



Merkblatt 401

Elektroband und -blech



Stahl-Informations-Zentrum

Stahl-Informations-Zentrum

Das Stahl-Informations-Zentrum ist eine Gemeinschaftsorganisation Stahl erzeugender und verarbeitender Unternehmen. Markt- und anwendungsorientiert werden firmenneutrale Informationen über Verarbeitung und Einsatz des Werkstoffs Stahl bereitgestellt.

Verschiedene **Schriftenreihen** bieten ein breites Spektrum praxisnaher Hinweise für Konstrukteure, Entwickler, Planer und Verarbeiter von Stahl. Sie finden auch Anwendung in Ausbildung und Lehre.

Vortragsveranstaltungen schaffen ein Forum für Erfahrungsberichte aus der Praxis.

Messebeteiligungen und Ausstellungen dienen der Präsentation neuer Werkstoffentwicklungen sowie innovativer, zukunftsweisender Stahlanwendungen.

Als **individueller Service** werden auch Kontakte zu Instituten, Fachverbänden und Spezialisten aus Forschung und Industrie vermittelt.

Die **Pressearbeit** richtet sich an Fach-, Tages- und Wirtschaftsmedien und informiert kontinuierlich über neue Werkstoffentwicklungen und -anwendungen.

Das Stahl-Informations-Zentrum zeichnet besonders innovative Anwendungen mit dem **Stahl-Innovationspreis** aus (www.stahlinnovationspreis.de). Er ist einer der bedeutendsten Wettbewerbe seiner Art und wird alle drei Jahre ausgelobt.

Für die Aus- und Weiterbildung von Bauingenieuren steht das **Stahlbau-Lehrprogramm** mit Fachbeiträgen und Berechnungsbeispielen auf CD-ROM zur Verfügung.

Die **Internet-Präsentation** (www.stahl-info.de) informiert u. a. über aktuelle Themen und Veranstaltungen und bietet einen Überblick über die Veröffentlichungen des Stahl-Informations-Zentrums. Schriftenbestellungen sowie Kontaktaufnahme sind online möglich.

Impressum

Merkblatt 401
„Elektroband und -blech“
Ausgabe 2005
ISSN 0175-2006

Herausgeber:
Stahl-Informations-Zentrum,
Postfach 10 48 42,
40039 Düsseldorf

Autoren:
Dr.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing.
Carl-Dieter Wuppermann,
Dr.-Ing. Andreas Schoppa,
44791 Bochum

