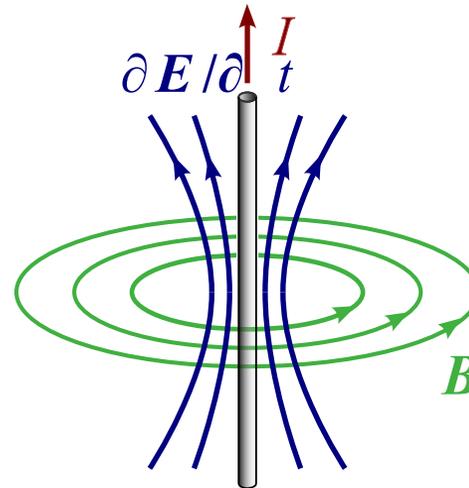
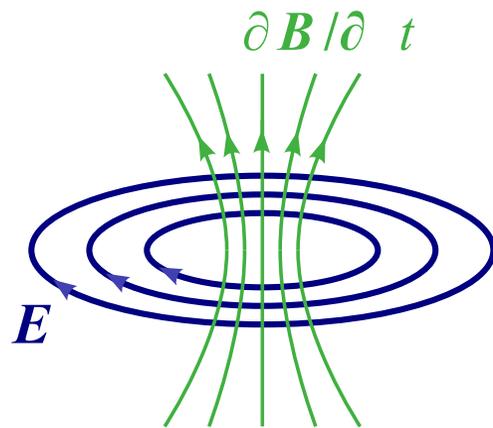
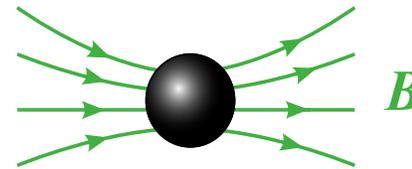
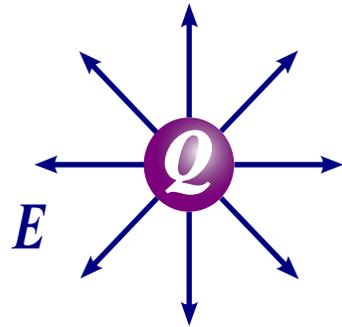


Elektrodynamik



Elektrodynamik – Wegbereiter der Relativitätstheorie



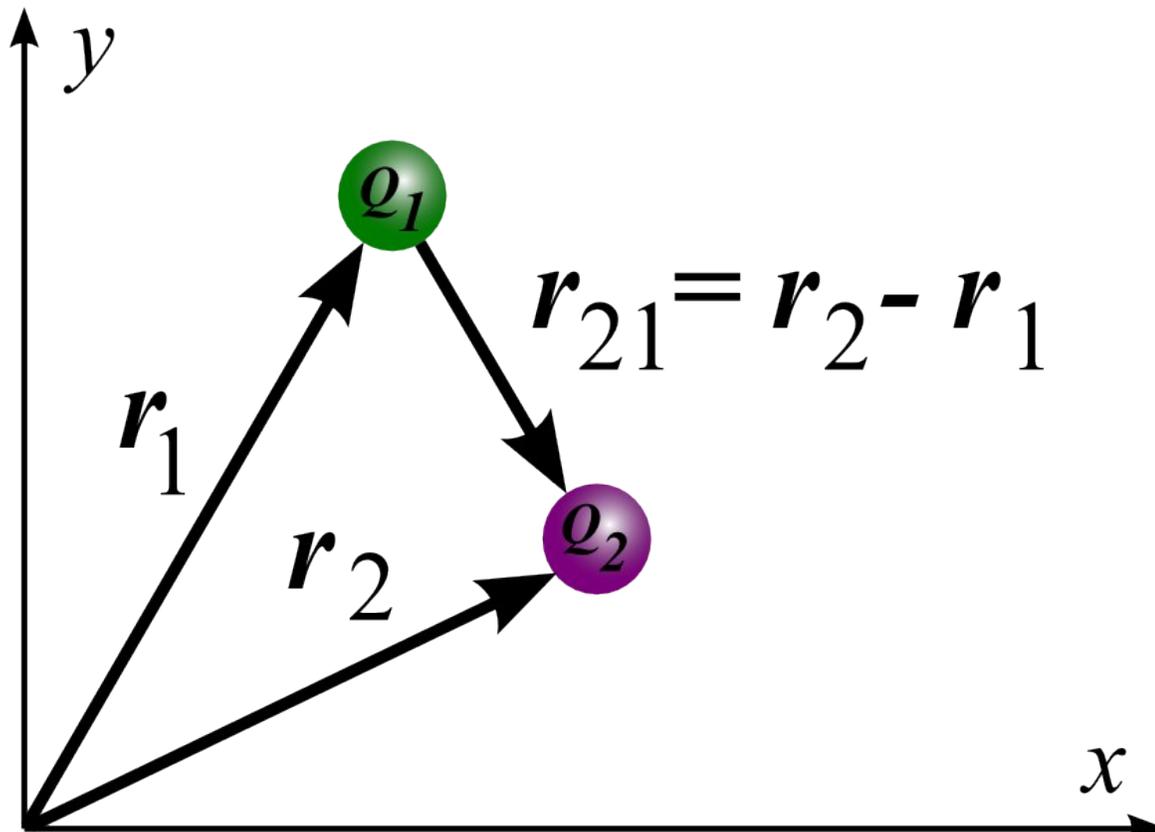
891

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

Daß die Elektrodynamik Maxwells — wie dieselbe gegenwärtig aufgefaßt zu werden pflegt — in ihrer Anwendung auf bewegte Körper zu Asymmetrien führt, welche den Phänomenen nicht anzuhafte scheinen, ist bekannt. Man denke z. B. an die elektrodynamische Wechselwirkung zwischen einem Magneten und einem Leiter. Das beobachtbare Phänomen hängt hier nur ab von der Relativbewegung von Leiter und Magnet,



Lorentz-Kraft



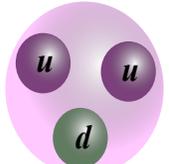
Coulombsches Gesetz in Vektor-Form:

Haben die Ladungen Q_1 und Q_2 das gleiche Vorzeichen, hat der Kraftvektor, welcher auf Q_2 wirkt, die gleiche Richtung wie der Abstandsvektor $r_2 - r_1$ (Abstoßung)

