

## Verschiedene praktische Induktionsversuche führen zum besseren Verständnis der elektromagnetischen Induktion:

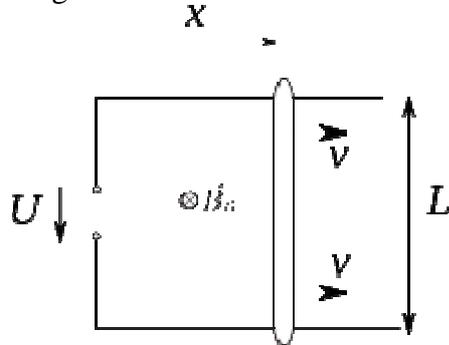
### Inhalt:

- Seite 01-03. Bewegter Leiter im Magnetfeld. Grafiken aus dem Wikipedia und eigene Grafiken.
- Seite 04-05 Abgeschirmter, bewegter Leiter im Magnetfeld, Diskussion im Wikipedia darüber.
- Seite 06-07 Weitere Versuchsanordnungen zum Thema abgeschirmter, bewegter Leiter im Magnetfeld.
- Seite 07-08 Fragen, Zweifel und Antworten.
- Seite 09 Induktionsmodell mit Ringkerntrafo und Schleifenrückschluss über Kugelschale.
- Seite 11 Windungsspannungsmessungen an Ringkerntrafo.
- Seite 12 Wo entsteht die Induktionsspannung an der Leiterschleife?
- Seite 13 Heringsches Paradoxon-bewegter Leiter im Magnetfeld, Erklärung und Beweise ohne Formeln.
- Seite 14-20 Fragen zu Leiterschleifen welche durch den Eisenkern hindurchgehend, und Antworten dazu.
- Seite 21 22 Antworten darauf wie Induktion entsteht.
- Seite 23 Windungsspannungsmessung. Beweis dafür wo Induktion entsteht.
- Seite 24 -25 Fragen und Beweise, wo die Induktion entsteht.
- Seite 26 Grafiken: Wo entsteht die Induktionsspannung.
- Seite 27-30 Wiederholungen zur Induktion an einer Leiterschleife. Formeln.
- Seite 30-33 Versuche zur Induktion in einer Spule mit einem bewegten Eisen-Kern und einem Dauermagneten mit und ohne Luftspalt.
- Seite 34 Quellen.

**\*1 Im Grunde geht es dem Autor um das Primat der Ergebnisse eines Versuches gegenüber einer Theorie die nur mit Formeln belegt wird.**

Der Autor hinterfragt und zeigt mit praktischen Beispielen, ob die Induktionsspannung durch eine Magnetfluss Änderung direkt um einen Leiter, (Lorenzkraft) oder durch die Magnetfluss Änderung innerhalb einer aufgespannten Schleifen Fläche des Leiters entsteht.

**Bild1:Aus dem Artikel im Wikipedia:** 3.1 Beispiel: Bewegter Leiterstab im unveränderlichen Magnetfluss mit der Flussdichte  $B_0$ .



 Bewegt sich der Leiterstab, so zeigt ein Messgerät an den Klemmen links die folgende Spannung an:  $U = vLB_0$ .

Der im obenstehenden Bild skizzierte Messaufbau besteht aus einer ruhenden elektrisch leitfähigen Schienenanordnung, über die mit der Geschwindigkeit  $v$  ein Leiterstab gleitet. Sie befindet sich in einem magnetischen Feld mit der Flussdichte  $\vec{B}_0$ , das durch einen ruhenden [Permanente Magneten](#) oder eine ruhende mit [Gleichstrom](#) betriebene Spulenanordnung hervorgerufen wird. Die Spannung zwischen den beiden Schienen wird mit einem [Voltmeter](#) gemessen.

Die Spannung  $U$  hängt von der Stärke der magnetischen Flussdichte  $B$ , der Geschwindigkeit  $v$  und dem Schienenabstand  $L$  ab:

$$U = vLB_0$$

Dieses soll im Folgenden mit dem Induktionsgesetz für die Leiterschleife erklärt werden:<sup>[12]</sup>

- Zunächst wird geprüft, ob die Richtungen, in der das B-Feld als positiv angegeben wird, und der Spannungspfeil im Sinne einer Linke-Hand-Regel angeordnet sind. Der im Bild dargestellte Pfeil (x) deutet an, dass  $\vec{B}_0$  in die Bildschirmenebene hinein zeigt. Beide Größen sind also tatsächlich im Sinne einer Linke-Hand-Regel miteinander verknüpft, sodass die Vorzeichen aus der Gleichung  $U = d\Phi/dt$  übernommen werden können.
- Die durch den Leiter und das Messgerät eingeschlossene Fläche ist eben und hat den Flächeninhalt  $A = x \cdot L$ . Da die magnetischen Flusslinien diese Fläche senkrecht durchstoßen, gilt  $\Phi = B_0 \cdot A = B_0 \cdot x \cdot L$ .
- Die Spannung wird mit Hilfe des Induktionsgesetzes für die Leiterschleife berechnet. Der erste Term wird durch die Änderung der Flussdichte hervorgerufen und wird auch Ruheinduktion genannt. Da die magnetische Flussdichte sich mit der Zeit nicht ändert, ist der erste Term in diesem Beispiel gleich Null. Der zweite Term wird durch die Bewegung des Leiterstabes und der damit einhergehenden Vergrößerung der Fläche verursacht. Dieser Term wird auch Bewegungsinduktion genannt. Er beträgt  $vLB_0$  und ist in diesem Fall für die Spannung an den Klemmen maßgeblich. Mithilfe der Produktregel für Ableitungen ergibt sich:

$$U = \frac{d\Phi}{dt} = \underbrace{\frac{\partial B_0}{\partial t}}_{=0} \cdot A + B_0 \cdot \underbrace{\frac{\partial A}{\partial t}}_{=vL} = vLB_0$$

### Soweit so gut.

In den folgenden Induktionsversuchen folgen unter Anderem Untersuchungen ob auch eine Leiterschleife oder eine Spule, die teilweise oder ganz magnetisch abgeschirmt sind und die in den Magnetfluss hinein oder hinaus bewegt werden, eine Induktion erfahren.

**Die folgenden Versuchsaufbauten sollen klären ob sich eine magnetische Abschirmung** des bewegten Leiters L auf die induzierte Spannungshöhe auswirkt oder nicht. Damit hängt die Frage zusammen ob die Induktion nur direkt am Leiter oder nur beim Eintritt oder Austritt des Magnetflusses in die Schleifenfläche oder auch bei der Magnetflussänderung in der Schleifenfläche entsteht.

**Grund zu diesen Fragen ist die bei den Versuchen gemachte Beobachtung, dass die Induktionsspannung immer genau dann entsteht, wenn sich der, die**

**Leiter, einer Messschleife zwischen die Magnet-Pole der folgenden Versuchsanordnung hinein oder hinaus bewegen. Ausserdem soll die Wirkung der Induktion beim Transformator untersucht und verstanden werden.**

**Die Spule wird im Magnetspalt hinein- und hinaus bewegt.**

**Bild 2:**



**Beobachtung:**

Bewegt sich der, die Leiter L einer Messschleife außerhalb der Magnetpole, wird keine Induktionswirkung registriert. Folglich erschien es sinnvoll mit einer magnetischen Abschirmung des, der Leiter L um diesen herum, die Induktionswirkung am Leiter und dann der ganzen Messschleife, probeweise zu unterdrücken zu wollen.

**Sollte sich die Abschirmung so auswirken, dass dann keine Induktion mehr erfolgt, so würde die These gestützt, dass die Induktion direkt am Leiter erfolgt.**

**Beschreibung der Versuchsanordnung mit bewegtem Leiter im Magnetfeld:  
Siehe Bild oben und unten.**

Ein starker Dauermagnet im linken Schenkel eingesetzt, erzeugt im Luftspalt des U-förmigen Schnittband-Kernes ein starkes Magnetfeld und damit einen permanenten Magnetfluss  $\Phi$ . ( $\Phi = B \cdot A$ )

In diesen Luftspalt wird eine Spule von Hand permanent so schnell wie möglich hinein und hinausbewegt. Die an der Spule entstehende Spannung wird mit dem daneben stehenden Speicher-Oszilloskop aufgezeichnet. Die Bewegung der Spule von Hand erfolgte für die Aufzeichnung der Oszilloskop-Aufnahmen jeweils permanent ohne Halt. Im Foto oben ist das gespeicherte Oszilloskop-Signal dargestellt, die Spule ist jedoch stillstehend im Luftspalt liegend gezeigt. Der Leser muß sich die von Hand erfolgte Bewegung der Leiter vorstellen, die ja auch durch das Messsignal mit 7,8mV Amplitude bewiesen wird. (Als Welligkeit des Signals.)

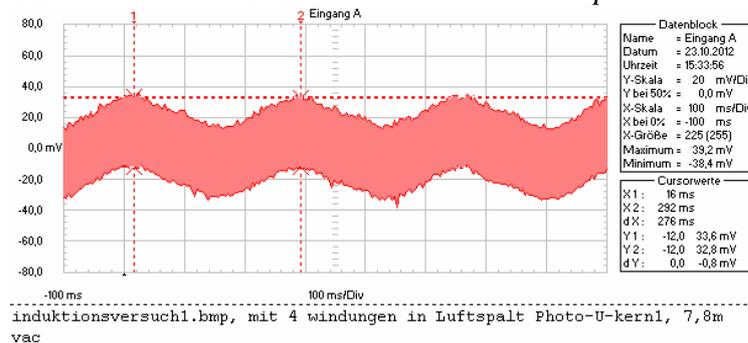
### Induktionsversuch 1:

Spule mit 4 Windungen wird ohne Abschirmung im Luftspalt von Hand hinein und hinaus bewegt. Das ergibt 7,8mVspitze, als Welligkeit mit einer 276msec. Periodendauer. Das Induktions-Signal ist trotz der Überlagerung mit einem 50 Hz Netzbrumm als Welle mit größerer Periodendauer als 50 Hz deutlich erkennbar.

**Bild 3:** Photo-U-Kern1.jpg



**Bild 4:** Unten der Bildschirm vom Oszilloscop.



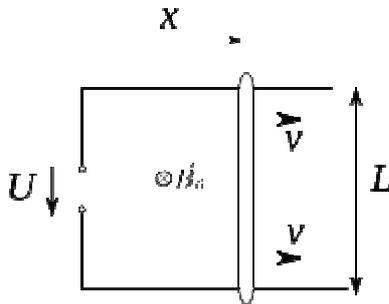
Bei Stillstand der Spule wäre nur die Brummspannung von 21mV, wie ein dicker Strich ohne die Welligkeit, symmetrisch zu 0,0mV zu sehen. (*Die 50Hz Brummspannung wird vom Netz hauptsächlich über die Hand der Bedienungsperson, welche die Spule hält, kapazitiv als Gleichtaktsignal eingekoppelt und kann vom Verstärkereingang des Oszilloskops nicht genügend unterdrückt werden.*) Ein zusätzlicher Aufwand zur Unterdrückung dieser Störspannung erschien nicht weiter nötig, da das Induktionssignal als Wellenzug auf dem Brumm im Unterschied zur ruhenden Spule deutlich zu erkennen ist. Frage: Wie verhält sich nun die Induktionwirkung wenn der Leiter oder die Spule teilweise oder ganz abgeschirmt ist?

