}$, $U_{\text{ind}} = -L\dot{I}$, $E_{\text{mag}} = \frac{1}{2} L I^2$, Ein- und Ausschaltvorgang der Spule, die Thomsonsche Gleichung, die Schwingungsgleichungen des Schwingkreises, die Grundfrequenz des Dipols und $c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}}$.

Nicht darin stehen unter anderem: Feldlinienbilder und ihre Regeln, die Bahnen geladener Teilchen (Parabel, Kreisbahnradius $r = \frac{mv}{qB}$, Wien-Filter $v = \frac{E}{B}$, Geschwindigkeit nach Beschleunigung), die Lenzsche Regel, die Herleitungen und alle Erklärungen. Die Formelsammlung schreibt N für die Windungszahl, dieses Skript n wie der Bildungsplan.

Wie man den Bildungsplan liest

Begriffe in Klammern ohne Zusatz sind verbindlich, nach **„zum Beispiel“** nur Beispiele. Massenspektrograph, Wien-Filter, Generator, Transformator, Induktionsladegerät, Wirbelstrombremse und Induktionskochplatte werden nur als Beispiele genannt; die Grundprinzipien dahinter sind Prüfungsstoff, die Geräte werden in einer Abituraufgabe gegebenenfalls erklärt. Das **Coulombsche Gesetz** steht nur in den Bildungsstandards der KMK und ist deshalb mit IQB-Pool markiert. Der Hall-Effekt steht in keinem der beiden; er kommt in älteren Abituraufgaben vor und ist hier Zusatz.

Die verbindlichen Kompetenzen und wo sie stehen:

Bildungsplan	Die Schülerinnen und Schüler können …	Abschnitt
3.6.2.1 (1)–(3)	Kraftwirkungen zwischen Ladungen; Struktur elektrischer Felder (Feldlinien, homogen, Punktladung, Dipol, Quelle, Senke); $E = \frac{F}{q}$	Kap. 2
3.6.2.1 (4)–(6)	Feldstärke im Plattenkondensator $E = \frac{U}{d}$; Kapazität $C = \frac{Q}{U}$; $C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r A}{d}$, $E_{\text{Kond}} = \frac{1}{2} C U^2$	Kap. 4
3.6.2.1 (7)	Auf- und Entladevorgang anhand von U-t-Diagrammen erläutern	Kap. 5
3.6.2.1 (8)	Spannung und Potential; Äquipotentiallinien (homogenes Feld, Dipol)	Kap. 3
3.6.2.1 (9), 3.6.2.2 (7)	elektrisches Feld, Magnetfeld und Gravitationsfeld vergleichen	Kap. 9
3.6.2.1 (10)	Bewegung geladener Teilchen parallel und senkrecht zum homogenen E-Feld	Kap. 6
3.6.2.2 (1)–(4)	Struktur magnetischer Felder; Kraft auf Leiter $F = BIs$; Lorentzkraft $F_L = qvB$; Feld der schlanken Spule	Kap. 7, 8.1
3.6.2.2 (5), (6)	Bewegung senkrecht zum homogenen B-Feld (Massenspektrograph); gekreuzte Felder (Wien-Filter)	Kap. 8
3.6.2.3 (1)–(3)	Induktion am bewegten Leiter; Faradaysches Induktionsgesetz (Fluss, Lenzsche Regel); technische Anwendungen	Kap. 10
3.6.2.3 (4), (5)	Selbstinduktion beim Ein- und Ausschalten ($U_{\text{ind}} = -L\dot{I}$); schlanke Spule ($L$, $E_{\text{Spule}} = \frac{1}{2} L I^2$)	Kap. 11
3.6.2.3 (6)	Maxwell-Gleichungen im Überblick	13.4
3.6.2.3 (7)	technische Anwendung von Wirbelströmen	10.7
3.6.3 (6)–(8)	Schwingkreis erklären, Energieumwandlungen, Differentialgleichung, Vergleich mit dem Federpendel	Kap. 12
3.6.4 (8), (9)	elektromagnetisches Spektrum; Hertzscher Dipol und Abstrahlung	Kap. 13

1 Wiederholung: Ladung, Strom, Spannung

1.1 Ladung und Stromstärke Abi

Es gibt positive und negative elektrische Ladungen. Gleichnamige Ladungen stoßen sich ab, ungleichnamige ziehen sich an. Ladung kann weder erzeugt noch vernichtet werden (**Ladungserhaltung**); ungleichnamige Ladungen können sich nur neutralisieren. Reibt man zwei Körper aneinander, wandern Elektronen vom einen zum anderen – etwa vom Fell auf einen PVC-Stab, der danach negativ geladen ist. Jede Ladung ist ein ganzzahliges Vielfaches der **Elementarladung** $e = 1{,}60 \cdot 10^{-19}\ \mathrm{C}$.

Merksatz

Die **Stromstärke** gibt an, wie viel Ladung pro Zeit durch einen Leiterquerschnitt fließt:

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \quad \text{bzw.} \quad I(t) = \dot{Q}(t).$$

Umgekehrt ist die transportierte Ladung die **Fläche unter der t-I-Kurve**: $Q = \int_{t_1}^{t_2} I(t)\,\mathrm{d}t$. Bei konstantem Strom ist $Q = I \cdot t$.

Beispiel 1

Ein Akku mit der Angabe 2000 mAh kann $Q = 2{,}0\ \mathrm{A} \cdot 3600\ \mathrm{s} = 7200\ \mathrm{C}$ abgeben – etwa $4{,}5 \cdot 10^{22}$ Elektronen. Liefert er 0,5 A, ist er nach 4 Stunden leer.

Ausprobieren: **Was ist Stromstärke?** ↗ Üben: **noctua** ↗ Einordnen: **Stromkreis: U, I, R & Leistung** ↗

1.2 Spannung, Widerstand und Schaltungen Abi

Merksatz

Wird beim Fließen der Ladung Q zwischen zwei Punkten die Energie W umgesetzt, liegt zwischen ihnen die **Spannung**

$$U = \frac{W}{Q}\,, \quad [U] = \mathrm{V} = \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{C}}.$$

Der **Widerstand** eines Bauteils ist $R = \frac{U}{I}$. In einer **Reihenschaltung** ist die Stromstärke überall gleich, die Spannungen addieren sich, $R = R_1 + R_2$. In einer **Parallelschaltung** ist die Spannung an allen Zweigen gleich, die Ströme addieren sich, $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$.

Ein Teilchen der Ladung q, das die Spannung U durchläuft, gewinnt oder verliert die Energie $\Delta E = qU$ (Formelsammlung). Diese Beziehung ist die Brücke von den Stromkreisen zu den Feldern: Was im Stromkreis die Elektronen antreibt, ist ein elektrisches Feld im Leiter.

Ausprobieren: **Was ist Spannung?** ↗ Üben: **noctua** ↗ Einordnen: **Stromkreis: U, I, R & Leistung** ↗



2 Das elektrische Feld

2.1 Kräfte zwischen Ladungen, Influenz Abi

Ein geladener Körper übt auf andere Ladungen eine Kraft aus, ohne sie zu berühren. Hält man eine geladene Folie über Grießkörner, springen diese hoch: Die Folie verschiebt in jedem Korn die Ladungen – auf der zugewandten Seite sammelt sich Ladung mit entgegengesetztem Vorzeichen, die abgewandte Seite lädt sich gleichnamig auf. Weil die ungleichnamige Ladung näher ist, überwiegt die Anziehung. Diese Ladungstrennung durch ein äußeres Feld heißt **Influenz**. Berühren die Körner die Folie, nehmen sie deren Ladung auf und werden abgestoßen.

Ausprobieren: **Influenz und Elektroskop** ↗ Üben: **noctua** ↗ Einordnen: **Elektrisches Feld & Kondensator** ↗

2.2 Feldlinienbilder Abi

Um die Wirkung einer Ladung im ganzen Raum zu beschreiben, führt man das **elektrische Feld** ein: Jeder Raumpunkt erhält die Kraft, die dort auf eine kleine positive **Probeladung** wirken würde. Sichtbar macht man das Feld mit Grießkörnern in Rizinusöl, die sich längs der Feldlinien aufreihen.

Merksatz

Regeln für elektrische Feldlinien:

- Sie geben die Richtung der Kraft auf eine **positive** Probeladung an; sie beginnen an positiven Ladungen (**Quellen**) und enden an negativen (**Senken**).
- Je dichter die Feldlinien, desto stärker das Feld.
- Feldlinien schneiden sich nie (an jedem Ort hat die Kraft nur eine Richtung).
- An der Oberfläche eines Leiters stehen sie senkrecht. Stünden sie schräg, würden die frei beweglichen Ladungen im Leiter so lange verschoben, bis das Feld senkrecht steht. Im Inneren eines Leiters ist im Gleichgewicht kein Feld (**Faradayscher Käfig**).

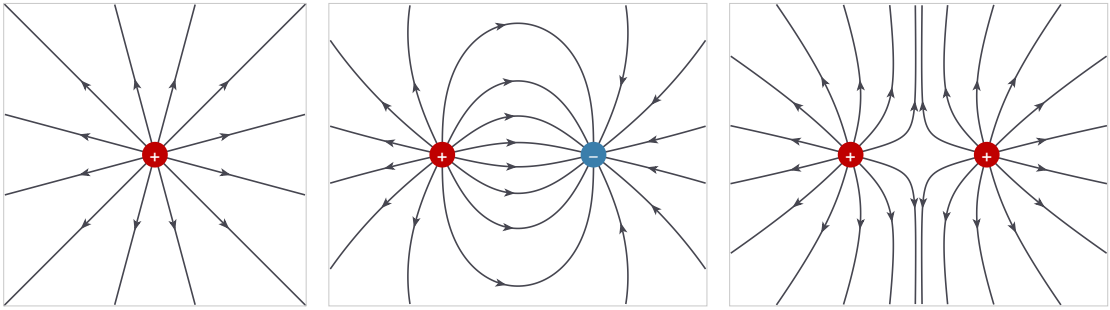


Abbildung 22: Berechnete Feldlinienbilder. Links: Punktladung (radiales Feld, die Linien werden nach außen dünner). Mitte: elektrischer Dipol aus zwei entgegengesetzt gleichen Ladungen – alle Linien von der positiven Ladung enden an der negativen. Rechts: zwei gleiche positive Ladungen – zwischen ihnen gibt es einen feldfreien Punkt.

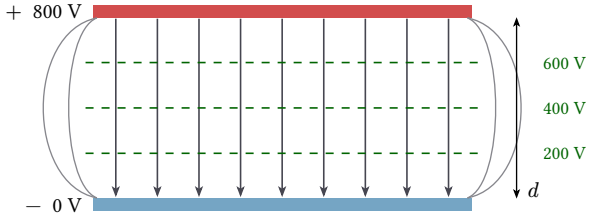


Abbildung 23: Feld zwischen zwei parallelen, entgegengesetzt geladenen Platten (Plattenkondensator): Im Inneren sind die Feldlinien parallel und gleich dicht, das Feld ist **homogen**. Nur am Rand quillt es etwas heraus. Gestrichelt die Äquipotentiallinien (Kap. 3).

Typischer Fehler

Falsch: Feldlinien sind die Bahnen, auf denen sich geladene Teilchen bewegen.

Richtig: Feldlinien zeigen an jedem Punkt die Richtung der Kraft auf eine positive Probeladung. Die Bahn folgt der Feldlinie nur, wenn das Teilchen aus der Ruhe startet und die Feldlinie gerade ist.

Ein Elektron, das quer in einen Kondensator fliegt, bewegt sich auf einer Parabel quer zu den Feldlinien.

Ausprobieren: **Elektrische Feldlinien und Potential** ↗ Üben: **noctua** ↗ Einordnen: **Elektrisches Feld & Kondensator** ↗

2.3 Die elektrische Feldstärke Abi

Definition

Die **elektrische Feldstärke** an einem Ort ist die Kraft auf eine Probeladung q, geteilt durch diese Ladung:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}_{\text{el}}}{q}\,, \quad [E] = \frac{\text{N}}{\text{C}} = \frac{\text{V}}{\text{m}}.$$

Sie zeigt in Richtung der Kraft auf eine positive Ladung. Auf eine Ladung q wirkt im Feld E die Kraft $F_{\text{el}} = q \cdot E$; auf negative Ladungen entgegen der Feldrichtung.

Messen kann man E, indem man eine kleine geladene Kugel an einem Kraftsensor in das Feld bringt und Kraft und Ladung bestimmt. Trägt man F über q auf, ergibt sich eine Ursprungsgerade mit der Steigung E. Die Feldstärke ist eine Eigenschaft des Feldes, nicht der Probeladung.

Beispiel 2

Das Erdfeld bei schönem Wetter hat in Bodennähe etwa $E = 130\ \frac{\text{N}}{\text{C}}$ und zeigt nach unten. Auf ein Elektron wirkt $F = eE = 2{,}1 \cdot 10^{-17}$ N nach oben; seine Gewichtskraft ist $m_e g = 8{,}9 \cdot 10^{-30}$ N – rund 10^{12}-mal kleiner. Bei geladenen Elementarteilchen spielt die Gravitation deshalb fast nie eine Rolle.

Ausprobieren: **Elektrische Feldlinien und Potential** ↗ Üben: **noctua** ↗ Einordnen: **Elektrisches Feld & Kondensator** ↗

2.4 Das Coulombsche Gesetz IQB-Pool

Nicht im Bildungsplan, aber in den Bildungsstandards (erhöhtes Niveau). Steht in der Formelsammlung.

Charles Augustin de Coulomb maß 1785 mit einer Drehwaage die Kraft zwischen zwei kleinen geladenen Kugeln. Sie gehorcht demselben Abstandsgesetz wie die Gravitation:

Merksatz

Coulombsches Gesetz: Zwei Punktladungen Q_1 und Q_2 im Abstand r üben aufeinander die Kraft

$$F = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{Q_1 Q_2}{r^2}$$

aus (abstoßend bei gleichen, anziehend bei verschiedenen Vorzeichen). Daraus folgt die Feldstärke im **Radialfeld** einer Punktladung Q:

$$E(r) = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{Q}{r^2}.$$

$\varepsilon_0 = 8{,}85 \cdot 10^{-12}\ \frac{\text{A s}}{\text{V m}}$ ist die **elektrische Feldkonstante**. In einem Isolator mit der Dielektrizitätszahl ε_r ist ε_0 durch $\varepsilon_0\varepsilon_r$ zu ersetzen.

