

# Elektromagnetische Induktion in neuer Perspektive

Hermann Härtel  
 Gastwissenschaftler am  
 Institut für Theoretische Physik und Astrophysik- ITAP  
 Universität Kiel

Die englische Originalfassung dieses Artikels erschien in  
 European Journal of Physics Education, Volume 9 Heft 2

## Zusammenfassung

Die bekannte historische Entwicklung des Elektromagnetismus, stark beeinflusst durch die Arbeit von Faraday und Maxwell, hat zur Einführung des Magnetfeldes als wichtige Komponente zur Erklärung der verschiedenen Phänomene der elektromagnetischen Induktion geführt.

Diese historische Entwicklung wird in Form eines Gedankenexperiments mit einem möglichen anderen Verlauf verglichen, in dem die Arbeit von Ampere und Weber die weiteren Entwicklungen mit weitreichenden Konsequenzen beeinflusst hätten.

An zwei Beispielen wird gezeigt, wie Webers Arbeit zur Erklärung des Phänomens Selbstinduktion sowie der Wechselwirkung zwischen parallelen stromführenden Leitern eingesetzt werden kann. Die Quelle für weitere Informationen zur Erklärung verschiedener Induktionsphänomene wie gegenseitige Induktion und unipolare Induktion wird angegeben.

## Die Geschichte der Elektromagnetischen Induktion

Schlägt man in den geläufigen Lehrbüchern jeweils das Kapitel "Elektromagnetische Induktion" auf, so findet man - wenn überhaupt - eine weitgehend einheitliche Darstellung der geschichtlichen Entwicklung dieses Teilgebietes der Physik. Sie, diese Geschichte, begann im Jahr 1819, als Oersted beobachtete, - wie es heißt zufällig - dass eine Magnetnadel durch einen elektrischen Strom abgelenkt wird. Damit wurde deutlich, dass es einen Zusammenhang gibt zwischen dem seit vielen Jahrhunderten bekannten Gebiet des natürlichen Magnetismus und dem damals neuen Phänomen des elektrischen Stromes. Diese Erkenntnis erregte großes Interesse in der damaligen Fachwelt und veranlasste besonders Faraday, diesen Zusammenhang zu untersuchen. Schon im folgenden Jahr (1821) veröffentlichte er seine ersten Resultate (Faraday 1821), die schließlich zu dem Ergebnis führten, welches heute als „Faradaysches Gesetz“ bekannt ist (Faraday 1832). In amerikanischen Lehrbüchern kann man lesen, dass zeitgleich von dem amerikanischen Physiker Joseph Henry (1797-1878) die gleichen Ergebnisse gefunden wurden.

Die Entwicklung kam dann zu einem gewissen Abschluß, als im Jahr 1864 Maxwell seine berühmten „Maxwellschen Gleichungen“ aufstellte, die Existenz von Wellenausbreitung im Raum vorhersagte und diese von dem Experimentator Herz bestätigt wurde.

Hinzu kamen dann noch weitere Gesetze wie das Biot-Savarsche Gesetz, das Ampèresche Gesetz und das Lorentzsche Kraftgesetz bzw. die Lorentzkraft.

Die entsprechenden Gleichungen sind allgemein bekannt und brauchen daher hier nicht aufgelistet zu werden.

All diesen Gesetzen bzw. Gleichungen ist gemeinsam, dass das Feldkonzept als grundlegend akzeptiert wird und damit die bis dahin vorherrschenden Fernwirkungstheorien gegenüber einer Nahwirkungstheorie in Mißkredit gerieten. Weiterhin gilt in all diesen Gesetzen das Magnetfeld bzw. der magnetische Fluß als der entscheidende Partner in der Wechselwirkung mit den elektrischen Phänomenen, wie bewegte Ladungsträger, oder elektrische Felder.

## Eine mögliche andere Geschichte- als Gedankenexperiment

Wenn es stimmt, dass Oerstedt seine Entdeckung zufällig gemacht hat, dann scheint es unter dieser Voraussetzung erlaubt zu sein, sich einen anderen Verlauf der geschichtlichen Entwicklung als Gedankenexperiment vorzustellen. Wie sich zeigen wird, hätten sich daraus recht weitreichende Konsequenzen ergeben können.

In dieser anderen Geschichte muß zunächst angenommen werden, dass Oerstedt seine Entdeckung im Jahr 1819 nicht gemacht hätte. Die Magnetnadel befand sich vielleicht etwas weiter entfernt von dem betreffenden Stromkreis. Dann wäre Faraday damals nicht dazu angeregt worden, sich diesem neuen Phänomen zuzuwenden.