Auch die Fragen aus der Diskussion im Wikipedia von 2012 zur Induktion, die teilweise unten zu lesen sind, sind es wert näher untersucht zu werden:

## Bewegter Leiter im Magnetfeld. ( Auszüge aus der Wikipedia -Diskussion.)

Zeichnung siehe auch oben Seite 1.

**Bild 5:**



(Zum Bild oben.) Man misst in etwa dieselbe Spannung, wenn der sich bewegende Leiter Stab magnetisch abgeschirmt wird (z.B. mit einem dünnen Eisenrohr). Wie erklärt man jetzt bitte, dass im bewegten Stab eine elektrische Feldstärke vorhanden ist????? ([Diskussion](#)) 11:04, 24. Okt. 2012 (CEST)) Und wo steht das? -- (Diskussion) 11:30, 24. Okt. 2012 (CEST)

Was denn genau? (Diskussion) 13:58, 24. Okt. 2012 (CEST))

Die Aussage "Man misst hier in etwa dieselbe Spannung, wenn der sich bewegende Stab magnetisch abgeschirmt wird (z.B. mit einem dünnen Eisenrohr)" - im Artikel jedenfalls nicht. -- (Diskussion) 14:39, 24. Okt. 2012 (CEST)

Ja, da hast du Recht. Ist eine Erweiterung des Versuches, bei der die Erklärung mit dem elektrischen Feld (als Wirkung eines sich in einem Magnetfeld bewegenden Leiters) nicht mehr funktioniert, da eben das Magnetfeld abgeschirmt wird. (Diskussion) 16:09, 24. Okt. 2012 (CEST))

Die magnetische Abschirmung ist ein wesentlicher Eingriff in die Experimentalanordnung. Die Abschirmung verursacht nämlich, daß das B-Feld nun zeitveränderlich ist. Zu einem Zeitpunkt, wo der jeweilige Ort gerade vom Röhrchen umschlossen ist, gilt  $B=0$ , sonst:  $B=B_0$ . Durch die Abschirmung erhalten wir also ein elektrisches Wirbelfeld. Da sich der Leiterstab nicht mehr im B-Feld befindet, wird das E-Feld aus beiden Bezugssystemen heraus gleich gemessen. Im mitbewegten System gilt  $E'=0$  (Näherung für kleine Ströme), im Laborsystem gilt

$\vec{E} = \vec{E}' - \vec{v} \times \vec{B}_{\text{imLeiterstab}} = \vec{0} - v \times \vec{0} = \vec{0}$ . An den Klemmen bleibt die Spannung die gleiche wie ohne Abschirmung. -- (Diskussion) 01:15, 9. Dez. 2012 (CET).

Wieso drückst du das immer so schwer verständlich und kompliziert und nur mit Formeln aus? Kennst du keine anschaulichere Sprache?-- (Diskussion) 16:51, 9. Dez. 2012 (CET)

Wieso versuchst Du nicht, die Formeln zu verstehen? Das Induktionsgesetz wird durch eine mathematische Gleichung beschrieben. Da kann ich doch nur schwer auf etwas anderes Bezug nehmen. -- (Diskussion) 12:22, 11. Dez. 2012 (CET)

**(Die Antwort war sicher nicht nur für den Autor unverständlich, auch weil  $E = 0$  ja keine Spannung erzeugt oder darstellt und doch eine gemessene Spannung vorkommt. Im Übrigen versteht der Laie praktische Versuche und daraus resultierende Messergebnisse wesentlich besser als reine Formeln.)**

Deshalb hat der Autor, siehe \*1, die folgenden Versuche durchgeführt.

Die Beschreibung des Versuchsaufbaus mit dem abgeschirmten Leitererfolgte oben auf Seite 3.

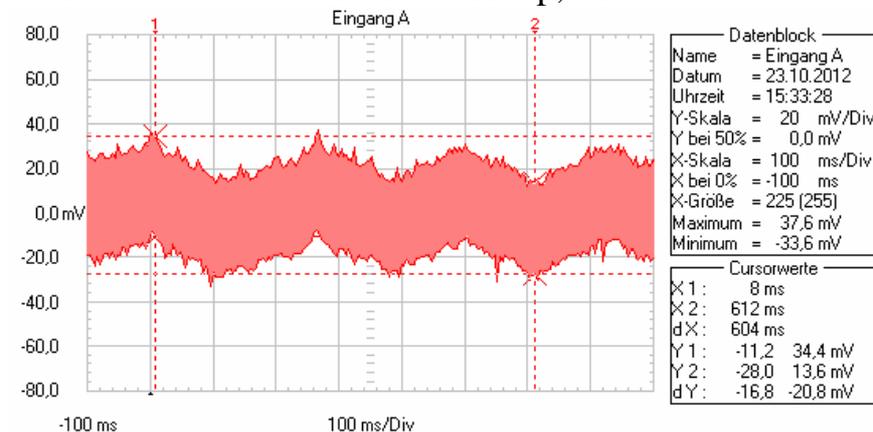
**Induktionsversuch2**, mit einer durch ein Weicheisenrohr teilweise magnetisch abgeschirmten Spule mit 4 Windungen. Nur das Rohr wurde durch den Luftspalt bewegt. Das ergibt 5,8mV ac, Welligkeit.-

Siehe das Bild unten.

**Bild 6: Induktionsversuch 2, an abgeschirmter Spule mit 4 Windungen.**



**Bild 7: Bild schirm von Oscilloscop, oben.**



induktionsversuch2.bmp, mit 4 windungen durch FE-Rohr in Luftspalt Phot  
o-U-Kern2, U = 5,8mVac

Der mit 5,8 mV geringere Ausschlag gegenüber der Messung mit nicht abgeschirmter Spule mit 7,8mVac, lag mit Sicherheit an der durch die Magnetkraft gebremsten Bewegung des Rohrs. ( Es war schwer das Rohr durch Luftspalt zu bewegen, weil die Magnetkraftwirkung auf das Eisenrohr die Bewegung bremste und das Rohr an den Polen streifte.)

Es scheint ansonsten keinerlei Einfluß auf die Induktion durch die magnetischen Abschirmung zu geben.

Die Induktion findet genauso statt wie bei der **un**abgeschirmten Spule.

**Um letzte Zweifel zu zerstreuen, wurde die Spule nun beim Versuch 3 gänzlich abgeschirmt.**

**Induktionsversuch 3**, eine mit einem Bowdenzug magnetisch abgeschirmte Spule mit 2 Windungen in voll abgeschirmter Ausführung wird durch den Luftspalt von Hand bewegt. 3,4mVac. Im Bowdenzug ist der Spulendraht, als der Leiter geführt und durch die Hülle abgeschirmt.

Induktionsversuch mit abgeschirmter Spule mit 2 Windungen.

**Bild 8:**

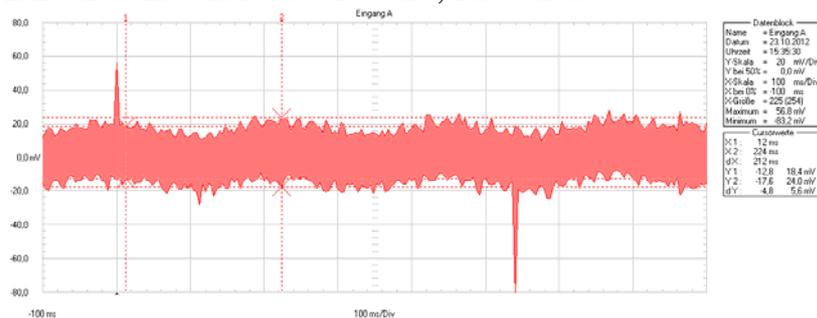


**Bild 9:** Magnet und Spulen Anordnung für Induktionsversuch 3.



Man erkennt den weis-grauen Draht als Mess-Leiter, der zum Oszilloscopeingang geht.

**Bild 10:** Induktionsversuch3, Messkurve.



induktionsversuch3.bmp, mit 2 Windungen durch Bowdenzug in Luftspalt Ph oto-U-Kern-3, 3,4mVac

**Beim Versuch 3 mit der Bowdenzug Spule**, deren Mantel aus Eisen besteht, ist deshalb objektiv betrachtet kein Unterschied der Induktionswirkung zur unabgeschirmten Spule zu messen weil: Die nur 2 Windungen mit dem Bowdenzug, die jedoch anders angeordnet sind als bei Versuch 1 und 2, also beim Bowdenzug voll abgeschirmt sind, ergeben zwar einen geringeren Ausschlag. Auch hier ist die Bewegung im Luftspalt durch die Anziehung des Hüllen-Metalls gebremst, allerdings nicht so stark wie beim dicken Rohr im Versuch 2. Unter Berücksichtigung der nur 2 Windungen der Bowdenzugspule und der gebremsten Bewegung ist die Induktion mit 3,4mV jedoch gleich stark wie beim Versuch 1, wo die Spule aus 4 Windungen bestand und 7,8mV ergab.

**Als Erklärung bleibt nur übrig: Nur die Magnetflussänderung in der Schleifenfläche ist für die Induktion ausschlaggebend. Die Induktionswirkung tritt also nur beim Ein-oder Austritt des konstanten Magnetflusses in die Schleifenfläche auf und nicht direkt am Schleifendraht der in das Magnetfeld ein oder austritt.**

**Fazit:**

**Einerseits gilt:**

**Weitere Beobachtung:** Werden Spulen, deren Schleifenfläche deutlich größer als die Magnetflussfläche ist, so bewegt dass die Leiter der Spulen nicht durch die Eisenkern-Pole fahren, dann findet auch keine meßbare Induktion statt. Diese Beobachtung hat den Autor zuerst auf die falsche Fährte gelockt, weil er annehmen konnte, dass die Induktion direkt am Leiter entsteht, was wohl auch anderen Lesern passieren kann. Der Magnetfluss  $\Phi$ , mit der kleineren Flussfläche als die Schleifenfläche, ändert sich dann nicht innerhalb der Schleifenfläche, wenn er deren Ränder nicht berührt oder überschreitet. Also findet die Induktion nicht statt wenn sich der räumlich begrenzte Magnetfluss sich zum Beispiel in der Mitte der bewegten Spule befindet, die eine größere Fläche aufspannt als sie der Magnet-Fluss hat, auch wenn die Spule dabei schnell hin und her bewegt wird. **Diese Magnetbewegung, überstreicht dabei keine Leiter die rechtwinkelig zur Bewegung stehen, was bedeutet, dass der Magnetfluss nicht in die Spulenfläche eintritt oder austritt und damit deren Magnetfluss in der Spule nicht ändert.**

Die Induktion findet im obigen Beispiel also nur dann statt, wenn die Leiter direkt unter den Magnetpolen im Luftspalt in diesen hinein und hinaus bewegt werden. Diese Beobachtung für sich alleine ist richtig, reicht aber nicht aus. Denn es findet dabei ein Ein und Austreten des Magnetflusses in die Schleifenfläche statt. Die Induktionsstärke ist deshalb unabhängig davon ob die Leiter der Spule, die zwischen den Magnetpolen bewegt werden, magnetisch teilweise oder ganz abgeschirmt sind oder unabgeschirmt sind!!

**Die Induktion findet nicht an den die Feldlinien schneidenden Leitern, sondern nur innerhalb der Schleifenfläche durch eine Magnetflussänderung in deren Fläche statt, wie es zum Beispiel auch beim Transformator der Fall**

**ist, wo sich nur der Magnetfluss innerhalb der Spulenfläche durch ständigen Auf und Abbau ändert, die Spulen und der Eisenkern stehen ja fest.**

**Ebenfalls gilt:**

Beim Wirk Prinzip des Transformators verhält es sich also anders als in den oben beschriebenen Versuchen, wo der oder die Spulen Leiter zwischen einem ruhenden Magnetfeld bewegt werden.

