

A) Elektromagnetische Wechselwirkung

In dem Kapitel „Magnetisches Feld“ wurde darauf geachtet, Elektrizität und Magnetismus genauestens zu unterscheiden. Insbesondere wurde herausgearbeitet, dass magnetische Pole keine echten Pole, sondern nur *Durchlaufgebiete* von Feldlinien sind. Doch in Blatt M7 zeigte sich, dass Magnetismus und Elektrizität doch zusammenhängen. Die Lorentzkraft entpuppte sich nämlich als eine elektrische Kraft, welche durch Aufladung bei relativistischer Verkürzung zustande kommt.

In diesem Kapitel nähern sich Elektrizität und Magnetismus noch weiter an:

Die „erste Elektrizität“ beruht auf Spannungsquellen, welche Ladungen trennen. Die getrennten Ladungen sind die Pole des elektrischen Feldes. Eine Feldlinie läuft vom Plus- zum Minuspol. Jetzt lernen wir eine „zweite Elektrizität“ kennen, bei welcher die Feldlinien wie beim Magnetismus geschlossene Linien sind. Wir beginnen mit der Lorentzkraft, drehen den Versuchsaufbau dann um und erweitern die Anordnung anschließend. So kommen wir zu geschlossenen Linien.

B) Das Motorprinzip, die Lorentzkraft bewegt einen Stab: Strom erzeugt Bewegung.

Kraft bewirkt Beschleunigung bzw. Bewegung. So ist es auch mit der Lorentzkraft. Die Lorentzkraft setzt Ladungsträger in Bewegung. In der Abbildung wird ein Metallstab an eine Spannungsquelle angeschlossen. Auf der Minusseite hat man dann einen Elektronenüberschuss, auf der Plusseite entsprechend frei bewegliche Löcher, also frei bewegliche Plusteilchen. Bei ihrer Bewegung durch den Stab erfahren beide Teilchensorten die Lorentzkraft.

Für die Elektronen nimmt man die **Linke Hand** Für die Löcher nimmt man die **Rechte Hand**
Daumen $\hat{=}$ Stromrichtung I_- Daumen $\hat{=}$ Stromrichtung I_+

Zeigefinger $\hat{=}$ Magn.fluss B ($N \rightarrow S$)

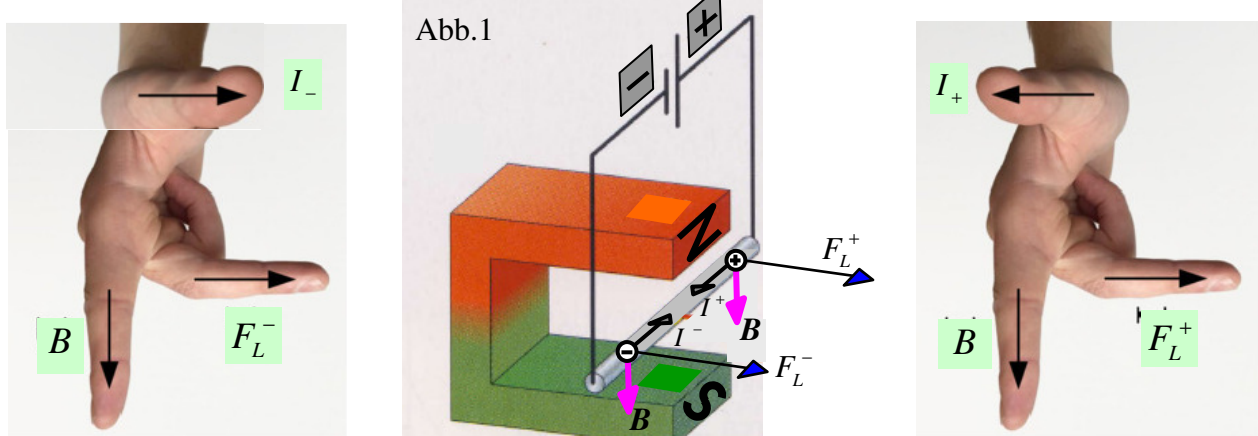
Zeigefinger $\hat{=}$ Magn.fluss B ($N \rightarrow S$)

Mittelfinger $\hat{=}$ Ergebnis: Lorentzkraft F_L^-

Mittelfinger $\hat{=}$ Ergebnis: Lorentzkraft F_L^+

Für beide Teilchensorten zeigt die Lorentzkraft nach rechts.