Neben Faraday wurde damals auch der französische Physiker Ampère von der Entdeckung Oerstedts in seinen physikalischen Aktivitäten beeinflusst und diese Beeinflussung wäre dann ebenfalls unterblieben.

Hier wird nun die neue, gedachte Geschichte weitergeführt, in der angenommen werden soll, dass Ampère, aus welchen Gründen auch immer, seine damals durchgeführten Experimente auch ohne die Entdeckung Oerstedts durchgeführt hätte.

Schon im Jahr 1820 stellte Ampère fest, dass zwei parallele stromführende Leiter miteinander wechselwirken, dass sie sich je nach Stromrichtung entweder anziehen oder abstoßen (Ampère 1820). Ampère deutete diese Wechselwirkung und alle anderen, von Faraday entdeckten Phänomene von vorne herein als Wechselwirkung zwischen infinitesimalen Stromelementen. Es gelang ihm, auf der Basis selbst durchgeführter Experimente und unter Verwendung diverser, neu entwickelter Meßvorrichtungen, für diese Wechselwirkung ein Gesetz zu formulieren - das ursprüngliche Ampèresche Gesetz - das ihm erlaubte, quantitative Aussagen über die Wechselwirkung zwischen zwei Stromkreisen bei beliebiger Ausrichtung im Raum zu machen [(Ampère, 1822).

Dieses Kraftgesetz hat eine kompliziertere Form als beispielweise das Gravitationsgesetz oder das Coulombgesetz, da es die Beziehung dreier, beliebig im Raum angeordneter Winkel beinhaltet. Es fand aber damals relativ große Anerkennung, wie aus dem folgenden Zitat einer Äußerung von Maxwell hervorgeht (Maxwell, 1954).

„The experimental investigation by which Ampère established the law of the mechanical action between electric currents is one of the most brilliant achievements in science. The whole, theory and experiment, seems as if it had leaped, full grown and full armed, from the brain of the ‘Newton of Electricity’. It is perfect in form, and unassailable in accuracy, and it is summed up in a formula from which all the phenomena may be deduced, and which must always remain the cardinal formula of electro-dynamics.“

Zwei Punkte sind bei der Beurteilung von Ampères Arbeit wichtig. Zum einen bestand Ampère darauf, dass alle in der Natur auftretenden Kräfte dem Newtonschen Prinzip von „Actio gleich Reactio“ in seiner strengen Form unterliegen müssen, d.h. dass es nur anziehende und abstoßende Kräfte geben kann, deren Wirkungslinie mit der Verbindungslinie der wechselwirkenden Partner zusammenfällt.

Zum andern ging Ampère davon aus, dass sämtliche Phänomene des natürlichen Magnetismus auf eine Wechselwirkung zwischen elektrischen Strömen zurückzuführen seien. Er postulierte zur Erklärung der Wirkung eines Dauermagneten die Existenz mikrophysikalischer Ströme im Innern des magnetischen Materials und zur Erklärung des Erdmagnetismus stellte er die Hypothese auf, dass im Erdinnern ein elektrischer Strom vorhanden sei (Ampère, 1822).

Es gibt weitere Aussagen damaliger Physiker mit ähnlich positiver Beurteilung der Ampèreschen Arbeit wie die von Maxwell. So ist es erlaubt anzunehmen, dass die Grundidee Ampères, nämlich die Phänomene der Induktion als Wechselwirkung zwischen elektrischen Strömen aufzufassen, den Lauf der weiteren Entwicklung bestimmt hätten. Ampère führte für dieses Teilgebiet der Physik die Bezeichnung „Elektrodynamik“ ein.

## Was wirklich geschah

Die Geschichte verlief anders. Oersted machte seine Entdeckung als Erster, Faraday folgte mit dem Induktionsgesetz und so stabilisierte sich das, was wir seit dem mit „Elektromagnetismus“ kennzeichnen: das Magnetfeld als wichtiger Partner aller elektromagnetischen Wechselwirkungen, oft ohne zu erwähnen, dass in aller Regel bewegte Ladungen die Ursache für ein Magnetfeld darstellen. Und für die auftretenden Kräfte gilt das Prinzip „Actio gleich Reactio“ nur noch in seiner weichen Form. Betragsmäßig sind Kraft und Gegenkraft in der Regel gleich, aber sie sind nicht mehr gleichgerichtet.

