

Übungen zur Elektrizitätslehre – Lösungen Serie 11

1. Ein Ring taucht ins Magnetfeld – Induktion auch bei der Wirbelstrombremse

- (a) **Nur während dem Eintauchen des Rings ins Magnetfeld und wenn er wieder aus diesem austritt**, wird Strom induziert, denn:

Lorentzkraft: Eintauchen: Die Leitungselektronen auf der rechten Seite des Rings tauchen zuerst ins Magnetfeld ein. Sie erfahren eine Lorentzkraft nach oben (3FR der linken Hand). D.h., solange der Ring am Eintauchen ist und die Elektronen auf der linken Seite des Rings keine solche Lorentzkraft erfahren, fließt ein Strom im Ring. Der Elektronenstrom verläuft von uns aus gesehen im Gegenuhrzeiger-, der technische Strom demzufolge im Uhrzeigersinn.

Beim Austritt des Rings aus dem Magnetfeld erfahren nur noch die Leitungselektronen links im Ring eine Lorentzkraft nach oben und es entsteht ein Elektronenstrom im Uhrzeiger- resp. ein technischer Strom im Uhrzeigersinn.

Lenz'sche Regel: Der Induktionsstrom muss eine Lorentzkraft erfahren, die der ursprünglichen Bewegung entgegen wirkt. Somit muss der Induktionsstrom innerhalb des Magnetfeldes nach unten fließen (3FR mit rechter Hand: Mittelfinger (F_L) nach links, Zeigefinger (B) nach vorne $\Rightarrow$ Daumen (I_{ind}) nach unten).

Beim Eintreten des Rings ins Magnetfeld entsteht demnach ein induzierter Kreisstrom im Uhrzeigersinn; beim Austreten fließt dieser Strom im Gegenuhrzeigersinn.

- (b) Bei der Erklärung mit der Lenz'schen Regel ist die Antwort auf diese Frage bereits gegeben: Der Induktionsstrom muss der ursprünglichen Bewegung entgegenwirken, damit das Energieerhaltungsprinzip nicht verletzt wird!

Kennen wir aufgrund der Erklärung mit den Lorentzkräften auf die Leitungselektronen erst die Richtung des Induktionsstromes, so können wir damit nun aber auch sofort die Richtung der Lorentzkraft ermitteln, die dieser Induktionsstrom im Magnetfeld erfährt. Sie zeigt nach links und bremst damit die Bewegung des Rings.

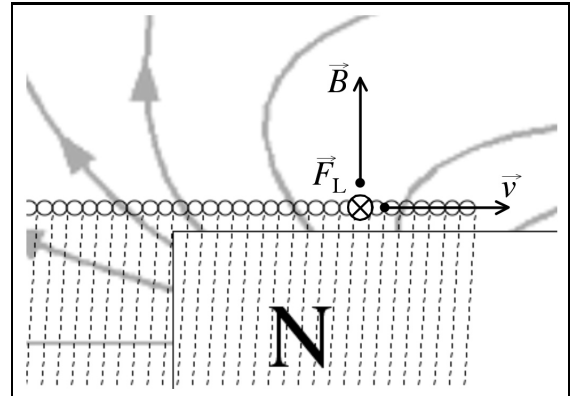
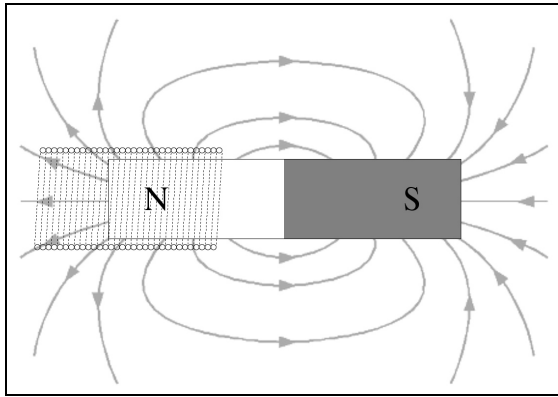
Nochmals zur Energieerhaltung: Das Bremsen muss stattfinden! Ansonsten würde der Ring beim Eintauchen ins Magnetfeld immer schneller. Dies würde wiederum die Lorentzkräfte auf die Leitungselektronen vergrößern, was erneut den Induktionsstrom im Ring verstärken würde, usw. Der Ring würde sich auf diese Weise quasi gratis selber beschleunigen und der Strom in ihm würde auch gratis zunehmen. Das würde dem Energieerhaltungsprinzip widersprechen!

