

Gegenstand Gewalt anzutun, zu überwinden sind, und daß bei der Lösung dieser allgemeineren Aufgabe die früheren Arbeiten gute Dienste leisten werden.

Und noch auf ein anderes verwandtes Gebiet spielt die Untersuchung der Wirbelströmung hinüber, d. i. auf die Theorie der Kommutierung: Man wird mit Rücksicht auf das Gegenfeld der Wirbelströme die Reaktanzspannung bei Kollektormaschinen einer Revision zu unterziehen haben, die mit manchen Unklarheiten der älteren Theorie aufzuräumen wird.

Zur Definition der induzierten elektromotorischen Kraft¹⁾.

Von

W. Rogowski.

1. Alte Vorstellung vom Induktionsvorgange. Bei Faraday und seinen Zeitgenossen richtet sich das Augenmerk auf die markanteste Erscheinung der Induktion: auf die Erzeugung elektrischer Ströme. Das Besondere des Induktionsvorganges wird im Drahte gesucht. Das Streben der Physiker geht nach einer Aufstellung der Gesetze der induzierten Strömung. Hierfür gibt noch 1851 Faraday an:

„Die induzierte Strommenge ist der Zahl der geschnittenen Kraftlinien proportional.“

Man beobachtete nun, daß der Proportionalitätsfaktor sich mit dem Widerstande des induzierten Stromkreises änderte. Infolgedessen ergab es sich als zweckmäßig, der Zahl der geschnittenen Kraftlinien (dem Induktionsflusse) nicht unmittelbar den induzierten Strom, sondern zunächst eine elektromotorische Kraft zuzuordnen und aus dieser den induzierten Strom wie bei Gleichstrom zu berechnen. So entstand die folgende noch heute gebrauchte Fassung (Fassung I):

„Die induzierte EMK ist gleich der zeitlichen Abnahme des Induktionsflusses.“

Dieser Ausdrucksweise liegt die Vorstellung zugrunde, daß beim Induktionsvorgange in den Leiter hinein ein elektrisches Elementchen getragen wird, das seinerseits die Ursache des induzierten Stromes ist (Vorstellung I).

2. Heutige Auffassung vom Induktionsvorgange. Wir suchen heute das Besondere des Induktionsvorganges nicht allein im Drahte, sondern auch außerhalb desselben im ganzen Raume. Wir denken uns diesen bei dem Induktionsvorgange durch ein elektrisches Feld erfüllt (Vorstellung II). Die Vorgänge im Draht ordnen sich diesem Felde nach bestimmten, vom Induktionsvorgange unabhängigen Vorschriften an. Diese Erweiterung unserer Anschauungen hat eine neue Fassung des Induktionsgesetzes erfordert. Ihren Ausdruck findet sie in der zweiten Maxwellschen Hauptgleichung. In integrierter Form lautet sie (Fassung II):

„Die elektrische Umlaufspannung ist gleich der zeitlichen Abnahme des Induktionsflusses.“

3. Stehen nun die Vorstellungen I und II miteinander im Einklang oder widersprechen sie sich? Solange man nur Augen für den elektrischen Strom im Drahte hat, führen beide Vorstellungen zu demselben Ergebnis. Wird aber das elektrische Feld außerhalb der Drähte in die Betrachtung einbezogen, so stehen sie in Widerspruch. Die Vorstellung I erfordert außerhalb des Drahtes immer ein wirbelfreies, die Vorstellung II immer ein

¹⁾ Ich verdanke die Anregung zu diesem Aufsatz meiner Mitarbeit beim AEF. Wiederholt sind dort Vor- und Nachteile der verschiedenen Möglichkeiten der Definition der induzierten EMK zur Sprache gekommen, so daß in den Abschnitten 1—4 im wesentlichen nur die Darstellung von mir stammt. Im Abschnitt 5 dürfte der Vergleich mit dem magnetischen Felde, das wir Ingenieure uns gut maxwellsch vorzustellen gewohnt sind, manchem willkommen sein. Der vorliegende Aufsatz ist namentlich durch Aussprache mit Herrn Emde und K. W. Wagner gefördert worden.