Im Jahr 1846 stellte dann Wilhelm Weber sein Kraftgesetz auf (Weber, 1846). Ausgangspunkt waren für ihn das Faradaysche Gesetz sowie das Ampèresche Gesetz, die beide zunächst unverbunden nebeneinander standen, von denen aber Weber vermutete, dass ihnen ein gemeinsames Fundamentalgesetz der Elektrodynamik zu Grunde liegen müßte. Er entwickelte eine beeindruckende Meßapparatur - ein feinmechanisches Meisterwerk - mit dessen Hilfe er die Wechselwirkung zweier um die gleiche Achse drehbar aufgehängter Leiterkreise mit großer Präzision bestimmen konnte. Und da Weber nicht nur ein großartiger Experimentator, sondern zugleich ein ebenso großartiger Theoretiker war (er war Musterschüler und Assistent von Gaus), gelang es ihm, aus seinen Messungen das vermutete Fundamentalgesetz abzuleiten (Weber 1846). Dieses Gesetz ist eine Erweiterung des Coulombgesetzes, und das heißt zunächst: es gilt, wie in der Elektrostatik, das Newtonsche Actio/Reactio-Prinzip in seiner strengen Form: Die Kräfte zwischen wechselwirkenden Partnern sind nicht nur gleich groß, sondern wirken stets ausschließlich in Richtung der Wechselwirkungspartner. Neu sind zwei additive Glieder, von denen das erste den Faktor  $v^2/c^2$  enthält, das zweite den Faktor  $a/c^2$ .

Das Webersche Fundamentalgesetz beschreibt die gegenseitige Kraft  $F_{1>2}$  (Kraft von  $q_1$  auf  $q_2$ ) "und  $F_{2>1}$  (Kraft von  $q_2$  auf  $q_1$ ) zwischen zwei Ladungsträgern  $q_1$  und  $q_2$  im gegenseitigen Abstand  $r_{12}$  und lautet:

$$\vec{F}_{1>2} = \frac{q_1 q_2 r_{12}^0}{4\pi\epsilon_0 r_{12}^2} \left( 1 - \frac{v_{12}^2}{2c^2} + \frac{r_{12} a_{12}}{c^2} \right) = -F_{2>1}$$

Die Größen  $v_{12}$  ( $dr/dt$ ) und  $a_{12}$  ( $d^2r/dt^2$ ) bedeuten die relative Geschwindigkeit bzw. die relative Beschleunigung zwischen den Wechselwirkungspartnern. Die Größe  $r_{12}^0$  bezeichnet den Einheitsvektor für die Verbindungsstrecke zwischen den Wechselwirkungspartner. Die zunächst von Weber eingeführte Konstante  $c$  wurde später durch ihn zusammen mit Kohlrausch experimentell bestimmt als übereinstimmend in Dimension und Größe mit der Lichtgeschwindigkeit (Weber, Kohlrausch, 1857). Daraus folgt, dass alle Änderungen, die sich durch dieses Webersche Gesetz im Vergleich zum Coulombgesetz ergeben, sehr klein sind und somit in ihrer Größenordnung vergleichbar mit allen sonstigen magnetischen Effekten.

Ein häufig zu hörender und schon sehr früh erhobener Einwand gegen das Webersche Gesetz betrifft die Frage nach der Unterscheidung zwischen Fernwirkung und Nahwirkung.

Spätestens nach der Aufstellung der Maxwell'schen Gleichungen und den Experimenten von Herz war bekannt, dass Wellen im Raum möglich sind und somit sich eine Änderung elektrischer Größen an einem Ort kontinuierlich in Raum und Zeit ausbreitet, eine Nahwirkungstheorie also zugrunde gelegt werden sollte.

Das Webersche Kraftgesetz ist in diesem Sinne ein Fernwirkungsgesetz. Es macht keine Aussagen darüber, wie sich eine Änderung im Raum ausbreitet, d.h. wie sich z.B. die betragsmäßige Gleichheit von  $F_{12}$  und  $F_{21}$  einstellt. Allerdings ist es nicht korrekt, aus dem Gesetz abzuleiten, dass hier vorausgesetzt wird, diese Gleichsetzung geschehe gleichzeitig, also mit unendlicher Geschwindigkeit. Vielmehr waren es unabhängig voneinander Weber und Kirchhoff, die schon 1857 über mögliche Spannungs/Stromänderungen längs eines Leiters nachdachten und auf der Basis des Weberschen Kraftgesetzes die heute als Telegraphenleitung bekannte Gleichung ableiteten. (Kirchhoff 1857). Weber sagte voraus, dass sich eine Spannungs-Stromänderung längs eines Leiters mit dem Widerstand Null mit Lichtgeschwindigkeit ausbreitet.

