Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 78 (1987)

Heft: 19

Artikel: Transformatoren mit Kern aus amorphem Band

Autor: Kozlowska, A.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-903926

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. 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. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

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. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

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. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 10.07.2025

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

Transformatoren mit Kern aus amorphem Band

A. Kozlowska

Untersuchungen mit neuartigen magnetischen Werkstoffen haben zu amorphen Bändern geführt, die wegen ihrer geringen Verluste für Ringkerntransformatoren kleinerer Leistung geeignet erscheinen. Es wird über die Eigenschaften der bisher bekannten Materialien sowie die Transformator-Prototypen berichtet. Ferner wird auf theoretische Untersuchungen an Verteiltransformatoren und auf Perspektiven eingegangen.

Des recherches au sujet de nouvelles matières magnétiques ont conduit à des rubans amorphes à faibles pertes qui paraissent convenir à des transformateurs à noyau toroïdal de faible puissance. Les propriétés de matières déjà connues, ainsi que des prototypes de transformateurs sont décrits. Les résultats des recherches théoriques à des transformateurs de distribution ainsi que leurs perspectives d'application sont présentées.

Adresse der Autorin

Doz. Dr. *Alicja Kozłowska*, Instytut Maszyn Elektrycznych i Transformatorów, Technische Hochschule Łódź, PL-90-924 Łódź.

1. Einführung

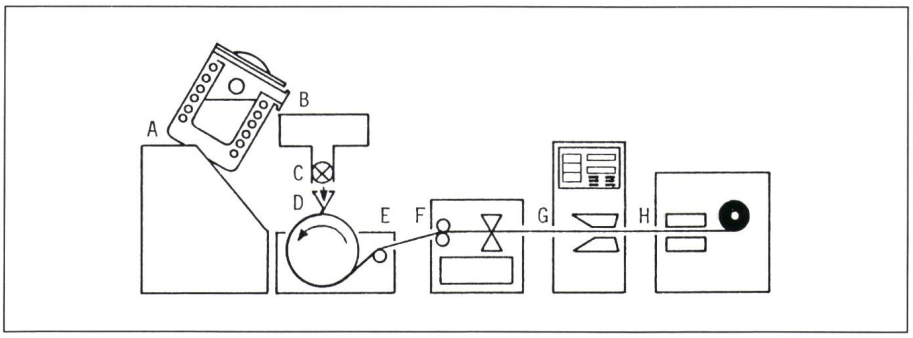
Ende der 60er Jahre begann eine dynamische Entwicklung in der Untersuchung von amorphen Magnetstoffen. Erster Hersteller amorpher Bänder (Handelsname Metglas) war die amerikanische Firma Allied Chemical Corporation. Im Jahre 1979 gelang es ihr, sehr dünne Bänder (etwa 30–50 µm) von geringer Breite (einige mm) herzustellen. Heute gibt es entsprechende Bänder mit bis 300 mm Breite. Die sehr guten magnetischen Eigenschaften dieses Materials lassen hoffen, dass es für ganz verschiedenartige Bauteile Anwendung finden wird.

Die amorphen Bänder werden in einem speziellen Verfahren mit sehr schneller Abkühlung (10^6 °C/s) aus der entsprechenden Legierung hergestellt. Das Schema der Einrichtung ist in Figur 1 dargestellt. Es handelt sich um eine verhältnismässig einfache Methode. Die Anlage hat typische Abmessungen von etwa 9×16×9 m bei einer Produktionsleistung von 10 000 t jährlich. Der Preis des hergestellten Materials, zu Anfang sehr hoch (im Jahre 1972 etwa 150 $/kg), beträgt heute etwa 3,3 $/kg [1].

2. Eigenschaften der amorphen Bänder

Unter den zurzeit hergestellten amorphen Bändern verschiedener Zusammensetzung können für die Herstellung von Transformatorkernen zwei Sorten Anwendung finden; 2605 SC und 2605 S-2. Wie aus Tabelle I ersichtlich ist, verbessern sich die magnetischen Eigenschaften des Materials nach dem Ausglühen bedeutend. Gemäss der Firmenweisung soll der fertige Kern in indifferenter Gasatmosphäre erhitzt werden, wobei er während dieses Prozesses der Wirkung einer konstanten Feldstärke von 800 A/m ausgesetzt ist.