Sind die Ladungen verschieden, ziehen sie sich an und der Kraftvektor ist antiparallel zu $r_2 - r_1$ (Anziehung)

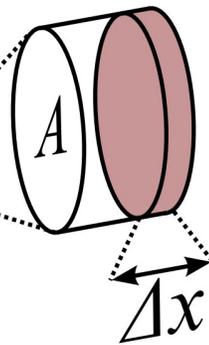
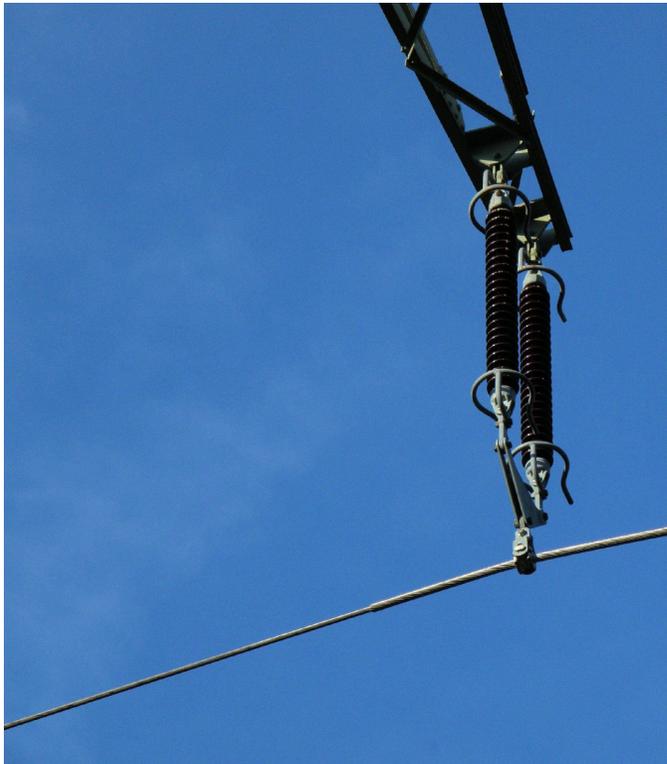
Ladung tritt in Vielfachen von $e/3$ auf.



Familie	Ladung	Elementarteilchen	Ladung	Atomteil	Name	
Quarks	2/3	u	c	t	 Proton	
		d	s	b		
		-1/3	e	μ		τ
	ν_e		ν_μ	ν_τ		
	Leptonen		-1	e		μ
		0	ν_e	ν_μ		ν_τ
-1		e			Elektron	

Kleinste heute bekannte Bestandteile der Materie. Die Teilchen, aus denen Atome und Moleküle bestehen (Protonen, Neutronen und Elektronen), haben Ladungen, die Vielfache der so genannten Elementarladung sind. Protonen und Neutronen bestehen aus Quarks mit Vielfachen eines Drittels der Elementarladung. Alle Elementarteilchen außer u, d, e, ν sind instabil

Strom und Ladungsträgergeschwindigkeit

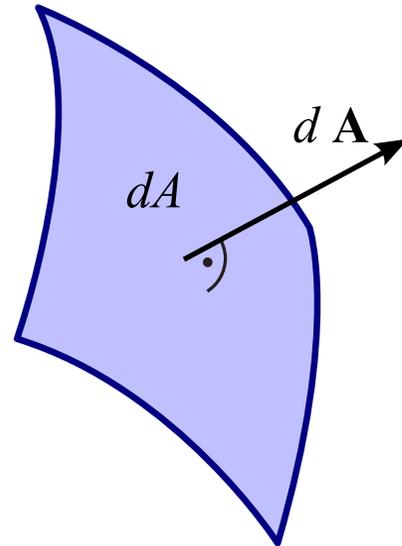


Skizze einer Leitung.
Der von ihr transportierte Strom ergibt sich aus der Anzahl der Ladungsträger, die sich im Volumen $A \Delta x$ befinden.

Dabei ist Δx von der Geschwindigkeit abhängig:

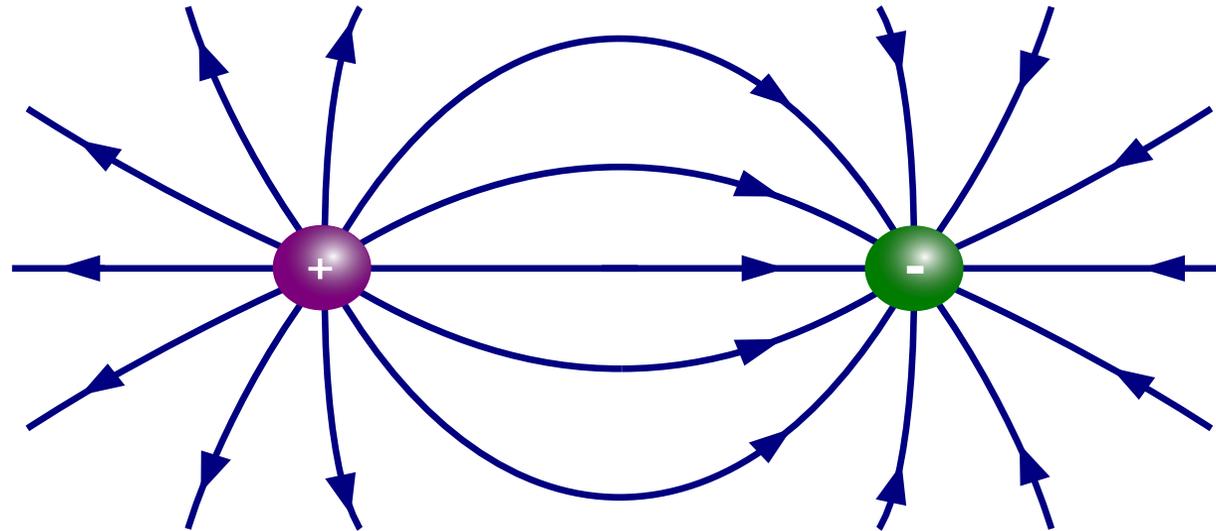
$$\Delta x = v_x \Delta t$$

Flächenvektor



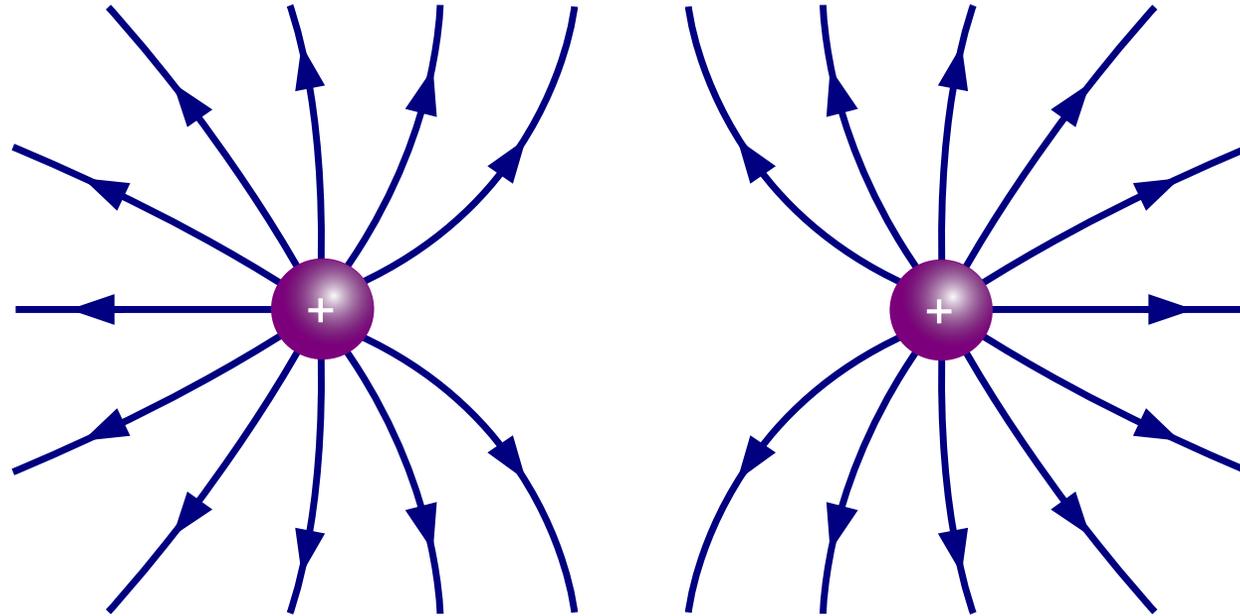
Skizze zur Bedeutung eines Flächenvektors: Jeder Fläche kann ein Vektor zugeordnet werden, der die Größe und die Orientierung der Fläche angibt. Sein Betrag ist die Größe der Fläche.

Feldlinien zwischen komplementären Ladungen



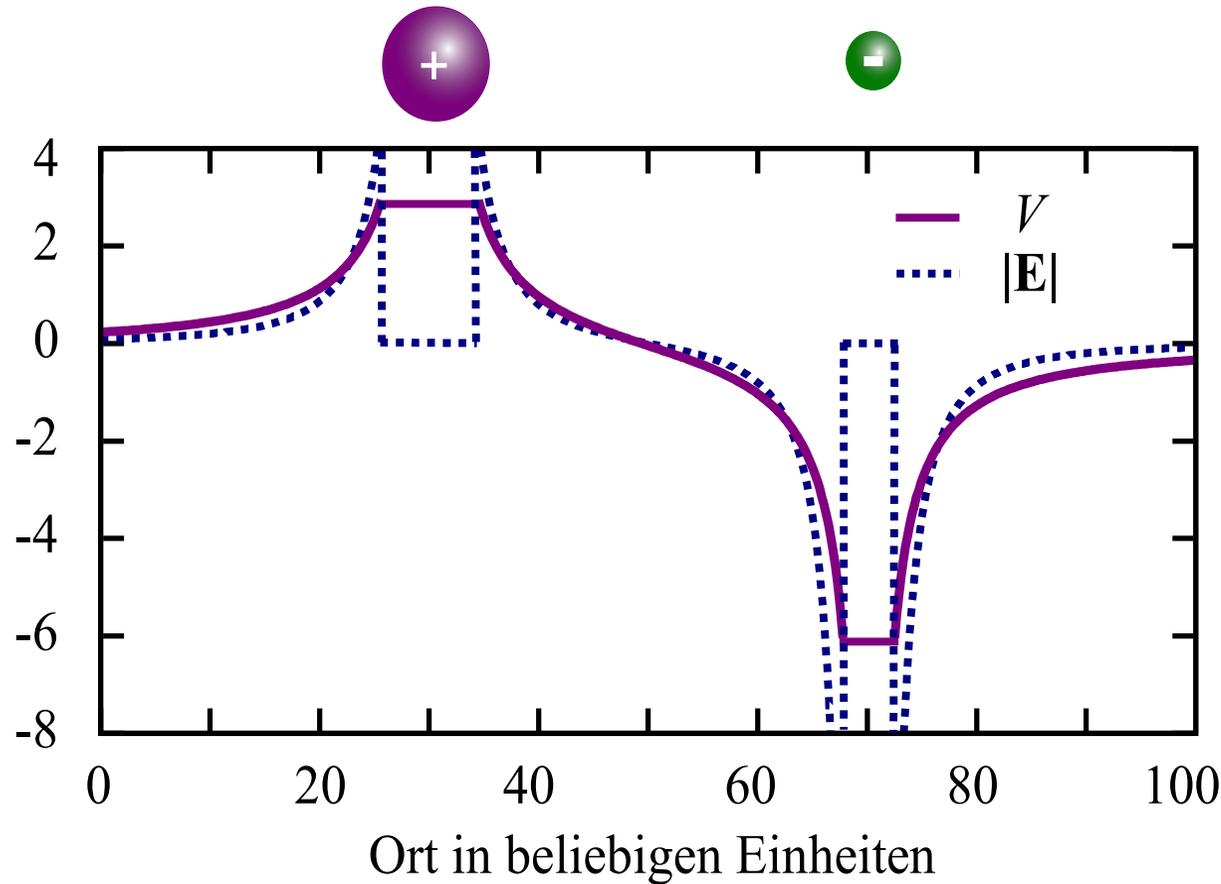
Von zwei entgegengesetzten Ladungen erzeugtes Feld, dargestellt als Feldlinien. Ein positiv geladener Probekörper würde von der positiven Ladung weg und zur negativen Ladung hin gedrückt werden

