

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 54 (1963)
Heft: 11

Artikel: Ummagnetisierungsverluste bei rascher Ummagnetisierung und hohen Feldstärken
Autor: Ritsch, R.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-916486>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 03.04.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Ummagnetisierungsverluste bei rascher Ummagnetisierung und hohen Feldstärken

Von R. Risch, Baden

538.247 : 621.318.43.042.1.017.3

Wattmetrische Messungen bei sehr starken Magnetisierungen, insbesondere bei kurzen Ummagnetisierungszeiten, sind nicht zuverlässig. Es wurden daher die Ummagnetisierungsverluste in Regeldrosselspulen aus kornorientiertem Siliziumeisen für Gleichrichter, bei denen diese Verhältnisse vorliegen, nach einer Erwärmungsmethode gemessen. Durch Vergleich mit wattmetrischen Messungen bei weniger extremen Verhältnissen hat sich diese Methode als auf wenige Prozente genau erwiesen. Die Messungen haben eine weitgehende Unabhängigkeit der Verluste von der Feldstärke oberhalb von 10 A/cm ergeben, sowie eine angenähert lineare Zunahme mit dem reziproken Wert der Ummagnetisierungszeit.

Les mesures wattmétriques ne sont sûres dans le cas de fortes aimantations, surtout lorsque les durées d'inversion d'aimantation sont brèves. On a donc procédé par une méthode d'échauffement à la mesure des pertes par hystérésis magnétique dans des bobines d'inductance de réglage en fer au silicium à grains orientés pour redresseurs, où ces conditions se présentent. Par comparaison avec des mesures wattmétriques, dans certains cas extrêmes, on a constaté que cette méthode est précise, à quelques pour cent près. Les mesures ont montré qu'au-delà de 10 A/cm les pertes ne dépendent que très peu de l'intensité du champ et qu'elles croissent à peu près linéairement avec la réciproque de la durée d'inversion d'aimantation.

1. Einleitung

Die für die Ummagnetisierung von ferromagnetischen Kernen im Wechselstrombetrieb benötigte Leistung — die sog. Ummagnetisierungsverluste — werden in der Regel mit Wattmetern gemessen. Kommt jedoch die Induktion nahe an die Sättigung heran, so wird der Magnetisierungsstrom sehr gross, trotzdem die Ummagnetisierungsverluste in einem viel geringeren Masse ansteigen. Der Leistungsfaktor ist dann sehr klein. Das bedeutet, dass sich der Mittelwert der Leistung über eine Periode aus zeitlich auftretenden positiven und negativen Werten zusammensetzt, die einander fast gleich sind. Der vom Wattmeter angezeigte Mittelwert ist dann eine kleine Differenz grosser Werte, die an sich schlecht bestimmbar ist. Ausserdem ist in diesem Fall auch bei sinusförmiger Spannung der Magnetisierungsstrom sehr stark verzerrt. Innerhalb einer Periode sind die zeitlich nahe liegenden Werte des Stromes sehr verschieden. Daher machen dann schon sehr kleine zeitliche Verschiebungen, einerseits des magnetischen Feldes im Wattmeter gegenüber dem Strom in der Stromspule, und andererseits des Stromes in der Spannungsspule gegenüber der durch die Induktion im Prüfling induzierten Spannung, sehr viel aus. Die erste Verschiebung kann durch Wirbelströme im Wattmeter, die durch die schnellen Stromänderungen gefördert werden, verursacht werden und die zweite durch Induktivitäten im Spannungskreis. Verlustmessungen an Transformatorblechen bei magnetischen Induktionen von mehr als 1,8 T¹⁾ (= 18 kGs) sind daher recht heikel.

2. Verhältnisse bei sinusförmigem Strom

Ähnlich liegen die Verhältnisse, wenn der Kern nicht an einer vorgegebenen, zumindest angenähert sinusförmigen Spannung liegt, sondern wenn der Strom vorgegeben und so gross ist, dass Feldstärken erreicht werden, die den Kern praktisch ganz sättigen. Dann treten sehr rasche Spannungsänderungen auf. Das ist der Fall, wenn ein Belastungskreis mit der Wicklung des Kernes in Serie an eine Spannung angeschlossen ist, die grösser ist als diejenige, welche durch den Sättigungsfluss des Kernes gemäss der Transformatorformel induziert wird:

$$\bar{U} > 4fNA B_s = 4fN \Phi_s \quad (1)$$

worin \bar{U} Mittelwert der Spannung der Quelle, f Frequenz, N Windungszahl des Kernes, A Querschnitt des Kernes, B_s Sättigungsinduktion, Φ_s Sättigungsfluss bedeuten.