Die Sättigungsinduktion B_s der amorphen Bänder (Tab. I) beträgt etwa 1,6 T. Sie ist also bedeutend kleiner als diejenige der orientierten Siliziumbleche (etwa 2,0 T). Dies führt selbstverständlich in den Kernen aus



Figur 1 Schema der Erzeugung des amorphen Bandes aus der Schmelze [2]

A	Induktionsofen für das Metallschmelzen
B	Sammelbehälter der Schmelze
C	Dosiergerät
D	Rotierende Trommel
E	Amorphes Band nach dem Erstarren des flüssigen Metalls innerhalb 1 ms
F,G	Kontrollgeräte
H	Bandaufwicklung auf die Trommel

Legierungsart		2605 SC $Fe_{81,5}B_{13,5}Si_{3,5}C_2$	2605 S-2 $Fe_{78}B_{13}Si_9$
Einführungsjahr		1979	1980
Sättigungs-	vor Ausglühen	1,57	1,52
induktion B_s [T]	nach Ausglühen	1,61	1,56
Magnetische	vor Ausglühen	0,67	0,40
Restinduktion B_r [T]	nach Ausglühen	1,42	1,30
Koerzitivfeld	vor Ausglühen	6,4	13,6
H_c [A/m]	nach Ausglühen	3,2	2,4
Curie-Temperatur [°C]		370	415
Kristallisierungstemperatur [°C]		480	550
Dichte [kg/m³]		$7{,}32 \cdot 10^3$	$7{,}18 \cdot 10^3$
Resistivität [μΩ · m]		1,25	1,30

Tabelle I Eigenschaften der amorphen Bänder für Transformatorenkerne [3]

Hersteller	Leistung [kVA]	Phasen-anzahl	Eisenverluste		Belastungsverluste	
			[W]	in % der Verluste bei orientiertem Blech	[W]	in % der Verluste bei orientiertem Blech
Osaka	10	1	8,6	22	173	102
Takaoka	20	1	18,9	24	348	94
General Electric	25	1	28,0	33	–	–
Osaka	30	1	30,0	32	390	107
Mitsubishi	35	3	49,0	21	–	–
Allied (toroidal)	50	1	28,0	20	422	50
Toshiba	100	3	85,0	30	1780	110

Tabelle II Prototypen von Verteiltransformatoren mit Kern aus amorphem Blech [1]

amorphen Blechen zur Verwendung kleinerer Nenninduktionswerte (1,3...1,4 T) als in den Kernen aus orientiertem Blech. Es ist hier jedoch zu berücksichtigen, dass der in der letzten Zeit wachsende Energiepreis zu möglichst geringen Verlustkosten zwingt, weshalb Transformatoren mit niedrigen Verlusten, besonders Leerlaufverlusten, gefragt sind. Daraus ergibt sich auch bei Transformatoren aus orientiertem Blech eine gewisse Tendenz zur Senkung der Nenninduktionen, dies sogar zu Werten von 1,3...1,4 T [4; 5].

Aus der geringsten Stärke der hergestellten amorphen Bänder (30...50 μm) folgt ein verhältnismässig kleiner Füllfaktor des Kernquerschnittes, 0,80...0,85 gegenüber etwa 0,96 bei den orientierten Blechen. Dies bewirkt selbstverständlich eine Vergrösserung des reellen Kernquerschnittes.

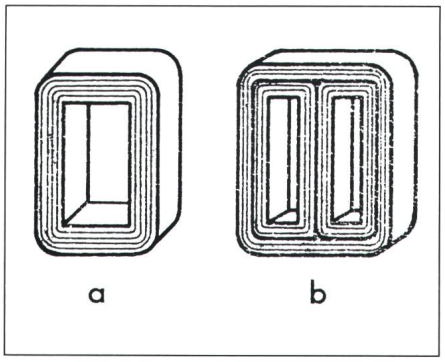
Die geringe Bandstärke ist ein Grund, dass dieses Material für die Konstruktion von Wickelkernen geeignet ist, also speziell für Transformatoren kleiner Leistung und für Verteiltransformatoren. Es kann in der hier besprochenen Form nicht zur Herstellung von Lagekernen Anwendung finden. Die Ergebnisse von Arbeiten in Richtung von stärkerem Material werden im Abschnitt 4 besprochen.

Neben den Eigenschaften in Tabelle I ist auch bemerkenswert, dass amorphe Bänder eine bedeutend höhere Härte besitzen (C-63...C-80 Rockwell [1; 6]) als orientierte Siliziumbleche. Trotzdem sind sie elastisch und biegsam. Der grösste Vorteil der Kerne, die aus amorphen Blechen gewickelt sind, besteht jedoch in deren kleinen Verlusten (1/5...1/3 der Verluste von orientiertem Blech) und in der kleinen Leistungsaufnahme für die Magnetisierung (1/20...1/5 je nach Nenninduktion [2; 5]). Letztere ist stark von der Ausführungsart des Kerns abhängig. Die Eisenverluste bestehen vor allem aus den Hystereseverlusten. Wirbelstromverluste sind sehr klein wegen der etwa dreimal grösseren Resistivität des amorphen Bandes gegenüber orientiertem Blech [3].