Das Feld einer geladenen Kugel ist außerhalb der Kugel genau so, als säße die ganze Ladung im Mittelpunkt – wie beim Gravitationsfeld der Erde (Skript PL1).

Beispiel 3

Im Wasserstoffatom sind Proton und Elektron etwa $r = 5{,}3 \cdot 10^{-11}$ m voneinander entfernt. Die elektrische Anziehung ist

$$F = \frac{(1{,}60 \cdot 10^{-19}\ \mathrm{C})^2}{4\pi \cdot 8{,}85 \cdot 10^{-12}\ \frac{\mathrm{A\,s}}{\mathrm{V\,m}} \cdot (5{,}3 \cdot 10^{-11}\ \mathrm{m})^2} = 8{,}2 \cdot 10^{-8}\ \mathrm{N}\ ,$$

die Gravitationsanziehung dagegen nur $\frac{G m_e m_p}{r^2} = 3{,}6 \cdot 10^{-47}$ N – ein Verhältnis von 10^{39}.

Ausprobieren: **Elektrische Feldlinien und Potential** ↗ Üben: **noctua** ↗ Einordnen: **Elektrisches Feld & Kondensator** ↗

2.5 Der elektrische Fluss

Zusatz · nicht Abi

Durchsetzt ein homogenes Feld eine Fläche A unter dem Winkel α zur Flächennormale, heißt $\Phi_E = E \cdot A \cdot \cos(\alpha)$ der **elektrische Fluss** – ein Maß dafür, wie viele Feldlinien durch die Fläche treten. Der Fluss durch eine geschlossene Fläche hängt nur von der eingeschlossenen Ladung ab: $\Phi_E = \frac{Q}{\varepsilon_0}$ (Gaußsches Gesetz, erste Maxwell-Gleichung, Abschnitt 13.4). Für eine Kugel um eine Punktladung folgt daraus sofort $E \cdot 4\pi r^2 = \frac{Q}{\varepsilon_0}$, also das Coulombsche Gesetz.

Zur Vertiefung: **Aufgabe 37** (Ladung und Strom, im Aufgabenskript), **Aufgabe 38** (Feldstärke und Kräfte, im Aufgabenskript), **Aufgabe 39** (Feldlinien skizzieren, im Aufgabenskript), **Aufgabe 40** (Coulomb im Atom, im Aufgabenskript) und **Aufgabe 167** (in der Sammlung Abi-ähnlich).



3 Spannung und Potential

3.1 Arbeit im homogenen Feld Abi

Bewegt man eine positive Ladung q im homogenen Feld **gegen** die Feldrichtung um die Strecke s, muss man die Arbeit $W = F \cdot s = qEs$ verrichten; die Ladung gewinnt potentielle Energie – wie ein Stein, den man im Schwerefeld anhebt. Bewegt man sie **senkrecht** zu den Feldlinien, ist keine Arbeit nötig. Und: Die Arbeit hängt nur von Anfangs- und Endpunkt ab, nicht vom Weg.

Ausprobieren: **Arbeit im elektrischen Feld** ↗ Üben: **noctua** ↗ Einordnen: **Divergenz, Rotation & Integralsätze** ↗ · **Elektrisches Feld & Kondensator** ↗

3.2 Potential und Spannung Abi

Definition

Das **Potential** φ an einem Punkt ist die potentielle Energie einer Probeladung, geteilt durch die Ladung: $\varphi = \frac{E_{\text{pot}}}{q}$. Es hängt von der Wahl des Bezugspunkts ($\varphi = 0$) ab, etwa der geerdeten Platte. Die **Spannung** zwischen zwei Punkten ist die Potentialdifferenz

$$U_{AB} = \varphi_B - \varphi_A$$

und hängt nicht vom Bezugspunkt ab.

Merksatz

Im **homogenen Feld** gilt für die Spannung zwischen zwei Punkten im Abstand d längs der Feldlinien

$$U = E \cdot d \quad \Leftrightarrow \quad E = \frac{U}{d}.$$

Daher die Einheit $\frac{\text{V}}{\text{m}}$ der Feldstärke: Sie gibt an, wie schnell das Potential längs der Feldlinien abnimmt. Feldlinien zeigen immer vom höheren zum niedrigeren Potential.

Ausprobieren: **Arbeit im elektrischen Feld** ↗ Üben: **noctua** ↗ Einordnen: **Divergenz, Rotation & Integralsätze** ↗ · **Elektrisches Feld & Kondensator** ↗

3.3 Äquipotentiallinien Abi

Verbindet man alle Punkte gleichen Potentials, erhält man **Äquipotentiallinien** (im Raum: Äquipotentialflächen). Längs einer Äquipotentiallinie bewegt sich eine Ladung ohne Arbeit; deshalb stehen Äquipotentiallinien überall **senkrecht** auf den Feldlinien.

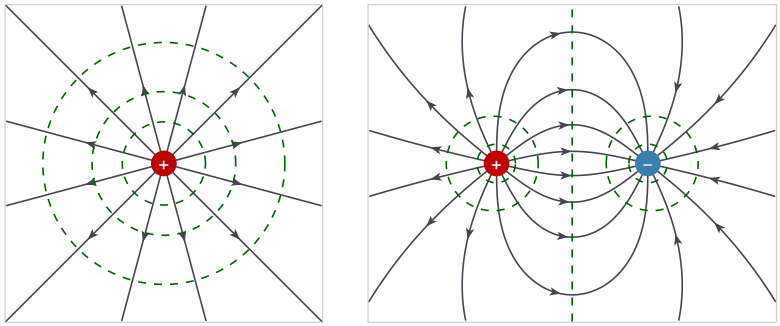


Abbildung 24: Äquipotentiallinien (grün gestrichelt) einer Punktladung – konzentrische Kreise – und eines Dipols. Sie schneiden die Feldlinien überall rechtwinklig. Beim Dipol ist die Mittelsenkrechte eine Äquipotentiallinie (Potential null, wenn man es im Unendlichen null setzt). Im homogenen Feld des Plattenkondensators sind die Äquipotentiallinien Geraden parallel zu den Platten (Abbildung in Abschnitt 2.2).

Ausprobieren: **Elektrische Feldlinien und Potential** ↗ · **Arbeit im elektrischen Feld** ↗ Üben: **noctua** ↗ Einordnen: **Elektrisches Feld & Kondensator** ↗ · **Divergenz, Rotation & Integralsätze** ↗

3.4 Energie in Elektronenvolt Abi

Durchläuft ein Teilchen der Ladung q die Spannung U, ändert sich seine Energie um $\Delta E = qU$. Für Elektronen und Protonen benutzt man deshalb gern die Einheit **Elektronenvolt**: 1 eV ist die Energie, die ein Teilchen mit der Ladung e beim Durchlaufen von 1 V gewinnt, $1\ \text{eV} = 1{,}60 \cdot 10^{-19}$ J. Ein Elektron, das mit 250 V beschleunigt wurde, hat 250 eV.

Ausprobieren: **Zyklotron** ↗ · **Linearbeschleuniger** ↗ Üben: **noctua** ↗ Einordnen: **Teilchenbeschleuniger** ↗

3.5 Potential einer Punktladung IQB-Pool

Folgt aus dem Coulombschen Gesetz, steht in der Formelsammlung.

Im Radialfeld ist E nicht konstant; man summiert die Arbeit wie bei der Gravitation (Skript PL1) über kleine Wegstücke. Mit dem Bezugspunkt im Unendlichen ergibt sich für das Potential im Abstand r von einer Punktladung Q:

$$\varphi(r) = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{Q}{r}.$$

Zur Vertiefung: **Aufgabe 41** (Kondensator mit Äquipotentiallinien, im Aufgabenskript) und **Aufgabe 168** (in der Sammlung Abi-ähnlich).

Ausprobieren: **Elektrische Feldlinien und Potential** ↗ · **Arbeit im elektrischen Feld** ↗ Üben: **noctua** ↗ Einordnen: **Elektrisches Feld & Kondensator** ↗ · **Divergenz, Rotation & Integralsätze** ↗



4 Der Kondensator

4.1 Kapazität Abi

Ein **Kondensator** besteht aus zwei voneinander isolierten Leitern, etwa zwei Platten. Schließt man ihn an eine Spannungsquelle an, fließen Elektronen auf die eine Platte und von der anderen weg; die Platten tragen danach die Ladungen $+Q$ und $-Q$. Je größer die Spannung, desto mehr Ladung: $Q \sim U$.

Definition

Die **Kapazität** eines Kondensators ist

$$C = \frac{Q}{U}\,, \quad [C] = \mathrm{F} = \frac{\mathrm{C}}{\mathrm{V}}$$

(Farad). Sie gibt an, wie viel Ladung der Kondensator pro Volt speichert. Übliche Werte reichen von Picofarad (pF) bis zu einigen Farad bei Doppelschichtkondensatoren.

Ausprobieren: **Plattenkondensator und Kapazität** ↗ Üben: **noctua** ↗ Einordnen: **Elektrisches Feld & Kondensator** ↗ · **Dielektrika & Polarisation** ↗

4.2 Der Plattenkondensator Abi

Misst man die Ladung eines Plattenkondensators bei fester Spannung für verschiedene Plattenflächen und -abstände, findet man $Q \sim A$ und $Q \sim \frac{1}{d}$. Genauer: Die Flächenladungsdichte auf den Platten ist proportional zur Feldstärke zwischen ihnen,

$$\sigma = \frac{Q}{A} = \varepsilon_0 \cdot E.$$

Mit $E = \frac{U}{d}$ folgt $Q = \frac{\varepsilon_0 A U}{d}$:

Merksatz

Kapazität des Plattenkondensators:

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \cdot \frac{A}{d}$$

ε_r ist die **Dielektrizitätszahl** des Materials zwischen den Platten (Vakuum 1, Luft 1,0006, Papier 3,7, Wasser 81). Große Platten, kleiner Abstand und ein gutes Dielektrikum ergeben eine große Kapazität.

Typischer Fehler

Falsch: Bei einem geladenen, von der Quelle getrennten Kondensator wird der Plattenabstand verdoppelt: „Die Spannung bleibt gleich, also halbiert sich die Ladung."

Richtig: Getrennt kann keine Ladung abfließen: Q bleibt, damit auch $E = \frac{Q}{\varepsilon_0 A}$. Die Kapazität halbiert sich, die Spannung $U = Ed$ verdoppelt sich.

Zuerst immer klären: Bleibt die Quelle **angeschlossen** (U konstant), oder ist der Kondensator **abgetrennt** (Q konstant)? Davon hängt alles Weitere ab.

Ausprobieren: **Plattenkondensator und Kapazität** ↗ Üben: **noctua** ↗ Einordnen: **Elektrisches Feld & Kondensator** ↗ · **Dielektrika & Polarisation** ↗

4.3 Das Dielektrikum Abi

Schiebt man einen Isolator (etwa Kunststoff) zwischen die Platten, werden seine Moleküle im Feld polarisiert: Die Elektronenhüllen verschieben sich leicht gegen die Kerne, polare Moleküle richten sich aus. An den Oberflächen des Isolators entstehen Ladungen, die den Plattenladungen entgegengesetzt sind und das Feld im Inneren schwächen. Bei abgetrennter Spannungsquelle sinkt deshalb die Spannung auf $\frac{U}{\varepsilon_r}$; bei angeschlossener Quelle fließt zusätzliche Ladung nach. In beiden Fällen ist die Kapazität um den Faktor ε_r gestiegen.

Wird die Feldstärke zu groß, wird der Isolator leitend, es kommt zum **Durchschlag** – in Luft bei etwa $3 \cdot 10^6\ \frac{\mathrm{V}}{\mathrm{m}}$ (Blitz, Funken), in Papier bei rund $1{,}5 \cdot 10^7\ \frac{\mathrm{V}}{\mathrm{m}}$.

Veränderung	Kondensator von der Quelle getrennt: Q bleibt	Kondensator an der Quelle: U bleibt
Plattenabstand verdoppeln	C halb, U doppelt, E gleich, Energie doppelt	C halb, Q halb, E halb, Energie halb
Dielektrikum einschieben	C ε_r-fach, U und E sinken auf $\frac{1}{\varepsilon_r}$, Energie sinkt	C ε_r-fach, Q ε_r-fach, E gleich, Energie steigt

Ausprobieren: **Plattenkondensator und Kapazität** ↗ Üben: **noctua** ↗ Einordnen: **Dielektrika & Polarisation** ↗ · **Elektrisches Feld & Kondensator** ↗

4.4 Energie im Kondensator Abi

Um einen Kondensator zu laden, muss man jede weitere Ladungsportion ΔQ gegen die schon vorhandene Spannung $U = \frac{Q}{C}$ auf die Platte bringen. Die Arbeit ist die Fläche unter der Q-U-Geraden – ein Dreieck:

Merksatz

$$E_{\text{el}} = \frac{1}{2}QU = \frac{1}{2}CU^2 = \frac{Q^2}{2C}$$

Die Energie steckt im elektrischen Feld zwischen den Platten. Sie wächst mit dem **Quadrat** der Spannung.

Beispiel 4

Ein Plattenkondensator mit $A = 314\ \text{cm}^2$ und $d = 0{,}50\ \text{mm}$ (Luft) hat $C = \frac{8{,}85 \cdot 10^{-12} \cdot 0{,}0314}{0{,}00050}\ \text{F} = 0{,}56\ \text{nF}$. Bei 230 V trägt er $Q = 0{,}13\ \mu\text{C}$ und speichert $E_{\text{el}} = \frac{1}{2} \cdot 0{,}56 \cdot 10^{-9}\ \text{F} \cdot (230\ \text{V})^2 = 15\ \mu\text{J}$ – winzig im Vergleich zu einer Batterie. Deshalb nutzt man Kondensatoren nicht als Energiespeicher für lange Zeit, sondern wo Energie **schnell** abgegeben werden muss: Blitzlicht, Defibrillator, Pufferung in Netzteilen.