Der zeitliche Verlauf von Strom i , Spannung u , Feldstärke H und Induktion B bei rein Ohmscher und rein induktiver Belastung zeigt Fig. 1. Die Quellenspannung U_1 ist als sinusförmig angenommen. Die Kurven sind für kornorientierte Transformatorbleche gezeichnet, bei denen die Remanenzinduktion bei $H = 0$ fast so gross ist wie die Sättigungsinduktion, und die Ummagnetisierung des Kernes daher erst unmittelbar nach dem Nulldurchgang des Stromes erfolgt. (Bei nicht orientierten Blechen beginnt die Ummagnetisierung schon vor dem Nulldurchgang des Stromes.) Abgesehen von der Zeitdauer der Ummagnetisierung verläuft der Strom bei beiden Belastungsarten sinusförmig, nur ist er bei Ohmscher Belastung in Phase mit der Spannung und bei induktiver Belastung um 90° nacheilend. Die anschliessend an den Stromnulldurchgang erfolgende Ummagnetisierung geschieht daher bei Ohmscher Belastung zu Beginn der Halbwellen der Spannung und bei induktiver Belastung in ihrem Scheitel. Während der Ummagnetisierung liegt die Quellenspannung an der Wicklung des Kernes, weil, solange der Kern nicht gesättigt ist, seine Impedanz viel grösser als diejenige der Belastung ist. Am Kern tritt daher bei Ohmscher Belastung eine angenähert dreieckförmige und bei induktiver eine angenähert rechteckige Spannung auf. In beiden Fällen ist jedoch beim gleichen Kern und bei gleicher Windungszahl die Fläche unter diesen Kurven einander gleich. Aus dem Induktionsgesetz:

$$u = -NA \frac{dB}{dt} \quad (2)$$

folgt nämlich für die Fläche unter den Kurven ohne Berücksichtigung des Vorzeichens:

$$\int u dt = NA \cdot \Delta B \quad (3)$$

Verläuft die Ummagnetisierungsschleife zwischen Sättigung und Ummagnetisierung ganz horizontal, so ist $\Delta B = 2B_s$. In Wirklichkeit ist das nicht ganz der Fall, und es kommt ein ΔB zur Wirkung, das etwas kleiner als $2B_s$ ist. Charakteristisch sind bei den hier vorliegenden raschen Ummagnetisierungen die Ummagnetisierungszeiten t_u . Im Rechteckfall ist:

$$\int u dt = NA \Delta B = \hat{U} t_u = \sqrt{2} \cdot U t_u \quad (4)$$

$$t_u = \frac{NA \Delta B}{\sqrt{2} \cdot U} \quad (5)$$

wenn \hat{U} den Scheitelwert bzw. U den Effektivwert der Quellenspannung bedeuten.

¹⁾ T = Tesla, 1 Gs $\hat{=} 10^{-4}$ T = 10^{-4} Wb/m².

Im Dreieckfall ist der Spannungsanstieg gleich der Steigung der Sinuskurve der Quellenspannung im Nullpunkt und somit:

$$\frac{du}{dt} = 2\pi \frac{\hat{U}}{T} = 2\sqrt{2} \cdot \pi \frac{U}{T} = 2\sqrt{2} \cdot \pi Uf \quad (6)$$

wenn T die Periodendauer bedeutet. Daher ist im Dreieckfall:

$$\int u dt = NA \cdot \Delta B = \frac{du}{dt} t_u \frac{t_u}{2} \quad (7)$$

$$t_u = \sqrt{\frac{NA \cdot \Delta B}{\sqrt{2} \cdot \pi Uf}} \quad (8)$$

3. Verhältnisse bei Regeldrosselspulen von Gleichrichtern

Ähnlich liegen die Verhältnisse auch bei Regeldrosselspulen von Halbleitergleichrichtern. Hier bricht die Spannung ebenfalls sehr plötzlich zusammen, und die Feldstärke erreicht daraufhin sehr hohe Werte. Die Schaltung eines solchen Gleichrichters in Dreiphasenbrückenschaltung mit Regeldrosselspulen ist in Fig. 2a dargestellt. In Fig. 2b ist gestrichelt der zeitliche Verlauf der verketteten Spannungen des Transformators und ausgezogen die Gleichspannung gezeichnet, wenn die Regeldrosselspule nicht wirkt. Fig. 2c zeigt den zeitlichen Verlauf der Ströme der Gleichrichterzellen D_1 , D_2 und D_3 im Fall, dass der Gleichstrom vollständig geglättet ist, und dass die Spannungsabfälle in den Zellen vernachlässigbar sind. Der Strom i_2 setzt mit horizontaler Tangente ein, sobald die

