

## Altlasten der Physik (87): Das Streufeld des Transformators

F. Herrmann

### Gegenstand

„Ein elektrisches oder magnetisches Feld, das sich außerhalb einer bestimmten Einrichtung ausbreitet. Das S. kann zu Verlusten oder Störungen führen.“ [1]

„..., der Magnetfluss  $\Phi$  soll ganz im Eisenkern konzentriert sein, d. h. beide Spulen in gleicher Stärke durchsetzen (kein Streufluss).“ [2]

„Dass die Sekundärspannung sich bei genauerer Messung kleiner herausstellt, als die Rechnung erwarten lässt, ist einerseits auf (ohmsche) Wärmeverluste ... zurückzuführen, ... Die andere Ursache ist, dass vom Induktionsfluss in der Primärspule infolge Streuung nur ein Teil durch die Sekundärspule geht.“ [3]

### Mängel

Streifelder lernt man kennen als etwas, das es zu vermeiden gilt. Sie sind im Prinzip nicht notwendig und man darf sie sich, ohne ein fundamentales physikalisches Prinzip zu verletzen, wegdenken. Es ist also ähnlich wie bei der mechanischen Reibung. Auch diese tritt häufig nur als Störeffekt auf, den man zu vermeiden trachtet.

Ein etwas gröberer Vergleich ist ein Leck in einem Gartenschlauch. Der Schlauch mag zwar einige Löcher haben oder an den Schraubverbindungen nicht ganz dicht sein. Diese Lecks lassen sich aber, im Prinzip wenigstens, belie-

big gut schließen. Tatsächlich ist das Entsprechende auch bei Streufeldern oft der Fall. Eine metallische Abschirmung verhindert das Herausquellen eines elektrischen Feldes, eine  $\mu$ -Metall-Verkleidung schließt ein magnetisches Feld ein oder hält ein äußeres magnetisches Feld von einem Gerät fern.

Nun spricht man aber von Streufeldern auch in Fällen, wo die Funktion des Gerätes genau auf diesem Feld beruht. Es gibt dafür mehrere Beispiele, von denen wir hier nur den Transformator ansprechen wollen.

Wir betrachten einen Transformator, wie man ihn aus der Schulsammlung kennt: ein rechteckig-geschlossener Eisenkern, auf dem die beiden Spulen sitzen, Abb. 1a. Wir machen die üblichen Annahmen:

die ohmschen Widerstände der Spulen seien klein gegen die entsprechenden induktiven Widerstände;

der Lastwiderstand sei klein gegen den induktiven Widerstand der Sekundärspule;

der Lastwiderstand sei groß gegen die ohmschen Widerstände der beiden Spulen;

die Permeabilität  $\mu$  des Kernmaterials sei groß gegen 1.

Wir wenden nun auf den Transformator das Ampère'sche Gesetz an. Wir integrieren zunächst über den Weg A:

$$\oint_A \vec{H} d\vec{r} = n_1 I_1.$$

Der Wert des Integrals ist gleich dem Gesamtstrom  $n_1 I_1$ , den der Integrationsweg umschließt. ( $n$  ist die Windungszahl, die Indizes beziehen sich auf die Primär- bzw. Sekundärspule.) Nun ist die magnetische Feldstärke im Innern des Eisenkerns größenordnungsmäßig um den Faktor  $\mu$  kleiner als außerhalb. Da typische  $\mu$ -Werte über 1000 liegen, ist der Beitrag zum Integral auf dem Weg im Eisen gegen den Beitrag außerhalb vernachlässigbar. Zum Wert des Integrals trägt also praktisch nur das „Streifeld“ bei. Wir betrachten nun den Integrationsweg B. Er umschließt beide Spulen. Da er ganz innerhalb des Eisens verläuft, ist das Integral gleich null:

$$\oint_B \vec{H} d\vec{r} = n_1 I_1 - n_2 I_2 = 0.$$

Es folgt die bekannte Beziehung  $n_1 I_1 = n_2 I_2$ . Ohne das „Streifeld“, d. h., wenn dessen Feldstärke null wäre, könnte diese Gleichung nicht gelten.

Man sieht die Wichtigkeit des verunglimpften Feldes aber noch auf eine andere Art. In Abb. 1b sind sowohl die  $H$ -Feldlinien als auch die Feldlinien der elektrischen Feldstärke schematisch eingezeichnet. (Die Flussänderung im Eisenkern ist die Ursache eines elektrischen Wirbelfeldes um die Schenkel des Transformators herum.) Außerdem zeigt die Abbildung den „Poynting-Vektor“  $\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H}$ , d. h. die Energiestromdichte im Feld. Man sieht, dass die Energie von der Primär- zur Sekundärspule durch das Feld fließt. Die Situation ist analog zum Energietransport mit einem normalen elektrischen Kabel, nur sind hier elektrisches und magnetisches Feld gegeneinander vertauscht, Abb. 1c. Da sich die beiden Leitungen auf unterschiedlichem elektrischem Potenzial befinden, laufen elektrische Feldlinien von der einen Leitung zur anderen, und da in den Leitungen ein elektrischer Strom fließt, sind sie von einem magnetischen Wirbelfeld umgeben. Die Energieströmung hat dieselbe räumliche Verteilung wie die im Transformator.