2. Das dynamische Mikrophon

Kommen Schallwellen beim Mikrophon an, so wird die Membran zu Schwingungen angeregt. Da diese Membran mit einer Spule verbunden ist, wird dadurch die Spule hin- und herbewegt (links-rechts-Bewegung in den Skizzen unten).

Innerhalb der Spule befindet sich ein Permanentmagnet. Die Schwingbewegung findet also in dessen Magnetfeld statt. Die Spule besteht, wie alle Materialien, aus Protonen, Neutronen und Elektronen. Die geladenen Teilchen (p , e^-) erfahren durch die Bewegung im Magnetfeld Lorentzkräfte. Mit Ausnahme der Leitungselektronen sind sie aber an ihre Plätze im Material gebunden.

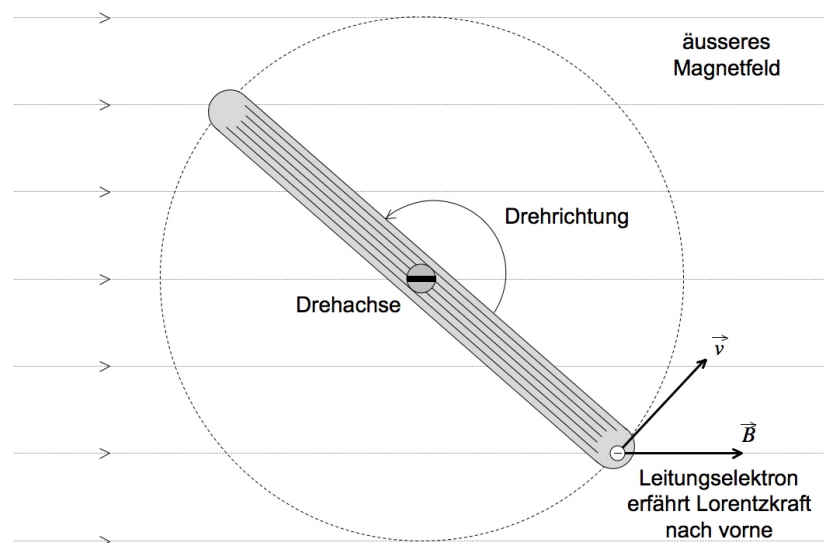
Auf dem rechten Bild betrachten wir die Situation für ein Leitungselektron in der Spule. Die Spule bewege sich aktuell nach rechts (v). Da das Magnetfeld B nach oben zeigt, erfährt das Elektron eine Lorentzkraft F_L nach hinten ins Blatt hinein. Das ist aber gerade die Richtung des Spulendrahtes an dieser Stelle. Somit wird es sich im Draht zu verschieben beginnen. An den Anschlüssen der Spule bilden sich dadurch elektrische Pole aus. Zwischen ihnen besteht eine elektrische Spannung.



Diese Spannung ist besonders gross, wenn die Lorentzkraft gross ist. Da das Magnetfeld des Permanentmagneten sich nicht verändert, hängt der Spannungswert in einem bestimmten Moment nur von der Geschwindigkeit der Spule in eben diesem Moment ab. Bewegt sie sich rasch, so ist die Spannung zwischen den Spulenanschlüssen gross. Bewegt sie sich nicht, z.B. in den Umkehrmomenten der Bewegung, so ist sie gleich Null. Tatsächlich ist diese Spannung in guter Näherung proportional zur aktuellen Geschwindigkeit v , weil die Lorentzkraft auf einzelne Teilchen ja ebenfalls proportional zu v ist.