Beim Transformator steht die Spule fest, ebenso der Eisenkern, aber der Magnetfluss im Eisenkern ändert sich ständig, wodurch wiederum die meßbare Induktion in der Spule entsteht und worauf das Trafoprinzip beruht. **Es ist also hier genauso die Magnetflussänderung innerhalb der Fläche der Spule oder Messschleife, die hier die Induktion bewirkt.**

Wobei die Induktion gleich groß ist, wenn die Spulenfläche groß oder klein ist, solange sich die Magnet-Polschuhfläche und der Hub von B nicht ändert. (Dies gilt wegen Streufeldern nur bei einer nur schwach belasteten Messung, bei der kein nennenswerter Strom fließt.)

**Zweifel widerlegt, noch einmal etwas anders formuliert:**

Bei den Versuchen 1-3 oben, tritt zwar die stärkste Änderung des Magnetflusses in der Spulefläche dann auf wenn sich der Magnetpol direkt über den Spulenleitern oder umgekehrt bewegt. Dann tritt auch die stärkste Induktion auf. Es scheint also auf den ersten Blick so als ob die Bewegung des Magneten direkt über den Leitern der Spule die Induktionswirkung hervorruft. Es ist aber der Ein und Austritt des Magnetflusses in die Schleifenfläche der die Induktion in der geschlossenen Schleife bewirkt. Die magnetisch teilweise oder ganz abgeschirmten Spulendrähte verhindern die Induktion in der Spulenfläche **nicht** und ergeben die gleiche Induktion wie im Fall 1 des Versuchs, wo die Spulendrähte nicht abgeschirmt waren.

Nur wenn die ganze Schleifenfläche abgeschirmt würde, so daß der Magnetfluss um die Fläche herum laufen muß, ergäbe sich **keine** Induktion, was noch praktisch untersucht werden könnte.

**Noch eine Beobachtung wird näher untersucht:**

**Wenn man nun das Trafoprinzip speziell beim Stromwandlertrafo** oder beim Ringkerntrafo mit nur einer Sekundärwindung betrachtet, dann wird dort eine Induktion einer Spannung **scheinbar** nur an dem Teil des Spulen Leiters erfolgen, der geradlinig durch den Kern läuft. ( Bei nur einer Windung des Leiters, der Laie sagt dazu fälschlicherweise eine halbe Windung, weil diese ja nicht direkt um den Kern herumläuft, sondern erst in großer Entfernung den Kreis schliesst.)

Der Leiter durch das Kernloch bildet jedoch zusammen mit den restlichen Leitern zum Messgerät die Messschleife für die Induktion, wobei nur die Magnetflussänderung in der Fläche des Ringkernquerschnitts für die Induktion innerhalb der viel größeren Messschleife maßgeblich ist.

**Bilder von User:Constant314 aus dem engl. Wikipedia, auf der folgenden Seite.**

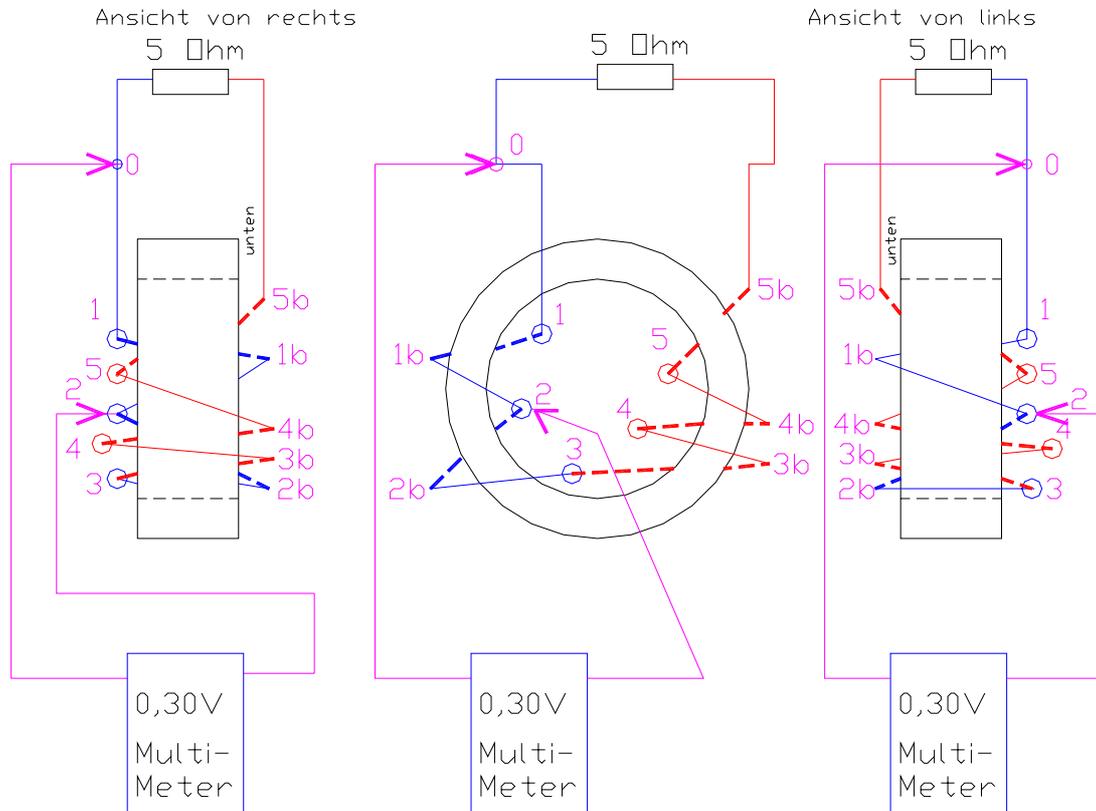


**Bild 13:** Ausschnitt aus Bericht: Trafo-wicklungsspannung 1.pdf, von emeko.

Windungsspannungs-Messungen an 300VA Ringkerntrafo. mit 5 Sekundärwindungen. Primärwicklung nicht dargestellt.

Messung der Teilspannungen an den Messpunkten 0 bis 5

Innenlaufende, "halbe" Windung sind mit  gezeichnet



EMEKO Ing. Büro Freiburg  
Tel. 0(049) 761 441803  
20.12.09

Trafowicklungsspannung-1-3.dwg

Es wird die Windungsspannung von 0,3 Volt gemessen, egal ob die rechte Messleitung zum Multimeter an Punkt 1b oder 2 kontaktiert ist. Es scheint so, als dass die Induzierte Spannung nur am inneren, senkrechten Windungsteil entsteht, der durch das Kernloch geht. Wie beim Stromwandler mit einer Windung, einem gerade durch das Kernloch verlaufenden Leiter. Es scheint als ob die äußeren Windungsteile an einem Ringkerntrafo nur zum Anschluß an die nächsten inneren Windungsteile dienen.

**Betrachtet man die ganze Messschleife** in der Grafik oben jedoch als Windung um den Trafokern, dann wird klar, dass es für die Lage der Messschleife egal ist ob der Kontakt der rechten Zuleitung zum Instrument am Punkt 1b oder 2 erfolgt. Beim Kontakt an Punkt 2b oder 3 würde das Messgerät dann 0,6 V zeigen.

Siehe auch die unten stehenden Grafiken zum Entstehen der Windungsspannung oder Induktionsspannung in Bild 14.

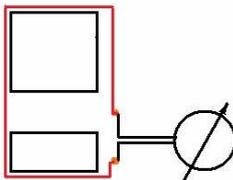
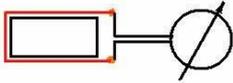
**Bild 14:**

### Wo entsteht die Induktionsspannung?

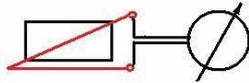
Wegweisend ist der bekannte M-Schnitt, bei dem sich der magnetische Fluss - und somit auch die Flussänderung - auf die beiden äußeren Schenkel verteilt.

Eine geistige Beschränkung ergibt sich aus dem Wunsch, die Messung zerstörungsfrei auszuführen. Aber auch eine durch eine Bohrung durch den Kern geführte Schleife erfasst in dem hier gezeigten Beispiel nur den halben magnetischen Fluss.

M-Schnitt



Ringkern



An allen drei roten Messschleifen wird die halbe Windungsspannung gemessen.

Bei der unteren Schleife gilt wegen der Richtung der Teile des Feldes:  
 $1 - 1/2 = 1/2$

Halbe Windungsspannung weil halber Magnetfluss in roter Schleife.

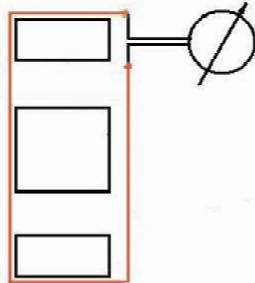
**Bild 15:**

In keiner der Anordnungen wird eine Spannung gemessen, weshalb?

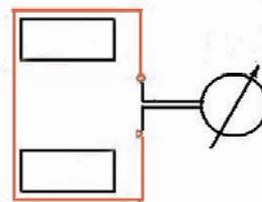
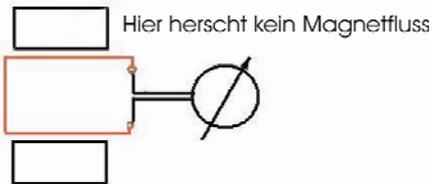
Trafokerne sind aufgeschnitten dargestellt

Die Summe der Magnetflüsse in den Schenkeln und in der Schleife ist gleich Null.

M-Schnitt



Ringkern



Die Summe der Magnetflüsse in den Schenkeln und in der Schleife ist gleich Null.

Es entsteht keine Windungsspannung weil sich ein gegenseitig aufhebender oder kein Magnetfluß in den roten Schleifen ergibt.

## Bewegter Leiter im Magnetfeld, Sonderfall, Heringsches Paradoxon. Bild 16:

Frage:

Weshalb wird die elektrische Spannung in der aufgespannten Schleifen-Fläche, welche vom Magnetfeld überstrichen wird nicht immer induziert?

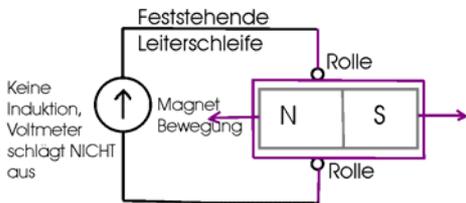
An diesen Beispielen lässt sich die INDUKTIONSWIRKUNG verstehen.



Heringsches Paradoxon Fall A.

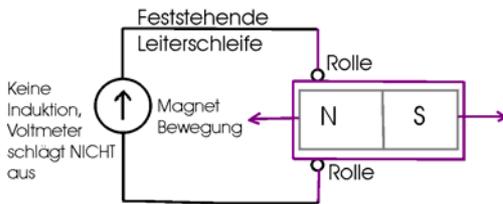
Es findet keine Induktion statt obwohl der Magnet bewegt wird. Der Magnet nimmt den Teil der Schleife, der zwischen den Kontakten liegt, in der Bewegung mit. Der Magnet ist ein flächiger Leiter. Genauso wäre es wenn die Rollen an einer Kupferplatte, die auf den Magneten geklebt ist, seitlich kontaktiert wären. Wie im folgenden Fall A1 und A2.

