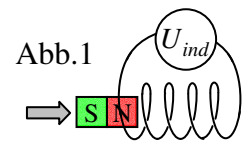


A) Spule

In Arbeitsblatt EM1 lernten wir, dass bei zeitlicher Änderung des magnetischen Flusses Φ an den Anschlüssen der aufgeschlitzten Leiterschleife die Spannung $U_{ind} = -\dot{\Phi}$ induziert wird. Dabei ist $\dot{\Phi}$ die erste Ableitung von Φ bzgl. der Zeit. Verbindet man n Leiterschleifen (als Reihenschaltung), so ergibt sich eine Spule mit n Windungen. Werden alle Windungen von demselben Fluss durchflossen, so addieren sich die induzierten Teilspannungen.

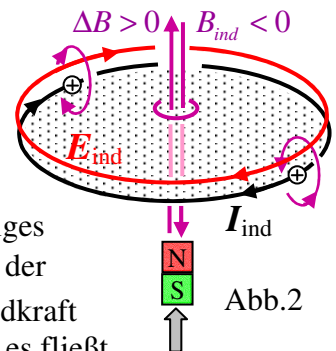


Insgesamt wird in der Spule daher die Spannung $U_{ind} = -n \cdot \dot{\Phi}$ induziert.

B) Lenz'sche Regel

1) Das Minuszeichen im Induktionsgesetz

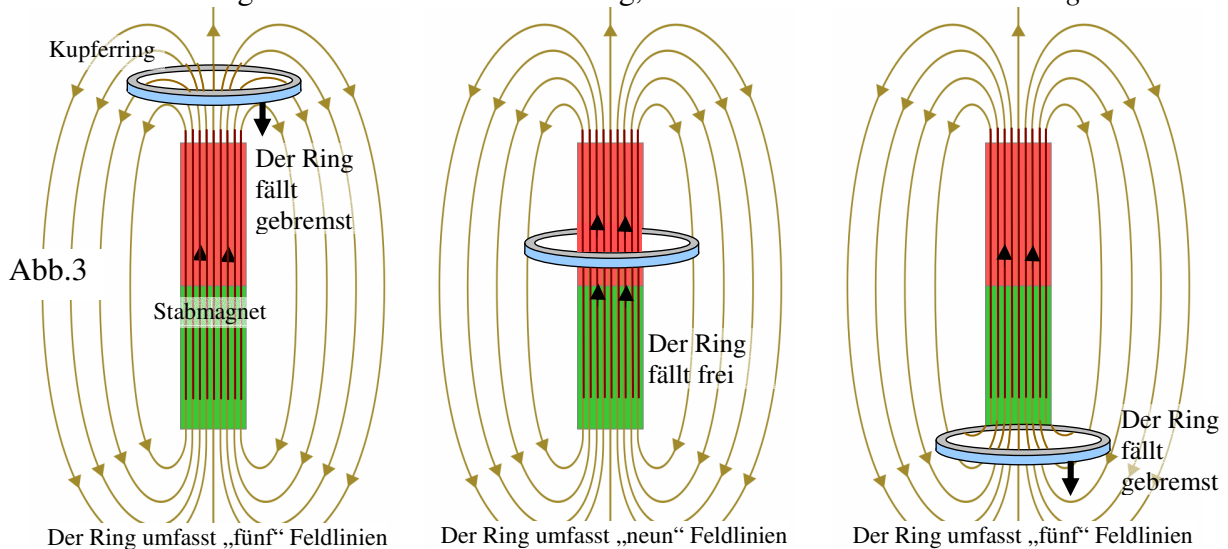
An einen Leiterring wird von unten ein Stabmagnet mit dem Nordpol nach oben heran geführt. Dadurch steigt die Anzahl der vom Ring erfassten Feldlinien. Also steigt die Flussdichte B und somit der magnetische Fluss $\Phi = A \cdot B$, also gilt $\dot{\Phi} > 0$. Im gesamten Raumbereich, also auch im Bereich des Metallringes, wird dann ein kreisförmiges elektrisches Feld E_{ind} induziert, welches wegen des *Minuszeichens* in der Induktionsformel einen mathematisch *negativen* Drehsinn hat. Die Feldkraft setzt dann die beweglichen Ladungsträger im Drahring in Bewegung, es fließt ein Strom. Die (gedanklich) positiven Ladungsträger des technischen Stromes bewegen sich dann in Richtung von E_{ind} . Sie bilden somit einen mathematisch negativ orientierten Ringstrom. Dieser Ringstrom erzeugt aber nach der Rechten-Korkenzieher-Regel seinerseits ein Magnetfeld, welches dem ursprünglichen Feld entgegen gerichtet ist und deshalb seinen **N**ordpol unten hat. Das Minuszeichen im Induktionsgesetz führt also zu *Abstoßung* und zur