3. Der Drehspulgenerator

(a) Erklärung der aktuellen Polung mit der Lorentzkraft auf Leitungselektronen



- i. Die Spule wird von uns aus gesehen im Gegenuhrzeigersinn gedreht. Die untere Spulenseite bewegt sich im gezeigten Moment demzufolge schräg nach rechts oben. Und mit ihr bewegen sich auch alle Teilchen, aus denen sie besteht, nach rechts oben, also auch die Leitungselektronen.
- ii. Die 3FR muss mit der linken Hand angewendet werden (e^- sind negativ geladen).
3FR: Daumen ($\hat{=}$ v) schräg nach rechts oben, Zeigefinger (B) nach rechts
 $\Rightarrow$ Mittelfinger ($\hat{=}$ Lorentzkraft) zeigt aus dem Blatt heraus nach vorne. Die e^- in der unteren Spulenseite werden also nach vorne gedrückt.
- iii. Schaut man die Wicklung der Spule genau an, so wird klar, dass die e^- gegen das Spulenende Y gedrückt werden. Dort entsteht ein e^- -Überschuss resp. ein negativer Pol. Umgekehrt besteht bei X in diesem Moment ein e^- -Mangel, also ein positiver Pol. Zwischen zwei ungleichnamigen elektrischen Polen herrscht eben eine elektrische Spannung.

(b) **Bestimmung der Richtung des Induktionsstromes mit der Lenz'schen Regel**

Die Lenz'sche Regel besagt, dass der induzierte Strom im B -Feld erneut Lorentzkräfte erfährt und dass diese "zweiten" Lorentzkräfte der ursprünglichen Drehbewegung entgegen wirken. Werfen wir wieder einen Blick auf die untere Seite der Drehspule, so muss der Induktionsstrom dort folglich eine Lorentzkraft nach unten – gegen die Drehbewegung und wegen der 3FR ganz bestimmt senkrecht zum Magnetfeld – erfahren. In welche Richtung hat der Strom an dieser Stelle demzufolge zu fließen? $\Rightarrow$ 3FR mit rechter Hand:

- i. Zeigefinger nach rechts (B -Feld)
- ii. Mittelfinger nach unten (F_L)
- iii. $\Rightarrow$ Daumen nach hinten ins Blatt hinein zeigt die Richtung von I_{ind} an.

Der Induktionsstrom muss in der unteren Spulenseite in diesem Moment also nach hinten fließen. Die Leitungselektronen bewegen sich nach vorne. Dies bestätigt das unter (a) mit den Lorentzkräften auf die Leitungselektronen gefundene Resultat.

Wichtige Anmerkung: Ausserhalb der Drehspule fliesst der Induktionsstrom I_{ind} von X nach Y, also vom positiven zum negativen Pol der Spannungsquelle, so wie wir uns das seit jeher gewohnt sind. Innerhalb der Spule hingegen fliesst der Induktionsstrom von Y nach X, also eben vom negativen zum positiven Pol. Das ist ganz normal, denn wir betrachten hier das "Innenleben" einer Spannungsquelle!