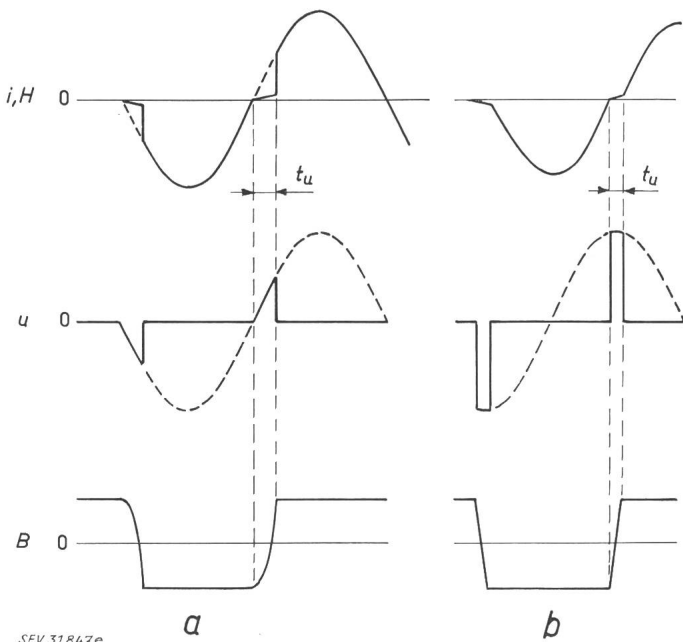
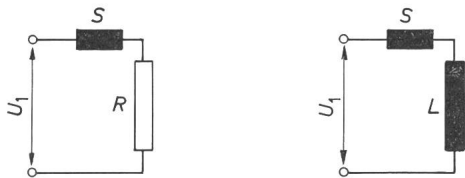
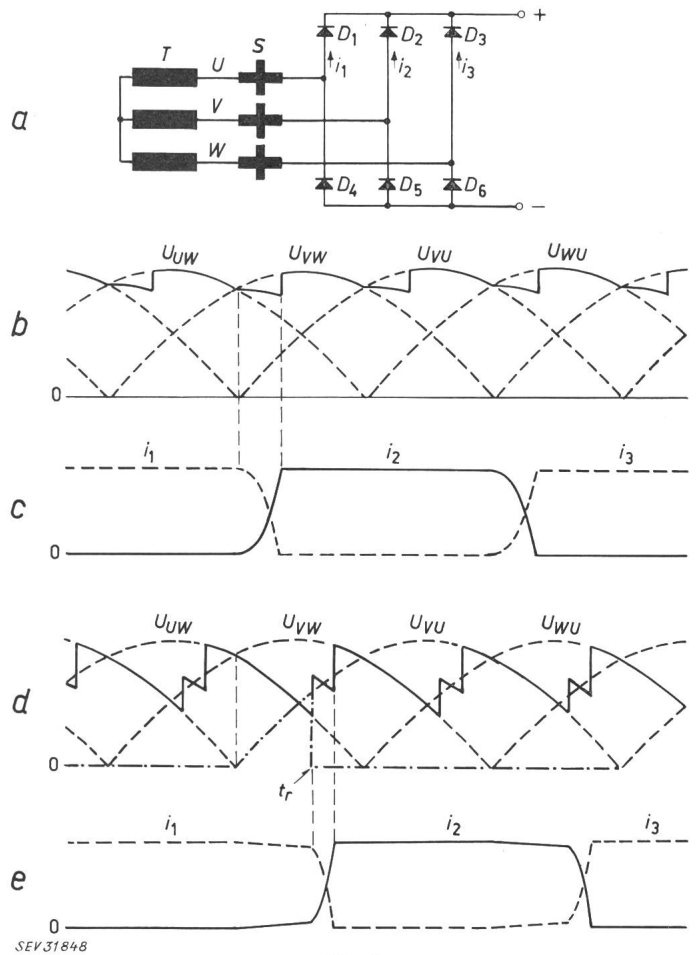


Fig. 1

Zeitlicher Verlauf von Strom i , Feldstärke H , Spannung u und Induktion B bei einem sich sättigenden Kern S , der a in Serie mit einem Widerstand R bzw. b mit einer Induktivität L an einer (gestrichelt eingezeichneten) sinusförmigen Spannung U_1 liegt

t_u Ummagnetisierungszeit



SEV31848

Fig. 2

Strom-Spannungs-Verhältnisse bei Regeldrosselspulen von Gleichrichtern in Dreiphasenbrückenschaltung