Feldlinien zwischen gleichen Ladungen



Von zwei gleichen Ladungen erzeugtes Feld, dargestellt als Feldlinien. Auf einen Probekörper genau im Punkt in der Mitte zwischen ihnen würde keine Kraft wirken

Feld und Potenzial bei Metallkugeln



Feld und
Potenzialverlauf
in und zwischen zwei
Metallkugeln von
unterschiedlicher
Größe, aber gleichem
Ladungsbetrag
(statisch)

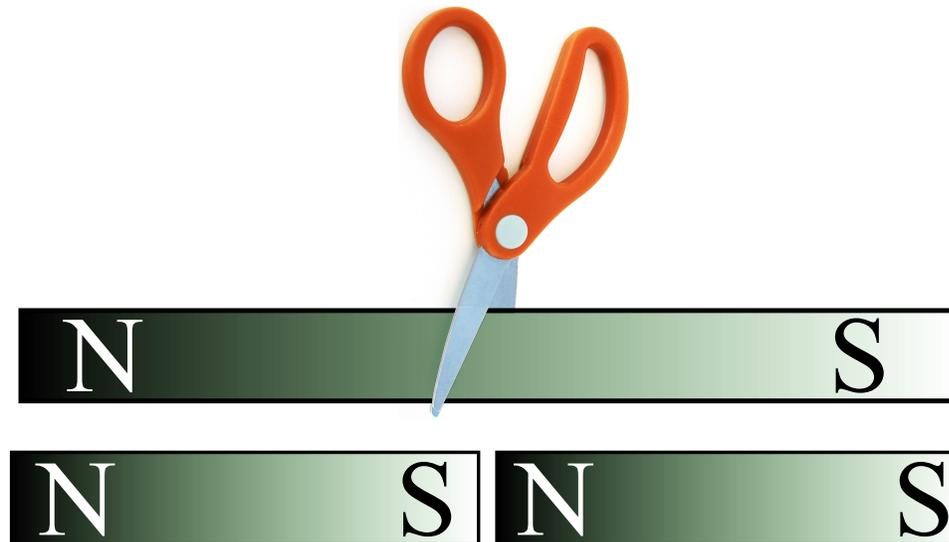
Feld und Potenzial bei Gewitter



Flug unter einer Gewitterwolke. Die im Flugzeug auftretenden Feldstärken hängen vom Schichtwiderstand der Außenhaut und der Stromstärke des Blitzes ab.

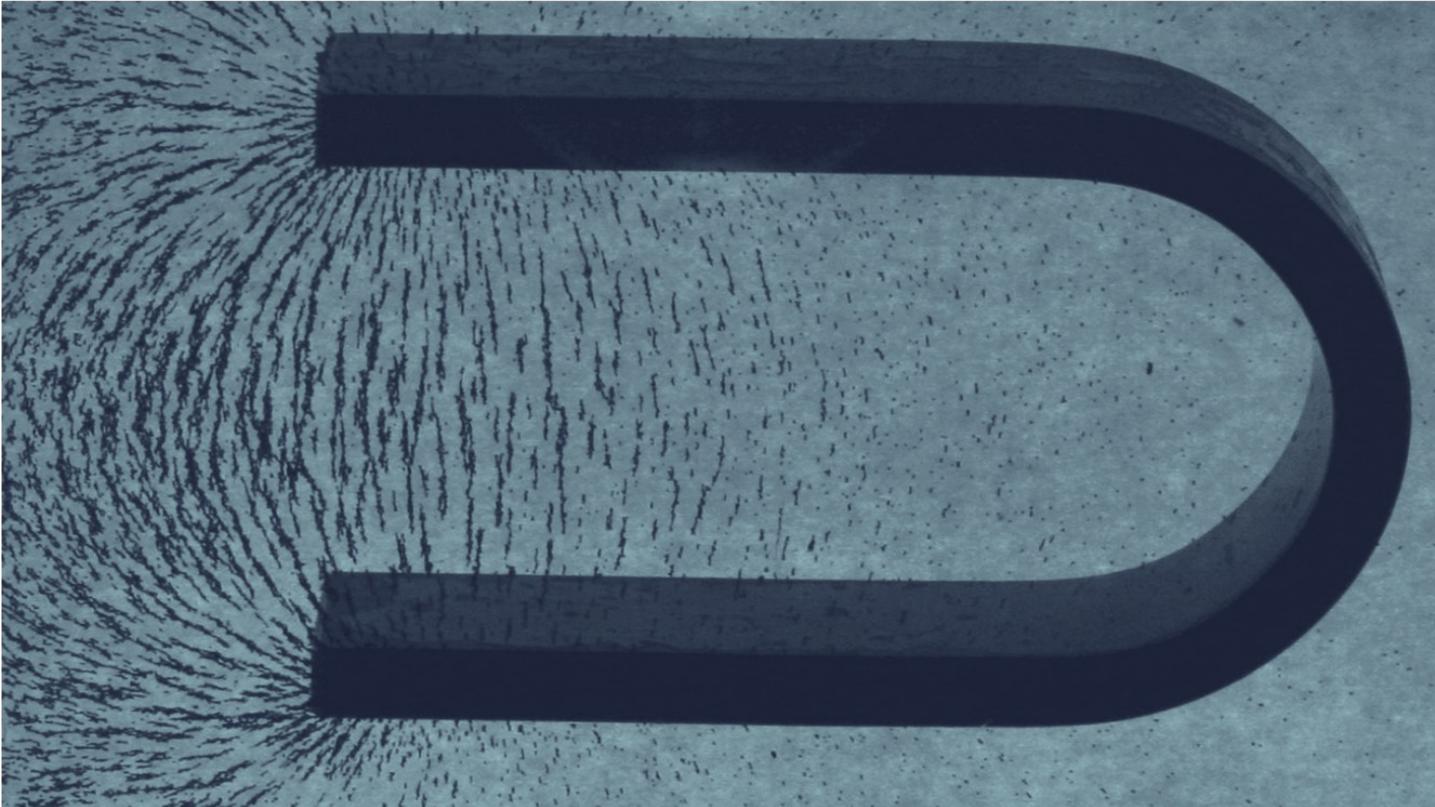
In diesem Fall war das Flugzeug schneller als der Blitz (Bild mit freundlicher Genehmigung der Dexmet Corporation)