Von einem Leiter mit  $R=0$  ist es nicht mehr weit bis zu einer Wellenausbreitung im Raum. Allerdings wurde zur Zeit Webers die Äthervorstellung allseits vorausgesetzt und über die Eigenschaften des Äthers gab es keine gesicherten Erkenntnisse.

In seiner ersten größeren Abhandlung von 1846 zeigte Weber, dass sich von seinem Gesetz das Faradaysche Gesetz sowie das Ampèresche Gesetz ableiten lassen.

Im Folgenden wird gezeigt, wie aus dem Weberschen Gesetz das Phänomen der Induktion sowie die Wechselwirkung zwischen parallelen stromführenden Leitern abgeleitet werden kann und zwar nur unter Verwendung graphischer Methoden mit dem Ziel einer qualitativen Veranschaulichung.

## Das Webersche Gesetz und das Phänomen der gegenseitigen Induktion

Betrachten werden zwei Abschnitte von zwei getrennten geschlossenen Stromkreisen, einem Primärkreis P und einem Sekundärkreis S mit der gleichen Anzahl positiver Gittereinheiten und freien Elektronen pro Längeneinheit (Abb.1). Der Einfachheit halber wird angenommen, dass durch das Anlegen einer externen Spannung an den Stromkreis P alle freien Elektronen dieses Kreises gleichmäßig aus der Ruhe beschleunigt werden.

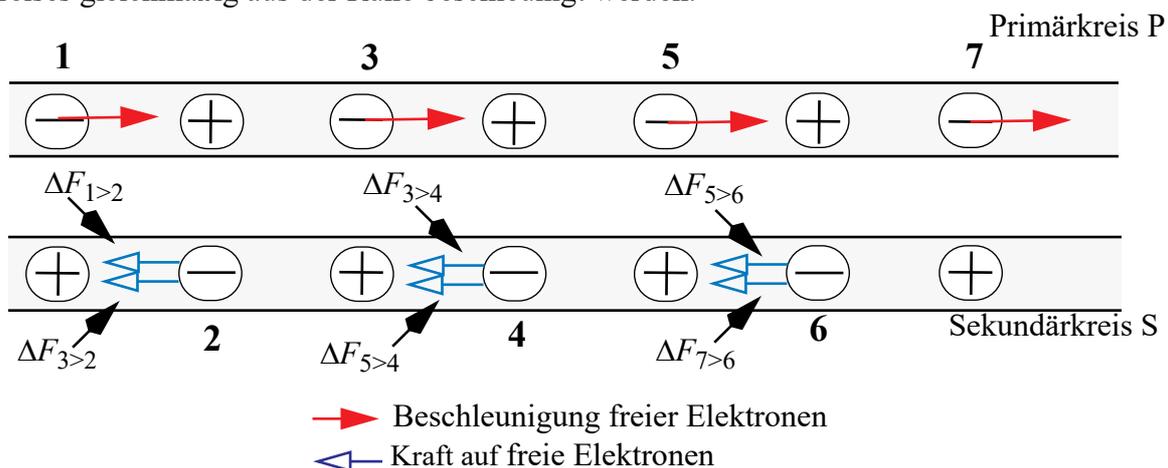


Abb.1: Ausschnitt aus 2 getrennten Stromkreisen mit beschleunigten Elektronen in P (siehe Text).

Betrachtet wird nun die Wechselwirkung zwischen dem beschleunigten Elektron 1 des Primärkreises P und dem anfangs stationären Elektron 2 des Sekundärkreises S.

Die Beschleunigung, von Elektron 2 in S aus gesehen, ist negativ (der Abstand wird verringert). Bei der Anwendung der Weberschen Gleichung mit  $v_{\text{rel}} = 0$  auf diese Situation ist nur das Beschleunigungsglied maßgebend. Daher ergibt sich aus der Weberschen Gleichung eine Verringerung der abstoßenden Wechselwirkung zwischen 1 und 2.

Da die Wechselwirkung mit allen benachbarten Leiterelementen nicht verändert wird, bedeutet diese Reduktion eine beschleunigende Kraft  $= \Delta F_{1>2}$  entgegen der Richtung der beschleunigten Elektronen im Primärkreis.