Das (magnetische) Streufeld ist am Energieverlust eines Transformators genau so wenig Schuld wie das (elektrische) „Streifeld“ am Verlust eines elektrischen Kabels. Der Wirkungsgrad wird vielmehr in beiden Fällen begrenzt durch Dissipation. Diese findet beim Transformator außer in den Spulen im Eisenkern statt, nämlich bei der ständigen Ummagnetisierung. Ein Maß für diese Dissipation ist die magnetische Feldstärke im Innern des Eisenkerns. Sie sollte im Idealfall null sein, genau so wie die elektrische Feldstärke in den beiden Drähten eines Kabels im Idealfall eines widerstandslosen Leiters gleich null ist. Da aber die Dissipation in Eisenkernen doch recht hoch ist, macht man bei technischen Transformatoren den Weg von der Primär- zur Sekundärspule möglichst kurz.

## Herkunft

Bei der herkömmlichen Erklärung der Funktionsweise des Transformators betrachtet man nicht die magnetische Feldstärke, sondern beschränkt sich auf die Rolle der magnetischen Flussdichte. Da diese im Eisen sehr viel größer ist als außerhalb, entsteht der Eindruck, das Feld außerhalb habe keine entscheidende Funktion. Dies ist eines von zahlreichen Beispielen dafür, dass die einseitige Beschreibung von magnetischen Feldern durch die Flussdichte zu Fehlvorstellungen führt, siehe auch [4]. Hinzu kommt, dass man bei der Diskussion von Energiebilanzen der nahe liegenden Frage nach dem Verlauf der Energieströmung gern aus dem Weg geht.

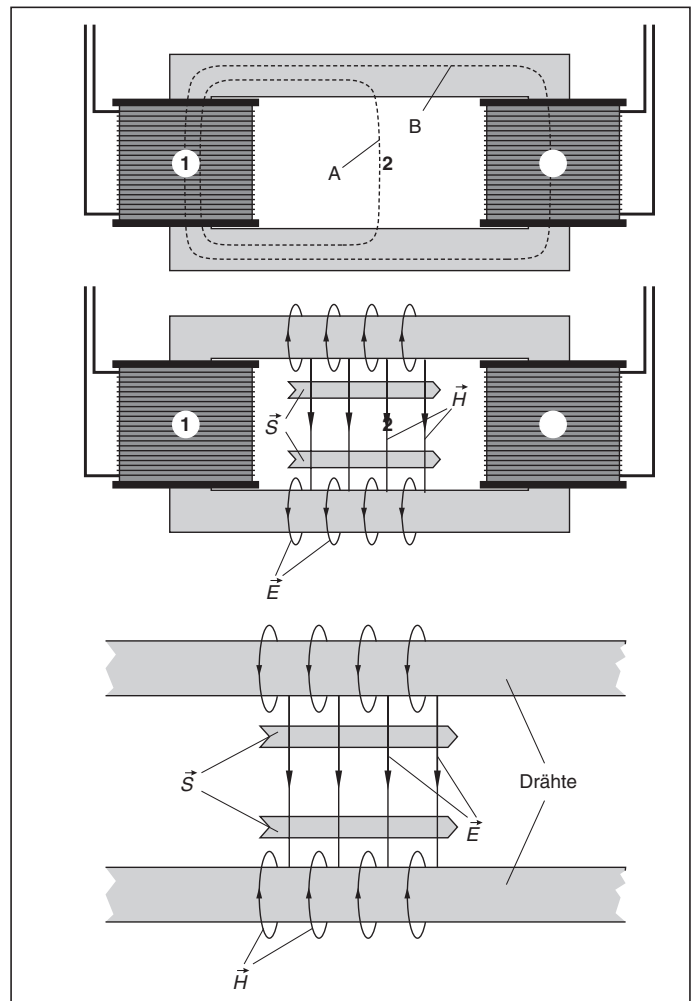


Abb. 1: Nur auf dem Stück des Integrationsweges, das außerhalb des Eisenkerns verläuft, ist die magnetische Feldstärke von null verschieden (a). Felder zwischen den Schenkeln eines Transformators. Der Energiestrom läuft von links nach rechts (b). Felder zwischen den beiden Drähten eines Kabels (c). Der Energiestrom läuft von links nach rechts.

## Entsorgung

1. Man werfe nicht alle „Streifelder“ in einen Topf. Da das Wort „Streifeld“ nun schon mal die Konnotation von etwas Unerwünschtem und Vermeidbarem hat, sollte man das magnetische Feld zwischen den Schenkeln eines Transformators am besten gar nicht als Streufeld bezeichnen.
2. Man diskutiere beim Transformator neben dem Verlauf der Feldlinien der Flussdichte auch den der magnetischen Feldstärke.
3. Man stelle bei möglichst vielen Gelegenheiten die Fragen: „Wo ist die Energie?“ und „Welchen Weg geht die Energie?“

## Literatur

- [1] Internet: <http://www.elektroniknet.de/elex/index.php>
- [2] D. Meschede (Hrsg.): Gerthsen: Physik, 21. Auflage, Springer-Verlag Berlin 2002, S. 414
- [3] A. Friedrich (Hrsg.): Handbuch der experimentellen Schulphysik, Elektrizitätslehre III, Aulis Verlag Deubner & Co KG Köln 1965, S. 70
- [4] F. Herrmann: Altlasten der Physik, Aulis Verlag, Köln 2002, S. 159, S. 163, S. 177

## Anschrift des Verfassers:

Prof. Dr. Friedrich Herrmann, Abteilung für Didaktik der Physik, Universität, 76128 Karlsruhe