3. Ausgeführte Transformatoren

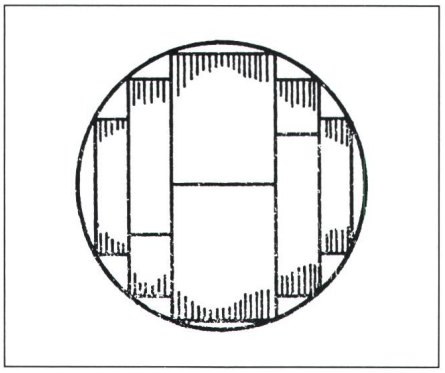
Wie erwähnt, ist die günstigste Lösung die Konstruktion mit dem aus Blechband gewickelten Kern (Fig. 2). Wenn die amorphen Bänder ungenügende Breite haben, können grössere Durchmesser der Treppenkerne durch Zusammensetzen der Bleche (Fig. 3) erreicht werden.

In den Vereinigten Staaten und in Japan sind breite Untersuchungen über die Anwendung der amorphen Bänder für Verteiltransformatoren durchgeführt worden. Tabelle II zeigt



Figur 2 Beispiele gewickelter Kerne mit rechteckigem Querschnitt [3]

a 1phasig
b 3phasig



Figur 3 Abgestufter Kern aus amorphen Bändern [3]

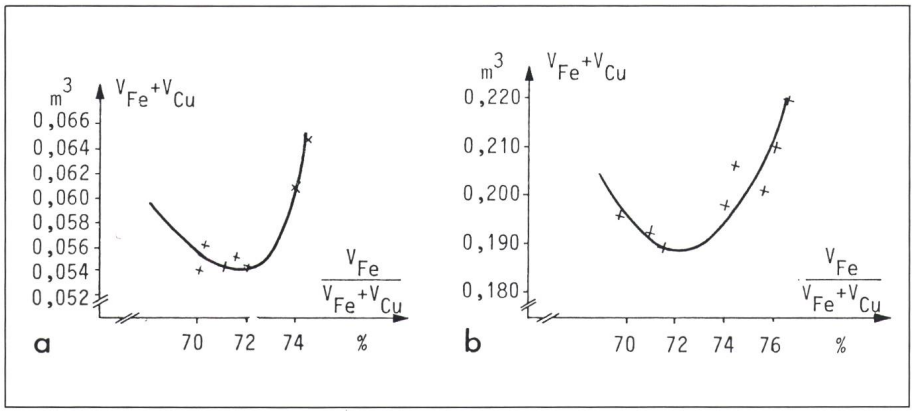
die von verschiedenen Firmen hergestellten Prototypen. Die grösste Anzahl Transformatoren - 1000 Stück, Leistung 25 kVA - wird von General Electric ausgeführt. Zu Beginn wurden einige Exemplare mit Treppenkern (Manteltyp) mit Band von 2,5 cm Breite gebaut [1]. Aufgrund der günstigen Ergebnisse (Tab. III) wurden anschliessend 25 Stück hergestellt und an Kunden abgegeben, um Erfahrungen zu sammeln. In der Zwischenzeit prüft General Electric auch andere Konstruktionsmöglichkeiten im Rahmen der Versuchsserie und lässt diese bei Kunden testen [1].

In Polen sind am Institut für Elektrische Maschinen und Transformatoren der TH Łódź eine Reihe von Berechnungen von Verteiltransformatoren mit amorphem Blech durchgeführt worden (100, 250, 400 und 630 kVA). Die Übersetzung der Transformatoren beträgt 20±1/0,4 kV, Schaltgruppe Dy 5. Die Entwürfe wurden in vielen Varianten ausgeführt unter Annahme verschiedener Induktionswerte und Windungsspannungen. Dabei wurde angenommen:

- amorphes Band Typ Metglas 2605 SC,
- aus Band gewickelte Kernkonstruktion, mit treppenförmigem Kernquerschnitt und Füllfaktor 0,85,
- die Verlustzahlkennziffer sowie die Scheinleistungsaufnahme für das Band 2605 SC nach Firmenangabe [3],
- Wicklungsmaterial Kupfer,
- Kurzschlussspannungswerte und Belastungsverluste ungefähr wie in modernen Transformatoren entsprechender Leistung, hergestellt in Polen,
- Berechnungsart der Transformatoren nach [7].