Also bewegt sich der Stab insgesamt nach rechts.



Ergebnis: Im Magnetfeld erfährt ein stromdurchflossener Stab eine Kraft. Das wird im Motor genutzt

C) Das Generatorprinzip, die Lorentzkraft trennt Ladungen: Bewegung erzeugt Strom.

Jetzt wird der Metallstab per äußerer Kraft mit der Geschwindigkeit v nach rechts bewegt. Damit bewegen sich auch die im Metallstab befindlichen (negativen) Elektronen und (positiven) Löcher mit v nach rechts.

Löcher, Rechte Hand: Daumen der nach *rechts*.

Zeigefinger in B -Richtung nach *unten*.

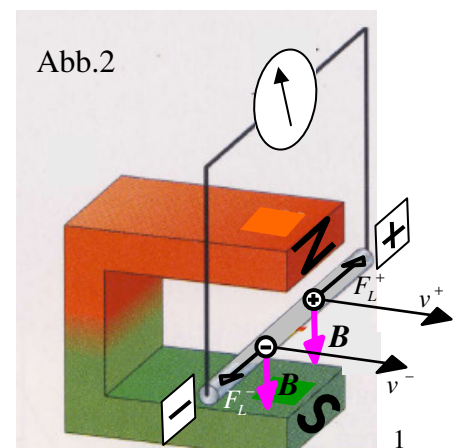
Mittelfinger: Die Lorentzkraft, er zeigt jetzt nach *hinten*.

Die positiven Ladungsträger werden also nach hinten gedrückt.

Ergebnis: Hinten entsteht daher ein Pluspol.

Elektronen, Linke Hand: ...

Ergebnis: Entsprechend: Vorne entsteht ein Minuspol.

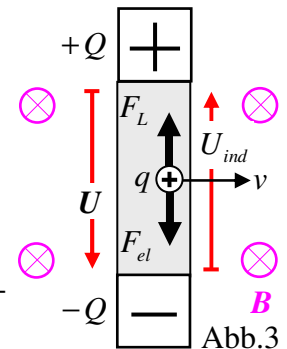


Bewegt man einen Metallstab rechtwinklig durch ein Magnetfeld, so erfolgt *während* der Bewegung eine Ladungstrennung. „Ladungstrennung“ ist aber das Kennzeichen einer *Spannungsquelle*. Man sagt: In dem Metallstab wird eine Spannung *induziert*. Im Generator wird dieses Prinzip der Ladungstrennung zur Spannungserzeugung großtechnisch genutzt.

Wie groß ist die durch die Lorentzkraft erzeugte *Induktionsspannung* U_{ind} ?

Einfachheitshalber betrachten wir in dem bewegten Stab nur positive bewegliche Ladungsträger q , also die Ladungsträger des technischen Stromes.

Die Induktionsspannung messen wir indirekt durch die Gegenspannung U , welche durch die Aufladung $\pm Q$ der Stabenden entsteht. Zwischen den geladenen Stabenden baut sich nämlich ein elektrisches Gegenfeld E auf. Die Aufladung endet, wenn die elektrische Kraft $F_{el} = q \cdot E$ auf die beweglichen Ladungsträger q den Wert der Lorentzkraft $F_L = q \cdot v \cdot B$ erreicht hat.