Redaktion:
Stahl-Informations-Zentrum

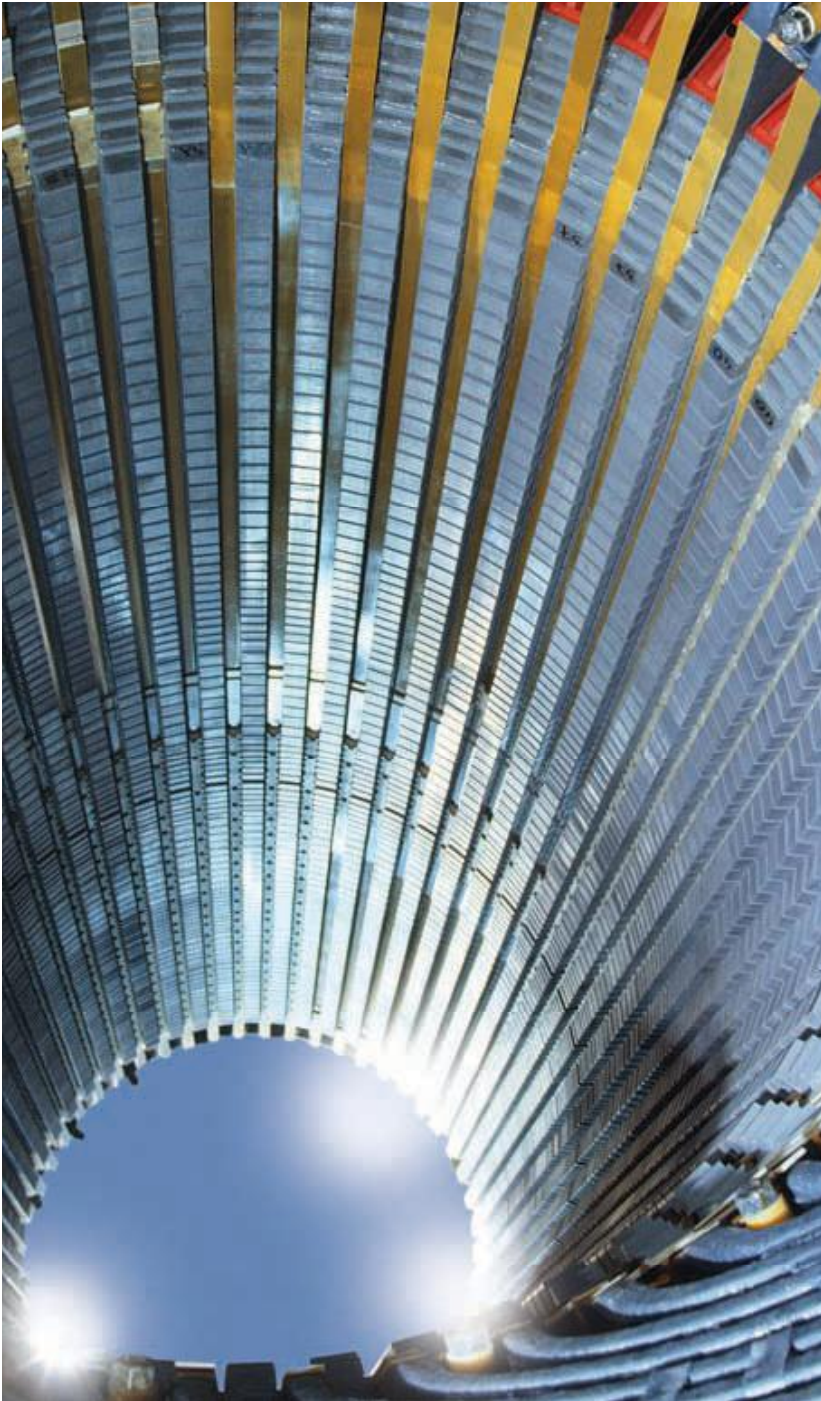
Die dieser Veröffentlichung zugrunde liegenden Informationen wurden mit größter Sorgfalt recherchiert und redaktionell bearbeitet. Eine Haftung ist jedoch ausgeschlossen.

Ein Nachdruck - auch auszugsweise - ist nur mit schriftlicher Genehmigung des Herausgebers und bei deutlicher Quellenangabe gestattet.

Titelbild:
Lamellen aus Elektroblech für Magnetkerne in elektrischen Systemen

Mitglieder des Stahl-Informations-Zentrums:

- AG der Dillinger Hüttenwerke, Dillingen
- Agozal Oberflächenveredelung GmbH, Neuwied
- Arcelor RPS Sàrl, Esch-sur-Alzette
- Benteler Stahl/Rohr GmbH, Paderborn
- EKO Stahl GmbH, Gruppe Arcelor, Eisenhüttenstadt
- Gebr. Meiser GmbH, Schmelz-Limbach
- Georgsmarienhütte GmbH, Georgsmarienhütte
- Mittal Steel Germany GmbH, Duisburg
- Rasselstein GmbH, Andernach
- Remscheider Walz- und Hammerwerke Böllinghaus u. Co. KG, Remscheid
- Saarstahl AG, Völklingen
- Salzgitter AG Stahl und Technologie, Salzgitter
- Stahlwerke Bremen GmbH, Gruppe Arcelor, Bremen
- ThyssenKrupp Electrical Steel GmbH, Gelsenkirchen
- ThyssenKrupp GfT Bautechnik GmbH, Essen
- ThyssenKrupp Stahl AG, Duisburg
- ThyssenKrupp VDM GmbH, Werdohl
- Wickeder Westfalenstahl GmbH, Wickede