Magnetverhalten bei Teilung



Zerschneidet man einen Magneten, so entstehen zwei neue mit der gleichen magnetischen Orientierung

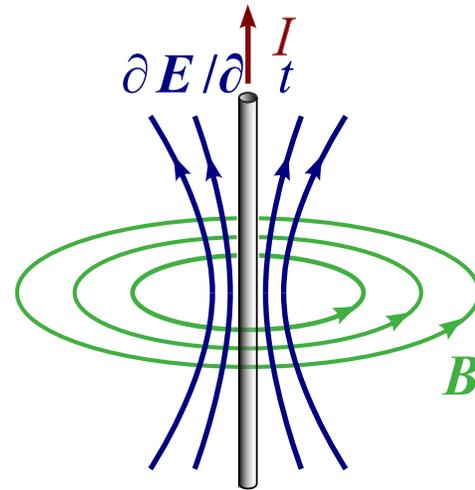
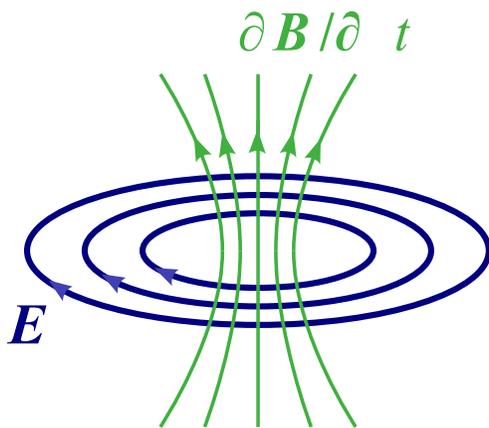
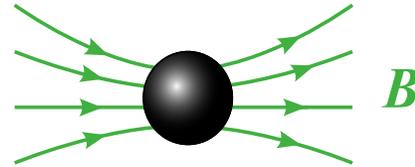
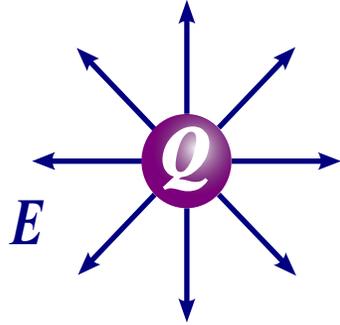
Magnetfeld, durch Eisenspäne sichtbar



Eisenstäbchen auf einer Glasplatte über einem Magneten. Sie zeigen charakteristische Muster, aus denen auf das Magnetfeld geschlossen wird (Foto: FH Münster, Physikalische Technik)



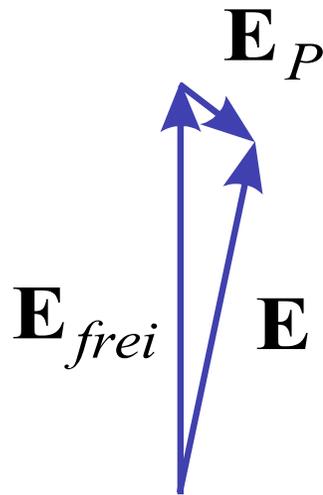
Die Maxwell'schen Gleichungen



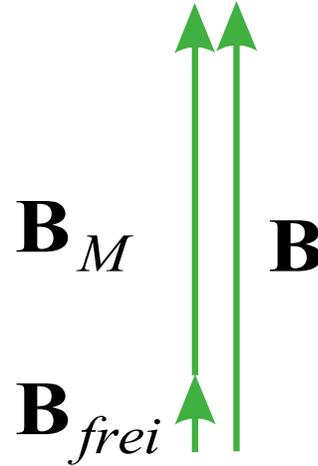
Makroskopische Veranschaulichung der differentiellen Form der Maxwell'schen Gleichungen:

Ladungen sind die Quellen des elektrischen Feldes. Das magnetische Feld hat keine Quellen, es ist ein Rotationsfeld. Elektrische Rotationsfelder entstehen durch Magnetfeldänderungen und magnetische Felder entstehen durch Ströme und Änderungen des elektrischen Feldes.

In Materie hat jedes Feld zwei Anteile



a)



b)

Felder in Materie und ihre Komponenten:

- a) zeigt das elektrische Feld in einem anisotropen Dielektrikum,
- b) zeigt das magnetische Kraftfeld in einem Ferromagneten.

Beide Fälle sind nicht maßstabsgerecht gezeichnet

H , D , M und P sind Feldanteile B und E sind Felder



■ **Tabelle 1.1** Bedeutung der traditionellen Feldgrößen im Infinitesimalen

Trad. Feldgröße	H	D	M	P
Bedeutung	B_{frei}/μ_0	$\varepsilon_0 E_{\text{frei}}$	B_M/μ_0	$-\varepsilon_0 E_P$
Ursache	Freie Ströme	Freie Ladung	Magnetisierung	Polarisation
Ursache (Symbol)	J_{frei}	ρ_{frei}	J_M	ρ_P

Einfache Feldgleichungen in Materie



Die Wirkung polarisierbarer und magnetisierbarer Stoffe auf die elektromagnetischen Kraftfelder lässt sich durch die Substitutionen

$$\begin{aligned}(\varepsilon_0 \mathbf{E}) &\rightarrow (\varepsilon_0 \varepsilon_r \mathbf{E}) = (\varepsilon \mathbf{E}) \\ (\mu_0^{-1} \mathbf{B}) &\rightarrow (\mu_0^{-1} \mu_r^{-1} \mathbf{B}) = (\mu^{-1} \mathbf{B})\end{aligned}$$

beschreiben. Diese Substitutionsregel macht die Verwendung der Felder \mathbf{H} und \mathbf{D} überflüssig. Sie setzt voraus, dass eindeutig zwischen freien und gebundenen Ladungen unterschieden werden kann. Sie gilt bei makroskopischen Körpern. Werden atomare Distanzen betrachtet, kann sie nicht mehr angewandt werden.