- a Schaltschema. T Sekundärseite des Transformators; S Regeldrosselspulen mit Steuerwicklungen; D Gleichrichterzellen
- b verkettete Transformatorspannungen U_{UW} , U_{VW} , U_{VU} usw. (---) und Gleichspannung (—) ohne Wirkung der Regeldrosselspulen
- c Ströme i_1 , i_2 und i_3 in den Zellen D_1 , D_2 und D_3 ohne Wirkung der Regeldrosselspulen
- d verkettete Transformatorspannungen U_{UW} , U_{VW} , U_{VU} usw. (---), Gleichspannung (—) und Spannung an der Regeldrosselspule der Phase V (— · — · —), wenn diese wirksam sind t_r Zeitpunkt der Sättigung der Regeldrosselspule in der Phase V
- e Ströme i_1 , i_2 und i_3 in den Zellen D_1 , D_2 und D_3 , wenn die Regeldrosselspulen wirksam sind

Spannung U_{VW} die Spannung U_{UW} überstiegen hat. Unter dem Einfluss der Differenz U_{VU} dieser beiden Spannungen wächst in der Überlappungszeit i_2 , und i_1 nimmt ab, bis es auf null gesunken ist und i_2 den Wert des Gleichstromes erreicht hat.

Sind die Regeldrosselspulen wirksam, so verläuft die Gleichspannung nach Fig. 2d. Da die Regeldrosselspulen in den Verbindungsleitungen zwischen dem Transformator und dem Gleichrichter liegen, werden sie von Strömen zweier Zellen entgegengesetzter Polarität durchflossen und werden daher dauernd ummagnetisiert. Ihre Windungszahl ist so gross, dass sie schon bei einer kleinen Spannung gesättigt werden. Die Spannung U_{VW} erscheint jetzt, nach ihrem Nulldurchgang im Schnittpunkt der Spannungen U_{UW} und U_{VW} , zunächst an der Regeldrosselspule in der Phase V , genau gleich wie in Fig. 1 bei Ohmscher Belastung. Der Strom i_2 kann dann nicht nach der Kurve in Fig. 2c anwachsen. Die Zelle D_1 führt weiter fast den vollen Strom, und die Gleichspannung wird daher

durch die fallende Spannung U_{UV} bestimmt. Erst wenn der Kern der Regeldrosselspule — im Zeitpunkt t_r — ummagnetisiert ist, beginnt die Übergabe des Stromes von der Zelle D_1 an die Zelle D_2 . Die in Fig. 2d durch die ausgezogene Kurve dargestellte Gleichspannung verläuft im Mittel tiefer als in Fig. 2b. Die Gleichspannung kann somit mit den Regeldrosselspulen reduziert werden. Die Ummagnetisierung besorgt — ganz oder teilweise — eine Steuerwicklung. Die Fläche der in Fig. 2d strichpunktiert eingezeichneten, dreieckigen Spannung an der Hauptwicklung der Regeldrosselspule wird dann kleiner, der Zeitpunkt t_r verschiebt sich nach links, und die Gleichspannung wird grösser.

4. Messmethode

Da, wie bereits erwähnt, wattmetrische Messungen der Verluste bei derartigen Ummagnetisierungen sehr ungenau sind, ist für die Messungen eine Erwärmungsmethode gewählt worden, die darin besteht, dass man die Zunahme ΔT der Kerntemperatur misst, wenn der Kern während einer gewissen Zeit t in der gewünschten Weise dauernd ummagnetisiert wurde.

Die auf 1 kg des Kernmaterials bezogenen Ummagnetisierungsverluste p_v [W/kg] werden dann:

$$p_v = c \frac{\Delta T}{t} \quad (9)$$

wenn c die spezifische Wärme des Kernmaterials ist.

Solche kalorimetrische Messungen sind im allgemeinen sehr heikel. *Brailsford* und *Bradshaw* [1]²⁾ haben sie bei sinusförmiger Spannung an Blechstreifen angewandt und mussten sich auf Einschaltzeiten t von nur wenigen Sekunden beschränken, damit die Erwärmungen ΔT klein blieben und keine störenden Wärmeflüsse längs des inhomogenen magnetischen Kreises und zwischen Wicklung und Kern verursachten. Die Erwärmungen betragen bei ihnen nur ca. $0,01^\circ\text{C}$; ihre genügend genaue Messung war daher sehr schwierig.