Betrachtet man nun die Wechselwirkung zwischen dem beschleunigten Elektron 3 im Primärkreis und dem anfangs stationären Elektron 2 im Sekundärkreis, so ist diese Beschleunigung von 2 aus gesehen positiv (der Abstand nimmt zu). Dies führt laut Weber zu einer Erhöhung der Abstoßungskraft zwischen 3 und 2  $= \Delta F_{3>2}$ . Die gleichen Überlegungen können auf die Wechselwirkungen, wie in Abbildung 1 gezeigt, zwischen den beschleunigten Elektronen 3, 5 und 7 sowie den anfangs stationären Elektronen 4 und 6 usw. im Sekundärkreislauf S angewendet werden. Für all diese Elektronen addieren sich diese zwei veränderten Wechselwirkungen zu einer beschleunigenden Kraft entgegen der Richtung des sich entwickelnden Stromes im Primärkreis, das heißt zu einem induzierten Strom im Sekundärkreis.

Zum Nachweis einer quantitativen Übereinstimmung mit den experimentellen Tatsachen wird auf die Literatur verwiesen (Assis, 1994).

## Das Webersche Gesetz und die Wechselwirkung zwischen parallelen Gleichströmen

In traditionellen Kursen wird die Wechselwirkung zwischen parallelen Strömen auf der Basis von Magnetfeldlinien und einer magnetischen Kraft ( $\sim v \times B$ ) erklärt.

Ergebnis: Parallele stromführende Leiter ziehen sich bei gleicher Stromrichtung an, stoßen sich bei entgegengerichteter Stromrichtung ab.

Beginnend mit dem Weberschen Kraftgesetz lautet die zu beantwortende Frage: Welche Relativgeschwindigkeiten und Relativbeschleunigungen treten zwischen zwei konstanten parallel verlaufenden Gleichströmen auf?

Im Laborsystem lautet die Antwort: Es gibt nur konstante Driftgeschwindigkeiten und keine Beschleunigungen. Bei der Frage nach relativen Größen ist die Antwort eine andere, die mit graphischen Mitteln gefunden werden kann.

Eine Beschleunigung wird graphisch ermittelt, indem zunächst die Geschwindigkeiten an zwei dicht beieinander liegenden Punkten (1) und (2) einer Bahnkurve und damit zu den entsprechenden Zeitpunkten  $t_1$  und  $t_2$  als Vektoren ermittelt werden. Diese werden dann zu einem gemeinsamen Startpunkt verschoben. Ihre Differenz  $\Delta v$  entspricht der mittleren Beschleunigung bezogen auf die Zeitspanne zwischen  $t_1$  und  $t_2$ . Abbildung 1 zeigt dieses Verfahren, welches im Unterricht oft am Beispiel einer Kreisbewegung angewendet wird.

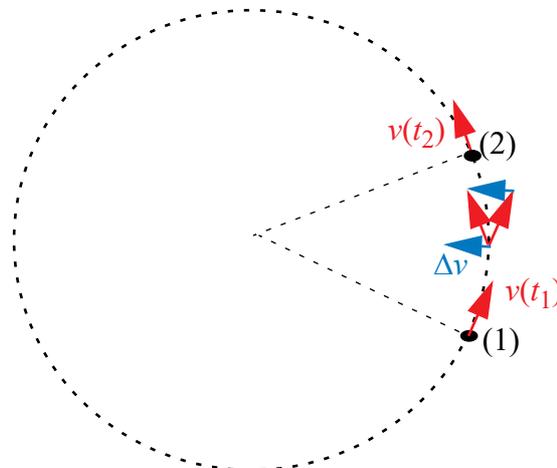


Abb.2: Graphisches Verfahren zur Bestimmung einer Beschleunigung (am Beispiel einer Kreisbewegung)

Bei der Anwendung dieses Verfahrens auf zwei parallele Gleichströme (Fig. 3) kann der Einfachheit halber angenommen werden, dass die Fließgeschwindigkeiten der Elektronen im Leiter 1 und im Leiter 2 gleich groß sind.

Von einem ausgewählten Element A des Leiters 1 aus betrachtet ruhen alle driftenden Elektronen des Leiters (2), während sich alle positiven Ladungsträger (Gitterkomponenten) in diesem Leiter in entgegengesetzter Richtung zum Strom bewegen. In diesem Fall muss also nur die Wechselwirkung zwischen den negativen Elementen des Leiters (1) und den positiven Elementen des Leiters (2) berücksichtigt werden.

Abbildung 3 zeigt die konstanten Driftgeschwindigkeiten der positiven Elemente von Leiter 2 (relativ zum Labor) und die entsprechenden Relativgeschwindigkeiten (relativ zu A).