Das geht sehr schnell. Dann gilt $\cancel{q} \cdot E = \cancel{q} \cdot v \cdot B$. Die Feldstärke E des Gegenfeldes erreicht also nach kurzer Zeit den Endwert $E = v \cdot B$. Besitzt der Stab die Länge d , so gilt für die Gegenspannung zwischen den Stabenden $U = d \cdot E$, also $U = d \cdot v \cdot B$. Die Gegenspannung U ist, wie jede Spannung zwischen zwei Ladungspolen, vom Plus- zum Minus-Ende des Stabes gerichtet. Die *Induktionsspannung*, hat den gleichen Betrag $U_{ind} = d \cdot v \cdot B$. Doch sie zählt in Richtung der Lorentzkraft, die ja als elektr. Kraft (s. M7) das Feld $E_{ind} = v \cdot B$ der Induktionsspannung erzeugt.

Die bisherigen Spannungsquellen beruhen auf der Elektrochemie, Lichtenergie oder Reibungselektrizität. Jetzt lernen wir das elektrodynamische Prinzip zur Spannungserzeugung kennen.

Bewegt man den Stab in Abb. 2

zunächst vor und dann wieder zurück, so polt sich die Spannung um. Bei fortwährender Vor- und Rückbewegung entsteht eine Wechselspannung. Eine sinusförmige Wechselspannung erhält man durch Drehen des Stabes oder besser noch, durch Drehen einer Leiterschleife. Dieses Prinzip wird im Generator genutzt.

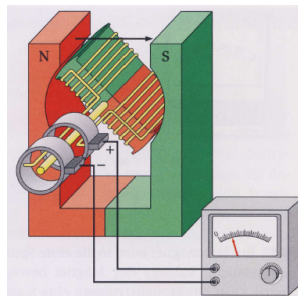


Abb 3.: Durch einen Kommutator wird die Spannung beim Abgriff umgepolt. So erhält man eine pulsierende Gleichspannung.



Abb 4.: Historischer Generator in einem Kraftwerk.

D) Erzeugung eines pollosen Ringstroms

Im Abschnitt C lernten wir, dass die Lorentzkraft die beweglichen Ladungsträger $\pm q$ im Leiterstab *längs* der Leiterrichtung in Bewegung setzt, wenn dieser rechtwinklig durch ein Magnetfeld gezogen wird. Nun ändern den Aufbau und betrachten einen *quadratischen* Metallrahmen, dessen Seiten aus Teleskopstangen bestehen, welche sich z.B. durch einen Zugmechanismus kontinuierlich verlängern lassen, wobei die Ecken zusammen bleiben. Der Rahmen „wächst“ also beim Auseinanderziehen in allen vier Richtungen. Alternativ kann man auch ein Quadrat aus Gummiband verwenden, in welches dünne Metalldrähte eingefaltet sind. Der Rahmen wird auf eine Tischplatte gelegt, *unter* welcher sich der großflächige Nordpol eines Magneten befindet. Somit wird der Rahmen von *unten* von einem B -Feld durchdrungen und wir halten den *Zeigefinger* von *unten* nach *oben*.

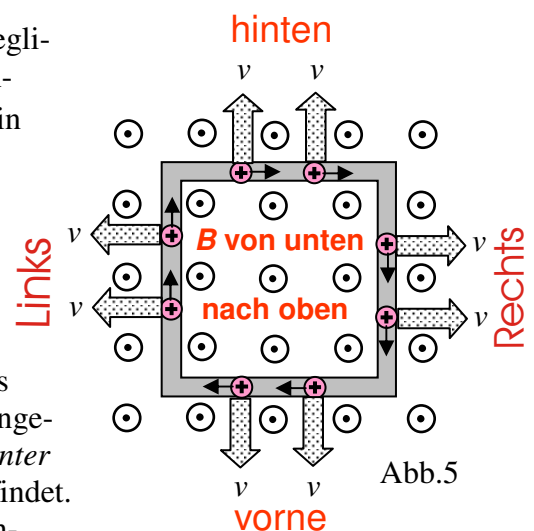


Abb.5

Einfachheit halber beschränken wir uns wieder auf positive bewegliche Ladungsträger. Dann liefert die **Rechte Hand** die Lorentzkraftrichtung. Ziehen wir nun alle Seiten gleichzeitig auseinander, so bewegen sich die in den Schenkeln befindlichen positiven Ladungsträger überall nach außen. Deshalb wird der Daumen stets in die jeweilige Bewegungsrichtung nach außen gehalten:

Hinten zeigt der Daumen nach **hinten**, sodass der Mittelfinger nach **rechts** zeigt und die Lorentzkraft die Ladungsträger nach **rechts** treibt. **Rechts** zeigt der Daumen nach **rechts**, sodass der Mittelfinger nach **vorne** zeigt und die Lorentzkraft die Ladungsträger nach **vorne** treibt.

Vorne zeigt der Daumen nach **vorne**, sodass der Mittelfinger nach **links** zeigt und die Lorentzkraft die Ladungsträger nach **links** treibt. **Links** zeigt der Daumen nach **links**, sodass der Mittelfinger nach **hinten** zeigt und die Lorentzkraft die Ladungsträger nach **hinten** treibt.

Ergebnis: Die Ladungsträger laufen beim Vergrößern des Rahmens im *Kreis* herum. Beim Vergrößern des Rahmens entsteht ein *Ringstrom* ohne Anfang und ohne Ende. Zeigt die Flussdichte nach oben, so hat sie ein positives Vorzeichen. Bei Rahmenvergrößerung hat die Änderung der Rahmenfläche A auch ein positives Vorzeichen. In diesem Fall durchläuft der Ringstrom den Rahmen *im Uhrzeigersinn*. Der Ringstrom hat also in diesem Fall einen mathematisch *negativen* Drehsinn.

Als **Michael Faraday** 1831 den *pollose Ringstrom* entdeckte, gab es nur Spannungsquellen *mit* Polen, nämlich die Batterie und die Influenzmaschine.

Jetzt entdeckt Faraday eine *neue* Art von Spannungserzeugung, welche keine elektrischen Pole besitzt: Während sich der magnetfelddurchflutete Rahmen vergrößert, entsteht durch die Lorentzkraft ein elektrisches Ringfeld

$E_{ind} = v \cdot B$. Dieses Feld setzt die beweglichen Ladungsträger q gemäß der Kraftformel $F_{el} = q \cdot E_{ind}$ genauso in Bewegung, wie es ein „normales“ Feld E tut, welches zwischen zwei Polen existiert.



Michael Faraday

Ergebnis:

Bei Vergrößerung des Rahmens entsteht ein elektrisches Ringfeld E_{ind} ohne Pole. Ringfelder ohne Pole kannten wir bisher nur vom Magnetismus. Auch dort sind die Feldlinien ringförmig geschlossen und die magnetischen Pole N und S sind nur Durchlaufgebiete von Feldlinien, also Scheinpole. Wie ein elektrisches Feld zwischen Polen, so kann auch ein elektr. Ringfeld Strom fließen lassen. Die Spannungen aller großtechnischen Stromkreise werden als Ringfelder per Induktion erzeugt.

Wie groß ist die Induktionsspannung U_{ind} bei der Rahmenvergrößerung?

Bei der Rahmenvergrößerung entsteht ein elektrisches Ringfeld und es fließt ein Ringstrom. Schlitzt man den Rahmen an einer Stelle auf, so staut sich die Ladung dort und die Schlitzenden laden sich mit $\pm Q$ auf. Dadurch lässt sich an den Schlitzenden die Induktionsspannung U_{ind} messen. Nach Abschnitt C liefert jeder Schenkel die Teilspannung $d \cdot v \cdot B$, sodass die am Schlitz gemessene Induktionsspannung $U_{ind} = 4 \cdot d \cdot v \cdot B$ beträgt.