Im vorliegenden Fall konnten die erwähnten Schwierigkeiten leicht umgangen werden, indem man einerseits als Prüflinge aus einem Band gewickelte Ringe, wie es die Kerne der Regeldrosselspulen sind, verwendete und andererseits die Primärwicklung auf nur wenige Windungen beschränkte. Man konnte daher den Kern für sich in einer sehr guten, ebenfalls ringförmigen Wärmeisolation unterbringen und den Strom einige Male durch ihr zentrales Loch durchführen. Ein störender Wärmeaustausch zwischen Wicklung und Kern kann dadurch leicht vermieden werden. Man kann dann mit Erwärmungen von einigen $^\circ\text{C}$ arbeiten, die man mit Leichtigkeit genügend genau messen kann.

Die Messungen sind an Ringen aus 0,3 mm dickem Band aus kornorientiertem Siliziumeisen mit Ummagnetisierungsverlusten bei 50 Hz von 0,444 bzw. 1,01 W/kg bei 1,0 bzw. 1,5 T ausgeführt worden. Ihre spezifische Masse betrug dementsprechend $7,65 \text{ g/cm}^3$. Die Messanordnung ist in Fig. 3 dargestellt. Die Temperatur wurde an 6 Stellen mit Thermoelementen gemessen. Um auch innerhalb des Eisens messen zu können, wurden 2 gleiche Ringe axial nebeneinander verwendet und 3 Thermoelemente im Spalt zwischen den beiden Ringen angeordnet. Die übrigen 3 Thermoelemente befanden sich an der Oberfläche des einen Ringes. Als Wärmeisolation wurde eine aus dem Vollen gedrehte ringförmige Schachtel

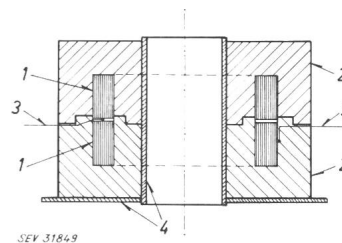


Fig. 3

Messanordnung im Längsschnitt

1 Ringkerne; 2 Wärmeisolation aus Polystyrol-Schaumstoff;
3 Thermoelemente; 4 Hartpapier

aus Polystyrol-Schaumstoff mit einer Wandstärke von ca. 20 mm verwendet, die aussen zusätzlich von Watte umgeben war. Aus Festigkeitsgründen ist die Schachtel mit dem Kern auf ein Hartpapierrohr mit Flansch gesetzt worden. Da zwischen den 6 Thermoelementen keine merklichen Temperaturdifferenzen auftraten, schaltete man sie stets — mit den kalten Verbindungsstellen in schmelzendem Eis — in Serie und erhielt so eine sechsfache Thermospannung. Die Einschaltdauer betrug jeweils einige Minuten. Wegen des Wärmewiderstandes zwischen Kern und den von ihm elektrisch isolierten Thermoelementen trat das Temperaturmaximum an diesen ca. 1 min nach dem Abschalten des Stromes auf. Dieses Maximum wurde für die Auswertung verwendet. Ausserdem wurde auch die Abkühlgeschwindigkeit im stromlosen Zustand bestimmt und die Temperaturzunahme mit dieser korrigiert. Dies konnte recht genau ausgeführt werden, weil die Abkühlgeschwindigkeit nur ca. $0,05^\circ\text{C}/\text{min}$ betrug.

5. Messergebnisse

Die Prüfung der Erwärmungsmethode durch Vergleich mit wattmetrischen Messungen unter Verhältnissen, bei denen diese noch einwandfrei sind, hat eine sehr gute Übereinstimmung der Resultate ergeben. Für die Messungen wurde der Prüfling über die Isolierschachtel mit einer Doppelwicklung für Strom und Spannung von je 21 Windungen bewickelt und die Stromwicklung an eine sinusförmige Spannung angeschlossen. Für die spezifische Wärme c in Gl. (9) ist zunächst der runde Wert für Eisen von $0,11 \text{ kcal/kg}^\circ\text{C} = 460 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$ eingesetzt worden. Der Vergleich mit den wattmetrischen Messungen hat die beste Übereinstimmung bei einem um 1% höheren Wert von $c = 465 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$ ergeben. Mit diesem c ergibt sich der in Tabelle I zusammengefasste Vergleich der Messungen nach der Erwärmungsmethode mit wattmetrischen Messungen.