Der Magnetfluss  $\Phi$  in der Schleifenfläche ändert sich nicht durch die Bewegung, weil der Magnet den leitfähigen Schleifenteil mitnimmt, da der ganze Magnet ein el. Leiter ist. Deshalb induziert der Magnet, trotz seiner Bewegung, in der gedachten Leiterlinie zwischen den Rollen keine Spannung.



Heringsches Paradoxon Fall A1.

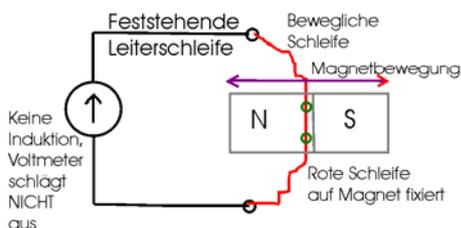
Die violett gezeichnete Kupferplatte, es kann auch nur ein Ring sein, wird vom Magneten mitgenommen. In der Fläche unter der Platte oder dem Ring entsteht keine Induktions-Dichte-Änderung durch die Magnetbewegung..



Heringsches Paradoxon Fall A2.

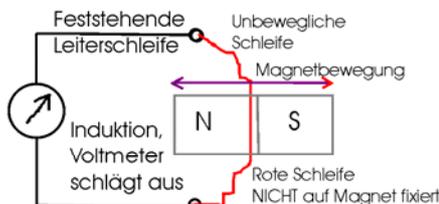
Die Kupferplatte oder der Käfig ist weiter herausgefahren.

Der Mess-Strom zum Voltmeter geht über die rote Schleife.



Heringsches Paradoxon, Fall B.

Dieser Fall ist dem Fall A ähnlich. Hier wird deutlicher was passiert. Der Magnet nimmt den Leiter mit. Wenn die rote Schleife auf dem Magneten fixiert ist, dann findet keine Induktion statt in der Schleife obwohl der Magnet bewegt wird. In der Schleifenfläche wird, trotz Bewegung des Magneten kein Magnetfluss geändert.



Kein Heringsches Paradoxon Fall C.

Wenn die rote Schleife auf dem Magneten NICHT fixiert ist, findet eine Induktion statt wenn der Magnet über den stillstehenden roten Draht bewegt wird, weil sich der Magnetfluss in der Schleifenfläche ändert.

Die Fälle A, A1, A2, B sind alle gleich was die fehlende Induktion betrifft.

Im Fall A, A1, A2, B, ändert sich der Magnetfluss in der Fläche der Schleife nicht.

Im Fall A hilft der Vergleich mit einem Aufbau in A1, wo eine Kupferplatte oder ein Ring aus Kupfer auf den Magneten geklebt wird, an der, dem, die Rollen entlang fahren. Weil die ganze Kupferplatte ein guter el. Leiter ist, kann man sagen es wird dieser Leiter vom Magneten mitgenommen bei der Bewegung, weil er ja auf den Magneten geklebt ist und es wird deshalb ein Teil der Schleifenfläche vom Magneten weggeschoben. Dieser Vergleich über Fall A1, A2, führt direkt zum Fall B, der zeigt, dass der bewegliche Schleifenleiter, der auf den Magneten geklebt ist, vom Magneten ebenfalls in der Bewegung mitgenommen wird, weshalb die sich verkleinernde oder vergrößernde Schleifenfläche keine Änderung vom Magnetfluss erfährt, weil der Flächenrand vom Magneten weggeschoben wird und deshalb der Magnetfluss nicht in die Fläche der Messschleife eintreten kann.

**Nur im Fall C** ändert sich der Magnetfluss in der Schleifenfläche, bzw. er tritt in die Schleifenfläche ein und es findet Induktion statt, weil der Magnetfluss in der Schleifenfläche sich ändert durch die Magnetbewegung.

### **Betrachtung aus einem anderen Blickwinkel:**

Im Gegensatz zum Versuch des Heringschen Paradoxons, wo ein Leiter scheinbar durch einen Magneten, der einen fixen Magnetfluss erzeugt oder durch einen Eisenkern mit einem fixen Magnetfluss, hindurch bewegt wird, steht bei den folgenden Versuchen der Leiter fest aber der Magnetfluss variiert, weil eine Wechselfeldspannung an die Spule links im folgenden Bild gelegt wird, die einen wechselnden Magnetfluss im Kern erzeugt..

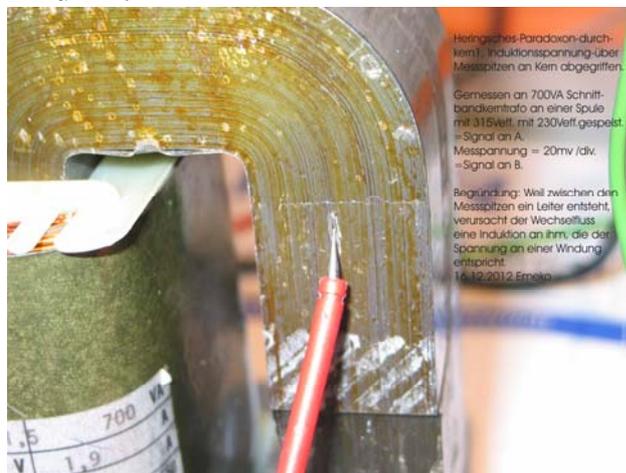
Voraussetzung: Der Magnetfluss  $\Phi$  wird im ganzen Kern als homogen angenommen, also er ist innen am Schenkel genauso groß wie weiter außen, was bei dem Versuch aufgrund des geringen magnetischen Widerstandes des Kerns angenommen werden kann.

### **Leiterschleife durch UI-Kern-Schenkel gehend.**

Praktische Induktions Versuche mit einem Wechselfluss  $\Phi$ , durch eine AC-Spule auf einem Schnittbandkern erzeugt. Diese Versuche sollen die Anschaulichkeit der diversen Heringschen Paradoxon Versuche oben erhöhen. ( Die folgenden Versuche haben nicht immer direkt etwas mit dem Heringschen Paradoxon zu tun, auch wenn sie so benannt sind.)

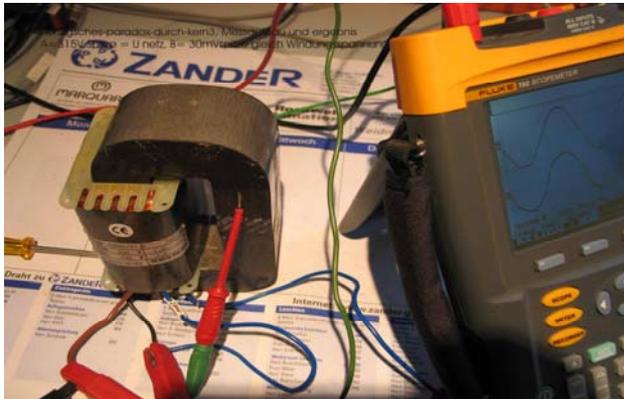
Messschleife durch den Kern: Grafik:heringsches-parad-durch-kern1.JPG.

### **Bild 17:**



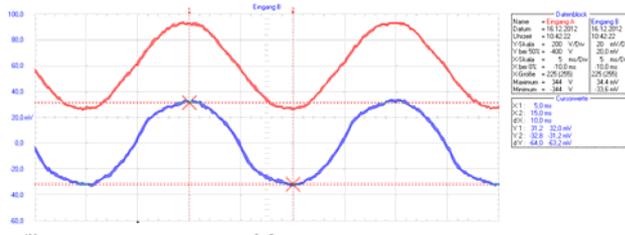
Der waagrecht liegende Luftspalt zwischen den U-Kernhälften ist mit ca. 0,1mm gering, er verursacht keine Inhomogenität des Magnetflusses im Kern. Zwischen den Messspitzen, vorne und hinten am Kern, entsteht auch durch den geblechten Kern hindurch ein Leiter. Auf diese damit entstehende Messschleife, deren Teil-Leiter also durch den Kern geht, der damit Teil einer Messschleife ist, wirkt der Wechselfluss  $\Phi$  der durch den Kern läuft. Oder anders ausgedrückt: Der Wechselfluss =  $B \cdot A/2$ , ( $A/2$  weil der Leiter etwa in Kernmitte liegt), erzeugt in der Schleifenfläche, die von rechts kommt eine Induktionsspannung, die mit 30mV peak ungefähr halb so groß ist wie die Windungsspannung des Kerns, wo die ganze Fläche  $A$  des Schenkels umspannt wird. Siehe die nächsten Bilder, Schnittbandkern mit Oscilloscopmessung und Oscilloscopmessung alleine und gezeichnetes Schema der Messschleife.

Die Schleife kommt von rechts und geht ungefähr in der Mitte des Schenkels durch ihn hindurch. **Bild 18:**



heringsches-parad-durch-kern3.JPG

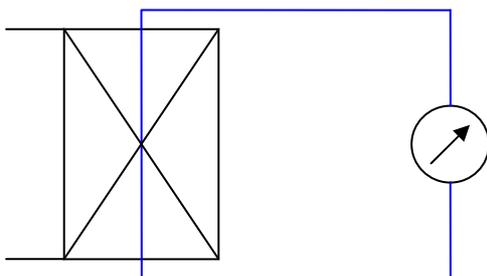
**Bild 19:** Messkurven vom Bild oben. Schleife kommt von rechts.



heringsches-parad-durch-kern3.bmp, Heringsches-Paradoxon-Versuchsaufbau-Leiter durch Kern hindurch: Messspitzen an Mitte von Schnittbandkerntrafo, Versuchsaufbau siehe gleichnamiges Bild. A= Netzspannung, B= 32mVspitze.emeko, 18.12.12

In der Draufsicht: Links Kern, rechts Schleife mit Voltmeter, (Oscilloscop).

**Bild 20:**



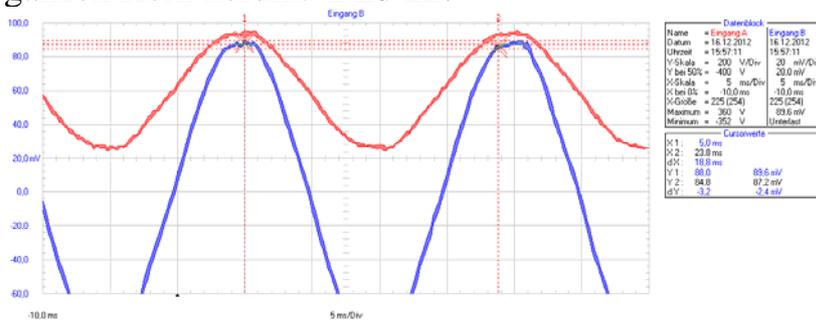
**Andere Anordnung:** Messspitzen jetzt ganz innen am Kern. Schleife, grünes u. rotes Kabel, kommen von rechts.

**Bild 21**, Photo zu Zeichnung in Bild 23 und messung in Bild 22.



88mV peak werden nun gemessen. Bild: heringsches-parad-durch-kern6.JPG

Es wird eine große Magnetflussfläche genutzt. Die Schleife läuft fast um den ganzen Kern herum. **Bild 22:**



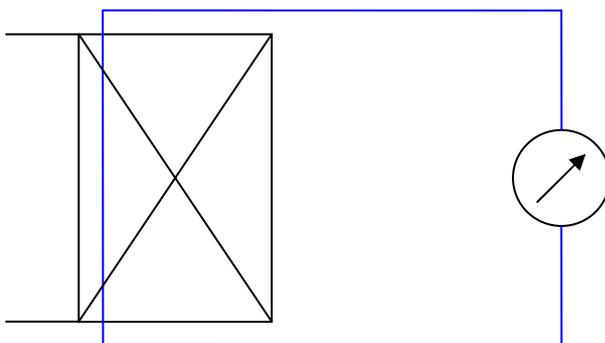
heringsches-parad-durch-kern6.bmp, Heringsches Paradoxon-Versuchsaufbau-Messspitzen-Leiter durch Kern ganz innen hindurch, siehe gleichnamiges Bild. A= Netzspannung, B= 88mVspitze. emeko, 18.12.12

Eine große Kernfläche wird durch die Schleife eingeschlossen. Fast so große Induktionsspannung wie die einer Windung um den ganzen Kern herum.