Lenz'schen Regel: Der induzierte Strom wirkt seiner Ursache, der Flussänderung, entgegen.

2) Der fallender Ring

Ein Kupfering fällt über einen Stabmagneten. Anfangs umfasst er eine geringe Anzahl von magnetischen Feldlinien, in der Mitte die maximale und unten wieder eine geringe Anzahl. Die Flussänderung bewirkt einen Strom im Ring, welcher ihn zu einem *Elektromagneten* macht.



Zu Beginn der Fallzeit ist der Ring noch so weit vom Magneten entfernt, dass die Anzahl der erfassten Feldlinien nahezu null ist. Damit ist auch der anfänglich umfasste Fluss Φ nahezu null. Befindet sich der Ring auf der Mitte des

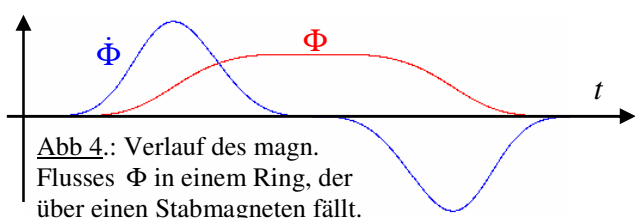


Abb 4.: Verlauf des magn. Flusses Φ in einem Ring, der über einen Stabmagneten fällt.

Stabmagneten, so ist Φ maximal. Anschließend nimmt Φ wieder ab. Der erfasste Fluss Φ ist durchgängig positiv, weil der Stabmagnet mit seinem Nordpol nach oben zeigt und die Feldlinien den Ring somit von *unten nach oben* durchdringen. Der induzierte Ringstrom I ist aber nicht proportional zu Φ , sondern zu der *negativen* zeitlichen ersten Ableitung von Φ .

Wenn Φ *zunimmt*, dann ist $\dot{\Phi}$ positiv und der Strom I *negativ* orientiert. Wenn Φ *konstant* ist, dann ist $\dot{\Phi}$ gleich *null* und die Stromstärke I ist ebenfalls gleich null. Wenn Φ *abnimmt*, dann ist $\dot{\Phi}$ *negativ*, der Ringstrom I fließt dann im math. *positiven* Sinn im Leiterring herum.

Zusammenfassung:

- 1) Anfangs läuft I *negativ* herum. Dieser Strom erzeugt in dem Kupferring ein zweites Magnetfeld, welches innerhalb des Ringes nach unten verläuft, so dass der Ring zu einem



S - Magneten wird und *unten* einen Nordpol ausbildet.

Somit wird der Ring vom Nordpol des Stabmagneten abgestoßen und der freie Fall wird abgebremst.

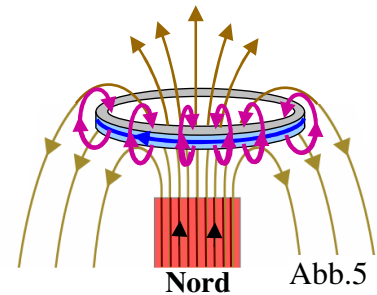


Abb.5 Nord

- 2) In der Mitte gibt es keinen bremsenden Ringstrom.

- 3) Verlässt der Ring den Stabmagneten, so macht der nunmehr *positiv* orientierte Ringstrom den Kupferring zu einem



N - Magneten, welcher jetzt *oben* seinen Nordpol ausbildet.