- (c) Betrachten wir die weitere Bewegung der momentan unteren Spulenseite: Solange sich diese Seite aufwärts bewegt, d.h., solange sie sich rechts von der Drehachse befindet, werden die Leitungselektronen in ihr nach vorne gedrückt. Sobald sie aber den obersten Punkt ihrer Kreisbewegung überschritten hat, befindet sie sich links von der Drehachse und bewegt sich nach unten. Dann zeigt die Lorentzkraft auf die Leitungselektronen nach hinten. Das bedeutet aber, dass alle Leitungselektronen in einem Moment zum einen und im nächsten Moment zum andern Spulenende hin gedrückt werden. Und deshalb wechselt die Polung der Spulenenden. Auf diese Weise entsteht als Folge der Drehbewegung eine Wechselspannung.
- (d) Die Lorentzkraft verschwindet, wenn die Bewegungsrichtung der Teilchen parallel oder antiparallel zur B -Feldrichtung verläuft ($\varphi = 0^\circ$ resp. $\varphi = 180^\circ \Rightarrow \sin \varphi = 0 \Rightarrow F_L = 0$). Dies ist immer dann der Fall, wenn die Spule senkrecht steht.
- (e) Wird die Spule schneller gedreht, so wird damit auch die Geschwindigkeit v der Leitungselektronen grösser. Laut $F_L = e \cdot v \cdot B \cdot \sin \varphi$ ist die Lorentzkraft proportional zu dieser Geschwindigkeit. D.h., die Elektronen werden stärker zum einen Spulenende gedrückt. Damit wird die Polung und somit auch die Spannung zwischen den Spulenenden stärker.

4. *Der hängende Ring – Lorentzkräfte & Lenz'sche Regel im Einklang*

(a) i. **Begründung mit der Lorentzkraft auf Leitungselektronen**

Für diese Begründung wechseln wir ins Bezugssystem des Magneten: Der Stabmagnet ruht und der Ring bewegt sich von links auf ihn zu.

Die Leitungselektronen im Ring bewegen sich als Bestandteil des Rings nach rechts ($\Rightarrow$ Daumen bei der 3FR mit linker Hand).

Betrachten wir ein Leitungselektron im oberen Teil des Rings: Dort zeigt das sich aufweitende Magnetfeld nach links oben (siehe rechte Skizze auf dem Aufgabenblatt), was die Richtung des Zeigefingers in der 3FR vorgibt.

Die Lorentzkraft auf das Leitungselektron (Mittelfinger) oben im Ring zeigt somit nach hinten (ins Blatt hinein). Analog erfährt ein Leitungselektron unten im Ring eine Lorentzkraft nach vorne (aus dem Blatt hinaus).

Im Ring ergibt sich somit vom Magneten aus gesehen ein Elektronenstrom im Uhrzeigersinn resp. ein technischer Strom **im Gegenuhrzeigersinn**.

ii. **Begründung mit der Lenz'schen Regel**

Die Lenz'sche Regel besagt, dass das Magnetfeld des Induktionsstromes dessen Ursache entgegenwirkt. D.h., das Magnetfeld des im Ring induzierten Stromes versucht, die Bewegung des Magneten abzubremesen. Dazu muss der Induktionsstrom im Ring so gerichtet sein, dass sein Magnetfeld den Permanentmagneten abstösst. Der Ring muss also auf der rechten Seite einen Nordpol entwickeln.

Gemäss der RHR ist dies genau dann der Fall, wenn der Strom in ihm von rechts aus gesehen **im Gegenuhrzeigersinn** fliesst.

- (b) Gemäss der RHR erzeugt der im Ring induzierte Strom selber ein Magnetfeld, das rechts aus dem Ringinnern austritt. Somit besitzt der Ring auf der rechten Seite, die ja dem Permanentmagneten zugewandt ist, einen Nordpol. Daraus ergibt sich die Abstossung, denn der fixe Nordpol des Stabmagneten und temporäre Nordpol des Ringes sind gegeneinander gerichtet.
- (c) Beim Wegziehen des Magneten vom Ring versucht der Ring dem Magneten nachzufolgen, d.h., es herrscht in diesem Moment eine Anziehung zwischen Ring und Magnet. Diese lässt sich gut begründen:

i. **Begründung mit der Lorentzkraft auf Leitungselektronen**

Nach dem Wechsel des Bezugssystems (Magnet ruht) bewegt sich der Ring samt Leitungselektronen nach links, sodass sich die Lorentzkräfte im Vergleich zur ersten Situation gerade umkehren und der Kreisstrom andersrum fliesst, nämlich von rechts gesehen **im Uhrzeigersinn**. Entsprechend ist die aus dem Induktionsstrom folgende Magnetpolung gerade umgekehrt und er hat auf der rechten Seite einen Südpol, aufgrund dessen er vom Stabmagneten angezogen wird.