(Siehe Bild: heringsches-parad-durch-wind8.JPG, am Schluß des Berichts.)

Messschleife in der Draufsicht, fast der ganze Magnetfluss geht durch die Schleifenfläche.

**Bild 23:**



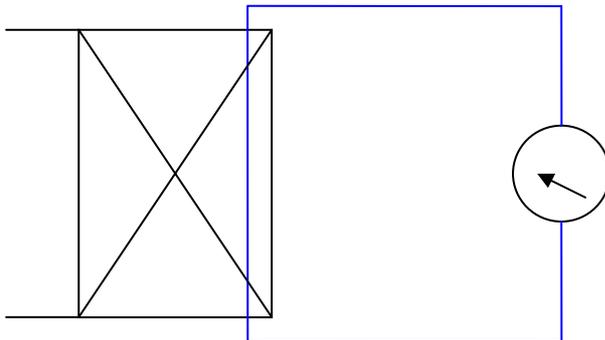
**Bild 24: Neue Messung:** Messspitzen ganz außen am Schenkel. Schleife kommt von rechts.



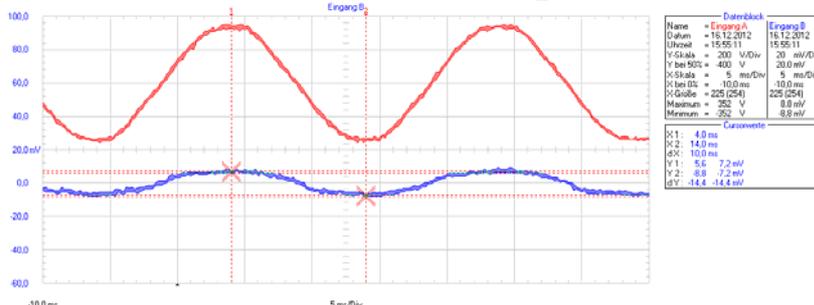
Bild:heringsches-parad-durch-kern7.JPG

Nur eine Kleine Kernfläche ist innerhalb der Schleife.  
Nur 8 mV peak werden in der Schleife induziert.

Messschleife in der Draufsicht: Nur wenig Magnetfluss vom Kern, geht durch die Schleifenfläche. **Bild 25:**



**Bild 26: Messkurve zu Zeichnung in Bild 25 und Photo Bild 24.**



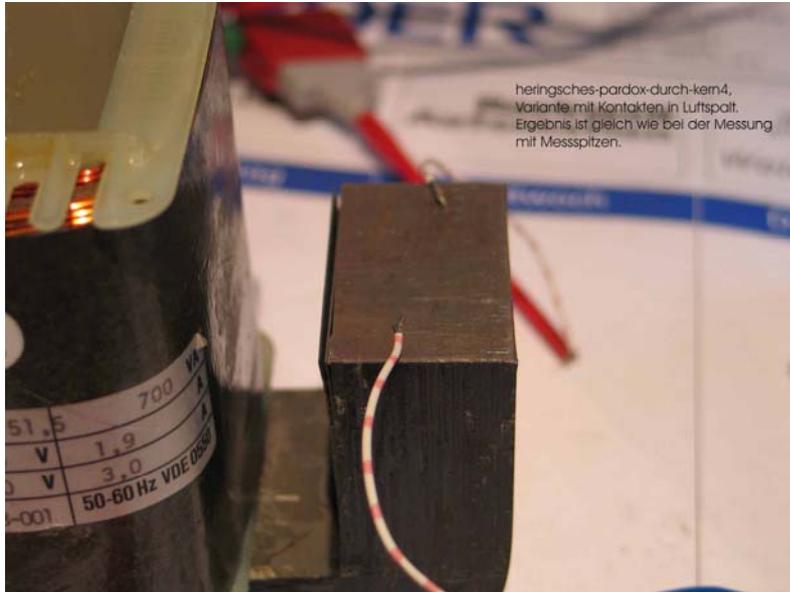
heringsches-parad-durch-kern7.bmp, Heringsches-Paradoxon Leiter durch Kern hindurch: Messspitzen ganz aussen an Kern, Versuchsaufbau wie gleichnamiges Bild. A= Netzspannung, B= 7mVspitze, emeko, 18.12.12

Eine kleine Kernfläche wird durch die Schleife, die von rechts kommt, eingeschlossen. Nur eine kleine Induktionsspannung wird erzeugt.

**Wenn die Spannung nur am Draht der durch den Kern geht entstehen würde, dann müßten die Spannungen der beiden Versuche in Bild 21 bis 23 und Bild**

**24 bis 26 gleich groß sein, weil überall im Kern die gleiche Flussdichteänderung herrscht.**

**Neue Messung:** Leiterschleife geht über Kontakte mitten durch den Kern. Schleife kommt von rechts. **Bild 27:**

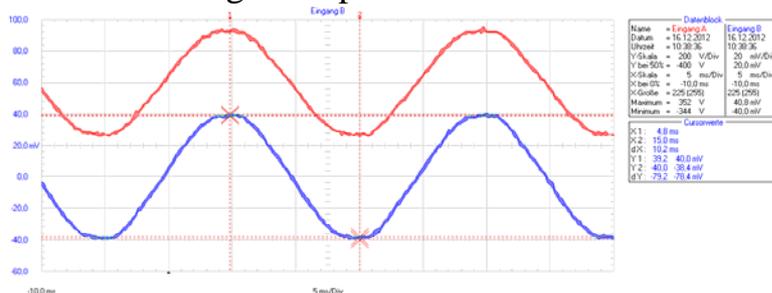


**Bild:**heringsches-parad-durch-kern4.JPG

**Bild 28:** Schleife kommt von rechts, zu Bild 27.



**Bild 29:** Heringsches-parad-durch-kern5.JPG

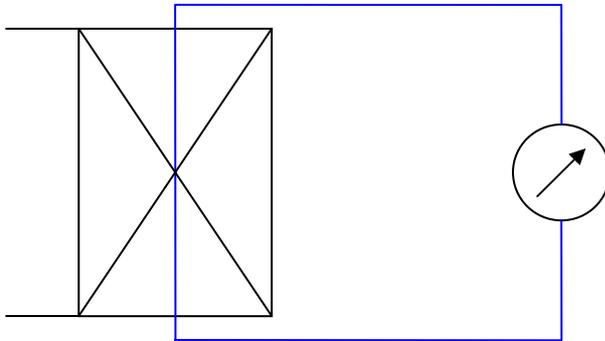


heringsches-parad-durch-kern5.bmp, heringsches-paradoxon-versuchsaufbau-Leiter durch Kern hindurch:Litzenenden in Luftspalt von Kern in Mitte. S siehe gleichnamiges Bild. A= Netzspannung, B= 40mVspitze, emeko, 18.12.12

Eine mittlere Kernfläche wird durch die Schleife eingeschlossen.  
Eine halb so hohe Induktionsspannung wie die einer Windung um den Kern wird gemessen.

Messschleife in der Draufsicht, der halbe Magnetfluss geht durch die Schleifenfläche und induziert die halbe Windungsspannung.

**Bild 30**, zu Bild 27, 28, 29.



**Bild 31: Neue Messung: Achtung geänderter Aufbau.**

Schleife kommt jetzt von links. Ansicht von vorne.

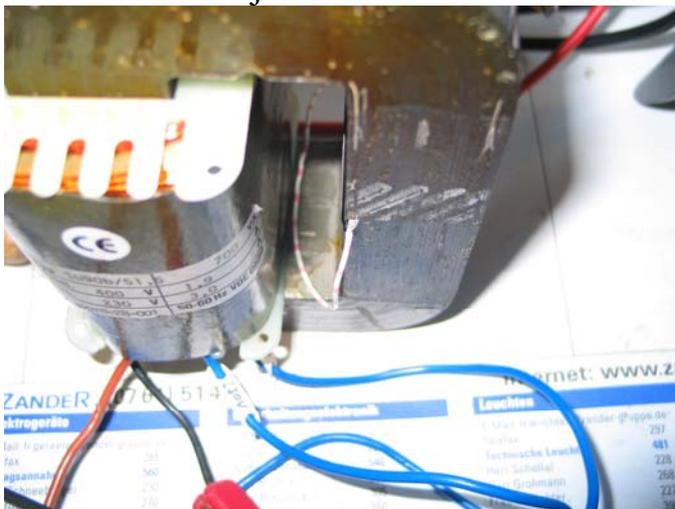
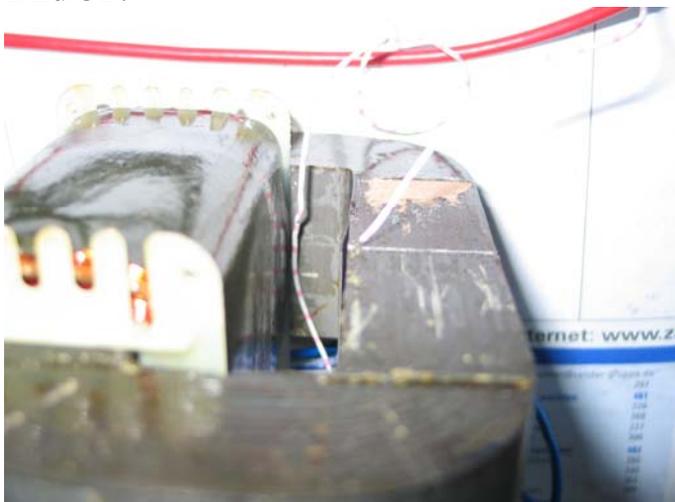


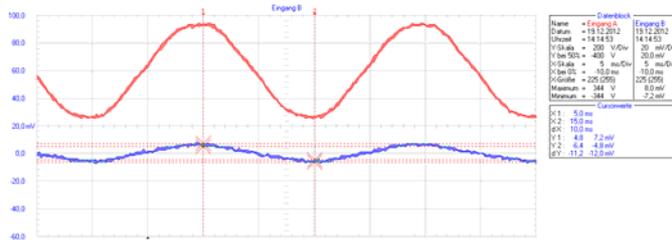
Bild:heringsches-parad-durch-wind+durch-kern9.JPG

Schleife kommt von links und geht durch den Kern zurück. Ansicht von hinten.

**Bild 32:**



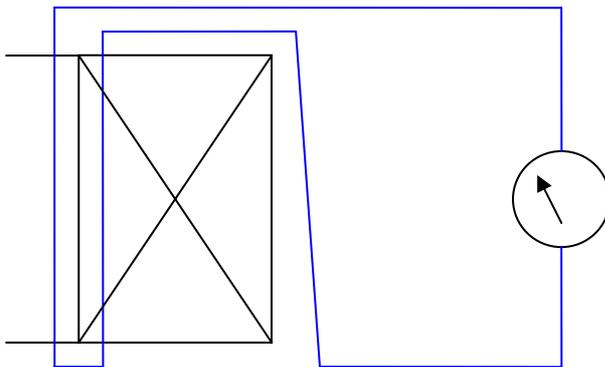
**Bild 33:** Zu Bild 31,32. heringsches-parad-durch-wind+durch-kern9a.JPG  
Schleife kommt von links und geht innen durch Kern zurück.  
Nur eine kleine Kernfläche kann die Schleife beeinflussen.



heringsches-parad-wind+durch-kern9.bmp, windung 1/2 um Kern und innen durch kern zurück, siehe Bild mit gleicher Bezeichnung. A= Netzspann., B= 6mV spitze Induktionsspannung.