Ausprobieren: **Plattenkondensator und Kapazität** ↗ Üben: **noctua** ↗ Einordnen: **Elektrisches Feld & Kondensator** ↗ · **Dielektrika & Polarisation** ↗

4.5 Kondensatoren schalten Zusatz · nicht Abi

Parallel geschaltete Kondensatoren liegen an derselben Spannung, die Ladungen addieren sich: $C = C_1 + C_2$ (wie größere Platten). In Reihe tragen beide dieselbe Ladung, die Spannungen addieren sich: $\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$ (wie größerer Abstand). Die Formeln stehen in der Formelsammlung, im Bildungsplan dagegen nicht.

Zur Vertiefung: **Aufgabe 42** (Plattenkondensator verändern, im Aufgabenskript), **Aufgabe 164** (in der Sammlung Abi-ähnlich), **Aufgabe 165** (in der Sammlung Abi-ähnlich), **Aufgabe 166** (in der Sammlung Abi-ähnlich), **Aufgabe 169** (in der Sammlung Abi-ähnlich), **Aufgabe 168** (in der Sammlung Abi-ähnlich) und **Aufgabe 170** (in der Sammlung Abi-ähnlich).



5 Auf- und Entladen eines Kondensators

5.1 Der Entladevorgang Abi

Ein auf U_0 geladener Kondensator wird über einen Widerstand R entladen. Zu Beginn fließt der Strom $I_0 = \frac{U_0}{R}$. Mit der Ladung sinkt aber die Spannung und damit der Strom – der Kondensator entlädt sich immer langsamer.

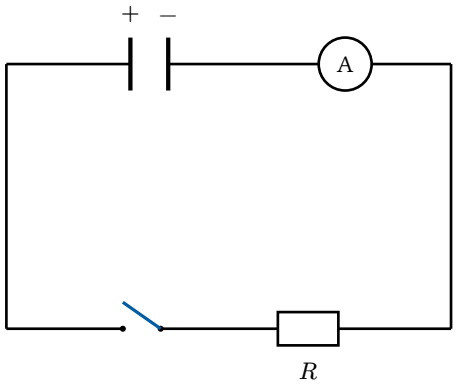


Abbildung 25: Schaltung zum Auf- und Entladen: Kondensator, Widerstand und Strommesser in Reihe. Mit einem Messwerterfassungssystem zeichnet man $U_C(t)$ und $I(t)$ auf.

Nach der Maschenregel ist die Kondensatorspannung gleich der Spannung am Widerstand: $\frac{Q}{C} = R \cdot I$. Da der Strom die Ladung auf dem Kondensator verringert, ist $I = -\dot{Q}$. Daraus folgt eine Differentialgleichung **erster** Ordnung:

$$\dot{Q}(t) = -\frac{1}{RC} \cdot Q(t).$$

Gesucht ist eine Funktion, deren Ableitung proportional zur Funktion selbst ist – Sinus und Kosinus scheiden aus, es ist die Exponentialfunktion. Der Ansatz $Q(t) = Q_0 e^{-kt}$ liefert $-kQ_0 e^{-kt} = -\frac{1}{RC} \cdot Q_0 e^{-kt}$, also $k = \frac{1}{RC}$.

Merksatz

Entladen: $Q(t) = Q_0 e^{-\frac{t}{RC}}, \quad U_C(t) = U_0 e^{-\frac{t}{RC}}, \quad I(t) = -I_0 e^{-\frac{t}{RC}}$

Aufladen an der Spannung U_0: $\quad U_C(t) = U_0\left(1 - e^{-\frac{t}{RC}}\right), \quad I(t) = I_0 e^{-\frac{t}{RC}}$

Die **Zeitkonstante** $\tau = RC$ ist die Zeit, nach der die Spannung beim Entladen auf $\frac{1}{e} \approx 37\%$ gesunken ist (beim Laden auf 63% gestiegen). Nach der **Halbwertszeit** $T_{\frac{1}{2}} = RC\ln(2) \approx 0{,}69RC$ hat sie sich halbiert, nach 5τ ist der Vorgang praktisch abgeschlossen.

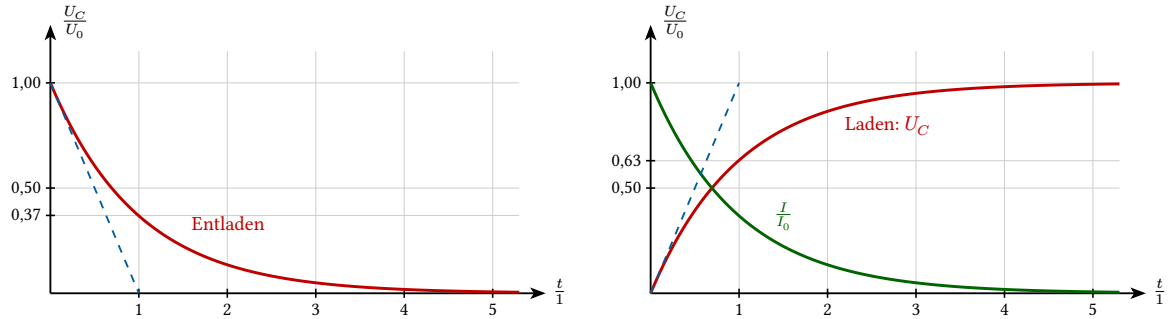


Abbildung 26: Entlade- und Ladekurve in Einheiten der Zeitkonstante. Die Tangente im Startpunkt (blau gestrichelt) schneidet die Zielgerade genau bei $t = \tau$ – so liest man τ aus einem Messdiagramm ab. Beim Laden nimmt der Strom ebenso exponentiell ab wie beim Entladen.

Typischer Fehler

Falsch: Nach der Zeitkonstante $\tau = RC$ ist der Kondensator halb entladen.

Richtig: Nach τ ist die Spannung auf $\frac{1}{e} \approx 37\%$ gefallen. Halb entladen ist er nach der Halbwertszeit $T_{\frac{1}{2}} = \tau\ln(2) \approx 0{,}69\tau$.

Ausprobieren: **Kondensator laden und entladen** ↗ Üben: **noctua** ↗ Einordnen: **Elektrisches Feld & Kondensator** ↗

5.2 Diagramme auswerten Abi

Aus einem gemessenen t-U- oder t-I-Diagramm lassen sich die Größen des Kreises bestimmen:

- **Zeitkonstante** über die Tangente im Startpunkt, über den 37%-Wert oder über die Halbwertszeit $T_{\frac{1}{2}} = \tau \ln(2)$. Mit bekanntem R folgt $C = \frac{\tau}{R}$.
- **Gespeicherte Ladung** als Fläche unter der t-I-Kurve (Kästchen zählen); dann $C = \frac{Q_0}{U_0}$.
- **Halblogarithmisch** aufgetragen ($\ln(U)$ über t) wird die Kurve zur Geraden mit der Steigung $-\frac{1}{RC}$.

Beispiel 5

Ein Kondensator wird über $R = 10\ \text{k}\Omega$ von 12 V entladen; nach 0,35 s ist die Spannung auf 6,0 V gesunken. Dann ist $T_{\frac{1}{2}} = 0{,}35\ \text{s}$, $\tau = \frac{0{,}35\ \text{s}}{\ln(2)} = 0{,}50\ \text{s}$ und $C = \frac{\tau}{R} = 50\ \mu\text{F}$. Der Anfangsstrom ist $I_0 = 1{,}2\ \text{mA}$, die geflossene Gesamtladung $Q_0 = CU_0 = 0{,}60\ \text{mC}$.

Zur Vertiefung: **Aufgabe 43** (Entladekurve auswerten, im Aufgabenskript) und **Aufgabe 171** (in der Sammlung Abi-ähnlich).

Ausprobieren: **Kondensator laden und entladen** ↗ Üben: **noctua** ↗ Einordnen: **Elektrisches Feld & Kondensator** ↗



6 Geladene Teilchen im elektrischen Feld

6.1 Beschleunigung längs der Feldlinien Abi

Ein Teilchen der Ladung q und Masse m startet aus der Ruhe und durchläuft die Spannung U (etwa zwischen Glühkathode und Lochanode einer Elektronenkanone). Es gewinnt die Energie qU:

Merksatz

$$qU = \frac{1}{2}mv^2 \quad \Rightarrow \quad v = \sqrt{\frac{2qU}{m}}$$

Das gilt für jedes Feld, auch inhomogene, weil nur die Spannung zählt. Für Elektronen ab etwa 10 kV ist die Rechnung nicht mehr genau (relativistische Korrektur, Skript Abiturvorbereitung).

Beispiel 6

Elektronen, die mit 250 V beschleunigt werden, erreichen $v = \sqrt{\frac{2 \cdot 1{,}60 \cdot 10^{-19}\ \text{C} \cdot 250\ \text{V}}{9{,}11 \cdot 10^{-31}\ \text{kg}}} = 9{,}37 \cdot 10^6\ \frac{\text{m}}{\text{s}}$ – drei Prozent der Lichtgeschwindigkeit.

Ausprobieren: **Elektronen im Querfeld: Braunsche Röhre ↗** · **Linearbeschleuniger ↗** Üben: **noctua ↗** Einordnen: **Elektrisches Feld & Kondensator ↗** · **Teilchenbeschleuniger ↗**

6.2 Ablenkung quer zum Feld Abi

Tritt ein Elektron mit v_0 parallel zu den Platten in einen Plattenkondensator ein, wirkt die konstante Kraft $F = eE$ senkrecht zur Flugrichtung. Die Bewegung zerfällt wie beim waagrechten Wurf in zwei unabhängige Teile:

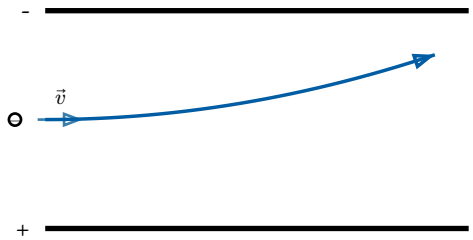


Abbildung 27: Elektron im homogenen Feld eines Plattenkondensators: In Flugrichtung gleichförmig, quer dazu gleichmäßig beschleunigt – die Bahn ist eine Parabel.

Merksatz

- parallel zu den Platten: $x(t) = v_0 t$ (keine Kraft),
- senkrecht dazu: $y(t) = \frac{1}{2}at^2$ mit $a = \frac{qE}{m} = \frac{qU}{md}$.

Eliminiert man $t = \frac{x}{v_0}$, erhält man die **Parabelbahn**

$$y(x) = \frac{qU}{2mdv_0^2} \cdot x^2.$$

Wurde das Teilchen vorher mit U_B beschleunigt ($mv_0^2 = 2qU_B$), wird daraus $y = \frac{Ux^2}{4dU_B}$ – unabhängig von Ladung und Masse. Nach dem Kondensator fliegt das Teilchen geradlinig weiter.

Diese Ablenkung nutzte man in der Braunschen Röhre (Oszilloskop, alte Fernseher): Zwei Plattenpaare lenken den Elektronenstrahl waagrecht und senkrecht ab.

Typischer Fehler

Falsch: Nach dem Verlassen des Kondensators fliegt das Elektron auf der Parabel weiter.
Richtig: Außerhalb des Feldes wirkt keine Kraft mehr: Das Elektron fliegt geradlinig weiter, in Richtung der Tangente an die Parabel am Austrittspunkt.

Für die Ablenkung auf einem entfernten Schirm addiert man deshalb die Ablenkung im Kondensator und die auf der geraden Strecke danach.

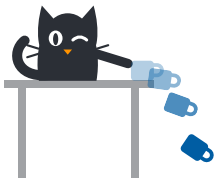
Ausprobieren: **Elektronen im Querfeld: Braunsche Röhre ↗** · **ionær ↗** Üben: **noctua ↗** Einordnen: **Elektrisches Feld & Kondensator ↗** · **Magnetfeld & Lorentzkraft ↗**

6.3 Schwebende Teilchen Abi

Im Feld eines waagrecht liegenden Plattenkondensators kann ein geladenes Teilchen schweben, wenn die elektrische Kraft die Gewichtskraft gerade aufhebt: $qE = \frac{qU}{d} = mg$. Robert Millikan bestimmte so ab 1909 die Ladungen vieler winziger Öltröpfchen und fand, dass sie stets ganzzahlige Vielfache von $e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C sind – der Nachweis, dass elektrische Ladung **gequantelt** ist.

Zur Vertiefung: **Aufgabe 44** (Elektronenstrahl im Kondensator, im Aufgabenskript), **Aufgabe 175** (in der Sammlung Abi-ähnlich), **Aufgabe 176** (in der Sammlung Abi-ähnlich) und **Aufgabe 45** (Schwebendes Öltröpfchen, im Aufgabenskript).

Ausprobieren: **Millikan-Versuch** ↗ Üben: **noctua** ↗ Einordnen: **Elektrisches Feld & Kondensator** ↗



7 Das magnetische Feld

7.1 Dauermagnete und Feldlinien Abi

Jeder Magnet hat einen Nord- und einen Südpol; gleichnamige Pole stoßen sich ab, ungleichnamige ziehen sich an. Anders als bei elektrischen Ladungen lassen sich die Pole nicht trennen: Zerbricht man einen Magneten, hat jedes Stück wieder beide Pole. Die Struktur des Feldes zeigen Eisenfeilspäne oder kleine Kompassnadeln.

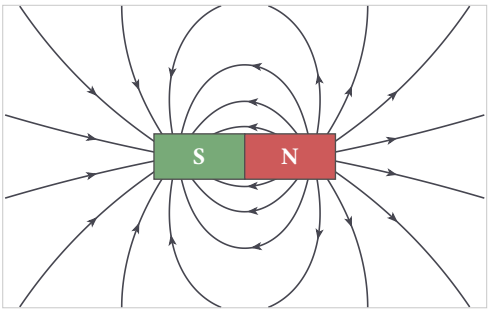


Abbildung 28: Magnetfeld eines Stabmagneten (außen wie das Feld eines Dipols berechnet). Die Feldlinien treten am Nordpol aus und am Südpol ein; im Inneren laufen sie weiter vom Süd- zum Nordpol – magnetische Feldlinien sind immer **geschlossen**.

Merksatz

Magnetische Feldlinien zeigen die Richtung an, in die sich der Nordpol einer Kompassnadel einstellt. Außerhalb eines Magneten laufen sie vom Nord- zum Südpol. Sie haben weder Anfang noch Ende: Es gibt keine magnetischen Einzelladungen (Abschnitt 13.4). Die Erde selbst ist ein großer Magnet; ihr geographischer Nordpol ist ein magnetischer Südpol.