Dadurch wird der Ring vom Südpol des Stabmagneten angezogen. Wiederum wird der freie Fall dadurch abgebremst, diesmal nicht durch Abstoßung, sondern durch Anziehung.

Ergebnis: Das Minuszeichen im Induktionsgesetz bewirkt einen Ringstrom, der zunächst die Annäherung an den Nordpol und dann die Entfernung vom Südpol hemmt.

Beide Male wirkt der Ringstrom seiner Ursache, nämlich dem freien Fall, entgegen.

- 4) Schlitzt man den Kupferring auf, so laden sich die Schlitzenden zwar auf und es besteht auch eine Spannung zwischen ihnen, aber ein Ringstrom kann *nicht* mehr fließen. Demzufolge wird der Ring auch nicht mehr zu einem Elektromagneten und eine Abstoßung von **N** bzw. Anziehung von **S** des Stabmagneten ist nicht mehr möglich. Das Aufschlitzen bewirkt daher einen ungebremste freien Fall.

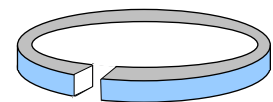


Abb.6 Aufgeschlitzter Ring

Verwendet man umgekehrt einen supraleitenden Ring, so bildet sich in diesem bei der Annäherung an den Stabmagneten von oben ein derart großer Ringstrom aus, dass dessen Magnetfeld *genauso groß* wird wie das des Stabmagneten an der Stelle. Daher ist die Abstoßung perfekt und der supraleitende Ring schwebt über dem Magneten.

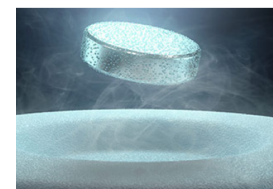


Abb.7 Supraleitender Ring

5) Das Fallrohr

Hier fällt ein Stabmagnet durch ein Kupferrohr. Wir stellen uns das Rohr aus übereinander gestapelten Kupferringen vor. Beim Fall des Stabmagneten durchqueren die *B*-Feldlinien die einzelnen (gedachten) Ringe des Rohres. In der Abb. nimmt im oberen Ring die Anzahl der Feldlinien *ab*. Also wird ein *positiv* orientierter Ringstrom induziert. Dieser erzeugt einem Elektromagneten mit **Südpol** unten. Der durchfallende Magnet wird deshalb vom oberen Ring hoch gezogen. Auf der Unterseite ist es umgekehrt: Die Anzahl der erfassten Feldlinien nimmt zu. Daher ist das Feld im Ring *negativ* orientiert und der induzierte Elektromagnet hat seinen **Südpol** oben, er stößt den fallenden Magneten ab.

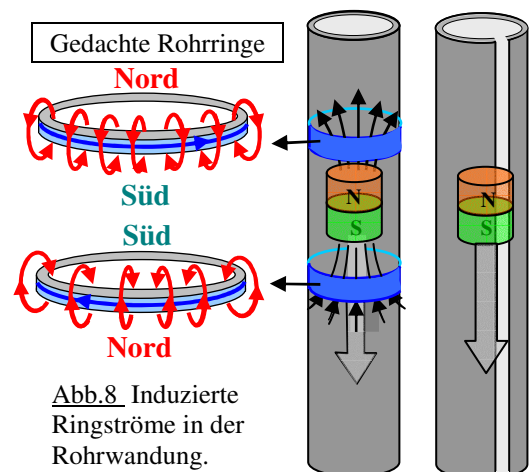


Abb.8 Induzierte Ringströme in der Rohrwandung.

Insgesamt wird der fallende Stabmagnet also auf der **gesamten** Fallstrecke abgebremst. Je besser die Leitfähigkeit des Rohrmaterials, desto stärker die Abbremsung. Besteht das Rohr aus supraleitendem Material, so bleibt der Magnet gleich oben stecken und fällt garnicht.

Umgekehrt: Ist das Fallrohr aufgeschlitzt oder besteht es aus Plastik oder einem anderen Isolator, so entstehen beim Fall zwar auch Ringfelder, die Ringströme können sich jedoch *nicht* ausbilden. Damit gibt es auch keine induzierten Elektromagnete und es gibt keine Abbremsung.