Messschleife in der Draufsicht: Nur ein kleiner Magnetfluss geht durch die Schleifenfläche, nur eine kleine Spannung wird induziert.

**Bild 34:** Zu Bild 31,32,33.

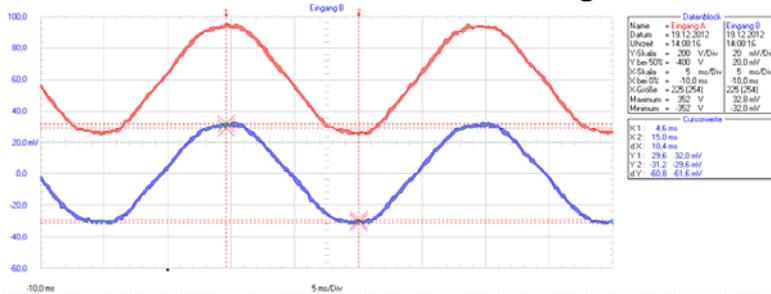


Würde die Induktionsspannung direkt am Leiter entstehen, der durch den Kern geht, dann müßten, die oben gemessene Spannungen alle gleich groß sein, weil die Magnetflussänderung um den Leiter herum immer gleich groß ist.

**Bild 35: Neue Messung:** Schleife kommt von links, geht innen an den Kern und läuft schräg durch den Luftspalt des Kernes zurück.

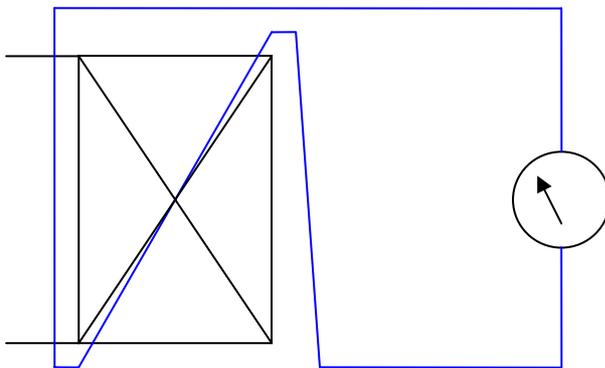


Bild 35:heringsches-parad-wind+durch-kern10.JPG

**Bild 36:** Zu Bild 35. Messkurve zu obigem Bild 35.

heringsches-parad-wind+durch-kern10.bmp, wind 1/2 um Kern und schräg durch Kern zurück, siehe Foto mit gleicher Bezeichnung, A= Netzspannung, B= 30mV spitze Induktionsspannung.

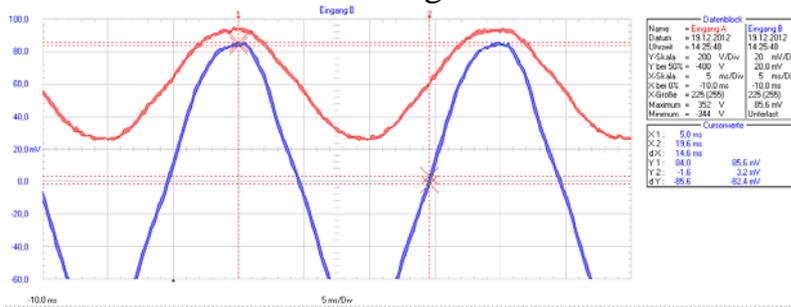
Eine mittelgroße Fläche vom Magnetfluss  $\Phi$  wird von der Schleife erfasst. Messschleife in der Draufsicht, der halbe Magnetfluss geht durch die Schleifenfläche.

**Bild 37:**

Diese Messung bringt das gleiche Ergebnis wie die Messung mit halbem Magnetfluss weiter oben in Bilder 18,19,20 : heringsches-parad-durch-kern3.JPG (Die Schleife kommt dort von rechts und geht ungefähr in der Mitte des Schenkels durch ihn hindurch.)

**Bild 38: Neue Messung:** Schleife kommt von links und geht geradlinig ganz rechts durch Kern zurück. Siehe Bild 40.

heringsches-parad-durch-wind+durch-kern11.JPG.

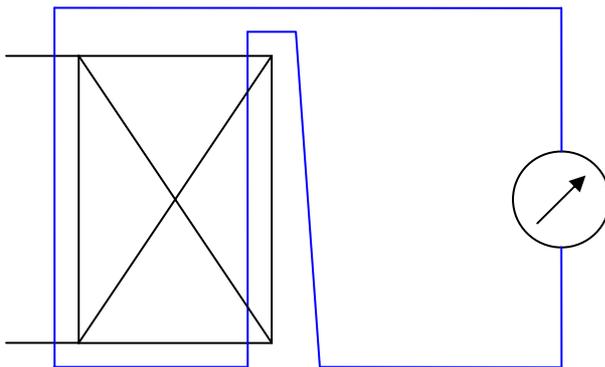
**Bild 39:** Messkurven zu obigem Bild 38.

heringsches-parad-wind+durch-kern11.bmp, wind 1/2 um KERN und aussen durch kern zurück, siehe Foto mit gleicher Bezeichnung. A=Netzspannung, B= 84mV spitze Induktionsspannung.

Eine große Fläche vom Magnetfluss  $\Phi$  wird von der Schleife erfaßt. Die induzierte Spannung ist fast so hoch wie die Windungsspannung der Anordnung. Vergleich mit: heringsches-parad-durch-wind8.JPG.

Messschleife in der Draufsicht, ein großer Magnetfluss geht durch die Schleifenfläche.

Die Zeichnung zur Grafik heringsches-parad-durch-wind+durch-kern11.png oben.

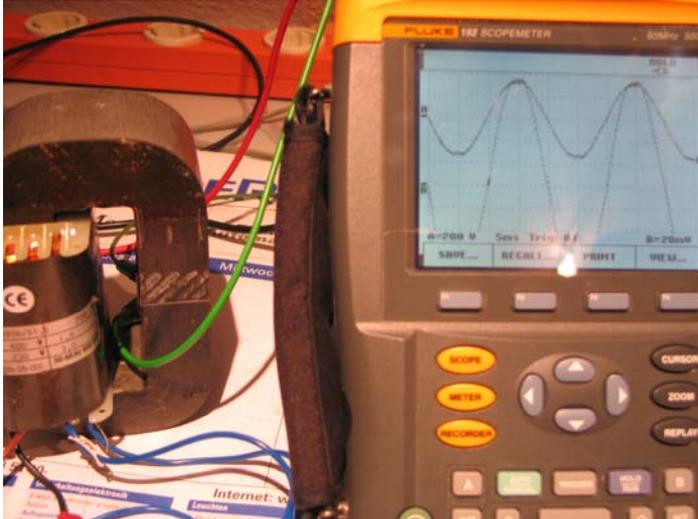
**Bild 40:** Zeichnung zu Bild 38, 39.

Würde am Leiter links im Kernloch eine Spannung induziert, so würde sich diese von der dann ebenfalls am Leiter rechts induzierten Spannung, die dann annähernd gleich groß sein müsste, subtrahieren und die am Voltmeter gemessene Spannung wäre dann klein. Da sie das aber nicht ist, ist damit bewiesen, dass die Induktion nicht durch die Magnetflussänderung am Leiter, sondern nur durch Magnetflussänderung in der Schleifenfläche entsteht

Siehe auch die folgenden Seiten und Seite 49, Windungsspannungsmessung.

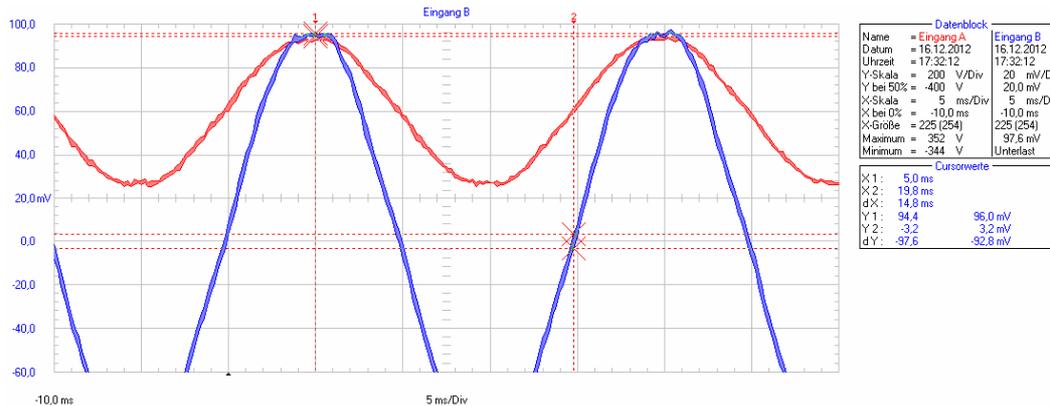
**Windungsspannungsmessung.** Schleife, grünes und mit ihm verbundenes rotes Kabel, kommt hier wieder von rechts und geht einmal um den Kern herum .

**Bild 41:**



heringsches-parad-durch-wind8.JPG

**Bild 42:** Messkurve zu Bild 41.



heringsches-parad-durch-wind8.bmp, Heringsches-Paradoxon-Versuchsaufbau-eine Windung um Kernherum. Siehe gleichnamiges Bild. A= Netzspannung, B = 96mVspitze. emeko, 18.12.12.

Die volle Fläche des Kernes mit dem größten Magnetfluss  $\Phi$  wird von der Schleife einer Windung um den Kern herum erfaßt.

**Die gemeinsame Betrachtung** der Induktion am bewegten Leiter und der Induktion beim Transformator bringt die Gewißheit, dass für die Induktion in einer Schleife nur die Änderung der Magnet-Flussdichte  $B$  und dabei die Größe der Fläche des Magnetflusses maßgeblich sind. Die Größe der Schleifenfläche ist unerheblich sofern sie größer ist als die Fläche des Magnetflusses. Ist sie dagegen kleiner als die Magnetflussfläche, so wirkt natürlich nur ein Teil des Magnetflusses auf die Schleifenfläche, weshalb die induzierte Spannung dann kleiner ist.

**Es folgt eine weitere Betrachtung**, die noch einmal probenhalber annimmt, dass nur im Leiter durch den Kern eine Spannung induziert wird. Bedingung ist, dass

der Magnetfluss im Kern mit Sicherheit als homogen angenommen wird, also innen und außen im Kern gleich hoch ist.