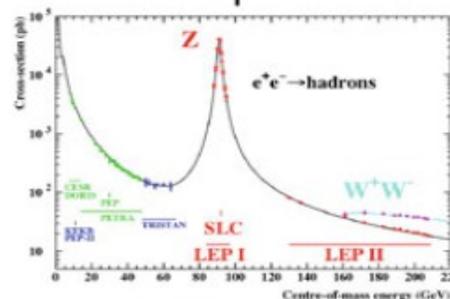
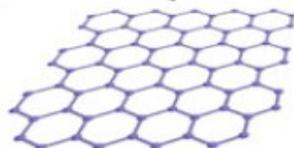
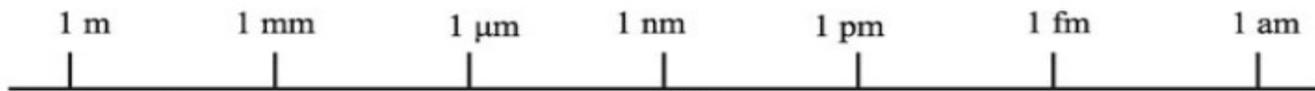


Unterhalb von 1 nm bleiben nur E und B

E, B



$D, H, P, M, \mu_r, \epsilon_r$



Die Felder P und M stehen für über viele Atome gemittelte Polarisations- und Magnetisierungsfelder. Wenn aber wie bei aktuellen Transistorgenerationen Oxidschichten nur noch aus fünf Atomen aus drei Elementen bestehen, dann wird so eine Mittelung fragwürdig. Spätestens wenn die Technik bei der Behandlung einzelner Atome anlagt werden diese Größen unbrauchbar. In der Folge werden auch H, D, ϵ_r und μ_r unbrauchbar.



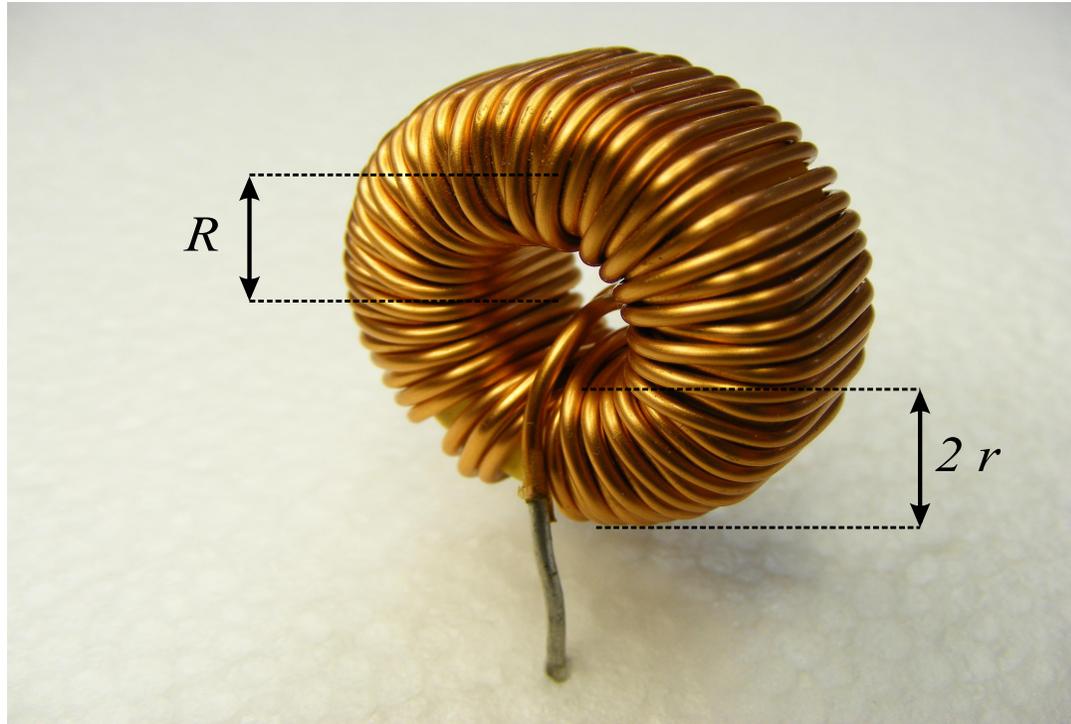
E und B aus Potenzialen

$$\mathbf{E} = -\nabla \cdot V + \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \quad \text{und} \quad \mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} .$$

Man kann einem Paar von Punkten im Raum nur dann eine zwischen ihnen herrschende Spannung zuordnen, wenn keine zeitabhängigen Magnetfelder vorhanden sind.

(Die Maschenregel gilt daher nicht immer)

Toroide Spule



Aufgabe:

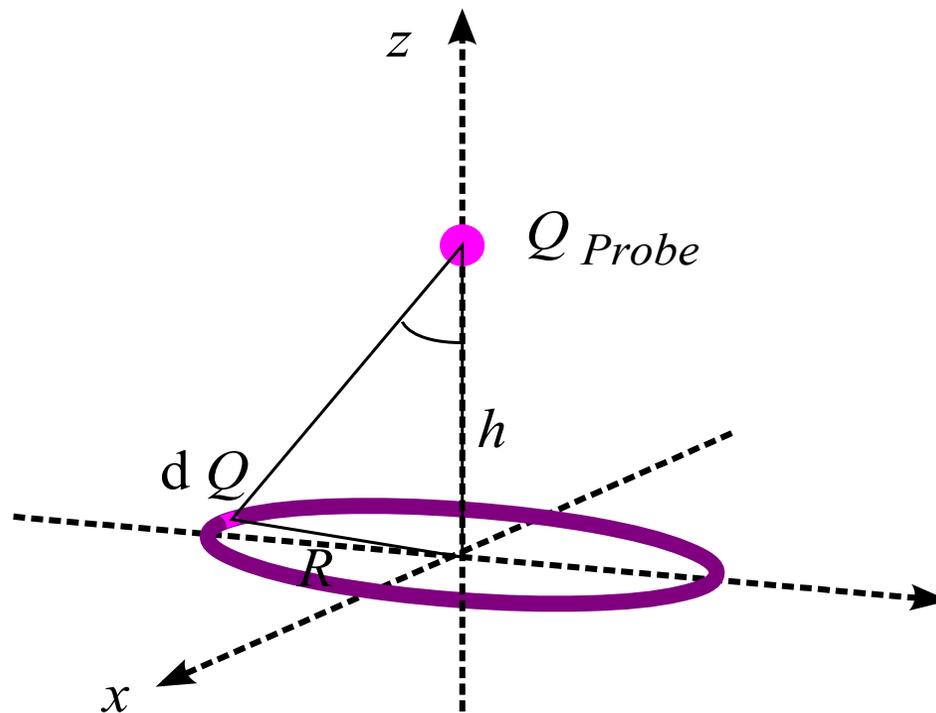
Als Torus gewickelte Spule

Bitte bestimmen Sie das
Magnetfeld!