wirbelhaftes Feld. Es liege z. B. der Fall¹⁾ vor, daß ein Kupferring durch einen magnetisierten konzentrisch angeordneten Eisenzyylinder induziert werde (Fig. 1). Das induzierte Element (die induzierte EMK) hätte man sich hier aus Symmetriegründen auf dem ganzen Kreisringe gleichmäßig verteilt vorzustellen. Das zugehörige elektrische Feld außerhalb des Drahtes verschwindet alsdann genau so, wie wir es bei einer kreisringförmig gebogenen Zambonischen Säule oder etwa bei einer kreisringförmig aufgestellten kurzgeschlossenen Akkumulatorenbatterie von großer Zellenzahl²⁾ erwarten müssen. Dagegen führt die Vorstellung II für das Drahtäußere auf ein von Null verschiedenes elektrisches Feld. Die elektrischen Kraftlinien bestehen aus konzentrischen Ringen (Fig. 2). Nun unterliegt es nach unseren Erfahrungen keinem Zweifel, daß außerhalb des Kupferinges ein elektrisches Feld vorhanden sein muß. Nicht alle, wohl aber ein Teil der Folgerungen der Vorstellung I steht daher mit der Erfahrung im Widerspruch. Eine physikalische Existenz kann die induzierte EMK somit nicht haben³⁾. Der Vorstellung I kann daher nun der Rang einer Hilfsvorstellung mit beschränktem Anwendungsgebiet zukommen.

4. **Folgerungen.** Die induzierte EMK ist eine eingeprägte EMK (ein eingeschaltetes Element), die wir uns beim Induktionsvorgange zur Berechnung des induzierten Stromes in einen linearen Leiter hineingetragen denken können, der dann aber eine physikalische Existenz nicht zukommt.

Bei der Vorstellung I redet man von dem, was nach der Meinung mancher Fachgenossen da sein soll. Bei der Vorstellung II redet man von dem, was wirklich da ist. Vom rein wissenschaftlichen Standpunkte aus geurteilt, sollte man allein die Vorstellung II empfehlen, dagegen die Vorstellung I mitsamt der induzierten EMK der Geschichte überweisen. Für den Augenblick aber scheint dies zu gewagt zu sein, da die induzierte EMK noch zu fest im Sprachgebrauche wurzelt und die Vorstellung II noch nicht einer großen Zahl von Fachgenossen geläufig ist. Will man für das jetzige Zeitbedürfnis die induzierte EMK definieren, so kann man dies auf folgende Weisen tun:

A. Man hält an der Vorstellung I als einer Hilfsvorstellung fest und versteht unter der induzierten EMK eine eingeprägte EMK, der aber eine physikalische Existenz nicht zukommt (vgl. oben).

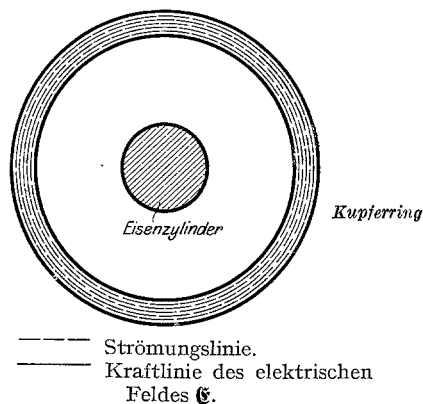


Fig. 1. Induktion eines Kupferinges nach der alten Vorstellung.

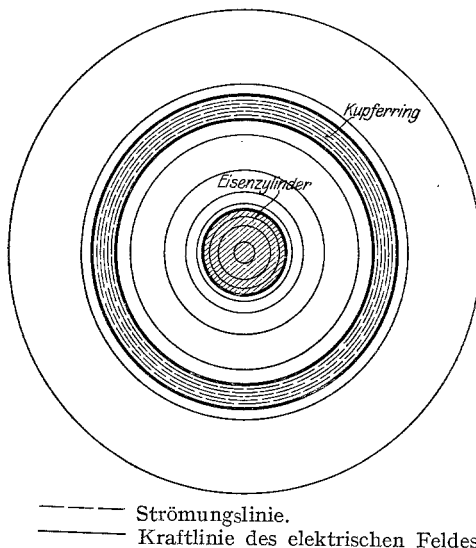


Fig. 2. Induktion eines Kupferinges nach der heutigen Vorstellung.

¹⁾ Das Beispiel stammt von Emde.