ii. **Begründung mit der Lenz'schen Regel**

Der Induktionsstrom im Ring versucht seiner Ursache, also der Bewegung des Magneten entgegenzuwirken. Folglich muss der Ring auf seiner rechten Seite einen Südpol aufweisen, damit der Magnet angezogen wird, was einem "Bremsversuch" entspricht. Die RHR verrät, dass dafür der Induktionsstrom im Ring von rechts gesehen **im Uhrzeigersinn** fliessen muss.

5. *Eine wachsende Schlaufe*

- (a) Bei der Vergrößerung der Schlaufe werden Metalldrähte in einem Magnetfeld bewegt. D.h., man bewegt Leitungselektronen durch ein B -Feld. Daraus resultieren Lorentzkräfte, welche die Leitungselektronen längs des Schlaufendrahtes in diesem herumzudrücken versuchen.

Wegen des Voltmeters, das ja auch einen Unterbruch im Ring darstellt, entsteht allerdings kein Induktionsstrom, sondern lediglich eine Polung resp. eine messbare Induktionsspannung über dem Voltmeter.

- (b) Der Induktionsstrom würde von uns aus gesehen **im Uhrzeigersinn** fliessen. Begründungen:

Lorentzkraft auf Leitungselektronen: Betrachten wir ein Leitungselektron auf der rechten Schlaufenseite. Beim Vergrössern der Schlaufe wird es nach rechts bewegt. Im zu uns zeigenden Magnetfeld erfährt es eine Lorentzkraft nach oben. D.h., es wird im Gegenuhrzeigersinn durch die Schlaufe geschoben.

Die Stromrichtung ist aber gerade entgegengesetzt zu dieser Elektronenflussrichtung und somit fliesst der Strom von uns aus gesehen eben **im Uhrzeigersinn**.

Lenz'sche Regel: Die Lorentzkraft, die der induzierte Strom erfährt, muss der Ausdehnung des Rings entgegengerichtet sein. Auf der rechten Seite des Rings muss sie also nach links zeigen. Das geht gemäss 3FR mit der rechten Hand nur dann, wenn der Induktionsstrom im nach vorne kommenden Magnetfeld nach unten fliesst. Es muss sich also ein Induktionsstrom **im Uhrzeigersinn** ergeben.

- (c) Wer unter (b) mit der Lenz'schen Regel gearbeitet hat, kennt die Antwort bereits. Man musste ja genau davon ausgehen, dass die auf den Induktionsstrom wirkende Lorentzkraft der ursprünglichen Bewegung, also der Ausdehnung des Rings, entgegen wirkt.

Wenn wir die Richtung des Induktionsstromes aufgrund von Lorentzkraften auf Leitungselektronen herausgefunden haben, so können wir damit aber auch sofort die Richtung der Lorentzkraft ermitteln, die dieser Strom im Magnetfeld erfährt: Mit der 3FR erhalten wir dafür eine Krafrichtung zur Schlaufenmitte! D.h., die entstehende Kraft arbeitet der Vergrößerung der Schlaufe entgegen, was einmal mehr dem **Energieerhaltungsprinzip** entspricht!

6. Das Waltenhofen'sche Pendel – die klassische Wirbelstrombremse

In der linken Plättchenhälfte entsteht von uns aus gesehen ein Elektronenstrom im Gegenuhrzeigersinn resp. ein technischer Strom im Uhrzeigersinn. Die Erklärungen hierfür entsprechen 1:1 denjenigen zum Wirbelstrom im Ring aus Aufgabe 1.