Diese Spannung beruht per Lorentzkraft auf der Vergrößerung der Rahmenfläche A . Sieht man von den Ecken ab, so zeigt die Abbildung, dass jeder Schenkel bei seiner Bewegung nach außen die umfasste Fläche um den Wert $d \cdot \Delta s$ vergrößert. Insgesamt beträgt die Flächenvergrößerung also $\Delta A = 4 \cdot d \cdot \Delta s$. Beachten wir, dass Geschwindigkeit gleich „Strecke durch Zeit“ ist, also $v = \Delta s / \Delta t$, so ergibt sich $\Delta A = 4 \cdot d \cdot v \cdot \Delta t$, bzw. $\Delta A / \Delta t = 4 \cdot d \cdot v$.

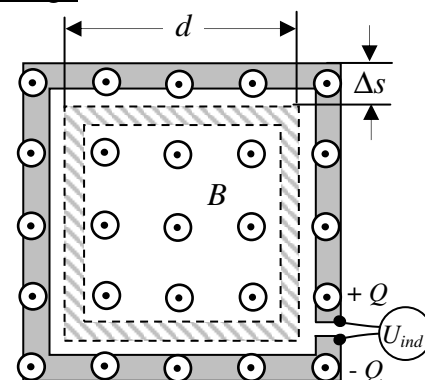


Abb 6.: Wird der Ringstrom durch einen Schlitz mit Voltmeter unterbrochen, so lässt sich die Induktionsspannung U_{ind} messen.

Einsetzen in $U_{ind} = 4 \cdot d \cdot v \cdot B$ ergibt für die induzierte Spannung $U_{ind} = -\Delta A / \Delta t \cdot B$.

Das Minuszeichen muss angebracht werden, weil bei positivem B und zeitlich positiver Flächenvergrößerung $\Delta A / \Delta t$ die Orientierung der Induktionsspannung mathematisch *negativ* ist.

E) Der magnetische Fluss, Formel der Induktionsspannung

Die Formel $U_{ind} = -\Delta A / \Delta t \cdot B$ für die induzierte Spannung beinhaltet das Produkt aus der Flächenänderung $\Delta A / \Delta t$ und der Flussdichte B . Es ist offensichtlich, dass eine gleichzeitige Vergrößerung der Rahmenfläche A und eine Vergrößerung der Flussdichte B die Induktionsspannung noch weiter ansteigen lässt. Deshalb erhebt sich die Frage, ob eine Flussdichtenvergrößerung *allein* auch eine Induktionsspannung hervorbringt.

Tatsächlich: Lässt man den Rahmen, welchen wir jetzt kreisförmig wählen, gleich und *verstärkt* anstatt dessen den Magnetismus, z.B. durch Heranführen eines Stabmagneten, so misst man am Schlitz ebenfalls eine mathematisch negativ orientierte Induktionsspannung.

Der gemeinsame Nenner beider Versuche ist, dass sowohl bei der Rahmenvergrößerung, als auch bei der Magnetfeldverstärkung die Anzahl der durch die Rahmenfläche laufenden Feldlinien vergrößert wird. Die Größe B ist die Flussdichte. Sie gibt an, wie viele Feldlinien pro Quadratmeter eine Fläche durchfließen. Daher gibt das Produkt $A \cdot B$ an, wie viele Magnetfeldlinien insgesamt die Fläche A durchfließen. Diese vom Rahmen umfasste „Magnetismusmenge“ nennt man „magnetischen Fluss“ Φ (groß Phi). Es gilt $\Phi = A \cdot B$