Ausprobieren: **Magnetfeld mit Kompassnadeln** ↗ Üben: **noctua** ↗ Einordnen: **Magnetismus — Grundlagen** ↗

7.2 Ströme erzeugen Magnetfelder Abi

Hans Christian Ørsted beobachtete 1820, dass eine Kompassnadel neben einem stromdurchflossenen Draht ausschlägt. Jeder elektrische Strom ist von einem Magnetfeld umgeben.

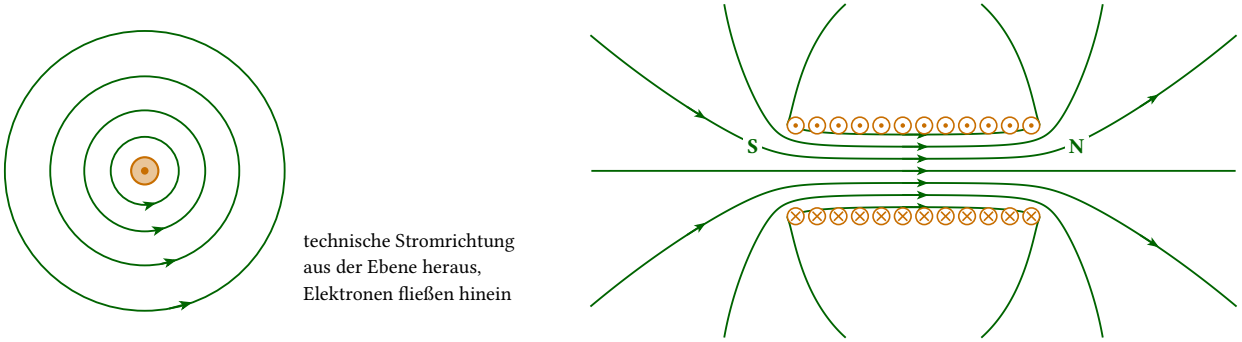


Abbildung 29: Links: Magnetfeld eines geraden Leiters – konzentrische Kreise, die nach außen weiter auseinanderliegen. Rechts: Längsschnitt durch eine lange Spule. Im Inneren ist das Feld homogen, außen gleicht es dem eines Stabmagneten.

Merksatz

Richtung des Feldes: Umfasst man den Leiter mit der **linken** Hand so, dass der Daumen in Richtung der **Elektronenbewegung** zeigt, geben die gekrümmten Finger die Richtung der Feldlinien an (Linke-Faust-Regel). Gleichwertig: rechte Hand, Daumen in **technischer** Stromrichtung (von + nach –). Bei einer Spule zeigen die gekrümmten Finger in Richtung der Elektronenbewegung in den Windungen; der Daumen der linken Hand zeigt dann zum Nordpol.

Ausprobieren: **Magnetfeld der langen Spule** ↗ Üben: **noctua** ↗ Einordnen: **Magnetfeld & Lorentzkraft** ↗ · **Magnetostatik & Biot-Savart-Modelle** ↗

7.3 Kraft auf einen stromdurchflossenen Leiter Abi

Ein stromdurchflossener Leiter im Magnetfeld erfährt eine Kraft senkrecht zum Leiter und senkrecht zu den Feldlinien (Leiterschaukel, Elektromotor). Misst man diese Kraft mit einem Leiterstück der wirksamen Länge s, das senkrecht zu den Feldlinien liegt, findet man $F \sim I$ und $F \sim s$. Der Quotient hängt nur vom Magnetfeld ab und definiert seine Stärke:

Definition

Die **magnetische Flussdichte** B ist definiert durch die Kraft auf einen Leiter der wirksamen Länge s, der senkrecht zu den Feldlinien vom Strom I durchflossen wird:

$$B = \frac{F}{I \cdot s} \quad \Leftrightarrow \quad F = B \cdot I \cdot s\ , \quad [B] = \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{A\ m}} = \frac{\mathrm{V\ s}}{\mathrm{m^2}} = \mathrm{T}$$

(Tesla). Das Erdmagnetfeld hat etwa 50 µT, ein Hufeisenmagnet aus der Sammlung einige 0,1 T, ein Kernspintomograph 1,5 bis 3 T.

Die Richtung der Kraft ergibt die Drei-Finger-Regel (nächstes Kapitel). Mit einer **Stromwaage** – einem Leiterrähmchen auf einer empfindlichen Waage, dessen untere Seite im Feld liegt – misst man B direkt: Man trägt die Kraftänderung über I auf, die Steigung ist nBs bei n Windungen.

Ausprobieren: **Stromwaage** ↗ Üben: **noctua** ↗ Einordnen: **Magnetfeld & Lorentzkraft** ↗

7.4 Das Feld einer schlanken Spule Abi

Im Inneren einer langen, schlanken Spule ist das Feld homogen. Seine Flussdichte wächst mit der Stromstärke und der **Windungsdichte** $\frac{n}{l}$, nicht aber mit dem Querschnitt:

Merksatz

$$B = \mu_0 \mu_r \cdot \frac{n \cdot I}{l}$$

$\mu_0 = 1{,}26 \cdot 10^{-6}\ \frac{\mathrm{V\ s}}{\mathrm{A\ m}}$ ist die **magnetische Feldkonstante**, μ_r die Permeabilitätszahl des Spulenkerns (Luft 1, Eisen bis einige Tausend). Ein Eisenkern verstärkt das Feld enorm, weil sich die atomaren Magnete im Eisen ausrichten.

Das Feld eines langen geraden Leiters nimmt mit dem Abstand ab: $B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$ (Formelsammlung, im Bildungsplan nur qualitativ). Zwei gleiche, koaxiale Ringspulen im Abstand ihres Radius (**Helmholtz-Spulen**) erzeugen zwischen sich ein besonders gleichmäßiges Feld; man benutzt sie beim Fadenstrahlrohr.

Beispiel 7

Eine 60 cm lange Luftspule mit 8000 Windungen soll innen 4,2 mT erzeugen. Dafür braucht man $I = \frac{Bl}{\mu_0 n} = \frac{4{,}2 \cdot 10^{-3}\ \mathrm{T} \cdot 0{,}60\ \mathrm{m}}{1{,}26 \cdot 10^{-6}\ \frac{\mathrm{V\ s}}{\mathrm{A\ m}} \cdot 8000} = 0{,}25\ \mathrm{A}$.

Zur Vertiefung: **Aufgabe 172** (in der Sammlung Abi-ähnlich) und **Aufgabe 173** (in der Sammlung Abi-ähnlich).

Typischer Fehler

Falsch: Ein größerer Spulenquerschnitt ergibt ein stärkeres Feld im Inneren.

Richtig: Für eine schlanke Spule gilt $B = \mu_0 \mu_r \cdot \frac{n \cdot I}{l}$: Es zählen Windungszahl pro Länge und Stromstärke, nicht die Querschnittsfläche.

Die Fläche steckt erst im Fluss $\Phi = BA$ und damit in der Induktivität.

Ausprobieren: **Magnetfeld der langen Spule** ↗ Üben: **noctua** ↗ Einordnen: **Magnetfeld & Lorentzkraft** ↗ · **Magnetostatik & Biot-Savart-Modelle** ↗

8 Bewegte Ladungen im Magnetfeld

8.1 Die Lorentzkraft Abi

Die Kraft auf einen stromdurchflossenen Leiter ist die Summe der Kräfte auf die einzelnen bewegten Elektronen. Bewegen sich in einem Leiterstück der Länge s insgesamt N Elektronen mit der Geschwindigkeit v, dann ist $I = \frac{Nev}{s}$ und $F = BIs = N \cdot evB$. Auf **jede** bewegte Ladung wirkt also eine Kraft – auch im Vakuum, ganz ohne Leiter.

Merksatz

Lorentzkraft: Auf eine Ladung q, die sich mit v senkrecht zu den Feldlinien bewegt, wirkt

$$F_L = q \cdot v \cdot B.$$

Allgemein ist $F_L = qvB\sin(\alpha)$ mit dem Winkel α zwischen $\vec{v}$ und $\vec{B}$; parallel zum Feld wirkt keine Kraft. Die Lorentzkraft steht senkrecht auf $\vec{v}$ und auf $\vec{B}$.

Drei-Finger-Regel der linken Hand (für Elektronen bzw. negative Ladungen): Daumen in Bewegungsrichtung der Elektronen (**Ursache**), Zeigefinger in Feldrichtung (**Vermittlung**), Mittelfinger zeigt die Richtung der Kraft (**Wirkung**). Für positive Ladungen nimmt man die rechte Hand.

Weil die Lorentzkraft immer senkrecht zur Bewegung steht, verrichtet sie keine Arbeit: Sie ändert die **Richtung** der Geschwindigkeit, nicht ihren Betrag.

Typischer Fehler

Falsch: Für Elektronen die Drei-Finger-Regel der **rechten** Hand mit der Bewegungsrichtung der Elektronen anwenden.

Richtig: Linke Hand für Elektronen (Daumen in ihre Bewegungsrichtung), rechte Hand für positive Ladungen und für die technische Stromrichtung. Eine Verwechslung dreht die Kraft um.

Kontrolle bei Kreisbahnen: Die Lorentzkraft muss zum Kreismittelpunkt zeigen.

Ausprobieren: **Fadenstrahlrohr: spezifische Ladung** ↗ · **Wien-Filter und Massenspektrograph** ↗ · **Zyklotron** ↗ · **Induktion im bewegten Leiter** ↗ · **ionær** ↗ Üben: **noctua** ↗ Einordnen: **Magnetfeld & Lorentzkraft** ↗ · **Teilchenbeschleuniger** ↗

8.2 Die Kreisbahn Abi

Tritt ein geladenes Teilchen senkrecht zu den Feldlinien in ein homogenes Magnetfeld ein, wirkt die Lorentzkraft wie eine Zentripetalkraft, die immer zum selben Punkt zeigt: Das Teilchen läuft auf einem Kreis.

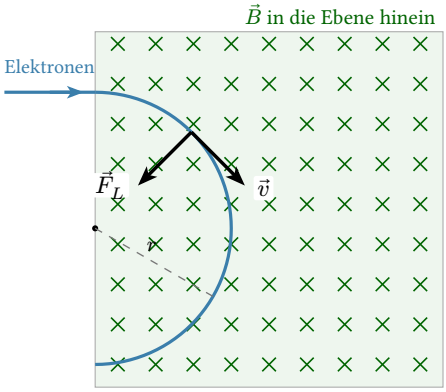


Abbildung 30: Elektronen im homogenen Magnetfeld (Feld in die Zeichenebene hinein). Die Lorentzkraft steht senkrecht auf der Geschwindigkeit und zeigt zum Kreismittelpunkt; nach der Drei-Finger-Regel der linken Hand werden die nach rechts fliegenden Elektronen nach unten abgelenkt.

Merksatz

Aus $F_L = F_Z$, also $qvB = \frac{mv^2}{r}$, folgt der **Bahnradius**

$$r = \frac{mv}{qB}.$$

Die Umlaufdauer $T = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi m}{qB}$ hängt **nicht** von der Geschwindigkeit ab: Schnellere Teilchen laufen auf größeren Kreisen, brauchen aber gleich lang (Prinzip des Zyklotrons). Nach Beschleunigung mit U_B ist $r = \frac{1}{B}\sqrt{\frac{2mU_B}{q}}$.

Im **Fadenstrahlrohr** macht ein wenig Gas die Kreisbahn von Elektronen sichtbar. Aus Beschleunigungsspannung, Radius und Flussdichte (Helmholtz-Spulen) erhält man die **spezifische Ladung** $\frac{e}{m_e} = \frac{2U_B}{B^2 r^2} = 1{,}76 \cdot 10^{11}\ \frac{\mathrm{C}}{\mathrm{kg}}$.

Ausprobieren: **Fadenstrahlrohr: spezifische Ladung** ↗ · **Wien-Filter und Massenspektrograph** ↗ · **Zyklotron** ↗ · **ionær** ↗ Üben: **noctua** ↗ Einordnen: **Magnetfeld & Lorentzkraft** ↗ · **Teilchenbeschleuniger** ↗

8.3 Der Massenspektrograph Abi

Ionen gleicher Ladung und gleicher Geschwindigkeit, aber verschiedener Masse, laufen im Magnetfeld auf verschieden großen Kreisen ($r \sim m$). Nach einem Halbkreis treffen sie an verschiedenen Stellen auf eine Fotoplatte oder einen Detektor. So trennt man **Isotope** und bestimmt Massen von Atomen und Molekülen sehr genau – etwa in der Chemie, der Altersbestimmung mit ^{14}C oder bei Dopingkontrollen. Schaltet man einen Geschwindigkeitsfilter vor (nächster Abschnitt), haben alle Ionen dieselbe Geschwindigkeit, und es gilt $r \sim m$. Durchlaufen dagegen alle dieselbe Beschleunigungsspannung, ist $r = \frac{1}{B} \cdot \sqrt{\frac{2mU_B}{q}} \sim \sqrt{m}$ – auch so werden die Massen getrennt.

Ausprobieren: **Wien-Filter und Massenspektrograph** ↗ · **ionær** ↗ Üben: **noctua** ↗ Einordnen: **Magnetfeld & Lorentzkraft** ↗

8.4 Gekreuzte Felder: der Wien-Filter Abi

Ein Plattenkondensator steht in einem Magnetfeld, dessen Feldlinien senkrecht zum elektrischen Feld und zur Flugrichtung verlaufen. Auf ein geladenes Teilchen wirken dann die elektrische Kraft und die Lorentzkraft in entgegengesetzte Richtungen:

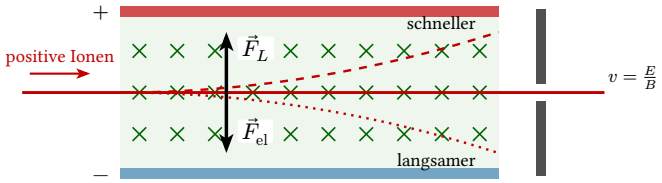


Abbildung 31: Wien-Filter für positive Ionen: Die elektrische Kraft zeigt nach unten, die Lorentzkraft nach oben. Nur bei $v = \frac{E}{B}$ heben sich beide auf, und das Ion fliegt geradeaus durch die Blende.