Innenansicht eines Turbogenerators mit geschichteten Elektroblech-Lamellen

Inhalt

	Seite
1 Einführung	4
2 Klassifizierung und Arten von Elektroband	5
2.1 Nichtkornorientiert	5
2.2 Kornorientiert	6
3 Eigenschaften von Elektroband	6
4 Herstellung von Elektroband	9
5 Prüfung von Elektroband	11
6 Be- und Verarbeitung von Elektroband	12
6.1 Nichtkornorientiert schlussgeglüht	12
6.2 Nichtkornorientiert nicht schlussgeglüht	15
6.3 Kornorientiert	15
7 Anwendungen von Elektroband	15
8 Elektroband und Umwelt	17
9 Grundlagen	18
9.1 Elektromagnetismus, magnetisches Verhalten	18
9.2 Elektroband als ferro- und weichmagnetischer Werkstoff	19
9.3 Formelzeichen	21
10 Quellennachweis	21
11 Wesentliche Elektrobandnormen	22
12 Bildnachweis	22

1 Einführung

Elektroband bzw. Elektroblech ist ein anspruchsvoller Stahlwerkstoff in einer außergewöhnlich umfangreichen Herstellungs- und Verarbeitungskette. Es trägt aufgrund seines funktionsbestimmenden Einsatzes in elektrischen Systemen wesentlich zu deren Energieeffizienz bei. Damit leistet es einen erheblichen Beitrag zur Nachhaltigkeit von Energieressourcen.

In früherer Zeit wurden einzelne Elektrobleche durch Warmwalzen in quasi Einzelfertigung unmittelbar hergestellt. Heute wird Elektroband mit zunehmender Weiterentwicklung der Kaltbandfertigung in Reversier- bzw. Tandem-Kaltwalz- und Durchlaufglüh-Anlagen überwiegend in Form von Breitband oder Spaltband, zumeist mit isolierenden Oberflächenbeschichtungen, an Kunden geliefert. Nach Verarbeitung des Elektrobandes entsteht das Elektroblech, das in den Magnetkernen der elektrischen Systeme eingesetzt wird.

Für die Anwendung von Elektroband sind insbesondere seine physikalischen Eigenschaften von entscheidender Bedeutung. So gehört Elektroband zu den sogenannten weichmagnetischen Werkstoffen (siehe auch Kapitel 9 „Grundlagen“), d. h. Werkstoffen, die im äußeren Magnetfeld besonders einfach magnetisierbar sowie entmagnetisierbar sind und dadurch bei ihrem Einsatz in elektrischen Systemen die Energie optimal nutzen.

An der Welt-Rohstahlerzeugung nimmt Elektroband einen Anteil von etwa 1% ein; das bedeutet immerhin eine jährliche Menge von 9 bis 11 Mio. t. Mit 95% Mengenanteil spielt das Elektroband unter den weichmagnetischen Werkstoffen eine dominierende Rolle.

Elektroband findet aufgrund seiner typischen magnetischen Eigenschaften und seiner wirtschaftlichen Herstellung eine breite Anwendung in der Elektrotechnik. Diese besteht im Einsatz in elektrischen Systemen aller Art wie Maschinen und Geräten für die Energieerzeugung in Generatoren, in der Energieübertragung und