Ummagnetisierungsverluste bei sinusförmiger Spannung von 50 Hz, gemessen nach der Erwärmungs- bzw. wattmetrischen Methode

Tabelle I

Scheitelwert der Induktion T	Scheitelwert der Feldstärke A/cm	Ummagnetisierungsverluste		Unterschied %
		Wattmetrische Methode W/kg	Erwärmungsmethode W/kg	
1,5	0,5	1,01	1,03	+ 2
1,6	0,86	1,23	1,21	— 1,6
1,7	2,0	1,52	1,53	+ 0,7
1,8	6,6	2,00	1,97	— 1,5

Bei der Messung der Verluste im Regeldrosselspulenbetrieb war keine Sekundärwicklung vorhanden, und die Induktion

²⁾ Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

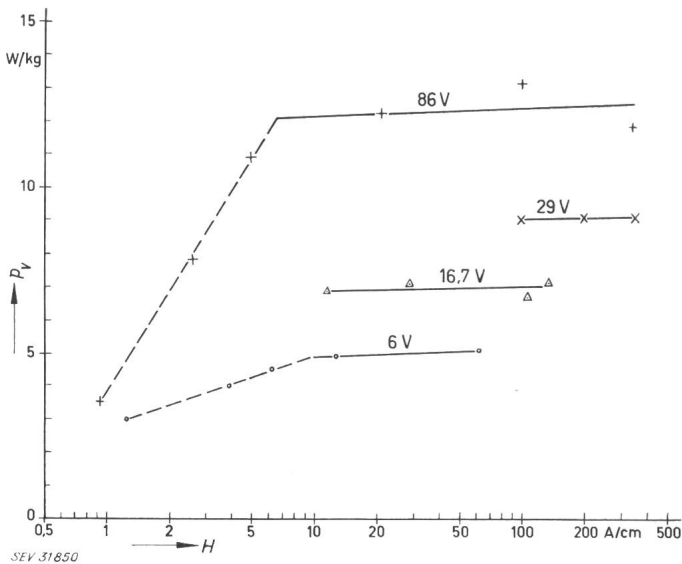


Fig. 4

Ummagnetisierungsverluste p_v in Regeldrosselspulen von Gleichrichtern in Dreiphasenbrückenschaltung ohne Steuerstrom in Funktion des Scheitelwertes der Feldstärke H

Die Messpunkte sind bei den vier an den Kurven angeschriebenen Transformatorspannungen aufgenommen worden. Diese Spannungen ergeben bei Sättigung die folgenden Ummagnetisierungszeiten:

- Spannung 6 V, Ummagnetisierungszeit 1,8 ms
- Spannung 16,7 V, Ummagnetisierungszeit 1,05 ms
- Spannung 29 V, Ummagnetisierungszeit 0,8 ms
- Spannung 86 V, Ummagnetisierungszeit 0,46 ms

wurde nicht gemessen. Die einzig vorhandene Primärwicklung bestand aus zwei, durch das Loch in der Schachtel durchgehenden, in Serie geschalteten Leitern. Die Schaltung war nach Fig. 2 aufgebaut. Die Verluste wurden in Funktion des Scheitelwertes der Feldstärke gemessen. Dieser wurde aus dem Scheitelwert des Stromes berechnet, für den der Gleichstrom eingesetzt wurde. Der Strom wurde bis 5000 A gesteigert und eine Feldstärke von 330 A/cm erreicht. Ausserdem wurde die Transformatorspannung, und dadurch die Ummagnetisierungszeit verändert, die sich einstellte, wenn die Sättigung erreicht wurde, und die Spannung am Prüfling dann nach dem strichpunktierten Dreieck in Fig. 2d verlief. Die Ummagnetisierungszeit wurde nach Gl. (8) berechnet und ausserdem oszillographisch gemessen. Beide Bestimmungsarten stehen in guter Übereinstimmung, wenn für ΔB $2 \cdot 1,65$ T eingesetzt werden.

Die gemessenen Verluste sind in Fig. 4 eingetragen. Beim Blech mit ca. 1 W/kg bei 1,5 T sind somit Verluste bis zu 12,5 W/kg aufgetreten. Besonders interessant ist, dass oberhalb von ca. 10 A/cm die Verluste von der Feldstärke fast unabhängig sind und nur von der Ummagnetisierungszeit abhängen. Unterhalb von 10 A/cm ist die Sättigung offenbar ungenügend, und der Spannungsverlauf weicht dann von der Dreieckform zu stark ab. Die Unabhängigkeit vom Scheitelwert der Feldstärke ist leicht verständlich, weil die Verluste proportional der Fläche der Magnetisierungsschleife im B-H-Diagramm sind, und bei dieser die Hin- und Rückläufe bei grosser Feldstärke ohne Fläche dazwischen zusammenfallen. Eine Fläche zwischen Hin- und Rücklauf tritt nur bei kleinen Feldstärken im Ummagnetisierungsgebiet auf. Die erhaltene starke Abhängigkeit von der Ummagnetisierungszeit zeigt, dass der Verlauf der B-H-Kurven in diesem Gebiet stark von der Geschwindigkeit abhängt, mit welcher sie durchlaufen werden.