²⁾ Die Berührung einer solchen kurzgeschlossenen Akkumulatorenbatterie ist ungefährlich. Wird der Kurzschluß dagegen geöffnet, so kann die Berührung der Öffnungsstelle bei genügender Zellenzahl wegen des dann dort vorhandenen elektrischen Feldes mit Lebensgefahr verbunden sein.

³⁾ Vgl. F. Emde, E. u. M. 1909, S. 786 Ende des zweiten Abschnittes.

B. Man gibt die Vorstellung I auf, behält aber das Wort induzierte EMK bei, bezeichnet aber mit demselben abweichend vom Vorschlage A eine mit der Vorstellung II verträgliche Größe. Man tut dies in der Absicht, eine Übergangsstufe von Vorstellung I zu II zu schaffen. Man kann nun unter der induzierten EMK verstehen:

1. die Umlaufspannung im wirklichen elektrischen Felde;
2. die Umlaufspannung im reinen Wirbelanteile des elektrischen Feldes¹⁾;
3. die zeitliche Änderung des Induktionsflusses.

Der Vorschlag A hat den Vorteil, daß er bei der üblichen Elementauffassung der induzierten EMK bleibt, aber den Nachteil, daß zu leicht übersehen wird, daß diese induzierte EMK keine physikalische Existenz hat. Der Vorschlag A kann daher zu der Frage nach der induzierten EMK pro Leiterelement und zu falschen Vorstellungen vom elektrischen Felde verführen (vgl. oben).

Der Vorschlag B₁ hat den Vorteil der Einfachheit und weiter den Vorteil, daß er eine reelle elektrische Größe unter der induzierten EMK versteht, und daß er die Wortfassungen I und II des Induktionsgesetzes in Einklang bringt. Während man aber bisher (Vorschlag A) gewohnt war, die induzierte EMK in den Teilen der Drahtleitung zu suchen, wo das magnetische Feld seine kräftigsten Werte hat, wird man nach der Definition B₁ den Hauptteil dieser induzierten EMK dort suchen müssen, wo das elektrische Feld seine kräftigsten Werte hat (z. B. zwischen den Klemmen eines Transformators).

Der Vorschlag B₂ vereinigt sämtliche Vorzüge des Vorschlags B₁, ohne dessen Nachteil in Kauf zu nehmen²⁾. Er würde am besten geeignet sein, die Vorstellungen I und II miteinander zu verquicken. Er setzt aber zu viel theoretisches Rüstzeug voraus, so daß er praktisch nicht in Betracht kommt.

Der Vorschlag B₃ hat ebenfalls den Vorteil der Einfachheit. Seine Nachteile sind, daß er 1. eine magnetische Größe unter der induzierten EMK versteht, und 2. daß nach ihm ähnlich wie unter B₁ die induzierte EMK außerhalb des Drahtes zu suchen ist.

Die Vorschläge B tragen den Charakter einer halben Maßregel. Es ergibt sich ein für den Verstand schmerzlicher Widerspruch, wenn der Klang des Wortes „induzierte EMK“ auf die Vorstellung I, die Definition aber auf die Vorstellung II hinweist.

5. Eine Analogie Es soll noch die Frage angeschnitten werden, ob voraussichtlich die Vorstellung I und die induzierte EMK beibehalten werden, oder ob sie im Laufe der Zeit aus der Denk- und Sprechweise verschwinden werden. Bei der Antwort wird man die Schwierigkeiten abzuschätzen haben, die eine allgemeine Anwendung der Vorstellung II erfordern wird. Es soll nachgewiesen werden, daß solche Schwierigkeiten, wenn sie wirklich bestehen sollten, von der Fachwelt bereits auf einem anderen Gebiete überwunden worden sind.

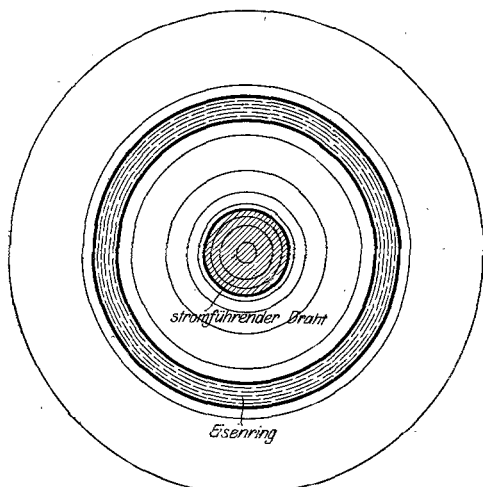
Es sei eine bestimmte Gleichströmung i_h gegeben und eine bestimmte Raumanordnung der Permeabilität μ vorgeschrieben. Jeder Physiker und Ingenieur ist heute in der Lage, das Feld der Induktion \mathfrak{B}_h und das zugehörige magnetische Feld \mathfrak{S}_h den großen Zügen nach anzugeben. Das Feld \mathfrak{S}_h ist durch folgende Forderungen an die Gleichströmung i_h gekettet:

1. Die Umlaufspannung von \mathfrak{S}_h ist gleich der Durchflutung (dem Flusse von i_h).
2. Der Fluß von $\mu \mathfrak{S}_h$ hat an allen Stellen einer Kraftröhre denselben Wert.

¹⁾ Ähnlich wie man ein beliebiges magnetisches Feld \mathfrak{S} zerlegen kann in ein Feld, welches nur von den elektrischen Strömen in Abwesenheit von Eisen hervorgebracht wird (reiner Wirbelanteil), und in ein zweites, welches seine Existenz den in oder auf dem Eisen influenzierten magnetischen Belegungen verdankt (reiner Quellenanteil), kann man auch jedes andere Vektorfeld und somit auch das elektrische Feld \mathfrak{E} in einen Wirbelanteil und Quellenanteil zerlegen. Der reine Wirbelanteil würde dann von einem Magnetfelde induziert werden, wenn die Leitfähigkeit sämtlicher Körper null wäre und wenn sämtliche Körper die gleiche Dielektrizitätskonstante besäßen.

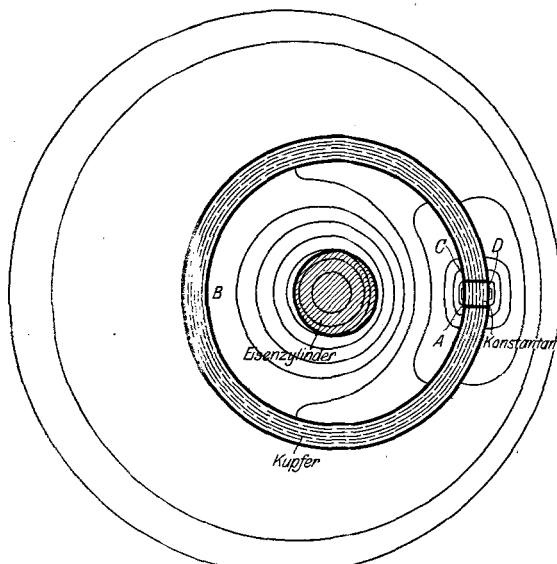
²⁾ Man vgl. Lenz, Archiv f. Elektrot. II, S. 67.

Wir setzen nun, eine neue Aufgabe anschnend, ein zeitlich veränderliches Induktionsfeld \mathfrak{B} (dieses darf nicht mit \mathfrak{B}_h verwechselt werden) voraus. Im Raume sei leitendes Material (Leitfähigkeit σ) in Form von Drähten verteilt. Es werde



— — — Induktionslinie.
— — — Linie der magnetischen Feldstärke \mathfrak{H} .

Fig. 3.



— — — Strömungslinie.
— — — Linie der elektrischen Feldstärke \mathfrak{E} .

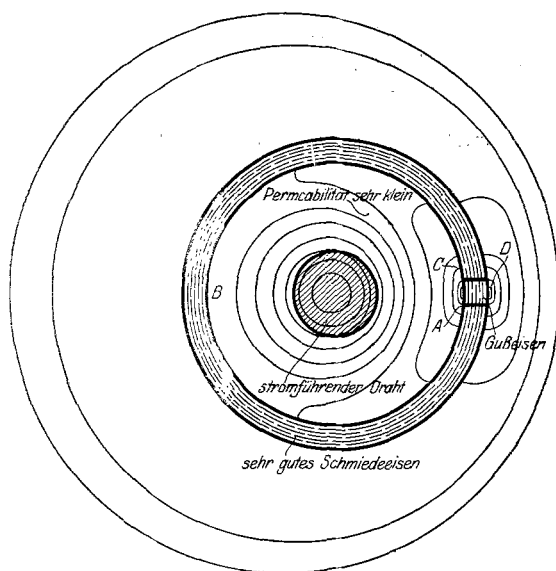
Fig. 4.