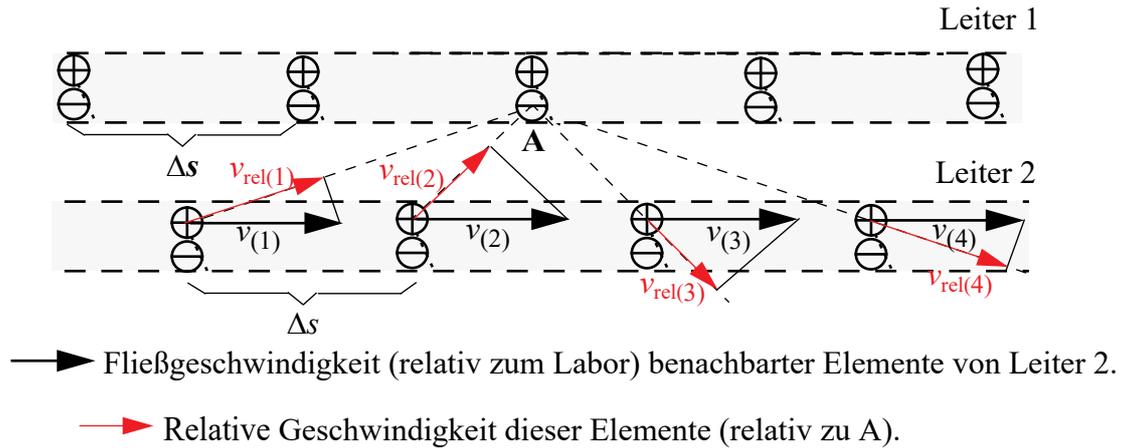


Abb.3: Fließgeschwindigkeiten und relative Geschwindigkeiten von zwei parallelen stromführenden Leitern (siehe Text).

Wird das oben beschriebene graphische Verfahren angewendet, um die Änderung der Relativgeschwindigkeit  $\Delta v$  der ausgewählten positiven Elemente zu bestimmen, die sich entlang einer Strecke  $\Delta s$  während eines konstanten Zeitintervalls  $\Delta t$  bewegen, so erhält man das in Abbildung 4 wiedergegebenen Ergebnis.

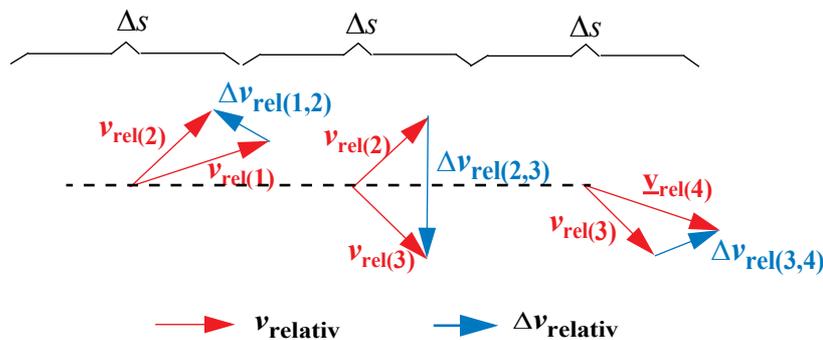


Abb.4: Graphische Bestimmung von  $\Delta v_{\text{rel}}$  zwischen Element A des Leiters (1) und vier ausgewählten Elementen des Leiters (2) (in Bewegung längs  $\Delta s$ ).

Um die relative Beschleunigung aus einem graphisch ermitteltem  $\Delta v$  zu bestimmen, muss das Vorzeichen der Geschwindigkeiten beachtet werden. In der Weberschen Gleichung wird die Richtung von Teilchen 1 zu Teilchen 2 als positiv definiert. Wenn sich Teilchen (2) in Richtung des Teilchens (1) bewegt, nimmt der Abstand ab und seine relative Geschwindigkeit ist negativ. Nimmt der Abstand zu, so ist die Relativgeschwindigkeit positiv.

Ein anderer Punkt, der für ein Arbeiten in einem Laborsystem ungewohnt ist, sollte beachtet werden. Da in der Weberschen Gleichung die relativen Geschwindigkeiten als  $dr/dt$  definiert sind, ist nur eine Abstandsänderung relevant. Eine Änderung der Richtung einer Geschwindigkeit ohne Änderung der Entfernung ist unerheblich. Wendet man dieses Ergebnis auf die verschiedenen  $\Delta v_{\text{rel}}$  von Abbildung 4 an, so ist  $\Delta v_{\text{rel}}$  für alle angegebenen Fälle positiv (siehe Abb. 5).