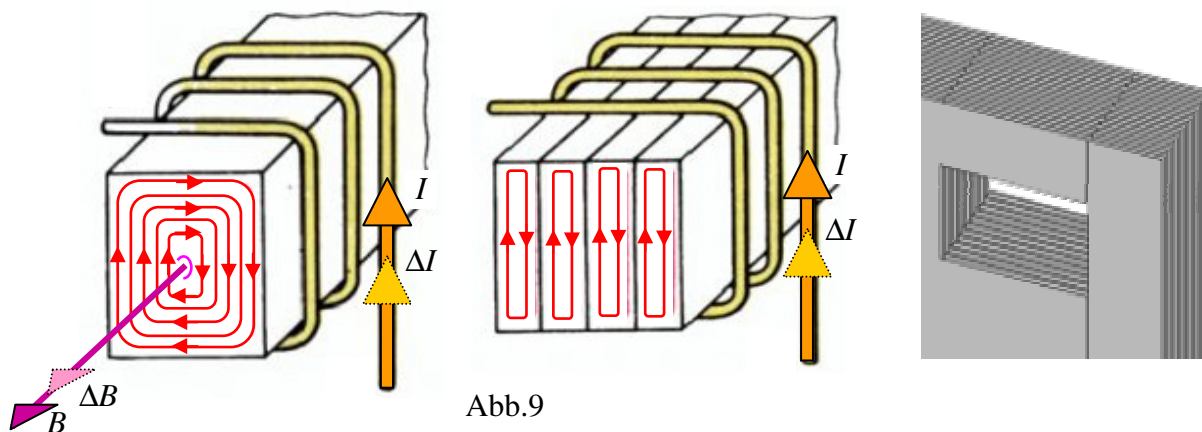
Ein Rohr aus Weicheisen, welches eine schlechte elektrische Leitfähigkeit hat, würde der Induktionseffekt gering sein. Dagegen würde die Magnetisierung des Weicheisens (Weißsche Bezirke) sogar das Gegenteil bewirken.

Merke: Der Stabmagnet nimmt bei seinem Fall sein B -Feld mit. Dadurch werden in den (gedachten) Ringen des Rohres Ströme induziert. Die *Lenzschen Regel* bestätigt die Abbremsung: Nach dieser Regel wirken die induzierten Ringströme ihrer Ursache, dem Fall, *entgegen*.

6) Transformatorblech.

Um das Magnetfeld einer Spule zu verstärken, verwendet man einen Eisenkern. Das wird beim Schrottmagneten, beim Relais usw. genutzt. Aber auch die Spulen von Transformatoren werden mit Eisenkernen gefüllt. Ein Transformator funktioniert aber nur mit *Wechselstrom*, bei Gleichstrom ist er unwirksam. Bei Wechselstrom ändert sich der Stromstärke I in der Spule aber permanent. In der Abbildung ist ein Moment mit zunehmender Stromstärke dargestellt.

Bei zunehmendem I nimmt auch die Flussdichte B zu. Dadurch entsteht ein negativ orientiertes elektrisches Ringfeld E_{ind} , welches die Ladungsträger im Eisenkern zu einem entsprechenden Wirbelstrom veranlasst. Durch den ohmschen Widerstand des Eisens erhitzt der Stromfluss den Kern, was zu Energieverlust und Zerstörung führt. Um das zu vermeiden, wird der Eisenkern aus wenigen Millimeter dicken, untereinander durch Lacksichten isolierten Blechen aufgebaut. Dadurch wird der Wirbelstrom unterdrückt, er kann nur noch sehr schmale Bahnen durchlaufen

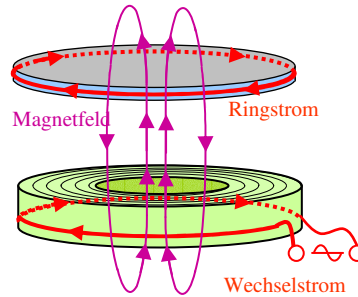


Bemerkung: Ohne das Minuszeichen im Induktionsgesetz, würde die magnetische Wirkung nicht hemmend, sondern selbstverstärkend sein. In diesem Falle könnte man ein Perpetuum mobile konstruieren. Das Minuszeichen hängt also mit der Unmöglichkeit zusammen, so etwas zu bauen.