Überlegt man sich, wie die Ummagnetisierungsverluste von der Ummagnetisierungszeit abhängen, so ergibt sich folgendes: Die Wirbelstromverluste pro Periode steigen mit der Ummagnetisierungsgeschwindigkeit viel rascher als die Hystereseverluste, welche vielfach sogar als unabhängig von der Ummagnetisierungsgeschwindigkeit angesehen werden. Die hohen gemessenen Verluste bestehen daher zur Hauptsache aus Wirbelstromverlusten p_w . Diese hängen bei dreieckigem Spannungsverlauf mit der Ummagnetisierungszeit t_u wie folgt zusammen:

Die Momentanwerte der Wirbelströme sind proportional demjenigen der induzierten Spannung und verlaufen daher ebenfalls dreieckförmig. Da die Wirbelstromverluste proportional dem Quadrat der Wirbelströme sind, ist:

$$p_w \sim \int_0^{t_u} u^2 dt \quad (10)$$

Wegen des geradlinigen Anstieges ist:

$$u = t \frac{du}{dt} \quad (11)$$

Durch den Querschnitt des Kernes und die Windungszahl ist nach dem bereits Erwähnten die Fläche des Dreieckes vorgegeben. Diese ist:

$$\int_0^{t_u} u dt = \frac{du}{dt} \cdot \frac{t_u^2}{2} \quad (12)$$

Daher ist:

$$\frac{du}{dt} = \frac{2}{t_u^2} \int_0^{t_u} u dt \quad (13)$$

$$u = \frac{2t}{t_u^2} \int_0^{t_u} u dt \quad (14)$$

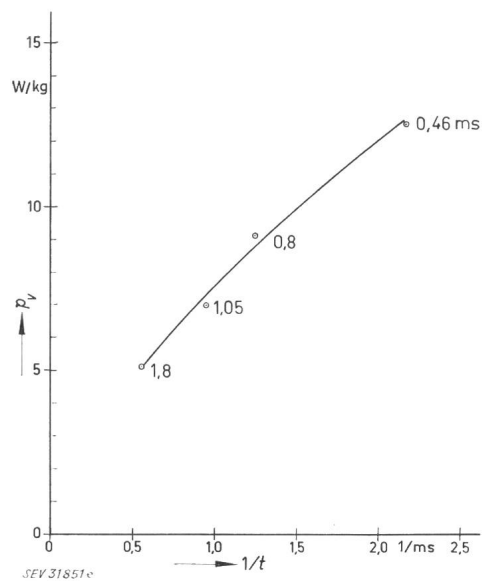


Fig. 5

Ummagnetisierungsverluste p_v in Regeldrosselspulen von Gleichrichtern in Dreiphasenbrückenschaltung

ohne Steuerstrom in Funktion des reziproken Wertes der Ummagnetisierungszeit

Die Zahlen an den Messpunkten geben die Ummagnetisierungszeit an

$$p_w \sim \left(\frac{2}{t_u^2} \int_0^{t_u} u \, dt \right)^2 \cdot \int_0^{t_u} t^2 \, dt = \frac{4}{3 t_u} \left(\int_0^{t_u} u \, dt \right)^2 \quad (15)$$

Es ist somit eine ungefähr lineare Zunahme der Verluste mit $1/t_u$ zu erwarten. In Fig. 5 sind die gemessenen Verluste in Funktion von $1/t_u$ aufgetragen. Die erhaltene Kurve weicht tatsächlich von der Geraden nicht stark ab. Das erleichtert die Extrapolation auf andere Ummagnetisierungszeiten. Die etwas schwächer als lineare Zunahme mit $1/t_u$ erklärt sich mit der Zunahme des Wirbelstromwiderstandes infolge der Zunahme der Stromverdrängung mit der Frequenz. Es sei noch betont, dass die gemessenen Verluste nur in dem Fall gelten, wenn die ganze Ummagnetisierung durch den Hauptstrom bewerkstelligt wird. Wird zum Teil mit dem Steuerstrom ummagnetisiert, so erfolgt die Ummagnetisierung im allgemeinen langsamer, und die Verluste sind dann kleiner.