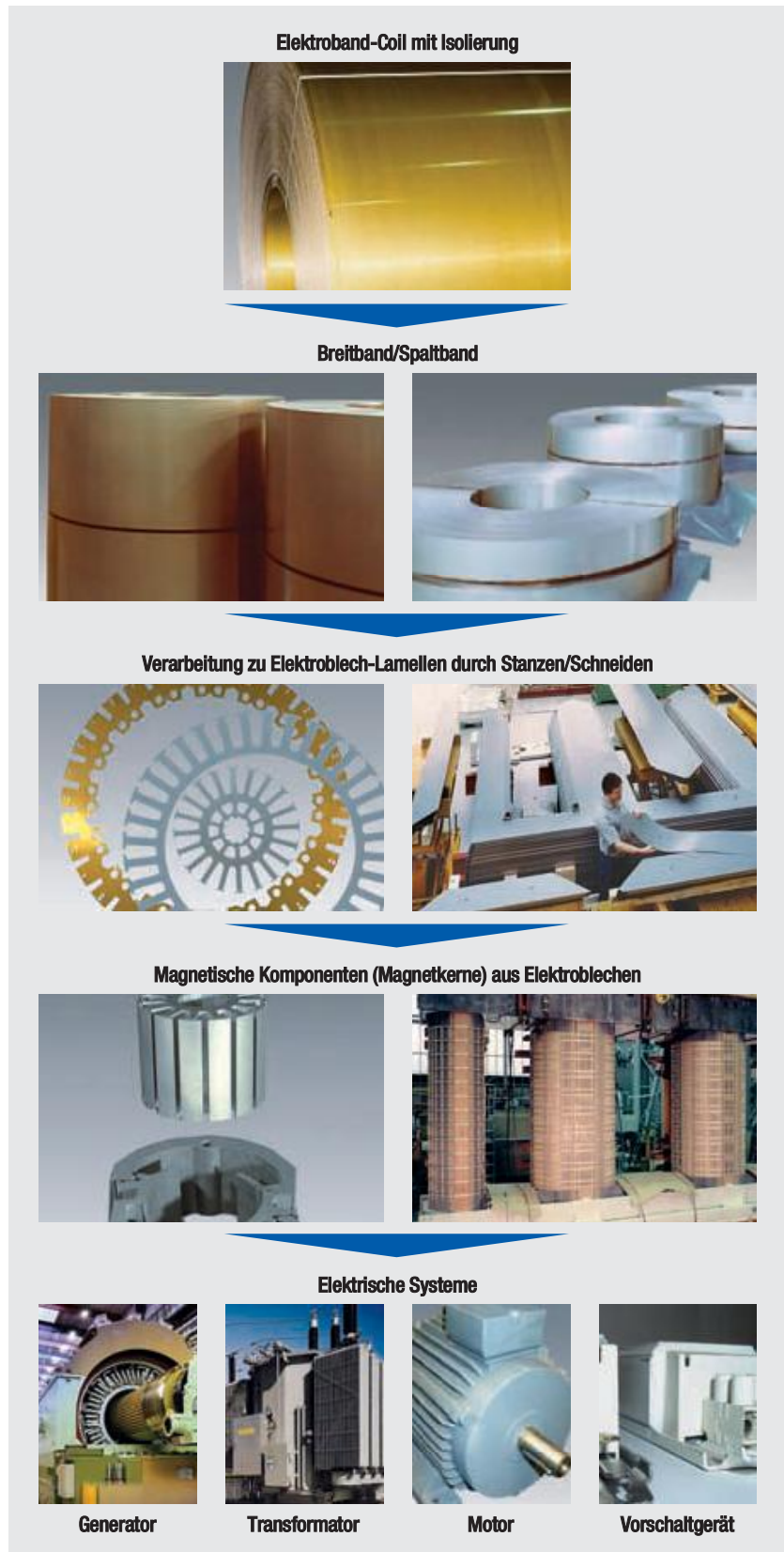


Abb. 1: Vom Elektroband zu Elektroblechlamellen und ihren Anwendungen in elektrischen Systemen

-verteilung in Transformatoren sowie in der Nutzbarmachung der Energie auf der Verbraucherseite in Motoren und anderen elektrischen Maschinen.