C) Anwendung der Induktion

1) Induktionsherd

Das magn. Wechselfeld einer Spule unter der Kochplatte induziert einen wechselnden Ringstrom im Boden des Kochtopfes. Nach Lenz erzeugt dieser Strom ein Gegenfeld, welches das ursprüngliche Feld an die Bodenseite des Topfes zurückdrängt. Deshalb entsteht die Hitze nur in einer dünnen Bodenschicht. Dort wird die elektrische Energie des Ringstromes (Wirbelstromes) über das Ohmsche Gesetz in Wärmeenergie umgewandelt.

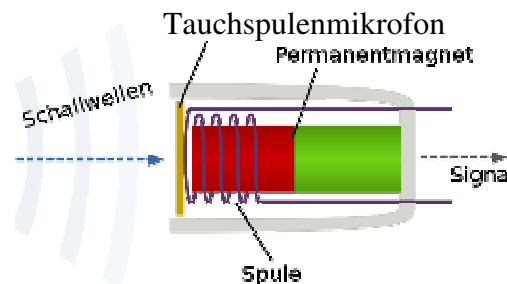


Die Spule unter der Herdplatte wird von einem Wechselstrom durchlaufen. Dadurch entsteht eine wechselnde Flussdichte B .

Nur in der untersten Topfbodenschicht heizen die Wirbelströme den Kochtopf. Die Wärme verteilt sich dann durch normale Wärmeleitung

2) Dynamisches Mikrofon

Das Tauchspulenmikrofon ist die Umkehrung des dynamischen Lautsprechers. Die Spule schwingt im Rhythmus der Membran über einen Permanentmagneten. Induktion liefert dann eine Spannung im Rhythmus der Schallschwingen.

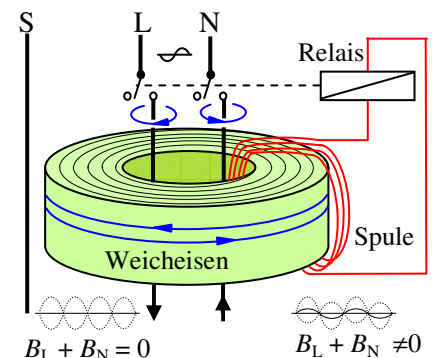


3) Elektrodynamisches Schweben

In der japanischen Magnetschwebbahn Maglev befinden sich starke, zum Boden hin gerichtete Magnete. Im Gleisbett liegt ein leitfähiges Metall ohne Stromversorgung. Der Zug will in das Gleisbett fallen. Ab einer Geschwindigkeit von 150 km/h ist die Flussänderung im Metall so groß, dass der Induktionsstrom seiner Ursache, dem Runterfallen, so stark entgegen wirkt, dass der Zug schwebt.



4) FI – Fehlstrom- Schutzschalter sind heutzutage für die Sicherheit nicht nur in Feuchträumen vorgeschrieben. Die hin- und rückstromführenden Leitungen L und N des Haushalts werden durch einen Ring aus magnetflussverstärkendem Weicheisen geführt, sie erzeugen dort zwei sich überlagernde magnetische Flussdichten. Im Normalfall heben sich die beiden B -Werte auf. Fließt jedoch, durch einen Defekt, ein Teil des Stromes z.B. von L über Mensch und Schutzleiter S zurück, so bleibt ein veränderlicher B -Rest übrig, welcher in der Spule einen Strom induziert, der über ein Relais blitzschnell die Leiter unterbricht.



5) Wirbelstrombremse

Eisenbahnen, Busse und viele große Anlagen werden (fast) verschleißfrei durch Wirbelstromanlagen gebremst. Das Prinzip: In schlecht leitendem Metall mit großem Widerstand werden bei Bewegung im Magnetfeld Ringströme (Wirbelströme) induziert, welche die Bewegungsenergie nach dem Ohmschen Gesetz in Wärme verwandeln.