Merksatz

Geradeaus fliegen genau die Teilchen, bei denen sich elektrische Kraft und Lorentzkraft aufheben:

$$qE = qvB \quad \Rightarrow \quad v = \frac{E}{B}.$$

Die Bedingung hängt weder von der Ladung noch von der Masse ab. Schnellere Teilchen werden in Richtung der Lorentzkraft abgelenkt, langsamere in Richtung der elektrischen Kraft.

Ausprobieren: **Wien-Filter und Massenspektrograph** ↗ · **ionær** ↗ Üben: **noctua** ↗ Einordnen: **Magnetfeld & Lorentzkraft** ↗

8.5 Der Hall-Effekt Zusatz · nicht Abi

Fließt Strom durch ein dünnes Metall- oder Halbleiterplättchen, das senkrecht von einem Magnetfeld durchsetzt wird, drängt die Lorentzkraft die Elektronen an einen Rand. Es entsteht ein elektrisches Querfeld, bis elektrische Kraft und Lorentzkraft im Gleichgewicht sind: $\frac{eU_H}{b} = evB$, also $U_H = bvB$ (b Breite des Plättchens). Diese **Hall-Spannung** ist proportional zu B. **Hallsonden** aus Halbleitern (dort gibt es viel weniger Ladungsträger, die sich bei gleichem Strom entsprechend schneller bewegen; die Hall-Spannung wird größer) sind die üblichen Messgeräte für Magnetfelder – auch in den Abituraufgaben, wo man sie nur benutzen, nicht erklären muss. Mit der Ladungsträgerdichte n gilt $U_H = \frac{IB}{nqd}$ (Formelsammlung).

Zur Vertiefung: **Aufgabe 174** (in der Sammlung Abi-ähnlich), **Aufgabe 46** (Spezifische Ladung aus Messreihen, im Aufgabenskript), **Aufgabe 177** (in der Sammlung Abi-ähnlich), **Aufgabe 47** (Neon-Isotope trennen, im Aufgabenskript), **Aufgabe 48** (Fadenstrahlrohr, im Aufgabenskript) und **Aufgabe 49** (Hall-Spannung im Kupfer, im Aufgabenskript).



9 Drei Felder im Vergleich

9.1 Gravitationsfeld, elektrisches und magnetisches Feld Abi

Der Bildungsplan verlangt, die drei Felder zu vergleichen (3.6.2.1 (9), 3.6.2.2 (7)). Das Gravitationsfeld ist in Skript PL1 beschrieben.

	Gravitationsfeld	elektrisches Feld	magnetisches Feld
Ursache	Massen	ruhende Ladungen (und zeitlich veränderliche Magnetfelder)	bewegte Ladungen (Ströme), Dauermagnete (und veränderliche E-Felder)
wirkt auf	Massen	Ladungen, ruhend und bewegt	nur **bewegte** Ladungen, Ströme, Magnete
Kraft	nur anziehend	anziehend oder abstoßend	senkrecht zu $\vec{v}$ und $\vec{B}$
Feldstärke	$\vec{g} = \frac{\vec{F}}{m}$	$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$	$B = \frac{F}{Is}$
Feldlinien	enden an Massen (nur Senken)	beginnen an $+$, enden an $-$ (Quellen und Senken)	geschlossen (keine Quellen)
homogen	nahe der Erdoberfläche	im Plattenkondensator	in einer langen Spule
Feld eines Körpers	Masse M: $g = \frac{GM}{r^2}$	Punktladung: $E = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 r^2}$	gerader Leiter: $B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$
Energie	$\Delta E = mgh$ (homogen)	$\Delta E = qU = qEd$ (homogen)	Lorentzkraft verrichtet keine Arbeit
Abschirmung	nicht möglich	Metallgehäuse (Faradayscher Käfig)	nur mit Eisen (umleiten)

Gravitationsfeld und elektrisches Feld sind sich besonders ähnlich: Beide Kraftgesetze haben die Form Konstante $\cdot\frac{(Q_1 Q_2)}{r^2}$, beide Felder sind **konservativ** (die Arbeit hängt nicht vom Weg ab, es gibt eine potentielle Energie und ein Potential), in beiden gibt es Äquipotentialflächen (beim Schwerefeld: waagrechte Ebenen gleicher Höhe). Ein geladenes Teilchen im Plattenkondensator bewegt sich wie ein geworfener Stein – Parabel quer zum Feld, gleichmäßig beschleunigt längs. Der wesentliche Unterschied: Es gibt nur eine Sorte Masse, aber zwei Sorten Ladung; deshalb ist Gravitation immer anziehend und lässt sich nicht abschirmen.

Zur Vertiefung: **Aufgabe 50** (Drei Felder vergleichen, im Aufgabenskript) und **Aufgabe 178** (in der Sammlung Abi-ähnlich).

> Ausprobieren: **Drei Felder im Vergleich** ↗ Üben: **noctua** ↗ Einordnen: **Gravitation & Keplergesetze** ↗ · **Elektrisches Feld & Kondensator** ↗



10 Elektromagnetische Induktion

10.1 Induktion im bewegten Leiter Abi

Bewegt man einen Leiter senkrecht zu den Feldlinien durch ein Magnetfeld, entsteht zwischen seinen Enden eine Spannung. Die Erklärung liefert die Lorentzkraft: Mit dem Leiter bewegen sich auch seine Elektronen; auf sie wirkt die Lorentzkraft längs des Leiters und verschiebt sie an ein Ende. Es entsteht ein elektrisches Feld im Leiter, das die Elektronen zurückdrängt. Die Verschiebung hört auf, wenn sich elektrische Kraft und Lorentzkraft die Waage halten:

$$eE = evB \quad \text{mit} \quad E = \frac{U}{l} \quad \Rightarrow \quad U_{\text{ind}} = Blv.$$

Merksatz

Bewegt sich ein gerader Leiter der Länge l mit der Geschwindigkeit v senkrecht zu den Feldlinien eines homogenen Magnetfelds, wird zwischen seinen Enden die Spannung

$$U_{\text{ind}} = B \cdot l \cdot v$$

induziert. Ein Leiter, der sich parallel zu den Feldlinien bewegt, erfährt keine Lorentzkraft – keine Spannung.

Ausprobieren: **Induktion im bewegten Leiter** ↗ Üben: **noctua** ↗ Einordnen: **Magnetfeld & Lorentzkraft** ↗ · **Induktion & Lenzsche Regel** ↗

10.2 Der Leiterrahmen im begrenzten Feld Abi

Ein rechteckiger Leiterrahmen mit n Windungen und der Breite b fährt mit konstanter Geschwindigkeit in ein begrenztes Magnetfeld:

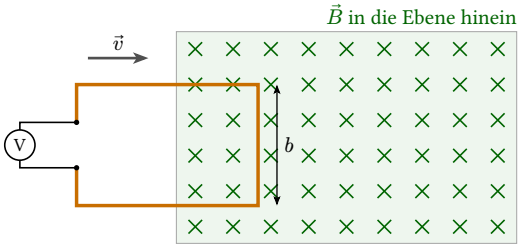


Abbildung 32: Leiterrahmen beim Eintauchen in ein Magnetfeld. Nur die vordere Seite (Länge b) liegt im Feld und bewegt sich quer dazu; in ihr wird die Spannung induziert. Die beiden waagrechten Seiten bewegen sich parallel zu ihrer eigenen Richtung – in ihnen wirkt die Lorentzkraft quer zum Draht und trägt nichts bei.

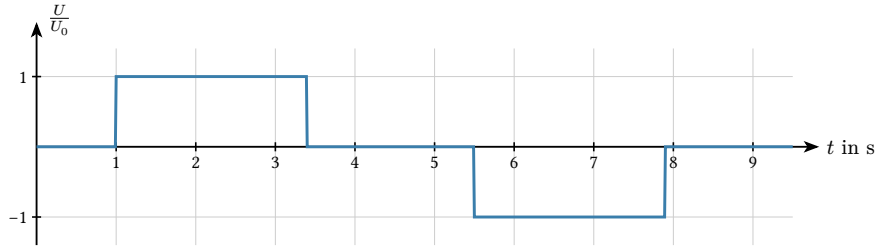


Abbildung 33: Induzierte Spannung beim Durchfahren eines Feldes, das breiter ist als der Rahmen lang: Beim Eintauchen ist $U_0 = nBbv$ konstant, solange der Rahmen ganz im Feld ist, null (beide Seiten liefern gleich große, entgegengesetzte Spannungen), beim Austreten $-U_0$.

Ausprobieren: **Leiterrahmen im Magnetfeld** ↗ Üben: **noctua** ↗ Einordnen: **Induktion & Lenzsche Regel** ↗

10.3 Magnetischer Fluss und Induktionsgesetz Abi

Michael Faraday entdeckte 1831, dass man Spannung auch ganz ohne Bewegung induzieren kann: Ändert man das Magnetfeld in einer ruhenden Spule (etwa durch Ein- und Ausschalten einer zweiten Spule), entsteht ebenfalls eine Spannung. Beide Fälle fasst ein einziges Gesetz zusammen.

Definition

Der **magnetische Fluss** durch eine Fläche A ist

$$\Phi = B \cdot A \cdot \cos(\alpha) \ , \quad [\Phi] = \mathrm{T\ m^2} = \mathrm{V\ s} = \mathrm{Wb}$$

(Weber), wobei α der Winkel zwischen den Feldlinien und der Flächennormale ist. $A\cos(\alpha)$ ist die **wirksame** Fläche, die senkrecht von Feldlinien durchsetzt wird.

Merksatz

Faradaysches Induktionsgesetz: In einer Spule mit n Windungen wird die Spannung

$$U_{\mathrm{ind}} = -n \cdot \dot{\Phi}(t) = -n \cdot \frac{\mathrm{d}\Phi}{\mathrm{d}t}$$

induziert, wenn sich der magnetische Fluss durch die Spule ändert. Mit der Produktregel: $\dot{\Phi} = \dot{B}A + B\dot{A}$ (bei $\alpha = 0$). Die Spannung entsteht also durch **Änderung der Flussdichte** (Transformator, bewegter Magnet) oder durch **Änderung der wirksamen Fläche** (bewegter Leiter, rotierende Spule).

Beim Leiterrahmen von oben wächst die Fläche im Feld um $\dot{A} = bv$, also $U_{\mathrm{ind}} = nBbv$ – dasselbe Ergebnis wie mit der Lorentzkraft. Das Minuszeichen beschreibt die Richtung (Lenzsche Regel).

Beispiel 8

Ein Rähmchen mit 500 Windungen und der Fläche $5{,}0\ \mathrm{cm} \times 6{,}0\ \mathrm{cm}$ steckt ganz in einer langen Spule. Deren Feld steigt gleichmäßig von 0 auf 4,2 mT in 2,0 s. Dann ist $\dot{B} = 2{,}1 \cdot 10^{-3}\ \frac{\mathrm{T}}{\mathrm{s}}$ und $U_{\mathrm{ind}} = nA\dot{B} = 500 \cdot 3{,}0 \cdot 10^{-3}\ \mathrm{m^2} \cdot 2{,}1 \cdot 10^{-3}\ \frac{\mathrm{T}}{\mathrm{s}} = 3{,}2\ \mathrm{mV}$, solange B steigt.

Typischer Fehler

Falsch: „Der Rahmen steckt ganz im Magnetfeld, der Fluss ist maximal, also ist auch die induzierte Spannung maximal."

Richtig: Induziert wird nur, wenn sich der Fluss **ändert**: $U_{\mathrm{ind}} = -n \cdot \dot{\Phi}$. Steckt der Rahmen ganz im homogenen Feld und bewegt sich nur darin, ändert sich Φ nicht, und die Spannung ist null.

Groß ist die Spannung dort, wo sich der Fluss am schnellsten ändert, beim Generator also in der Stellung mit $\Phi = 0$.

Ausprobieren: **Leiterrahmen im Magnetfeld** ↗ · **Generator und Wechselspannung** ↗ · **Transformator** ↗ Üben: **noctua** ↗
Einordnen: **Induktion & Lenzsche Regel** ↗ · **Wechselstromtechnik & Impedanz** ↗

10.4 Die Lenzsche Regel Abi

Merksatz

Lenzsche Regel: Der Induktionsstrom ist stets so gerichtet, dass er seiner Ursache entgegenwirkt.

Nähert man einen Magneten einem geschlossenen Aluminiumring, wird darin ein Strom induziert, dessen Magnetfeld den Magneten abstößt – ein leicht beweglicher Ring weicht zurück (**Thomsonscher Ringversuch**). Zieht man den Magneten weg, zieht der Ring ihn an. Ein Magnet, der durch ein Kupferrohr fällt, wird stark gebremst. Die Regel folgt aus der Energieerhaltung: Würde der Induktionsstrom seine Ursache verstärken, könnte man aus nichts Energie gewinnen. Die elektrische Energie des Induktionsstroms stammt aus der Arbeit, die man gegen die Bremskraft verrichten muss.

Ausprobieren: **Leiterrahmen im Magnetfeld** ↗ · **Lenzsche Regel** ↗ Üben: **noctua** ↗ Einordnen: **Induktion & Lenzsche Regel** ↗

10.5 Generator und Wechselspannung Abi

Eine Spule mit n Windungen und der Fläche A dreht sich mit der Winkelgeschwindigkeit ω in einem homogenen Magnetfeld. Die wirksame Fläche ist $A\cos(\omega t)$, der Fluss $\Phi(t) = BA\cos(\omega t)$.

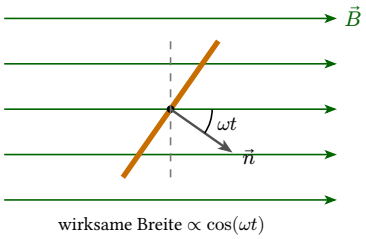


Abbildung 34: Generatorprinzip von der Seite: Die Leiterschleife (orange) dreht sich um die Achse senkrecht zur Zeichenebene. Durchsetzt wird nur die Projektion der Fläche senkrecht zu $\vec{B}$; sie ändert sich periodisch.

Merksatz

$$U_{\text{ind}} = -n \cdot \dot{\Phi} = nBA\omega \cdot \sin(\omega t), \quad \hat{U} = nBA\omega$$

Es entsteht eine sinusförmige **Wechselspannung**. Sie ist maximal, wenn die Spulenfläche parallel zu den Feldlinien steht (dort ändert sich der Fluss am schnellsten), und null, wenn die Fläche senkrecht zu den Feldlinien steht (Fluss maximal, aber momentan konstant).