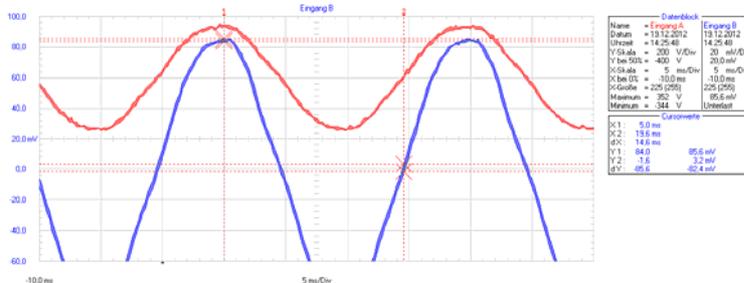
Weitere Überlegungen zur Induktion mit den Fragen:

- A. Wirkt die Induktion am bewegten Leiter erzeugt, der die Magnetfeldlinien kreuzt? oder
- B. Wirkt die Induktion nur in der Fläche der Schleife? Wobei die Höhe der Induzierten Spannung von der Magnetfluss  $\Phi$  Änderungsgeschwindigkeit und dessen Fläche beeinflusst wird.

**Bild 43:** ( Wie Bild 38, 39, 40.) von Messschleife, die außen am Kern durch den Trafokern zurückgeht.

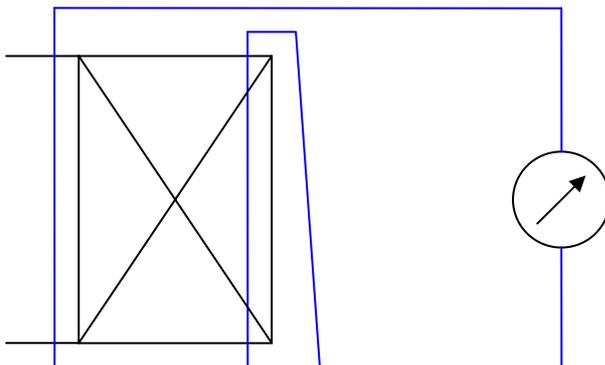


**Bild 44:** Messkurve zu Bild 43.



heringsches-parad-wind+durch-kern1.bmp, wind 1/2 um KERN und aussen durch kern zurück, siehe Foto mit gleicher Bezeichnung. A=Netzspannung, B= 84mV spitze Induktionsspannung.

**Bild 45:** Zeichnung zu Bild 44.



Zu A: Das Bild heringsches-parad-durch-wind+durch-kern11.JPG, siehe Bild 38, 39, 40, 43, 44, 45, zeigt oben zwei Leiter, einer innen um den Kern und einer außen durch den Kern.

Eine große Fläche vom Magnetfluss  $\Phi$  wird von der Schleife erfaßt.

**Siehe Bild oben: Ein Leiter, der rot weiße Draht bildet den Hinweg, ein anderer Leiter geht rechts außen durch den Kern zurück, er bildet den Rückweg der Messschleife.**

**Wenn die Induktion nur an Leiterdrähten und nicht in der Schleifenfläche erfolgen würde, dann müssten die beiden Induktionsspannungen von diesem Bild oben, heringsches-parad-durch-wind+durch-kern11.JPG und dem Bild unten, heringsches-parad-durch-kern7.JPG, gleich groß sein, was sie aber laut den Messungen überhaupt nicht sind.**

**Bild 46:** Nochmal zum Vergleich: Messspitzen ganz außen. Schleife kommt von rechts.



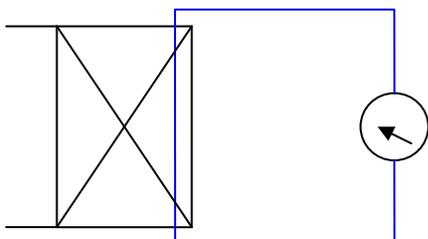
Bild: heringsches-parad-durch-kern7.JPG

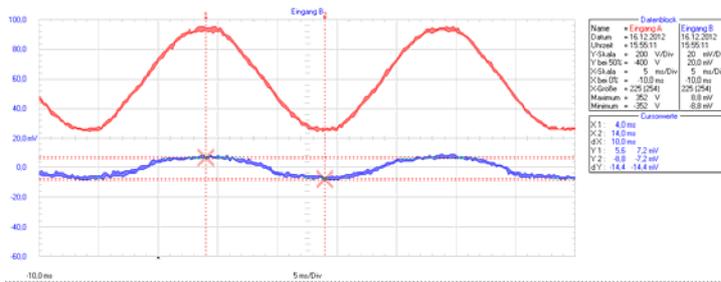
Nur eine Kleine Kernfläche ist innerhalb der Schleife.

Nur 8 mV peak werden in der Schleife induziert.

Messschleife in der Draufsicht, nur ein kleiner Magnetfluss geht durch die Schleifenfläche.

**Bild 47:** Zeichnung zu Bild 46, 48.



**Bild 48:**

heringsches-parad-durch-kern7.bmp, Heringsches-Paradoxon Leiter durch Kern hindurch: Messspitzen ganz aussen an Kern, Versuchsaufbau wie gleichnamiges Bild. A= Netzspannung, B= 7mVspitze, emeko, 18.12.12

Zu B: Die vorangegangenen Bilder und Messungen zeigen eindeutig, dass die Induktion nur dann entsteht, wenn der sich ändernde Magnetfluss  $\Phi$  durch eine geschlossene Schleife hindurchgeht. Wobei der Schleifenschluss mit einem Messegerät oder einem Lastwiderstand auch weit entfernt erfolgen kann. Maßgebend ist die Fläche des Magnetflusses durch die Schleifenfläche.

Die folgende Grafik Trafowindungsspannung-8-1.png auf der nächsten Seite geht beispielhaft auf diese Überlegungen ein.

Wie groß die Schleife mit Ihrer Fläche selbst ist, das ist unerheblich. Wichtig ist nur die Fläche des Magnetflusses  $\Phi$  der die geschlossene Schleife durchdringt, die eine viel größere Fläche haben kann und die Änderungshöhe und Geschwindigkeit des Magnetflusses. Ein Magnetfluss außerhalb der geschlossenen Schleifenfläche hat keine Induktionswirkung auf diese. Siehe der Fall H im Bild unten.

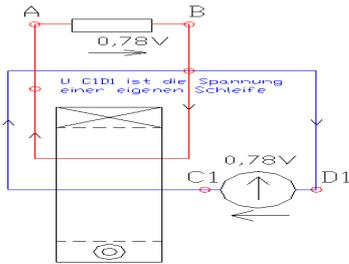
**Bild 49:**

Wo entsteht die Induktionsspannung an einer Drahtschleife, obwohl sie nur an den Enden messbar ist?

Windungsspannungs-Messungen an 3 kVA Ringkerntrafo. mit verschiedenen Sekundärwindungen. Primärwicklung für 480V mit 335 Windungen nicht dargestellt, wird mit 240V 50Hz gespeist. Kernquerschnitt ist 45qcm. Die Windungsspannung des Trafos ist 0,78V / Windung. Ringkerne sind aufgeschnitten gezeichnet. Alle R = 2,2 KOhm

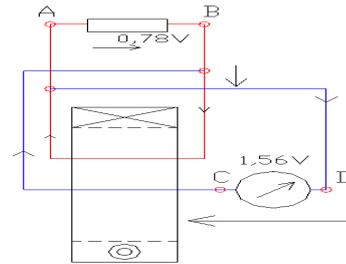
Fall: B1

Die blaue Schleife ist an einem Punkt mit der roten Schleife verbunden, was aber keinen Einfluss hat auf die Messung.



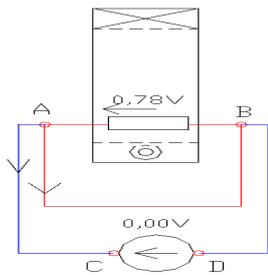
Fall: C

Reihenschaltung von roter und blauer Schleife, die Windungsspannungen addieren sich.



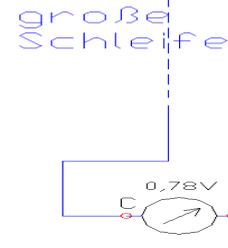
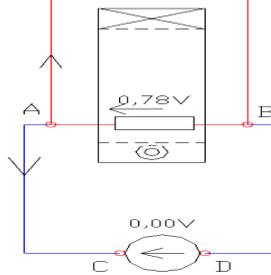
Fall: F

Die Windungsspannung fällt am R ab.



Fall: G

Die Windungsspannung fällt am R ab.



Messgerät ist weit entfernt.

Zu Fall H: Die Windungsspannung ist auch in einer sehr großen Schleife in gleicher Voltzahl messbar. Schlussfolgerung: Man könnte annehmen die Spannung entsteht um den Draht im Kernloch herum. Aber das ist falsch. Die Induktion in der Schleife entsteht nur in der Fläche des Magnetwechselflusses durch den Trafokernquerschnitt, welche die Schleifenfläche durchdringt.

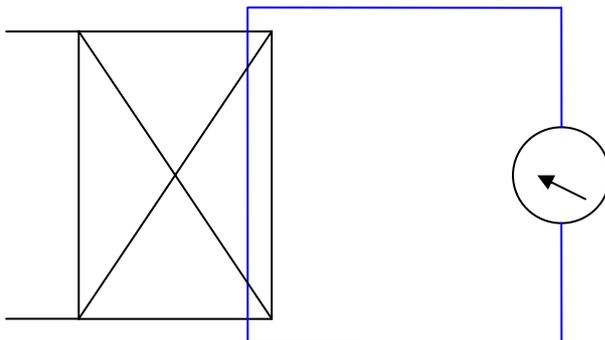
Trafowindungsspannung-8-1.dwg  
EMEKO, 17.12.2012, geändert: 25.09.2013

Beeinflusst die Leiterlänge im Magnetfeld die Höhe der Induzierten Spannung?  
Nein, nur die Fläche und natürlich die Stärke des Magnetwechselflusses der in die Schleife eintritt beeinflusst die Spannung.

**Bild 50:** Leiter ganz außen, Schleife kommt von rechts.  
Kanal B mit 20 mV / div.



**Bild 51:** Zeichnung zu Bild 50 oben: Der Magnetfluss  $\Phi$  tritt nur wenig in die Leiterschleife ein.



Siehe Induktion am Leiterstab im Wikipedia Artikel elektromagnetische Induktion.  
Leiter ganz außen, Schleife kommt von rechts.

**Bild 52:** Wie Bild 50 oben ,Kanal B mit 20 mV / div. Kaum eine Induktions-Spannung erkennbar



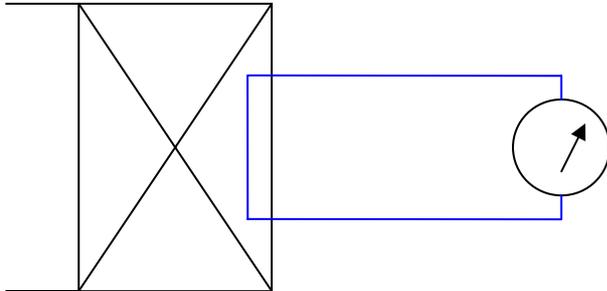
**Bild 53:** Gleiches Bild mit anderer Verstärkung: Leiter ganz außen ist verkürzt, Schleife von rechts. Hier Kanal B mit 5 mV / div. Induktions-Spannung besser erkennbar weil mehr verstärkt.



Ein Leiter der auf kurzem Weg rechts in dem Schenkel ein und austritt, bringt weniger Induzierte Spannung, weil die Magnetflussfläche in der Schleife verkleinert ist.

**Bild 54:** Zeichnung zu Bild 52, 53 oben: Der Magnetfluss  $\Phi$  tritt nur teilweise in Leiterschleife ein, weshalb die Spannung kleiner ist.

Messschleife in der Draufsicht, nur wenig Magnetfluss geht durch die Schleifenfläche.