Die Ergebnisse der Berechnungen, als Beispiel je eine Version für jede Leistung, sind in Tabelle IV zusammengefasst. Die Eisenverluste sind etwa 4,5mal kleiner und der Leerlaufstrom etwa 20mal kleiner als die entsprechenden Werte bei Verwendung des orientierten Siliziumbleches. Die reelle Verminderung des Leerlaufstromes wäre sicherlich kleiner wegen dessen hoher Empfindlichkeit auf die Ausführungsart des Kerns.

In den vorgestellten Entwürfen wurden die Induktionswerte verhältnismässig niedrig angenommen (etwa 1,3 T). Unter Annahme von etwa 1,4 T, was möglich ist, wäre die Senkung der Verluste und des Leerlaufstromes geringer. Es fällt auf, dass man bei Induktionswerten von 1,3 T bei Anwendung des amorphen Bandes eine etwa 30% höhere Masse der aktiven Werkstoffe erhält. Bei höheren Induktionswerten ist der Unterschied kleiner. Figur 4 zeigt die Masseänderung der aktiven Werkstoffe bei den verschiedenen Berechnungsvarianten der Transformatoren von 100 und 630 kVA. Die Kurven zeigen ihr Minimum bei einem Verhältnis des Eisenvolumens zur Summe der Volumina von Eisen und



Figur 4 Gesamtes Volumen der aktiven Werkstoffe in Abhängigkeit vom bezogenen Eisenvolumen

a für 100-kVA-Transformatoren
b für 630-kVA-Transformatoren

Parameter	amorphes Blech	orientiertes Blech M-4
Induktion [T]	1,4	1,6
Eisenverluste [W]	28 (0,32 W/kg)	86 (0,96 W/kg)
Leerlaufstrom [%]	0,3	0,9
Kernmasse [kg]	88	90

Tabelle III Eigenschaften der Prototyp-Wickelkerne 25 kVA (General Electric) im Vergleich mit den Kernen aus dem orientierten Blech M-4 [1]

Parameter	100 kVA		250 kVA		400 kVA		630 kVA	
	TA B=1,30 T	TK	TA B=1,285 T	TK	TA B=1,35 T	TK	TA B=1,31 T	TK
Eisenverluste P_{Fe} [W]	64	300	128	580	161	830	238	1200
Belastungsverluste P_B [W]	1617	1700	3129	3100	4457	4400	6353	6200
Kurzschlussspannung [%]	4,42	4,5	4,37	4,5	4,5	4,5	6,06	6,0
Eisenmasse M_{Fe} [kg]	291,4	225,4	582,7	397,0	432,7	555	1079,5	772
Kupfermasse M_{Cu} [kg]	140,4	100,3	234,4	200,0	326,9	261	457,9	369
Eisenvolumen V_{Fe} [m³]	0,0398	0,0295	0,0796	0,0519	0,100	0,0725	0,147	0,100
Kupfervolumen V_{Cu} [m³]	0,0158	0,011	0,0263	0,0225	0,0367	0,0292	0,0514	0,0414
Verhältnis $\frac{V_{Fe}}{V_{Fe}+V_{Cu}}$ [%]	71,5	73,0	76,0	69,8	73,0	71,0	74,0	70,9
Leerlaufstrom i_0 [%]	0,121	2,5	0,093	1,9	0,078	1,6	0,074	1,3
Leistungsfaktor $\cos \varphi_0$	0,529	0,12	0,0547	0,122	0,513	0,129	0,509	0,146

Tabelle IV Vergleich der Parameter mit Kern aus amorphem Blech 2605 SC (TA) mit denjenigen mit orientiertem Blech ET5 (TK)

Kupfer bei etwa 72%. Nach [6] beträgt dieses Verhältnis etwa 74%.

Einen Vergleich der Wirkungsgrade der Transformatoren aus amorphen und aus orientierten Kernbändern gibt Figur 5.