In der rechten Plättchenhälfte fliesst ebenfalls ein Kreisstrom, aber gerade im anderen Umlaufsinn. Beide Ströme wechselwirken so mit dem Magnetfeld, dass sowohl die linke, wie auch die rechte Plättchenhälfte abgebremst werden.

Erklärung der Bremswirkung aufgrund der Magnetpole der Wirbelströme: Das auf uns zu führende Magnetfeld kann man sich hilfsweise als das Resultat zweier (äusserer) Magnetpole vorstellen: Dann wäre bei uns ein Südpol und hinter dem Blatt ein Nordpol. Die Polung des Plättchens aufgrund der Wirbelströme ist links so, dass das Plättchen auf unserer Seite einen Süd- und auf der Rückseite einen Nordpol aufweist (RHR). Demnach stösst sich die linke Plättchenseite von den äusseren Magnetpolen ab, was die Bremswirkung erklärt. Bei der rechten Plättchenseite sind die erzeugten Magnetpole gerade andersrum, sodass eine Anziehung zu den äusseren Magnetpolen entsteht, was wiederum einer Bremswirkung entspricht, denn die rechte Seite ist an den äusseren Polen ja bereits vorbeigelaufen.

Erklärung der Bremswirkung aufgrund der Lorentzkräfte auf die Wirbelströme: Innerhalb des äusseren Magnetfeldes fließen die induzierten (technischen) Wirbelströme nach unten. Im äusseren Magnetfeld erfahren diese Ströme eine bremsende Kraft nach links.

7. Ein Kraftwerksdynamo

- (a) Um die Richtung des Induktionsstromes mit der Lorentzkraft auf Leitungselektronen zu erklären, ist ein Wechsel des Bezugssystems nötig!

Wie sieht die Situation aus Sicht des ruhenden Rotors aus? In dieser Perspektive rotieren die Spulen um den Magneten, und zwar von links aus gesehen im Gegenuhrzeigersinn! Von uns aus gesehen bewegt sich die Spule A im gezeigten Moment nach oben (Daumen bei der 3FR). Jetzt können wir Lorentzkräfte auf Leitungselektronen in der Spule betrachten. Das Magnetfeld führt von aussen nach innen auf den Südpol des Rotors zu (Zeigefinger). Gemäss 3FR mit der linken Hand entstehen so auf sämtliche Leitungselektronen Lorentzkräfte nach rechts. In der linken und der rechten Spulenseite haben diese Lorentzkräfte keinen Effekt, weil sie nicht in Richtung der Drahtwindungen der Spule wirken. In der oberen und der unteren Seite hingegen können diese Kräfte zu Strömen führen. Allerdings arbeiten diese Lorentzkräfte gegeneinander, wenn es um die Stromrichtung in Spule A geht. Welche Krafrichtung gewinnt? Bei der unteren Spulenseite ist das Magnetfeld stärker als bei der oberen, denn erstens befindet sich die untere Spulenseite praktisch direkt beim Südpol des Rotors. Zweitens verläuft das Magnetfeld bei der oberen Spulenseite schon fast ganz in Aufwärtsrichtung und somit parallel zur Bewegungsrichtung der Spule. D.h., der Winkel φ zwischen Bewegungsrichtung und Magnetfeldrichtung geht schon gegen 0° – der Winkel, bei dem die Lorentzkraft verschwindet. Beide Effekte sorgen somit dafür, dass die Lorentzkräfte auf die Leitungselektronen in der unteren Spulenseite dominieren. Es ergibt sich demnach von uns aus gesehen ein Elektronenstrom im Gegenuhrzeigersinn resp. ein technischer Strom **im Uhrzeigersinn**.