### Formeln: Beziehungen zwischen $B$ und $H$ , zum Verständnis der Bilder 55 bis 59:

- 1.)  $B = \mu_y * \mu_0 * H$ , **Dimension:** [Vsec/cm<sup>2</sup>], Tesla.  $B$  ist die Magnetflussdichte, die Dichte der Feldlinien pro Fläche. Sie ist proportional zu der Menge der magnetischen Feldlinien pro cm<sup>2</sup>.

Aus Formel 8:  $H$  in der obigen Formel wird ersetzt durch  $I * N / L$ , ergibt:

- 2.)  $B = \mu_y * \mu_0 * I * N / L$  Das zeigt, dass  $B$  um so größer wird je größer  $\mu_y$  wird oder je größer  $I$  oder  $N$  wird.  $B$  wird ebenfalls größer je kleiner  $L$ , der Luftspalt wird. Der Dauermagnet entspricht hierbei der Magnetspule mit  $N$  Windungen und dem Strom  $I$ . (Es ist egal ob das Magnetfeld mit einem Dauermagneten oder einer Elektromagnetspule erzeugt wird.)

- 3.)  $\mu_y$  = magnetische Leitfähigkeit. In Luft = 1, in Eisen ca. 10000-50000.

- 4.)  $\mu_0$  = magnetische Leitfähigkeitskonstante.

Beispiel: Zu  $B = 1$  Tesla in Luft gehört die Feldstärke  $H = 8000$  A/cm.

Zu  $B = 1$  Tesla in Eisen gehört die Feldstärke  $H = 0,1$  A/cm.

Also kann der Dauermagnet im Bild 2 viel schwächer sein, wenn die Magnetfeldlinien keine Luft durchqueren müssen, sondern nur im Eisenweg laufen, um eine große Induktion zu erzielen. Oder aber die induzierte Spannung ist beim gleichen Dauermagneten viel größer wenn der Luftspalt nur so groß wie nötig ist, damit beispielsweise die bewegte Spule im Bild 2 darunter durch paßt.

- 5.)  $\Phi = B * A$ , magnetischer Fluß, **Dimension:** [Vsec/]

6.)  $A$  = Fläche des Magnetischen Leiters, Eisenfläche. [cm<sup>2</sup>]

7.)  $\Phi = \mu_y * \mu_0 * H * A$ , **Dimension:** [Vsec]

8.)  $H = I * N / L$ , **Dimension für H:** [A/cm], gilt für eine Spule mit N Windungen

Zum Beispiel bei  $I = 1$  Ampere Strom durch eine Spule mit N Windungen für die Kraft eines Elektromagneten bei einer bestimmten Feldlinienlänge L im Luftspalt.

Ist L klein, weil ein kleiner Luftspalt besteht, zum Beispiel zwischen einem Hufeisen-Magneten und einem Anker davor, dann ist H groß.

$F = B * B * A / 2 * \mu_0$  ist die Formel für die Kraft eines Dauermagneten, der einmal mit einer Spule die N Windungen und mit dem Strom I aufgeladen wurde. Je größer B desto größer die Kraft. (Sogar quadratische Zunahme von F.)

Energie im Dauermagneten = Volumen \*  $H * B / 2$ . Wenn mit einem zunehmenden Luftspalt das H größer wird, muß das B kleiner werden und dann nimmt die Kraft rapide ab.

Die Energie im Dauermagneten bleibt jedoch erhalten.

9.)  $H * L = I * N$ , = Durchflutungssatz.

Induktion kann jedoch auch an einer feststehenden Spule entstehen, denn:

**Induktion entsteht durch vergrößern oder verkleinern des Magnetflusses durch eine Spule. Auch durch die Magnetflussänderung innerhalb des Weicheisen-Magnetleiters innerhalb der Spule. Siehe Transformator.**

**Wie wirkt sich ein Luftspalt zwischen zwei Kernhälften auf die Stärke des Magnetflusses im Eisenkern und damit auf die Induktionsdichte B und die durch die Bewegung der Kernhälften Induzierte Spannung aus?**

Die Magnetflussdichte ändert sich stark wenn der Luftspalt zwischen den Magnetleiterkernhälften sich ändert.

Dazu werden die Kernhälften im Bild unten **von Hand** zusammengesetzt oder auseinandergezogen, damit eine Induktionsspannung in der Spule entsteht, die mit einem Oszilloskop gemessen wird.

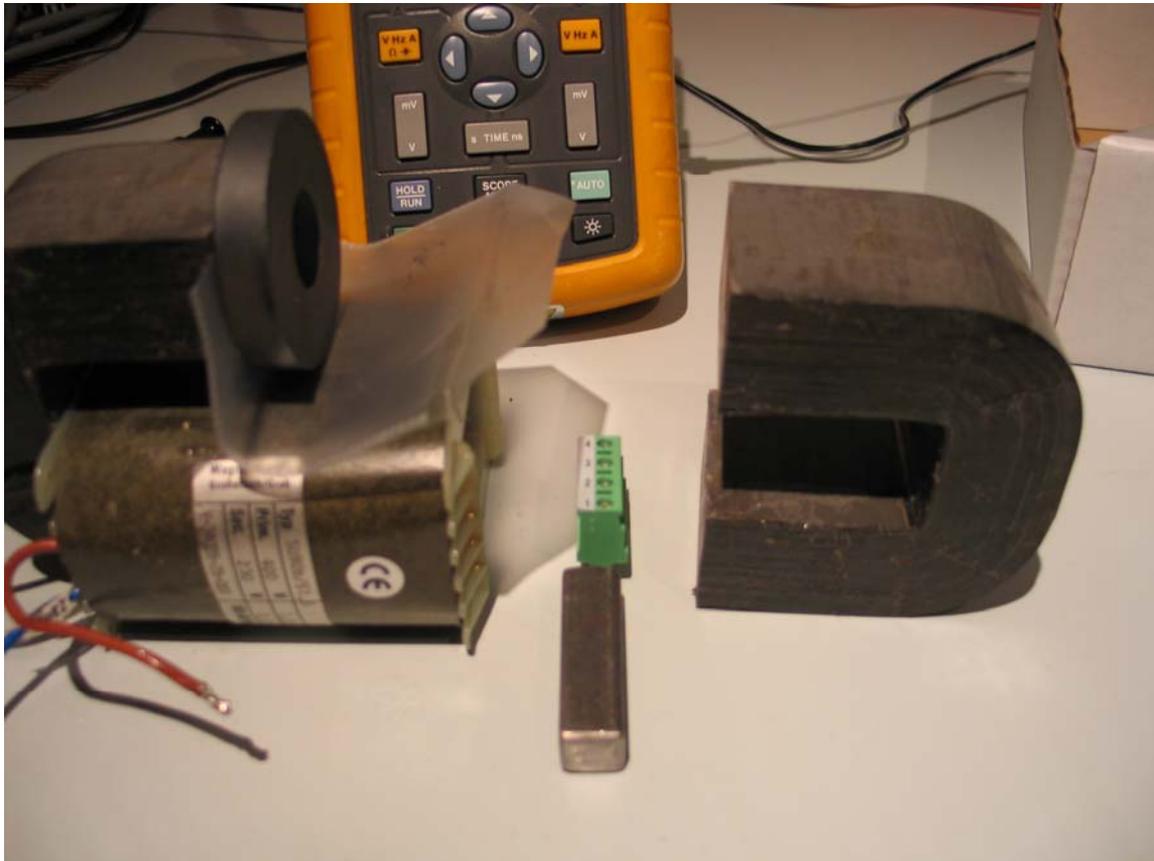
Die Geschwindigkeit der Bewegung sei bei den Versuchen gleich. Sie hängt im Wesentlichen von der Anzugskraft des Dauermagneten ab.

**Der Magnet hat links den Süd- und rechts den Nordpol.**

Zwei Kernhälften mit Dauermagnet oben und Abstandhalter unten zwischen den Kernhälften sind im Bild unten zu sehen.

Die Spule liegt um den unteren Schenkel. Die Abstandhalter aus Eisen oder aus Kunststoff werden abwechselnd in Spule gelegt, damit die Kernhälften parallel liegen.

**Bild 55:** Ansicht vom Induktionsversuch mit offenen Kernhälften.



Je nachdem welcher Abstandhalter in der Spule liegt, ist die Ausgangsinduktion  $B$  und damit die Induktionsänderung von  $B$  beim Bewegen des rechten Schenkels und damit die induzierte Spannung stärker oder schwächer.

Der grüne Kunststoffabstandhalter ist magnetisch nichtleitend und erzeugt einen Luftspalt im unteren Kernschenkel, was die Induktion schwächt.

Der graue, eiserne Abstandhalter ist magnetisch gut leitend und verringert den Luftspalt deutlich und verstärkt damit die Induktion.

**Bild 56: Beim Öffnen der Kernhälften von Hand entsteht ein negativer Spannungspuls von 25Vpeak wenn der Abstandshalter aus Eisen ist, welches den Luftspalt verkleinert. Das Foto ist nach dem Öffnen aufgenommen.**



Die Spannungsspitze entstand während dem Öffnen.

**Bild 57: Beim Schließen der Kernhälften von Hand entsteht ein positiver Spannungspuls von 30Vpeak wenn der Abstandshalter aus Eisen ist.**



Das Foto ist nach dem Schließen aufgenommen. Die Spannungsspitze entstand während dem Schließen.

**Bild 58: Beim Öffnen der Kernhälften von Hand** entsteht wie oben im Bild 56 ein negativer Spannungspuls, der aber nur 10Vpeak groß ist, weil der Abstandshalter aus Kunststoff ist, was den Luftspalt unnötig vergrößert.



Die induzierte Spannung ist kleiner mit dem großen Luftspalt im Kern, weil die Ausgangsinduktion nur halb so groß war wie im Fall mit dem Eisenstück. Folglich ist auch die Änderungshöhe von  $B$  nur halb so groß.

**Bild 59: Beim Schließen der Kernhälften von Hand** entsteht ein positiver Spannungspuls von 15Vpeak wenn der Abstandshalter aus Kunststoff ist.



Die ruhende Magnetfeldstärke nimmt ab, wenn ein großer Luftspalt zwischen den Kernhälften besteht. Die Ausgangs-Induktionsdichte  $B$  nimmt damit also ab.

Die Magnetfeldstärke nimmt ab, wenn ein Luftspalt zwischen den Kernhälften besteht. Die Ausgangs-Induktionsdichte  $B$  nimmt damit ebenfalls ab. Die Änderung von  $B$  beim Öffnen oder Schließen der Kernhälften nimmt damit ebenfalls ab, die Induktion wird kleiner.

**Ausblick:**

Die hier vorliegenden Messungen und Versuche sollen Formeln zur Induktionswirkung nicht ersetzen, sondern verständlich machen und untermauern. Weil diese Formeln, besonders beim Heringschen Paradoxon wie im WP beschrieben, jedoch nur für Elektrotechnik-Studierte Leser verständlich sind, sollen diese Versuchsbeschreibungen hier auch dem Laien verständlich machen wann Induktion entsteht und wann nicht.

„Nur was man sieht und sich auch vorstellen kann, kann man auf Dauer im Gedächtnis behalten.“

Freiburg.05.2.2013, 29.12.2013, 18.02.2014 Michael Konstanzer, [www.emeko.de](http://www.emeko.de)

**\*1 Im Grunde geht es dem Autor um das Primat der Ergebnisse eines Versuches gegenüber einer Theorie die nur mit Formeln belegt wird.**

Quellen: Wikipedia und eigene Messungen und daraus Grafiken und Bilder.