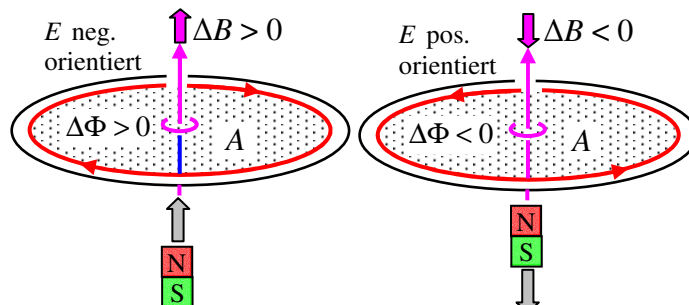


Abb 7) Heranführen / Entfernen des Stabmagneten vergrößert / verkleinert die Anzahl der erfassten Feldlinien. Bei positivem $\Delta\Phi$ ist E_{ind} negativ orientiert. Bei negativem $\Delta\Phi$ ist E_{ind} positiv orientiert.

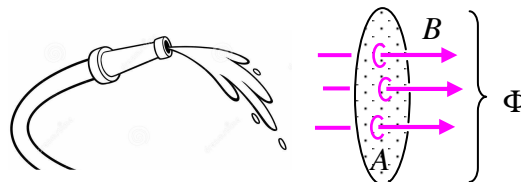


Abb.8

Der magnetische Fluss nimmt also zu wenn ...

- 1) sich die Rahmenfläche A bei konstanter Flussdichte B vergrößert und
- 2) sich die Flussdichte B bei konstanter Fläche A vergrößert.

Beim Wasserschlauch ist das ähnlich:

Die Durchflussmenge hängt 1) vom Schlauchquerschnitt und 2) von der Fließgeschwindigkeit ab.

Die Maßeinheit der Flussdichte B ist $\underline{T esla} = \frac{V \cdot s}{m^2}$. Multipliziert man dies mit der Maßeinheit

m^2 von A , so erhält man die Maßeinheit des magnetischen Flusses $\frac{V \cdot s}{m^2} \cdot m^2 = \underline{V \cdot s}$.

Die beiden Experimente zeigen: Egal, auf welche Art sich der von einem Rahmen umfasste Fluss $\Phi = A \cdot B$ ändert, in jedem Fall ergibt sich für die Induktionsspannung $U_{ind} = -\Delta\Phi / \Delta t$.

Im Grenzübergang $\Delta t \rightarrow 0$ wird aus dem Differenzenquotienten $\Delta\Phi / \Delta t$ der Differentialquotient $d\Phi / dt$, was dasselbe ist wie die erste Ableitung $\dot{\Phi}$ des Flusses Φ nach der Zeit.

Damit lautet unsere Formel $U_{ind} = -\dot{\Phi}$. Auch stimmt die Maßeinheit, weil $V \cdot s / s = \underline{Volt}$ ergibt.

Versuch: Bei Flussänderung entsteht das elektrische Ringfeld sogar im *Vakuum* ohne jeglichen Metallrahmen: Ist die Flussänderung groß genug, so ist das induzierte elektrische Ringfeld in der Lage, die Ionen des Füllgases durch Stoßionisation zum Leuchten zu bringen.

Die Lorentzkraft in den Schenkeln des Metallrahmens, welche in Abschnitt D zur Erklärung des Ringfeldes diente, ist also nur eine Verständniskrücke. Entscheidend ist, dass sich ein veränderlicher magnetischer Fluss Φ auch ohne jedes Hilfsmittel mit einem elektrischen Ringfeld E_{ind} umgibt.

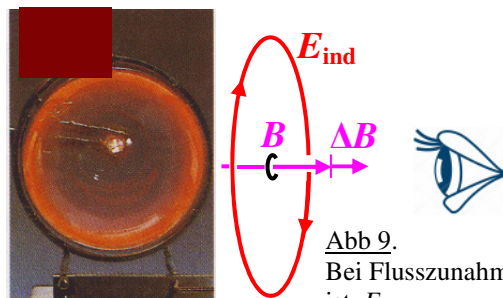


Abb 9. Bei Flusszunahme ist E_{ind} mathematisch negativ orientiert.