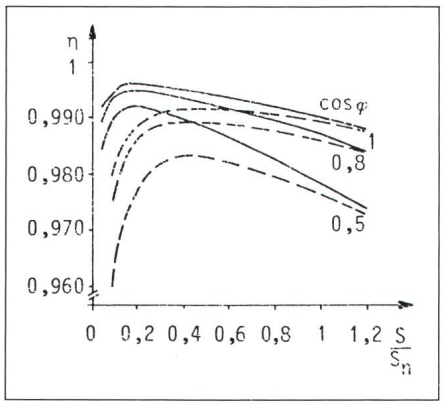
4. Perspektiven für Lagerkerne

Die besprochenen Wickelbandkerne für Verteiltransformatoren verlangen im allgemeinen eine besondere Art der Wicklungsherstellung, was wegen der grossen Kosten der Einführung auf grosse Schwierigkeiten stösst. Es besteht daher der Wunsch nach zusammengesetzten Kernen, insbesondere auch für Transformatoren grösserer Leistung. Dies also bedeutet, dass der amorphe Werkstoff in höherer Stärke verfügbar sein muss. Bei Allied Corporation wird versucht, dies durch Verbindung einiger dünner Schichten zu erreichen. Das neue Material wird mit Powercore bezeichnet; nach [1] kann die Stärke des neuen Werkstoffes 0,1 mm erreichen. Nach [8] wird bei Anwendung von 13 Schichten eine Stärke von 0,25 mm erzielt, nach [9] 0,28 mm schon mit 7 Schichten. Die Entwicklung ist noch ganz im Fluss.

Messungen der Verluste zeigen, dass die Wirbelstromverluste in den aus einigen Schichten bestehenden Blechen nicht viel höher sind, als aus der Summe der einzelnen Schichten zu erwarten wäre. Ausserdem wäre das Ausglühen der Bänder bei der Kernherstellung zwecks Verlustsenkung nicht notwendig.

Bei der Herstellung zusammengesetzter Kerne müssen die Bleche geschnitten werden, wozu spezielle Messer nötig wären. Mit den heute üblichen Messern könnten bis zum Schärfen nur 2000 Schnitte ausgeführt werden, gegenüber etwa 2 000 000 Schnitten bei normalem orientiertem Blech [9]. Wichtig ist auch, dass man bei den Lagerkernen eine hohe Abhängigkeit der magnetischen Eigenschaften vom Pressdruck beobachtet [9].

In Tabelle V [9] sind Messergebnisse, bei einer Induktion von 1,4 T, an unter 90° und 45° verschachtelten Kernen angegeben. Zum Vergleich sind auch die Messwerte für den Toroidkern angegeben. Auffällig ist, dass beim Lagekern die Scheinleistung wesentlich höher ist.



Figur 5 Wirkungsgrad eines Transformators 630 kVA in Funktion der Belastung bei verschiedenen Leistungsfaktoren cos φ

——— Trafo mit einem Kern aus amorphem Blech

----- Trafo mit einem Kern aus orientiertem Blech

	Toroidkern	Zusammengesetzter Kern	
		unter dem Winkel 90°	unter dem Winkel 45°
Eisenverluste (W/lb)	0,114...0,123	0,137	0,128
Scheinleistungsaufnahme (VA/lb)	0,145...0,135	2,55	1,73

Tabelle V Messergebnisse an unter 90° und 45° verschachtelten Kernen sowie Toroidkern (B = 1,4 T).

Literatur

[1] *G.E. Fish:* Recent developments in low core loss materials for power transformers, Paper No. 85 A-63. Montreal, Canadian Electrical Association, Electrical Apparatus Section, 1985.

[2] What if? Morristown/N.J., Allied Corporation, Metglas Products, 1982.

[3] Metglas Electromagnetic Alloys. Morristown/N.J., Allied Corporation, Metglas Products, 1981.

[4] *L.A. Johnson* a.o.: Application of low loss amorphous metals in motors and transformers. IEEE Trans. PAS 101(1982)7, p. 2109...2114.

[5] *D. Masheter* and *E.T. Norton:* Amorphous metals for transformer cores - today and tomorrow. Report of the discussion at the CIGRE-Colloqium of study, Committee 12 (Transformers) in Aachen/FRG, September 1983. Electra (1984)94, p. 19...21.

[6] *J.A. Mas:* Design and performance of power transformers with metallic glass cores. IEEE Power Electronics Specialists Conference, 1980; p. 68...79.

[7] *P. Jezierski, A. Koslowska* and *Z. Rydzewski:* Berechnung der energetischen Öltransformatoren für 30 kV-Spannung. Lodz, Technische Hochschule, 1981.

[8] *E.T. Norton:* Application of new materials for power transformers. Low loss steels. Report of discussion at the CIGRE-Colloquium of study, Committee 12 (Transformers) in Helsinki/Finland, 24...27 June, 1985.

[9] *K.C. Lin:* Amorphous metal stacked cores. IEEE Electrical/Electronics Insulation Conference, Chicago, 2...6 October 1983; p. 190...193.

[10] *H.R. Sheppard* and *E.T. Norton:* Economics of amorphous metal core power transformers. Report of the discussion at the CIGRE-Colloquium of study, Committee 12 (Transformers) in Aachen/FRG, September 1983.