Die Nutzung von Elektroband ist auf die Erfindung des Elektromagneten und des dynamo-elektrischen Prinzips zurückzuführen. Diese leitete die Herstellung von Maschinen zur Stromerzeugung aus mechanischer Energie (Generatoren) und umgekehrt, zur Erzeugung mechanischer Energie aus elektrischer Energie (Elektromotoren), ein. Dabei wurde erkannt, dass man für die Herstellung der magnetisch aktiven Teile solcher Maschinen nicht nur irgendeine Eisenlegierung verwenden kann, sondern dass es auch sehr wichtig ist, dass diese Magnetkerne aus vielen, voneinander isolierten Teilen (Lamellen) bestehen müssen. Gerade diese Erkenntnis erlangte eine grundlegende Bedeutung mit Erfindung des Wechsel- und Drehstroms gegen Ende des 19. Jahrhunderts.

Im ersten Jahrzehnt des 20. Jahrhunderts kam es zur Entwicklung eines siliziumlegierten Stahlblechs mit besonders günstigen Eigenschaften zum Aufbau von Magnetkernen.

Mit der Zentralisierung der Energieversorgung und der Notwendigkeit von Übertragung der elektrischen Energie über lange Wege zu den Endverbrauchern stieg die Bedeutung des Transformators. Ein Patent von Norman P. Goss, USA, leitete im Jahre 1934 die Entwicklung von kornorientiertem Elektroband ein.

Elektrobänder werden nach dem mehrstufigen Herstellungsprozess längs auf Verwendungsbreiten geteilt und durch Stanzen oder Schneiden zu Elektroblechen verarbeitet. Die Elektrobleche werden in weiteren Verarbeitungsschritten zu elektromagnetischen Komponenten geschichtet, paketiert und fixiert. Diese elektromagnetischen Komponenten finden dann in elektrischen Systemen wie Generatoren, Transformatoren, Elektromotoren und Vorschaltgeräten als Magnetkerne in Form von Statorn, Rotoren, E-I-Kernen, Wickelkernen und anderen Magnetkernformen Anwendung, **Abb. 1**.

Für den gezielten Einsatz des Elektrobandes in den relevanten Anwendungsfeldern sind zahlreiche Merkmale wie seine geometrischen, mechanisch-technologischen und anderen werkstofftechnischen Eigenschaften von entscheidender Bedeutung. Besonders wichtig für die Funktion des jeweiligen Bauteiles ist jedoch sein Verhalten im magnetischen Feld. Dies wird im Kapitel 9 genauer beschrieben.

Die magnetischen Eigenschaften werden beim Elektroband wesentlich durch einen hohen Reinheitsgrad, den Gehalt an Silizium und Aluminium (bis ca. 4 Massenanteile in %), geringe Mengen anderer Legierungselemente wie z. B. Mangan, Schwefel und Stickstoff sowie durch Warmwalz-, Kaltwalz- und Glühprozesse bestimmt. Das Elektroband wird vorwiegend im Dickenbereich unterhalb von 1 mm angeboten.

2 Klassifizierung und Arten von Elektroband

Werkstoffe, deren physikalische Eigenschaften von der Richtung abhängen, werden als anisotrop bezeichnet. Sind die Eigenschaften in allen Richtungen gleichwertig, spricht man von isotropen Werkstoffen. Die Anisotropie der magnetischen Eigenschaften von Elektroband beruht auf der Kristall-Anisotropie des Eisens. Eisen und seine Legierungen kristallisieren in einer kubischen Struktur. Die Würfelkantenrichtung ist dabei die am leichtesten magnetisierbare Richtung. Die Richtung der Raumdiagonale im Würfel ist die magnetisch ungünstigste Richtung, **Abb. 2**.

2.1 Nichtkornorientiert

Für Anwendungen im Elektromaschinenbau, bei denen der magnetische Fluss auf keine bestimmte Richtung festgelegt ist und deshalb gleich gute magnetische Eigenschaften in allen Richtungen verlangt werden, erzeugt man Elektroband mit möglichst isotropen Eigenschaften.