Im Verlauf der Messungen sind auch einige Verlustmessungen bei rechteckförmiger Spannung nach Fig. 1b ausgeführt worden. Drei Messungen bei $t_u = 0,44 \dots 0,47$, im Mittel 0,46 ms, haben Verluste von 9,5...10,8, im Mittel 10,0 W/kg, ergeben gegenüber 12,5 W/kg nach Fig. 5. Bei rechteckförmiger Spannung sind somit nur 80% der Verluste bei dreieckförmiger Spannung im Regeldrosselspulenbetrieb nach Fig. 2 gemessen worden. Eine ähnliche Überlegung wie bei dreieckiger Spannung führt bei rechteckiger Spannung zu den folgenden Wirbelstromverlusten:

$$p_w \sim \int_0^{t_u} u^2 \, dt = u^2 t_u \quad (16)$$

$$\int_0^{t_u} u \, dt = u t_u \quad (17)$$

$$u = \frac{1}{t_u} \int_0^{t_u} u \, dt \quad (18)$$

$$p_w \sim \frac{1}{t_u} \left(\int_0^{t_u} u \, dt \right)^2 \quad (19)$$

Der Vergleich von Gl. (19) mit (15) ergibt 75% der Wirbelstromverluste bei dreieckiger Spannung. Da ausser den Wirbelstromverlusten noch die, vom Verlauf der Ummagnetisierung schwächer oder gar nicht abhängigen Hystereseverluste auftreten, muss der Unterschied der totalen Verluste in den beiden Fällen etwas kleiner als 25% sein. Die bei den Messungen erhaltenen 80% der Verluste im Regeldrosselspulenbetrieb entsprechen somit recht gut dieser Berechnung.

Literatur

[1] *Brailsford and Bradshaw*: Iron losses at high magnetic flux densities in electrical steel sheets. Proc. of the Instn. of El. Engrs., Part A, 102(1955)4, p. 463.

Adresse des Autors:

Rudolf Risch, Physikalisches Laboratorium, AG Brown, Boveri & Cie., Baden (AG).

Berichtigung

Wegen eines Versehens ist im Bulletin SEV 1963, Nr. 9, S. 326 die Adresse des Autors unrichtig wiedergegeben. Sie lautet richtig: Prof. *A. Imhof*, Delegierter des Verwaltungsrates der Moser-Glaser & Co. AG, Muttenz (BL).

RUDOLF EMANUEL CLAUDIUS

1822—1888

Jeder Zürcher Student kennt die Clausius-Strasse. Aber wer war Clausius, zu dessen Ehren die 1895 erbaute Strasse so benannt wurde?

Als sechstes einer 18-köpfigen Kinderschar kam Rudolf Emanuel Clausius am 2. Januar 1822 im deutschen Köslin in Pommern zur Welt. Sein Vater, der Theologe war, liess Rudolf mit 18 Jahren an die Universität Berlin ziehen. Um seine vielen Geschwister etwas unterstützen zu können, betätigte er sich als Lehrer, wodurch sich aber seine Studien bis ins Jahr 1848 hinauszogen. Seine Promotionsarbeit handelte über «den Regenbogen und verwandte Erscheinungen». Als Physiklehrer wirkte er alsdann an der Artillerieschule zu Berlin und nebenbei als Privatdozent an der dortigen Universität.

1855 kam Clausius als Physikprofessor an das neu gegründete Polytechnikum nach Zürich. Zwei Jahre später, von 1857 bis 1867 lehrte er dieses Fach an beiden Zürcher Hochschulen, folgte dann aber einem Ruf an die Universität Würzburg. 1869 wechselte er bereits wieder an die Universität Bonn, wo er 1884/85 das Amt des Rektors bekleidete. Am 24. August 1888, also vor 75 Jahren, starb R. E. Clausius in Bonn. Seine Hauptverdienste liegen auf dem Gebiet der Wärmelehre.

Die Erforschung der Wärmevergänge war zu jener Zeit noch nicht sehr weit gediehen. Noch war man der Meinung, Wärme sei eine unzerstörbare und unerschaffbare Substanz. Erst als man erkannt hatte, dass Wärme eine Energieform darstellt, kam man mit den Erkenntnissen vorwärts. 1840 hatte der grosse deutsche Arzt und Physiker Robert Mayer das Prinzip der Erhaltung der Energie postuliert (1. Hauptsatz), sowie zwei Jahre später das mechanische Wärmeäquivalent errechnet und experimentell bestimmt. Auf diesen Errungenschaften aufbauend stellt der 28-jährige Clausius im Jahr 1850 den sog. «zweiten Hauptsatz» der Thermodynamik auf, der besagt, dass Wärme nicht von selbst von einem kälteren auf einen wärmeren Körper übergehen kann.