Fast alle elektrische Energie wird so erzeugt; im Kraftwerk dreht sich allerdings meist der Magnet (Elektromagnet) in feststehenden Spulen. Ein Fahrraddynamo ist ein kleiner Generator mit Dauermagnet.

Ausprobieren: **Generator und Wechselspannung** ↗ Üben: **noctua** ↗ Einordnen: **Induktion & Lenzsche Regel** ↗ · **Wechselstromtechnik & Impedanz** ↗

10.6 Transformator und Induktionsladen Abi teilweise

Abi (3.6.2.3 (3)): die Funktionsweise qualitativ beschreiben. Die Formel des idealen Transformators steht in der Formelsammlung und darf benutzt werden.

Ein **Transformator** besteht aus zwei Spulen auf einem gemeinsamen geschlossenen Eisenkern. Die Wechselspannung an der Primärspule erzeugt einen Wechselstrom und damit einen sich ständig ändernden magnetischen Fluss im Eisenkern. Dieser Fluss durchsetzt auch die Sekundärspule und induziert dort eine Wechselspannung. Weil durch jede Windung beider Spulen derselbe Fluss geht, verhalten sich die Spannungen (im Leerlauf) wie die Windungszahlen:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{n_1}{n_2}.$$

Mit Gleichspannung funktioniert ein Transformator nicht – ohne Flussänderung keine Induktion. Transformatoren setzen die Spannung für die Fernübertragung hoch (weniger Strom, weniger Verluste in den Leitungen) und für Geräte herunter.

Nach demselben Prinzip arbeitet ein **Induktionsladegerät** (etwa für Smartphones oder elektrische Zahnbürsten): Die Primärspule sitzt in der Ladestation, die Sekundärspule im Gerät; zwischen ihnen ist kein Eisenkern, sondern ein Luftspalt und das Gehäuse. Die Kopplung ist schwächer, deshalb arbeitet man mit hohen Frequenzen.

Ausprobieren: **Transformator** ↗ · **Stromnetz: Warum Hochspannung?** ↗ Üben: **noctua** ↗ Einordnen: **Wechselstromtechnik & Impedanz** ↗ · **Induktion & Lenzsche Regel** ↗

10.7 Wirbelströme Abi

Ändert sich der magnetische Fluss in einem massiven Metallstück, werden darin geschlossene Ströme induziert – **Wirbelströme**. Nach Lenz bremsen sie die Bewegung, die sie verursacht. Ein Metallpendel, das zwischen den Polen eines Magneten schwingt, kommt fast sofort zur Ruhe; ein geschlitztes Pendel schwingt fast ungebremst, weil die Schlitze die Stromwege unterbrechen.

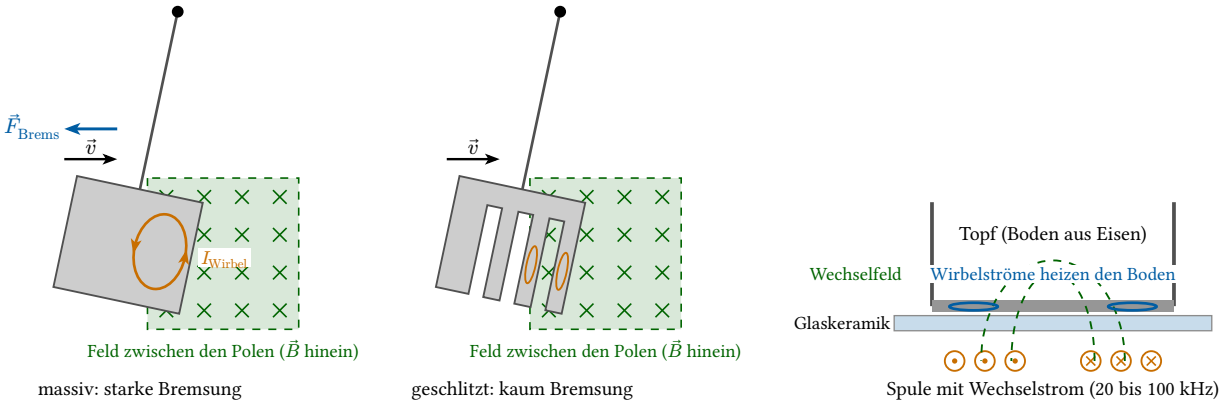
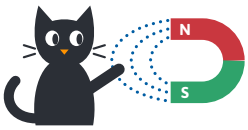


Abbildung 35: Links: Eine massive Metallplatte tritt in das Magnetfeld ein. Der Fluss durch die Platte nimmt zu, der induzierte Wirbelstrom (gegen den Uhrzeigersinn) erzeugt ein Gegenfeld; die Kraft auf ihn bremst die Platte (Lenz). Mitte: Durch die Schlitze können sich nur noch kleine Wirbel bilden, die Bremswirkung ist gering. Rechts: Induktionskochfeld – das schnell wechselnde Feld der Spule induziert Wirbelströme im Topfboden, der sich dadurch erwärmt.

Technisch genutzt werden Wirbelströme in der **Wirbelstrombremse** (Lkw, ICE, Fallturm im Freizeitpark): Sie bremst verschleißfrei und umso stärker, je schneller das Fahrzeug ist. In der **Induktionskochplatte** erzeugt eine Spule unter der Glaskeramik ein hochfrequentes Wechselfeld, das im Topfboden aus Eisen Wirbelströme induziert; der Topf erwärmt sich, die Platte selbst bleibt fast kalt. In Transformatorkernen sind Wirbelströme dagegen unerwünscht – deshalb bestehen die Kerne aus gegeneinander isolierten Blechen.

Zur Vertiefung: **Aufgabe 51** (Leiterrahmen durch ein Feld, im Aufgabenskript), **Aufgabe 52** (Rähmchen und Spule, im Aufgabenskript), **Aufgabe 179** (in der Sammlung Abi-ähnlich), **Aufgabe 180** (in der Sammlung Abi-ähnlich), **Aufgabe 53** (Stab auf Schienen, im Aufgabenskript), **Aufgabe 54** (Generator, im Aufgabenskript), **Aufgabe 181** (in der Sammlung Abi-ähnlich), **Aufgabe 55** (Lenzsche Regel anwenden, im Aufgabenskript) und **Aufgabe 56** (Transformator und Ladegerät, im Aufgabenskript).

Ausprobieren: **Lenzsche Regel** ↗ Üben: **noctua** ↗ Einordnen: **Induktion & Lenzsche Regel** ↗



11 Selbstinduktion

11.1 Ein- und Ausschalten einer Spule Abi

Eine Spule erzeugt ihr eigenes Magnetfeld. Ändert sich der Strom durch die Spule, ändert sich dieses Feld – und induziert in der Spule selbst eine Spannung. Nach Lenz wirkt sie der Stromänderung entgegen.

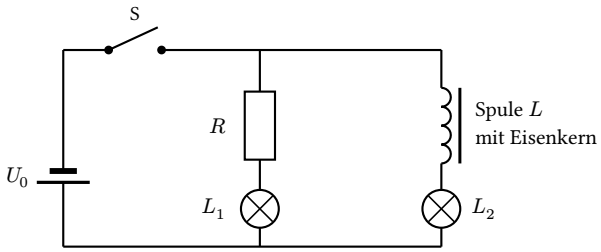


Abbildung 36: Zwei gleiche Lampen, die eine in Reihe mit einem ohmschen Widerstand, die andere in Reihe mit einer Spule hoher Induktivität (mit Eisenkern) und gleichem ohmschem Widerstand. Beim Einschalten leuchtet L_1 sofort, L_2 erst mit deutlicher Verzögerung.

Merksatz

- **Einschalten:** Der ansteigende Strom erzeugt ein wachsendes Magnetfeld; die induzierte Spannung ist der angelegten entgegengerichtet und bremst den Anstieg. Die Stromstärke erreicht ihren Endwert $I_0 = \frac{U_0}{R}$ erst allmählich.
- **Ausschalten:** Der abfallende Strom erzeugt eine Spannung, die den Strom aufrechterhalten will. Ist der Kreis plötzlich unterbrochen, kann diese Spannung sehr groß werden – am Schalter springt ein Funke über. Bleibt ein Stromweg geschlossen (etwa über einen parallelen Widerstand), fließt der Strom noch eine Weile in der alten Richtung weiter.

Typischer Fehler

Falsch: Beim Ausschalten einer Spule kann die Spannung höchstens so groß werden wie die Quellspannung.
Richtig: Die Spule hält den Strom kurzzeitig aufrecht. Fließt er über einen großen Widerstand, entsteht dort $U = RI$, ein Vielfaches der Quellspannung.

Darauf beruhen Zündfunken und Weidezaungeräte, und deshalb schützt man Schalter vor Spulen mit einer Freilaufdiode.

Ausprobieren: **Ein- und Ausschalten einer Spule** ↗ Üben: **noctua** ↗ Einordnen: **Induktion & Lenzsche Regel** ↗

11.2 Induktivität Abi

Der Fluss einer Spule ist proportional zur Stromstärke. Deshalb ist auch die Selbstinduktionsspannung proportional zur Änderungsrate des Stroms:

Merksatz

$$U_{\text{ind}} = -L \cdot \dot{I}(t)$$

Die **Induktivität** L (Einheit Henry, $1\ \text{H} = 1\ \frac{\text{V s}}{\text{A}}$) beschreibt, wie träge eine Spule auf Stromänderungen reagiert. Für eine lange, schlanke Spule folgt aus $B = \frac{\mu_0 \mu_r n I}{l}$ und $U_{\text{ind}} = -nA\dot{B}$:

$$L = \mu_0 \mu_r \cdot \frac{n^2 A}{l}.$$

Die Induktivität wächst mit dem **Quadrat** der Windungszahl: doppelte Windungszahl, vierfache Induktivität.

Beim Einschalten an der Spannung U_0 gilt im Kreis mit dem Gesamtwiderstand R: $U_0 = RI + L\dot{I}$. Die Lösung hat dieselbe Form wie beim Aufladen eines Kondensators:

Merksatz

$$\text{Einschalten:}\quad I(t) = I_0\left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right),\quad \text{Ausschalten:}\quad I(t) = I_0 e^{-\frac{t}{\tau}},\quad \tau = \frac{L}{R}$$

Im ersten Moment ist $I = 0$, die ganze Spannung liegt an der Spule: $\dot{I}(0) = \frac{U_0}{L}$. Die Tangente im Ursprung schneidet die Endstromstärke bei $t = \tau$.

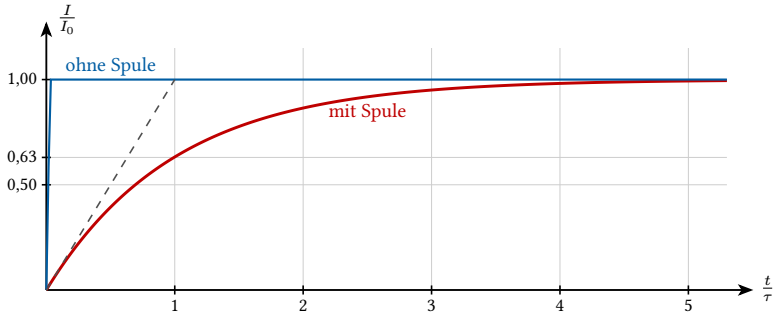


Abbildung 37: Einschaltvorgang: Mit Spule steigt die Stromstärke nach $I_0\left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$; nach $\tau = \frac{L}{R}$ sind 63% des Endwerts erreicht.

Ausprobieren: **Ein- und Ausschalten einer Spule** ↗ Üben: **noctua** ↗ Einordnen: **Induktion & Lenzsche Regel** ↗

11.3 Energie im Magnetfeld Abi

Beim Einschalten muss die Quelle gegen die Selbstinduktionsspannung Arbeit verrichten. Diese Energie steckt im Magnetfeld der Spule und wird beim Ausschalten wieder frei – als Funke, als Wärme im Widerstand oder als Licht einer Glimmlampe, die kurz aufblitzt.

Merksatz

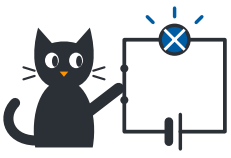
$$E_{\text{mag}} = \frac{1}{2} L I^2$$

Beispiel 9

Eine Spule mit $L = 3{,}5\ \text{H}$ und $R = 30\ \Omega$ wird an 12 V gelegt. Endstrom $I_0 = 0{,}40\ \text{A}$, Zeitkonstante $\tau = 0{,}12\ \text{s}$; nach $0{,}20\ \text{s}$ ist $I = 0{,}40\ \text{A} \cdot \left(1 - e^{-1{,}7}\right) = 0{,}33\ \text{A}$. Im Magnetfeld stecken am Ende $E_{\text{mag}} = \frac{1}{2} \cdot 3{,}5\ \text{H} \cdot (0{,}40\ \text{A})^2 = 0{,}28\ \text{J}$.

Zur Vertiefung: **Aufgabe 182** (in der Sammlung Abi-ähnlich), **Aufgabe 183** (in der Sammlung Abi-ähnlich), **Aufgabe 187** (in der Sammlung Abi-ähnlich), **Aufgabe 188** (in der Sammlung Abi-ähnlich) und **Aufgabe 57** (Spule mit Parallelwiderstand, im Aufgabenskript).

Ausprobieren: **Ein- und Ausschalten einer Spule** ↗ Üben: **noctua** ↗ Einordnen: **Induktion & Lenzsche Regel** ↗



12 Der elektromagnetische Schwingkreis

12.1 Wie die Schwingung entsteht Abi

Ein Kondensator wird geladen und dann mit einer Spule verbunden. Was passiert, zeigt ein Oszilloskop: Die Kondensatorspannung schwingt sinusförmig hin und her.

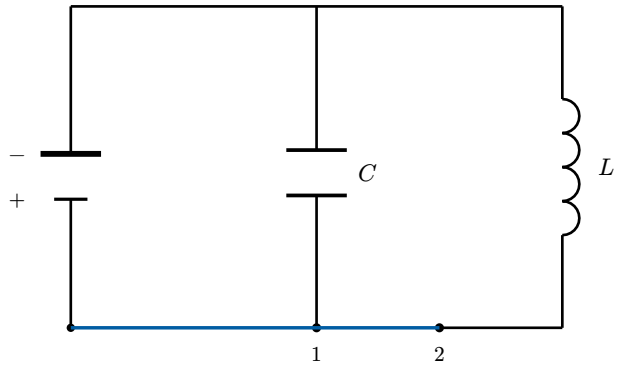


Abbildung 38: Schwingkreis: In Schalterstellung 1 wird der Kondensator von der Batterie geladen, in Stellung 2 ist er mit der Spule zu einem geschlossenen Kreis verbunden.