Betrachten Sie dann den
Grenzfall eines sehr
großen Radius R : Was
folgt aus dieser
Betrachtung für das
Magnetfeld einer langen
geraden Spule?



Ring und Punktladung

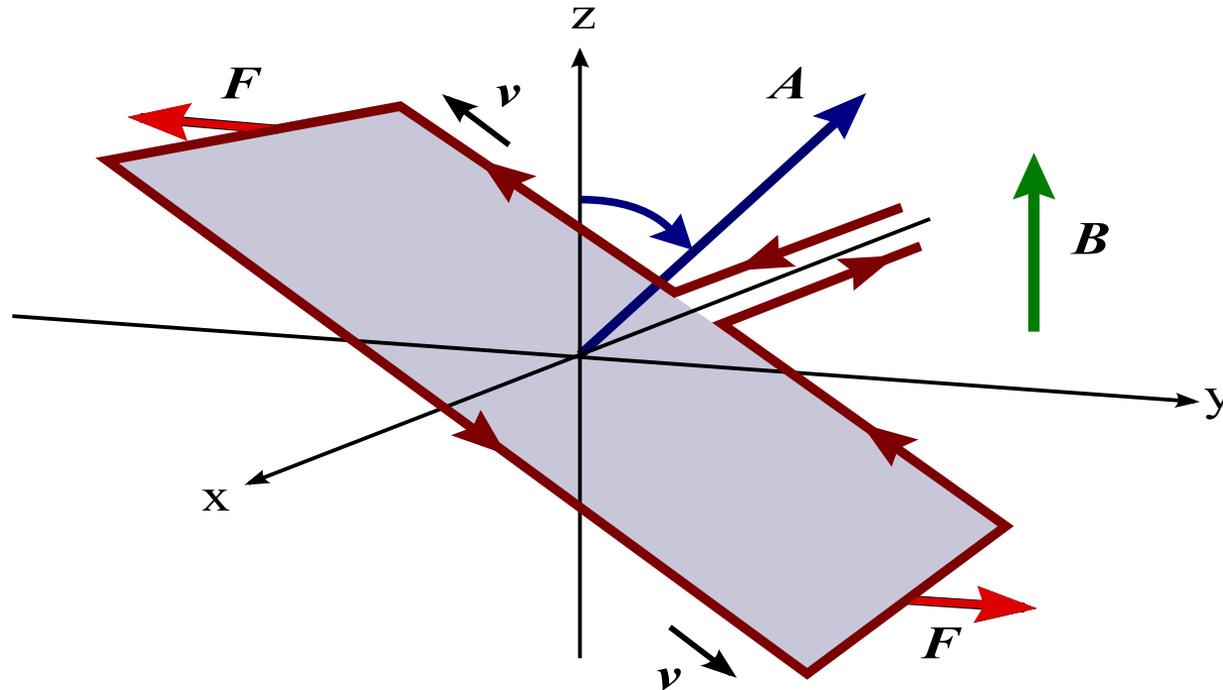


Aufgabe:

Probeladung Q_{Probe} , schwebend
in der Höhe h über
einem homogen geladenen
Ring mit dem Radius r

Wie groß muss eine
Probeladung mit dem Gewicht
 m_{Probe} sein, damit sie in der Höhe
 h schwebt?

Kraft auf eine Leiterschleife im Magnetfeld



Aufgabe:
Leiterschleife im
homogenen
Magnetfeld
 $\mathbf{B} = (0, 0, B)$.
Durch die Schleife
fließe ein Strom in der
durch die Pfeile
angegebenen
Richtung

Bitte berechnen Sie
das Drehmoment

Induktionsspannung durch Bewegung

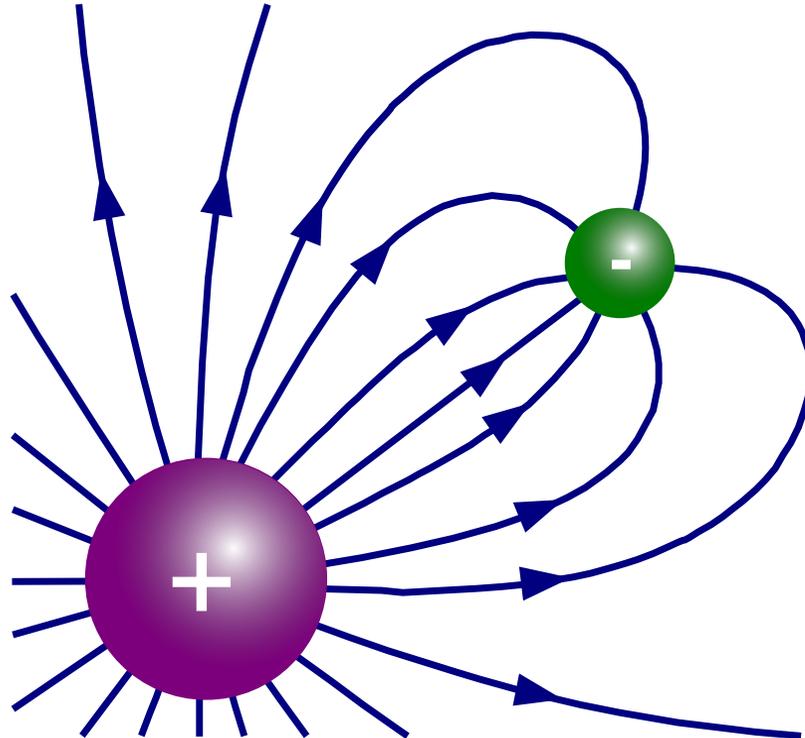


Aufgabe:

Ein ICx und die bei seiner Fahrt mit der Geschwindigkeit v verursachte Änderung des magnetischen Flusses aufgrund der Flächenzunahme ΔA .
(Foto: Siemens)

Vergleichen Sie die Spannung an den Achsen, ausgerechnet aus Lorentz-Kraft und Faraday-Henry-Gesetz.