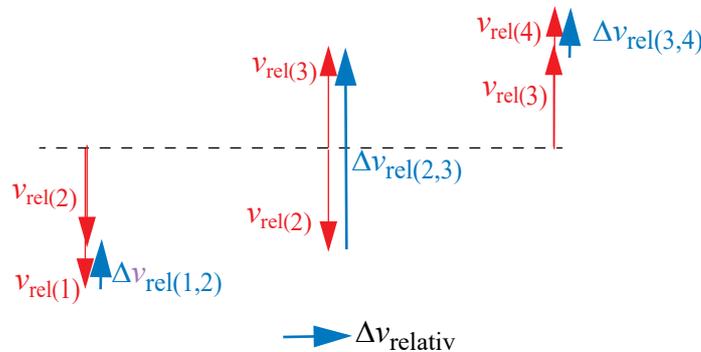


Abb.5: Bestimmung von  $\Delta v_{\text{relativ}}$  unter Beachtung des Vorzeichens von  $\Delta v_{\text{relativ}}$

Diese Betrachtung kann auf alle negativen Elemente des Leiters (1) angewendet werden. Ein positives  $\Delta v_{\text{rel}}$  für ein bestimmtes  $\Delta t$  bedeutet eine positive Beschleunigung.

Eine solche positive Beschleunigung kann als Ergebnis zunächst wegen der konstanten Driftgeschwindigkeit relativ zum Labor überraschen. Zum besseren Verständnis kann es hilfreich sein, eine Situation zu betrachten, in der sich ein Teilchen auf einer Kreisbahn mit dem zweiten Teilchen als Mittelpunkt bewegt. Aus Sicht des Labors gibt es für eine solche Bewegung eine Geschwindigkeit mit ständig wechselnder Richtung und eine konstante radiale Beschleunigung. Von einem der Teilchen aus gesehen ergibt sich jedoch keine Abstandsänderung, keine Relativgeschwindigkeit ( $v_{\text{rel}} = dr/dt = 0$ ) und auch keine Relativbeschleunigung ( $a_{\text{rel}} = d^2r/dt^2 = 0$ ).

Für diese Teilchen gibt es keine Bewegung. Gleiches gilt auch, sollte sich die Geschwindigkeit des kreisenden Teilchens (vom Labor aus betrachtet) ändert, ohne die Kreisbahn zu verändern. Wieder ergibt sich von einem der beiden interaktiven Teilchen aus gesehen keine Relativgeschwindigkeit, keine Relativbeschleunigung und daher auch keine Bewegung.

Für eine Bewegung, bei der ein Partikel das andere Partikel auf einer geraden Linie passiert, existiert jedoch eine nach außen gerichtete, also positive relative Beschleunigung.

Aus der Weberschen Gleichung folgt aus einer positiven relativen Beschleunigung eine Zunahme der anziehenden Wechselwirkung zwischen den negativen und den positiven Elementen der beiden parallelen Leiter.

Neben dem Beschleunigungsglied muss auch das Geschwindigkeitsglied in der Weberschen Gleichung mit  $-v^2/c^2$  berücksichtigt werden. Zu diesem Zweck müssen mathematische Methoden angewendet werden, um über alle relativen Geschwindigkeiten und Beschleunigungen zu integrieren. Diese Berechnung wurde durchgeführt (unter der Annahme unendlich langer Leiter) mit dem Ergebnis, dass das positive Beschleunigungsglied das negative Geschwindigkeitsglied um einen Faktor 3 übertrifft<sup>1</sup>. Da alle anderen Wechselwirkungen unverändert bleiben, folgt auf Grund dieses dominanten positiven Beschleunigungsgliedes aus der Weberschen Gleichung erwartungsgemäß eine anziehende Kraft zwischen zwei parallelen Leitern mit gleicher Strömungsrichtung.