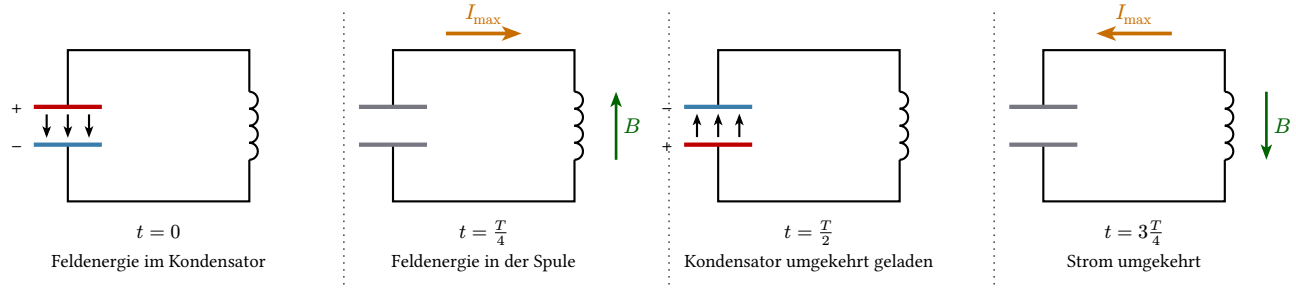


Abbildung 39: Die vier Viertelperioden einer Schwingung. Die Energie pendelt zwischen dem elektrischen Feld im Kondensator und dem magnetischen Feld der Spule.

Merksatz

a) $\boldsymbol{t = 0}$**:** Der Kondensator ist voll geladen, die ganze Energie steckt im elektrischen Feld. Er beginnt, sich über die Spule zu entladen; die Selbstinduktion lässt den Strom nur allmählich ansteigen.
b) $\boldsymbol{t = \frac{T}{4}}$**:** Der Kondensator ist entladen, der Strom ist maximal, die Energie steckt im Magnetfeld der Spule.
c) Das Magnetfeld bricht zusammen. Die Selbstinduktion hält den Strom in derselben Richtung aufrecht – er lädt den Kondensator mit umgekehrter Polung auf. **Bei** $\boldsymbol{t = \frac{T}{2}}$ ist der Kondensator umgekehrt voll geladen, der Strom null.
d) Der Vorgang läuft in umgekehrter Richtung ab; nach einer Periode T ist der Ausgangszustand erreicht.

Spannung am Kondensator und Stromstärke sind um eine Viertelperiode gegeneinander verschoben: Ist $|U|$ maximal, ist $I = 0$, und umgekehrt.

Ausprobieren: **Elektromagnetischer Schwingkreis ↗** · **Federpendel und Schwingkreis im Vergleich ↗** · **Entdämpfung ↗** Üben: **noctua ↗** Einordnen: **Elektromagnetischer Schwingkreis ↗** · **Harmonischer Oszillator ↗**

12.2 Die Differentialgleichung Abi

In der geschlossenen Masche ist die Summe aus Kondensatorspannung und Spulenspannung null: $\frac{Q}{C} + L\dot{I} = 0$. Mit $I = \dot{Q}$ wird daraus

$$L \cdot \ddot{Q}(t) = -\frac{1}{C} \cdot Q(t) \quad \Leftrightarrow \quad \ddot{Q}(t) = -\frac{1}{LC} \cdot Q(t).$$

Das ist die Gleichung des Federpendels (Skript PL1) mit Q statt x, L statt m und $\frac{1}{C}$ statt D. Der Ansatz $Q(t) = \hat{Q}\cos(\omega t)$ liefert $\omega^2 = \frac{1}{LC}$:

Merksatz

Thomsonsche Schwingungsgleichung:

$$T = 2\pi\sqrt{LC}, \quad f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

$$Q(t) = \hat{Q}\cos(\omega t), \quad U(t) = \hat{U}\cos(\omega t), \quad I(t) = \dot{Q}(t) = -\hat{Q}\omega\sin(\omega t), \quad \hat{I} = \hat{Q}\omega$$

Große Kapazität und große Induktivität ergeben eine langsame Schwingung.

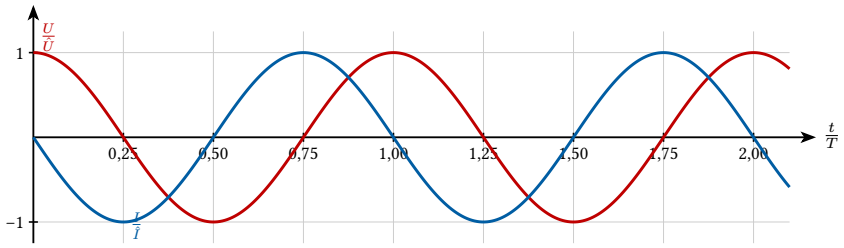


Abbildung 40: Spannung am Kondensator und Stromstärke im ungedämpften Schwingkreis. Der Strom ist dort null, wo die Spannung extremal ist, und am größten beim Nulldurchgang der Spannung.

Beispiel 10

Ein Schwingkreis aus $C = 47$ nF und $L = 8{,}6$ H schwingt mit $T = 2\pi\sqrt{8{,}6\ \text{H} \cdot 47 \cdot 10^{-9}\ \text{F}} = 4{,}0$ ms, also $f = 250$ Hz. Wird der Kondensator auf 10 V geladen, ist $\hat{Q} = 0{,}47$ µC und $\hat{I} = \frac{\hat{Q}\cdot 2\pi}{T} = 0{,}74$ mA.

Ausprobieren: **Elektromagnetischer Schwingkreis** ↗ Üben: **noctua** ↗ Einordnen: **Elektromagnetischer Schwingkreis** ↗

12.3 Vergleich mit dem Federpendel Abi

Federpendel	Schwingkreis
Auslenkung x	Ladung Q
Geschwindigkeit $v = \dot{x}$	Stromstärke $I = \dot{Q}$
Masse m – Trägheit gegen Geschwindigkeitsänderung	Induktivität L – Trägheit gegen Stromänderung
Richtgröße D – rücktreibende Kraft $-Dx$	Kehrwert $\frac{1}{C}$ – rücktreibende Spannung $-\frac{Q}{C}$
$m\ddot{x} = -Dx$	$L\ddot{Q} = -\frac{Q}{C}$
$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{D}}$	$T = 2\pi\sqrt{LC}$
Spannenergie $\frac{1}{2}Dx^2$	elektrische Feldenergie $\frac{Q^2}{2C}$
kinetische Energie $\frac{1}{2}mv^2$	magnetische Feldenergie $\frac{1}{2}LI^2$
Reibung wandelt Energie in Wärme	ohmscher Widerstand wandelt Energie in Wärme

Die Energie wechselt in beiden Systemen zweimal pro Periode zwischen den beiden Formen hin und her; ohne Verluste bleibt die Summe konstant: $\frac{1}{2}C\hat{U}^2 = \frac{1}{2}L\hat{I}^2$. Unterschiede: Beim Pendel bewegt sich ein Körper sichtbar, im Schwingkreis schwingen Felder; die Frequenzen elektrischer Schwingkreise reichen von wenigen Hertz bis zu Gigahertz. Und ein Schwingkreis kann Energie abstrahlen (Kap. 13) – ein Pendel praktisch nicht.

Ausprobieren: **Elektromagnetischer Schwingkreis** ↗ · **Federpendel und Schwingkreis im Vergleich** ↗ Üben: **noctua** ↗
Einordnen: **Elektromagnetischer Schwingkreis** ↗ · **Harmonischer Oszillator** ↗

12.4 Dämpfung und Entdämpfung Abi teilweise

Abi: Ursache der Dämpfung erklären (ohmscher Widerstand, Abstrahlung). **IQB-Pool:** gedämpfte Schwingung mit $Q(t) = \hat{Q}_0 e^{-\delta t}\cos(\omega_D t)$, $\delta = \frac{R}{2L}$ (Formelsammlung). **Zusatz:** Rückkopplung.

Jeder reale Schwingkreis ist gedämpft: Im Draht der Spule wird Energie in Wärme umgewandelt, und ein wenig wird abgestrahlt. Die Amplitude nimmt exponentiell ab, genau wie beim Pendel mit geschwindigkeitsproportionaler Reibung (Skript PL1). Um eine ungedämpfte Schwingung zu erhalten, muss man in jeder Periode im richtigen Moment Energie nachliefern. In der **Meißner-Schaltung** (1913) steuert eine zweite Spule, die mit der Schwingkreisspule gekoppelt ist,

einen Transistor so, dass er im Takt der Schwingung Energie aus einer Gleichspannungsquelle zuführt (**Rückkopplung**) – das elektrische Gegenstück zur Hemmung der Pendeluhr.

Treibt man einen Schwingkreis mit einer äußeren Wechselspannung an, gibt es **Resonanz** bei seiner Eigenfrequenz (Skript PL1). So wählt ein Radio einen Sender aus: Man verändert die Kapazität, bis die Eigenfrequenz des Empfangskreises mit der Senderfrequenz übereinstimmt.

Zur Vertiefung: **Aufgabe 184** (in der Sammlung Abi-ähnlich), **Aufgabe 185** (in der Sammlung Abi-ähnlich), **Aufgabe 189** (in der Sammlung Abi-ähnlich), **Aufgabe 190** (in der Sammlung Abi-ähnlich), **Aufgabe 58** (Gedämpfter Schwingkreis, im Aufgabenskript) und **Aufgabe 186** (in der Sammlung Abi-ähnlich).

> Ausprobieren: **Entdämpfung** ↗ Üben: **noctua** ↗ Einordnen: **Grenzzyklen & Selbsterregung** ↗ · **Elektromagnetischer Schwingkreis** ↗



13 Vom Schwingkreis zur elektromagnetischen Welle

13.1 Der Hertzsche Dipol Abi

Will man mit einem Schwingkreis sehr hohe Frequenzen erzeugen, muss man L und C verkleinern: weniger Windungen, kleinere und weiter entfernte Kondensatorplatten. Am Ende bleibt ein gerader Draht übrig – ein **offener Schwingkreis** oder **Hertzscher Dipol**. Kapazität und Induktivität stecken jetzt im Draht selbst. Heinrich Hertz zeigte 1886 damit, dass von solchen Schwingungen elektromagnetische Wellen ausgehen.

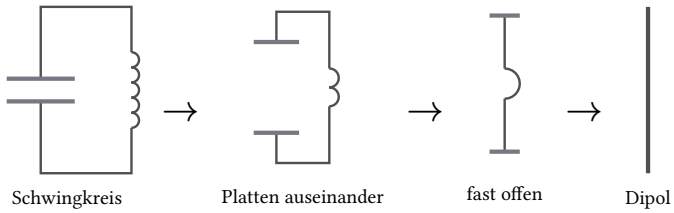


Abbildung 41: Vom geschlossenen Schwingkreis zum Dipol: Kondensatorplatten und Spule werden immer kleiner, das elektrische und das magnetische Feld reichen immer weiter in den Raum hinaus.

Im Dipol schwingen die Elektronen hin und her. An den Enden können sie nicht weiter: Dort ist die Stromstärke immer null, es sammelt sich abwechselnd positive und negative Ladung. In der Mitte fließt der größte Strom. Auf dem Stab bildet sich eine **stehende Welle** der Stromstärke mit Knoten an den Enden und einem Bauch in der Mitte – wie bei einer Saite mit zwei festen Enden (Skript PL2). In der Grundschwingung ist der Dipol genau eine halbe Wellenlänge lang:

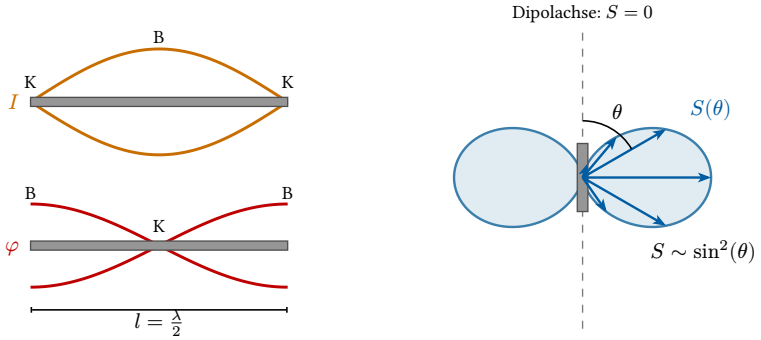


Abbildung 42: Hertzscher Dipol in der Grundschwingung. Links: Stromstärke I und Potential φ längs des Stabs sind stehende Wellen (gezeichnet die Einhüllende): Der Strom hat Knoten (K) an den Enden und einen Bauch (B) in der Mitte, das Potential umgekehrt. Rechts: Strahlungscharakteristik – die Pfeillänge gibt die Intensität S an, die unter dem Winkel θ zur Dipolachse abgestrahlt wird. Senkrecht zum Stab ist sie am größten, in Achsrichtung null; räumlich hat sie die Form eines Rings (Torus) um den Stab. (Nach Fokus Physik und Metzler Physik.)

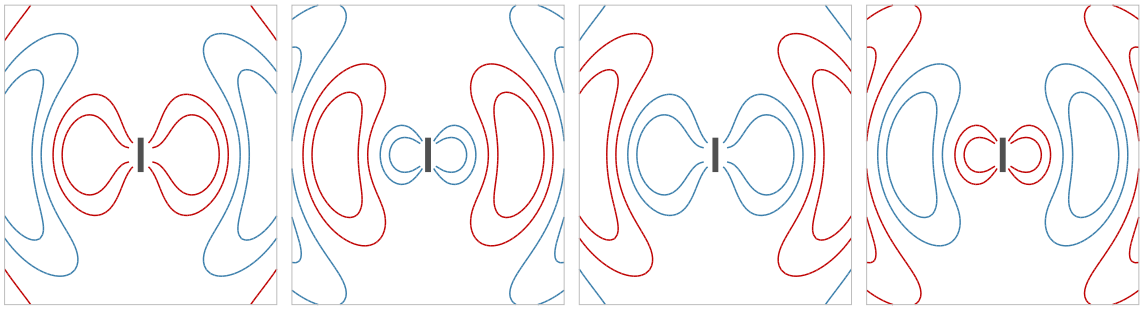
Merksatz

Hertzscher Dipol: Ein gerader Leiter der Länge l schwingt in der Grundschwingung mit

$$l = \frac{\lambda}{2} \quad \Rightarrow \quad f = \frac{c}{2l}.$$

Er strahlt elektromagnetische Wellen ab, am stärksten senkrecht zu seiner Achse, gar nicht in Achsenrichtung. Das elektrische Feld der abgestrahlten Welle schwingt parallel zum Dipol: Die Welle ist **linear polarisiert**.