eine so kurze Zeitspanne in Betracht gezogen, daß $\frac{\partial \mathfrak{B}}{\partial t}$ als konstant angesehen werden kann. (Später lassen wir diese Voraussetzung fallen.) Gesucht ist das elektrische Feld \mathfrak{E} der Induktion. Dieses ist durch folgende Forderungen an das Feld $\frac{\partial \mathfrak{B}}{\partial t}$ gekettet:

1. Die Umlaufspannung von \mathfrak{E} ist gleich dem magnetischen Schwunde¹⁾ (dem Flusse von $\frac{\partial \mathfrak{B}}{\partial t}$).
2. Der Fluß von $\sigma \mathfrak{E}$ hat an allen Stellen einer Kraftröhre denselben Wert.

Mit diesen Forderungen vergleichen wir die obigen Forderungen. Es wird eine völlige Übereinstimmung erzielt, wenn das Vektorfeld \mathfrak{i}_h dem Vektorfelde $\frac{\partial \mathfrak{B}}{\partial t}$, die Permeabilität μ der Leitfähigkeit σ , die Feldstärke \mathfrak{H}_h der Feldstärke \mathfrak{E} entspricht.

Geben wir daher der Gleichströmung \mathfrak{i}_h im vorigen Abschnitt überall den Wert von $\frac{\partial \mathfrak{B}}{\partial t}$ und legen wir der Permeabilität μ überall den Wert σ der elektrischen



— — — Induktionslinie.
— — — Linie der magnetischen Feldstärke \mathfrak{H} .

Fig. 5.

¹⁾ Eine Bezeichnung, die bisher nur innerhalb AEF, aber noch nicht öffentlich vorgeschlagen worden ist.

Leitfähigkeit bei, so stimmt das Feld \mathfrak{S}_h mit dem gesuchten Felde \mathfrak{C} der Induktion überein.

Z. B. werde ein homogener Kupferring durch einen konachsal angeordneten Eisenzylinder induziert (Fig. 1). Dann verlaufen die Feldlinien \mathfrak{C} genau so, wie die Linien \mathfrak{S} bei einem Eisenring, der durch einen geraden Draht magnetisiert wird (vgl. Fig. 2. u. 3). Ist der Ring nicht homogen, sondern besteht er auf der Länge A B C aus gut leitendem, auf der Länge C D A aus schlecht leitendem Material (Fig. 4), so stimmt das induzierte Feld \mathfrak{C} praktisch überein mit dem magnetischen Felde \mathfrak{S} eines Ringes aus magnetisch sehr gutem Schmiedeeisen und einem Zwischenstücke aus Gußeisen (praktisch ist dies das Feld des geschlitzten Ringes)¹⁾. (Fig. 5.)

Will man den Induktionsvorgang nicht nur für eine kurze, sondern für eine längere Zeitspanne verfolgen, so teilt man die letztere in eine Reihe von kurzen Teilabschnitten und erhält für jeden ein besonderes Bild des induzierten elektrischen Feldes. Sämtliche Bilder werden ihren wesentlichen Zügen nach unter sich übereinstimmen, sich aber in quantitativer Hinsicht unterscheiden.

Die Oberfläche des magnetisierten Eisens belädt sich mit magnetischen Mengen. Die Oberfläche des induzierten Drahtes belädt sich mit elektrischen Mengen. Die Stärke dieser Ladung wird im allgemeinen von Zeitabschnitt zu Zeitabschnitt sich ändern: dies erfordert, daß außer der gewöhnlich betrachteten induzierten Längsströmung auch eine Querströmung im Drahte vorhanden sein muß. Auch über solche Feinheiten kann man sich an Hand der entwickelten Analogie rasch ins Klare setzen.

Niemand spricht heutzutage bei der Magnetisierung von Eisen durch den elektrischen Strom von einer „induzierten magnetomotorischen Kraft“. Ihre Einführung würde einen bedenklichen Rückschritt bedeuten. Niemand braucht bei dem Induktionsvorgange von einer induzierten EMK zu sprechen. Ihre Ausmerzung würde ein wissenschaftlicher Fortschritt sein.

¹⁾ Ein weiteres Beispiel zu dieser Analogie findet sich in meiner Arbeit über den Wechselstrommotorzähler; Archiv f. Elektrot. I. S. 205.