- (b) Unter (a) haben wir gesagt, dass sowohl in der oberen, wie auch in der unteren Seite der Spule A die Leitungselektronen Lorentzkräfte nach rechts erfahren (Rotor in Ruhe, Spule bewegt sich im gezeigten Moment aufwärts). Die Stromrichtung ergab sich aus der Tatsache, dass die Lorentzkräfte in der unteren Spulenseite dominieren, weil dort das Magnetfeld einerseits stärker und andererseits für die Erzeugung der Lorentzkraft besser ausgerichtet ist.

Nun kann man argumentieren, dass das Magnetfeld bei der unteren Spulenseite beim Wegfahren vom Südpol des Rotors schwächer wird. Diese Verschlechterung ist aber offenbar weniger entscheidend wie die Verschlechterung der Situation in der oberen Spulenseite. Dort geht es darum, dass die Magnetfeldrichtung immer mehr mit der Bewegungsrichtung übereinstimmt. Obwohl also in beiden Spulenseiten die Lorentzkräfte nach rechts schwächer werden, wird der Strom im Moment stärker, weil die Abnahme der den Strom bremsenden Lorentzkräfte in der oberen Spulenseite grösser ist als die Abnahme der den Strom antreibenden Lorentzkräfte in der unteren Spulenseite.

Hier sehen Sie ein Beispiel für eine Fragestellung, bei dem die Lorentzkräfte auf Leitungselektronen nur bedingt resp. mit sehr viel Erfahrung zu einer befriedigenden Begründung führen. Andere elektromagnetische Prinzipien werden hier eine bessere Aussage machen können.

8. Der rutschende Magnet

- (a) **Lösung:** Das Leitungselektron **bei A** wird in der Skizze rechts **ins Blatt hinein** und dasjenige **bei B** **aus dem Blatt hinaus** gedrückt.

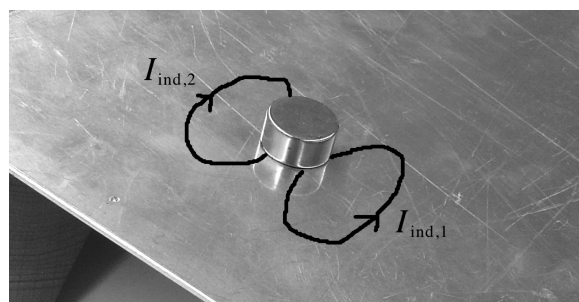
Begründung: Nach dem **Wechsel ins Ruhesystem des Magneten** bewegt sich neu die Platte und somit auch die darin enthaltenen Leitungselektronen nach links oben $\Rightarrow$ Daumen in der 3FR.

Das **Magnetfeld** zeigt **bei A nach links unten** $\Rightarrow$ Zeigefinger bei der 3FR.

Gemäss der **3FR mit der linken Hand** erfährt das Leitungselektron **bei A eine Lorentzkraft nach hinten ins Blatt hinein**. Gleichermassen zeigt man, dass das Leitungselektron eine Lorentzkraft aus dem Blatt heraus erfährt.

- (b) Der Ausdruck **Induktionsstrom** ist als technischer Strom aufzufassen. Dieser fliesst entgegengesetzt zur Bewegungsrichtung der Elektronen.

Im Bild ergibt sich folgender Wirbelstrom ($I_{\text{ind},1}$):



- (c) Gemäss der Lenz'schen Regel muss ein Induktionsstrom seiner Ursache – in diesem Fall der Bewegung des Magneten – entgegen wirken. Es geht also um eine Bremswirkung.

Diese Bremswirkung lässt sich z.B. durch eine Magnetpolung erklären, welche die Platte durch den in ihr fliessenden Induktionsstrom erhält. Zeigt der Nordpol des Magneten gegen die Platte, so muss die Platte hinter dem Magneten **an der Oberseite einen Südpol** aufweisen, damit dies einen Bremseffekt ergeben kann.

Gemäss der RHR (Oersted'sche Regel) muss der Induktionsstrom dafür **von oben gesehen im Uhrzeigersinn** fließen. Er lässt sich gut ins Bild eintragen.