Wie sich die Welle vom Dipol löst, zeigt das Momentbild der elektrischen Feldlinien. Nahe am Stab verlaufen sie wie beim ruhenden Dipol von einem Ende zum anderen. Kehrt sich der Strom um, bevor das Feld weit draußen „zurückgeholt“ werden kann, schnüren sich die äußeren Linien ab: Es entstehen geschlossene Feldlinien, die sich mit Lichtgeschwindigkeit vom Dipol entfernen. Im Abstand einer halben Wellenlänge folgen Schleifen mit entgegengesetzter Feldrichtung. Ein Magnetfeld, dessen Feldlinien als Kreise um den Stab laufen, gehört untrennbar dazu.



$t = t_0$ $t_0 + \frac{T}{4}$ $t_0 + \frac{T}{2}$ $t_0 + \frac{3T}{4}$

Abbildung 43: Ablösung der elektrischen Feldlinien vom schwingenden Dipol (Mitte, senkrecht), vier Momentbilder im Abstand einer Viertelperiode, berechnet in einer Ebene durch die Stabachse (nach Metzler Physik, Abb. 297.1). Rot und Blau: entgegengesetzte Feldrichtung. Die Schleifen am Stab wachsen, schnüren sich ab und wandern als geschlossene Feldlinien nach außen; das ringförmige Magnetfeld um den Stab ist nicht gezeichnet.

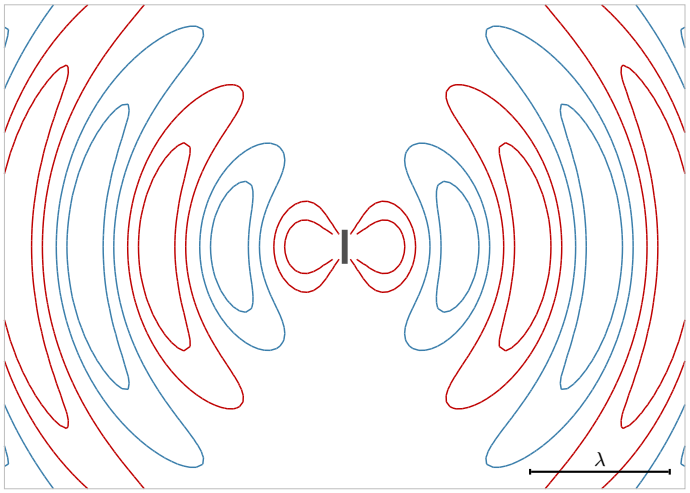


Abbildung 44: Größerer Ausschnitt: Momentbild bis in rund zwei Wellenlängen Entfernung. Senkrecht zum Stab liegen die Feldlinien am dichtesten, längs der Stabachse wird nichts abgestrahlt.

Nachweisen kann man die Welle mit einem zweiten, gleich langen **Empfangsdipol**, in dessen Mitte ein Lämpchen oder ein Messgerät sitzt. Er wird in Resonanz angeregt – aber nur, wenn er parallel zum Sendedipol steht. Dreht man ihn um 90°, zeigt er nichts mehr an: ein direkter Nachweis der Polarisation. Für $f = 433$ MHz (Funkfernbedienung) ist $\frac{\lambda}{2} = 35$ cm, für Mikrowellen mit $f = 10$ GHz nur 1,5 cm.

> Ausprobieren: **Mikrowellen: Reflexion und Polarisation ↗** · **Hertzscher Dipol ↗** · **Maxwell-Gleichungen im Überblick ↗** Üben: **noctua ↗** Einordnen: **Elektromagnetische Wellen ↗** · **Hochfrequenztechnik, Leitungen & Antennen ↗**

13.2 Eigenschaften elektromagnetischer Wellen Abi

Merksatz

- Elektromagnetische Wellen bestehen aus einem elektrischen und einem magnetischen Feld, die senkrecht zueinander und senkrecht zur Ausbreitungsrichtung schwingen: Sie sind **Transversalwellen**.
- Sie brauchen keinen Wellenträger und breiten sich im Vakuum mit der Lichtgeschwindigkeit aus:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} = 3{,}00 \cdot 10^8 \ \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}.$$

- Sie zeigen alle Wellenphänomene: Reflexion (an Metall), Brechung, Beugung, Interferenz, stehende Wellen und Polarisation.

Dass sich aus den beiden Feldkonstanten der Elektrostatik und des Magnetismus genau die gemessene Lichtgeschwindigkeit ergibt, war für James Clerk Maxwell 1864 der Hinweis, dass **Licht** eine elektromagnetische Welle ist.

Mikrowellen lassen sich mit einem **Metallgitter** polarisieren: Schwingt das elektrische Feld parallel zu den Gitterstäben, regt es die Elektronen in den Stäben zu Schwingungen an. Diese strahlen selbst eine Welle ab, die gegenphasig zur einfallenden ist und sie hinter dem Gitter auslöscht – das Gitter reflektiert. Steht das Feld senkrecht zu den Stäben, können die Elektronen kaum schwingen, die Welle geht durch. (Achtung: Das ist umgekehrt wie beim Seil im Lattenzaun.) Vor einer Metallwand bilden sich stehende Mikrowellen mit Knoten im Abstand $\frac{\lambda}{2}$ (Skript PL2, Mikrowellenherd).

Ausprobieren: **Mikrowellen: Reflexion und Polarisation** ↗ · **Hertzscher Dipol** ↗ · **Elektromagnetisches Spektrum** ↗ · **Maxwell-Gleichungen im Überblick** ↗ Üben: **noctua** ↗ Einordnen: **Elektromagnetische Wellen** ↗ · **Hochfrequenztechnik, Leitungen & Antennen** ↗

13.3 Das elektromagnetische Spektrum Abi

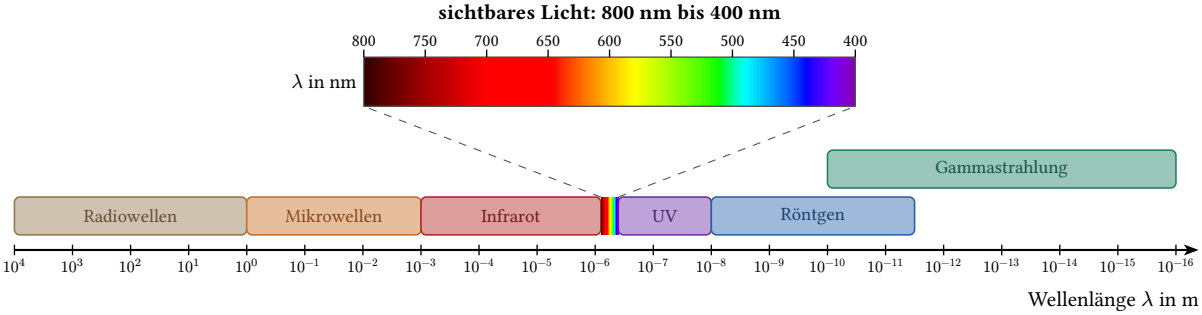


Abbildung 45: Das elektromagnetische Spektrum über der Wellenlänge. Der sichtbare Bereich ist nur ein winziger Ausschnitt; in Abituraufgaben wird er meist mit 400 nm bis 800 nm angegeben.

Bereich	Wellenlänge	Entstehung	Anwendungen
Radiowellen	über 1 m	Schwingkreise, Antennen (Dipole)	Rundfunk, Funk, MRT
Mikrowellen	1 mm bis 1 m	Schwingkreise, Magnetron	Mobilfunk, WLAN, Radar, Mikrowellenherd
Infrarot	800 nm bis 1 mm	Wärmestrahlung aller Körper	Wärmebildkamera, Fernbedienung
sichtbares Licht	400 bis 800 nm	Elektronenübergänge in Atomen, heiße Körper	Sehen, Beleuchtung, Laser
Ultraviolett	10 bis 400 nm	Gasentladung, Sonne	Desinfektion, Fluoreszenz
Röntgenstrahlung	10 pm bis 10 nm	Abbremsen schneller Elektronen	Medizin, Materialprüfung
Gammastrahlung	unter 10 pm	Atomkerne	Strahlentherapie, Sterilisation

Alle Bereiche sind dieselbe Art von Welle, nur mit verschiedener Frequenz ($c = \lambda f$). Mit wachsender Frequenz wächst die Energie der Photonen ($E = hf$, Skript PL5): Ab dem Ultraviolett reicht sie aus, um Moleküle zu ionisieren – deshalb ist kurzwellige Strahlung gesundheitsschädlich, Radiowellen dagegen nicht.

Ausprobieren: **Elektromagnetisches Spektrum** ↗ Üben: **noctua** ↗ Einordnen: **Elektromagnetische Wellen** ↗

13.4 Die Maxwell-Gleichungen im Überblick Abi

James Clerk Maxwell fasste 1864 die gesamte Elektrodynamik in vier Gleichungen zusammen. Im Bildungsplan sind ihre **Aussagen** verlangt, nicht ihre mathematische Form:

Gleichung	Aussage
a) Gaußsches Gesetz (elektrisch)	Elektrische Ladungen sind Quellen und Senken des elektrischen Feldes: Elektrische Feldlinien beginnen bei positiven und enden bei negativen Ladungen.
b) Gaußsches Gesetz (magnetisch)	Es gibt keine magnetischen Ladungen: Magnetische Feldlinien sind immer geschlossen.

Gleichung	Aussage
c) Induktionsgesetz	Ein sich zeitlich änderndes Magnetfeld ist von einem elektrischen Wirbelfeld umgeben (Faraday).
d) Ampèresches Gesetz mit Verschiebungsstrom	Ein elektrischer Strom **und** ein sich zeitlich änderndes elektrisches Feld sind von einem magnetischen Wirbelfeld umgeben (Maxwells Ergänzung).

Die Gleichungen 3 und 4 zusammen erklären die elektromagnetische Welle: Ein sich änderndes Magnetfeld erzeugt ein sich änderndes elektrisches Feld, das wiederum ein sich änderndes Magnetfeld erzeugt – die Felder erhalten sich gegenseitig und lösen sich vom Dipol ab. Dafür braucht es keine Ladungen und keinen Wellenträger.
Zur Vertiefung: **Aufgabe 59** (Antennen, im Aufgabenskript), **Aufgabe 60** (Spektrum einordnen, im Aufgabenskript) und **Aufgabe 61** (Maxwell und die Lichtgeschwindigkeit, im Aufgabenskript).

> Ausprobieren: **Maxwell-Gleichungen im Überblick** ↗ Üben: **noctua** ↗ Einordnen: **Maxwell-Gleichungen** ↗ · **Elektromagnetische Wellen** ↗



14 Das Wichtigste auf einen Blick

Im Abitur 2027 liegt die Formelsammlung des IQB bereit. Die rechte Spalte zeigt, was man dort nachschlagen kann:

Thema	Zusammenhang	Formelsammlung
Feldstärke	$E = \frac{F}{q}$; homogen $E = \frac{U}{d}$; Feldlinienregeln	Formeln: **steht drin** Regeln: nein
Potential	$U = \varphi_B - \varphi_A$; $\Delta E = qU$; Äquipotentiallinien $\perp$ Feldlinien	**steht drin**
Kondensator	$C = \frac{Q}{U} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r A}{d}$; $\frac{Q}{A} = \varepsilon_0 \varepsilon_r E$; $E_{\text{el}} = \frac{1}{2} C U^2$	**steht drin**
Auf-/Entladen	$U_C = U_0 e^{-\frac{t}{RC}}$; $\tau = RC$; $T_{\frac{1}{2}} = RC \ln(2)$; Q = Fläche unter $I(t)$	Gleichungen: **steht drin** $T_{\frac{1}{2}}$: nein
Teilchen im E-Feld	$v = \sqrt{\frac{2qU}{m}}$; Parabel $y = \frac{qEx^2}{2mv_0^2}$; Schweben $qE = mg$	nein
Flussdichte	$F = BIs$; Spule $B = \frac{\mu_0 \mu_r n I}{l}$; Faustregel	Formeln: **steht drin**
Lorentzkraft	$F_L = qvB$; Drei-Finger-Regel	Formel: **steht drin**
Kreisbahn	$r = \frac{mv}{qB}$; $T = \frac{2\pi m}{qB}$	nein
Wien-Filter	$v = \frac{E}{B}$	nein
Induktion	$\Phi = BA\cos(\alpha)$; $U_{\text{ind}} = -n\dot{\Phi}$; bewegter Leiter $U = Blv$; Lenzsche Regel	Gesetz: **steht drin** Lenz: nein
Generator	$U = nBA\omega \sin(\omega t)$	nein
Transformator	$\frac{U_1}{U_2} = \frac{n_1}{n_2}$ (ideal, Leerlauf)	**steht drin**
Selbstinduktion	$U_{\text{ind}} = -L\dot{I}$; $L = \frac{\mu_0 \mu_r n^2 A}{l}$; $\tau = \frac{L}{R}$; $E_{\text{mag}} = \frac{1}{2} L I^2$	**steht drin**
Schwingkreis	$T = 2\pi\sqrt{LC}$; U und I um $\frac{T}{4}$ verschoben; Analogie zum Federpendel	Formeln: **steht drin** Analogie: nein
Dipol, Welle	$l = \frac{\lambda}{2}$, $f = \frac{c}{2l}$; $c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}}$; transversal, polarisiert	**steht drin**
IQB-Pool **Zusätzlich aus den Bildungsstandards**		
Coulomb	$F = \frac{Q_1 Q_2}{4\pi\varepsilon_0 r^2}$; $E = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 r^2}$; $\varphi = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 r}$	**steht drin**