Feld sehr unterschiedlicher Ladungen

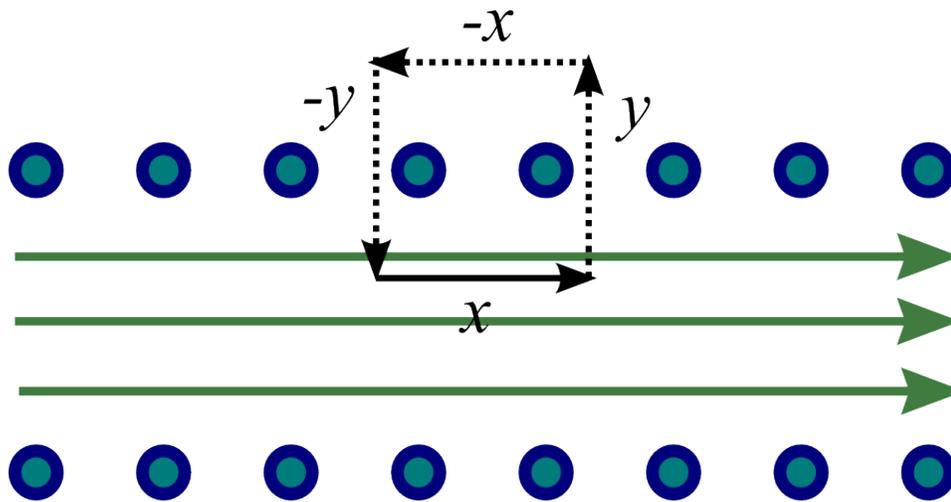


Lösung:
Elektrisches Feld
zweier sehr
unterschiedlicher
Ladungen.

Bei sehr ungleich
großen Ladungen
treffen die Feldlinien
sogar von der
Rückseite auf die
kleinere Ladung



Feld einer langen Spule



$$\mathbf{B} = (B_x, 0, 0)$$

Lösung:

Anwendung des Ampère'schen Gesetzes auf eine lange Spule:

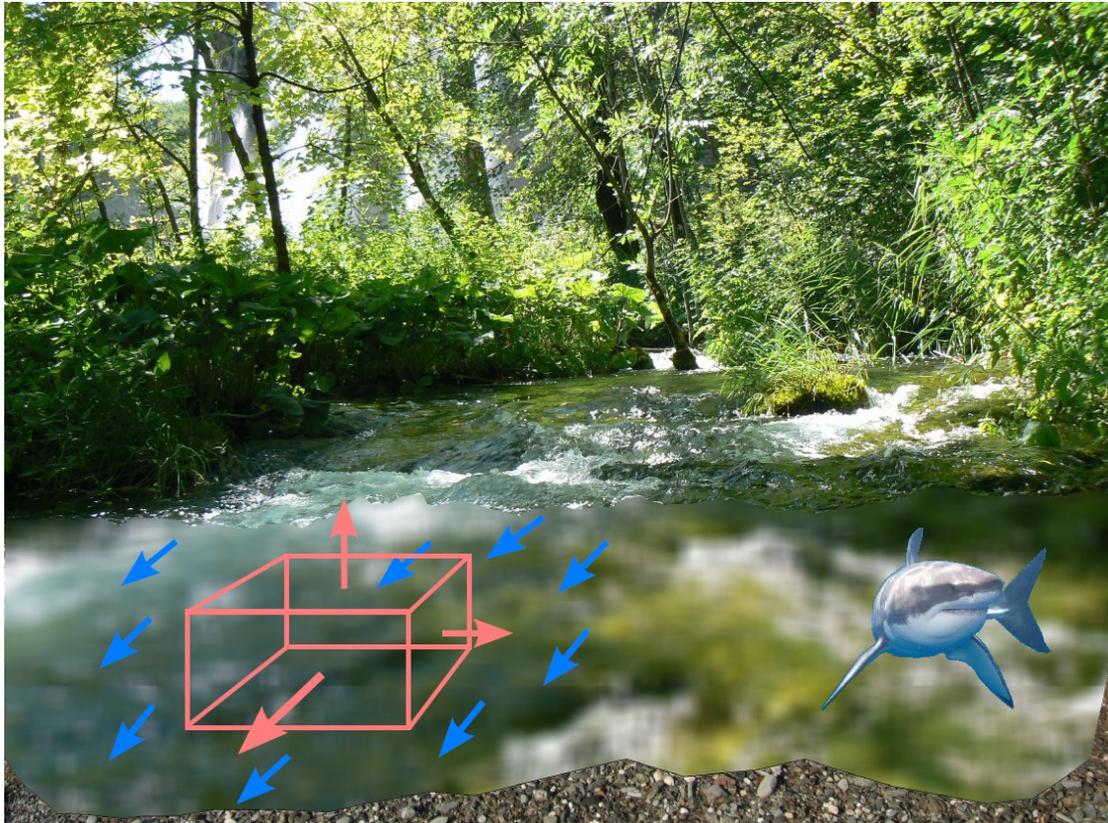
Nur der untere Teil des Pfades liefert einen nennenswerten Beitrag:

$B \Delta l = x B$: Der Pfad umschließt

den Strom $I N$ -mal

(hier: $N = 2$)

Wörtlich: Fluss eines Vektorfeldes



Lösung:

Fluss eines Vektorfeldes, hier als Beispiel die Fließgeschwindigkeiten in einem Bach. Die Quellenfreiheit dieses Feldes ist gleichbedeutend mit der Erhaltung der Wassermenge:

So viel Wasser, wie in jedes Volumen hinein strömt, muss auch wieder hinaus