9. Die Wirbelstrombremse im Rohr

- (a) Damit eine elektrische Ladung eine Lorentzkraft erfährt, muss sie sich durch ein Magnetfeld bewegen. Im Bezugssystem des ruhenden Rohres bewegen sich die Leitungselektronen allerdings gar nicht. D.h., die Entstehung der Wirbelströme lässt sich in diesem Bezugssystem sicher nicht durch Lorentzkräfte erklären.

Von oben her gesehen fliesst der Wirbelstrom im Rohrabschnitt A im Gegenuhrzeigersinn und derjenige im Rohrabschnitt B im Uhrzeigersinn, denn:

- i. Das Magnetfeld soll ruhen. Das Kupferrohr bewegt sich darin aufwärts – mitsamt aller **Leitungselektronen** in ihm. Die betrachteten Leitungselektronen bewegen sich also aufwärts (Daumenrichtung bei Anwendung der 3-Finger-Regel).
- ii. Ich betrachte exemplarisch das Leitungselektron im Rohrabschnitt A auf der rechten Rohreite. Das **Magnetfeld** dort zeigt **nach rechts oben** (Zeigefinger in der 3FR).
- iii. Gemäss der **3-Finger-Regel** mit der **linken Hand** erfährt dieses Leitungselektron eine **Lorentzkraft F_L in unsere Richtung**, also aus dem Blatt.
- iv. Somit fliesst in Rohrabschnitt A von oben her gesehen ein **Elektronenstrom im Uhrzeigersinn** und ein technischer Strom im Gegenuhrzeigersinn.
- v. In Rohrabschnitt B ergibt sich auf ein Leitungselektron in der rechten Rohrseite eine Lorentzkraft nach hinten (ins Blatt hinein), weil dort das Magnetfeld nach links oben zeigt.
Dem entsprechend fliesst in Rohrabschnitt B von oben her gesehen ein **Elektronenstrom im Gegenuhrzeigersinn** und ein technischer Strom im Uhrzeigersinn.

- (b) Gemäss der Rechten-Hand-Regel erzeugen die Wirbelströme selber wieder Magnetfelder.

Der Wirbelstrom in Rohrabschnitt A fliesst von oben her gesehen im Gegenuhrzeigersinn. Damit erzeugt er ein Magnetfeld, dessen Feldlinien im Rohrinernen nach oben führen.

D.h., der Strom im Rohrabschnitt A erzeugt oben an diesem Abschnitt einen Nordpol und unten einen Südpol. Dieser Südpol wirkt anziehend und somit bremsend auf die Magnetkugel. Ganz analog kann man den unteren Wirbelstrom betrachten, wo oben am Rohrabschnitt B ein Südpol entsteht, der sich vom Südpol der Kugel abstösst und somit ebenfalls bremsend wirkt.

- (c) Betrachten wir die Situation nun wieder im Ruhesystem des Rohres. Darin bewegt sich die Magnetkugel nach unten.

Der im Rohrabschnitt B induzierte Wirbelstrom muss so fliessen, dass er seiner Ursache, nämlich der Bewegung der Magnetkugel, entgegenwirkt. D.h., Rohrabschnitt B muss an seiner Oberseite einen Südpol aufweisen, der den Südpol der Kugel abstösst und die Kugel somit bremst.

Für diese Polung muss der Kreisstrom im Rohrabschnitt B gemäss der RHR von oben her gesehen **im Uhrzeigersinn** fliessen. Das stimmt mit unserem Resultat aus (a) überein.

Ganz analog kann man sich überlegen, dass der Kreisstrom im Rohrabschnitt ab dazu führen muss das der Pol an der Unterseite dieses Rohrabschnittes die Kugel anziehen muss, um sie zu bremsen. Rohrabschnitt A muss somit an seiner Unterseite einen Südpol aufweisen, was nur dann der Fall ist, wenn dort der Induktionsstrom von oben her gesehen **im Gegenuhrzeigersinn** fliesst.