1. Private Mitteilung von Ernesto Martin

Bei antiparallelen Strömen bewegen sich, von A des Leiters (1) aus gesehen, sowohl die positiven als auch die negative Teilchen des Leiters (2) mit unterschiedlichen relativen Fließgeschwindigkeiten. Daher müssen die zu Abbildung 1 und 2 dargestellten Überlegungen verdoppelt werden: erstens für die Wechselwirkung zwischen den freien Elektronen des Leiters (1) und den positiven Gitterelementen des Leiters (2) und zweitens für die Wechselwirkung zwischen den freien Elektronen des Leiters (1) und den freien Elektronen des Leiters (2). Erstere führt zu einer erhöhten Anziehungskraft, letztere zu einer erhöhten Abstoßung. Aufgrund der höheren Relativgeschwindigkeit zwischen den Elektronen in beiden Leitern dominiert die letztere. Daraus folgt erwartungsgemäß eine abstoßende Kraft zwischen zwei parallelen Leitern mit entgegengesetzter Strömungsrichtung.

Die gleichen qualitativen Betrachtungen wie oben gezeigt, können auf der Grundlage der Weberschen Gleichung erfolgreich auf alle bekannten Phänomene der Induktion bzw. der Lorentzkraft angewendet werden, wie Selbstinduktion, sogenannte Bewegungsinduktion, Faradaysches Paradoxon sowie unipolare Induktion. Für weiteren Informationen siehe unter:

<http://www.astrophysik.uni-kiel.de/~hhaertel/PUB/induktion-alternativ.pdf>.

## Diskussion

Ist das Faradaysche Gesetz ein universelles Gesetz oder gibt es Konstellationen, in denen es nicht gilt, in denen aber die Lorentzkraft zur Erklärung benötigt wird? In der heutigen Wissenschaft besteht in dieser Frage kein Konsens.

Es besteht jedoch Einigkeit darüber, dass es keine Alternative zum Faradayschen Gesetz und zur Lorentz-Kraft gibt. Wie aus der Behandlung dieses Themas in allen verfügbaren Lehrbüchern hervorgeht, werden diese als grundlegende Tatsachen oder Naturgesetze aufgeführt, die nicht weiter in Frage gestellt werden müssen.

Nun gibt es eine Alternative, die vor über 150 Jahren von Wilhelm Weber eingeführt wurde, aber in völlige Vergessenheit geraten ist.

Hat diese Tatsache Konsequenzen für den Unterricht? Die Lehrpläne und Prüfungsordnungen lassen hier kaum Spielraum. Was sich jedoch ändern könnte, ist der "Geist", in dem diese Themen behandelt werden.

Vielleicht ist das Gesetz von Faraday kein grundlegendes Naturgesetz, das nicht in Frage zu stellen ist, sondern nur eine Regel, die mehr oder weniger erstaunlich korrekte Ergebnisse liefert, aber niemand weiß, warum.

Vielleicht werden Vorgänge in der Natur durch die Lorentz-Kraft nicht genau so beschrieben, wie sie tatsächlich ablaufen, sondern vielleicht handelt es sich auch hier nur um eine Regel, die erstaunlicher Weise perfekt funktioniert, von der aber niemand weiß, warum.

Ein solcher neuer "Geist" könnte die Schüler daran hindern, nach einem tieferen Zusammenhang zwischen einer Magnetflußänderung und einem ringförmigen elektrischen Feld zu suchen, und könnte im Falle eines wahrscheinlichen Scheiterns verhindern, dass sie das Interesse am weiteren Lernen auf dem Gebiet der Physik verlieren.

## Literatur

Ampère A.M. (1820) *Annales de Chimie et de Physique*, Vol. 15, pp. 59-76 .

Ampère A.-M. (1822) *Expériences relatives à de nouveaux phénomènes électro-dynamiques*. *Annales de Chimie et de Physique*, 20:60–74.

Assis A.K.T. (1994) *Weber's Electrodynamics*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.

Faraday M. On some new electro-magnetical motions, and on the theory of magnetism, *The Quarterly Journal of Science, Literature, and the Arts* 12, 74-96.

Faraday M. (1821) *Experimental researches in electricity*, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, Vol. 122, pp. 125-162 (1832).

Kirchhoff G. (1857) *Annalen der Physik*, Vol. 102, pp. 529-544.

Maxwell J.C.A. (1954) *Treatise on Electricity and Magnetism*, Dover, New York, Vol. 2, article 528, p. 175.

Weber W. (1846) *Elektrodynamische Maassbestimmungen, Über ein allgemeines Grundgesetz der elektrischen Wirkung. Abhandlungen bei Begründung der Königl. Sächs. Gesellschaft der Wissenschaften am Tage der zweihundertjährigen Geburtstagfeier Leibnizens' herausgegeben von der Fürstl. Jablonowskischen Gesellschaft (Leipzig)*, pages 211–378.

Weber W. & Kohlrausch R. (1856) *Annalen der Physik*, Vol. 99, pp. 10-25.