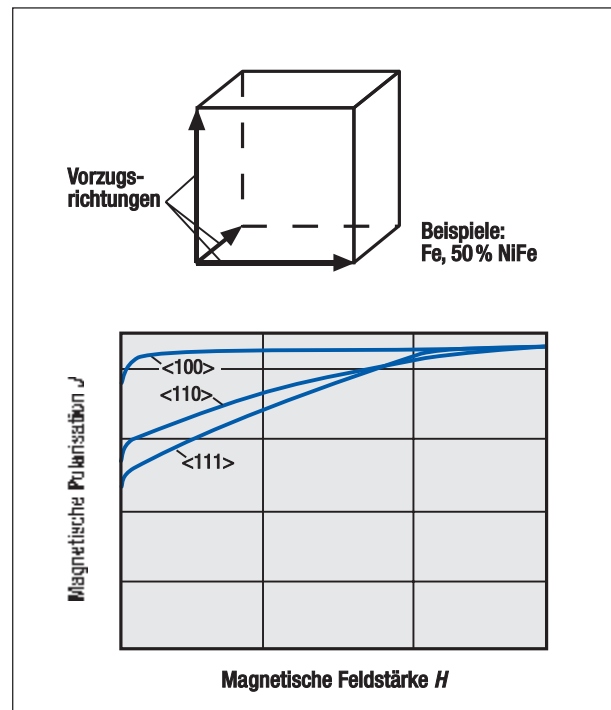


Abb. 2: Magnetische Vorzugsrichtungen in kubischer Struktur

Man bezeichnet es als nichtkornorientiertes (NO-)Elektroband. Dieses wird schwerpunktmäßig in Generatoren, Elektromotoren, Schützen, Relais und Kleintransformatoren eingesetzt.

Die ideale Struktur (Gefügeaufbau) für ein nichtkornorientiertes Elektroband ist ein polykristallines Gefüge mit Korngrößen zwischen 20 µm und 200 µm, wobei die Kristallite regellos in der Blechebene mit der Fläche (100) ausgerichtet sind, Abb. 2. In der Praxis sind jedoch die magnetischen Eigenschaften von realem nichtkornorientiertem Elektroband in der Blechebene in geringem Umfang von der Magnetisierungsrichtung abhängig. So betragen die Verlustunterschiede zwischen Längs- und Querrichtung nur max. 10 %.

Die Ausprägung einer hinreichenden Isotropie der magnetischen Eigenschaften bei nichtkornorientiertem Elektroband wird wesentlich durch die Gestaltung des Fertigungsweges Warmumformung, Kaltumformung und Schlussglühung beeinflusst. Die Fertigung eines Elektrobandes mit völlig isotropen Eigenschaften ist bis heute nicht gelungen.

2.2 Kornorientiert

Für Verwendungszwecke, bei denen es auf einen besonders niedrigen Ummagnetisierungsverlust ankommt und besonders hohe Ansprüche an Permeabilität oder Polarisation gestellt werden, wie bei Leistungstransformatoren, Verteilungstransformatoren und höherwertigen Kleintransformatoren, erzeugt man Elektroband mit einheitlicher Orientierung der Kristallite (kristallografische Textur), das man als kornorientiertes (KO-)Elektroband bezeichnet. Die einheitliche Orientierung der Kristallite bewirkt ein stark anisotropes Verhalten des Elektrobandes.

Bei kornorientiertem Elektroband wird hierzu durch die aufwendige Fertigung eine wirksame Kornwachstumsauslese durchgeführt. Seine Körner (Kristallite) zeigen mit einer geringen Fehlorientierung im schlussge-

glühten Material eine nahezu ideale Textur, die nach ihrem Erfinder benannte Goss-Textur. Eine Würfelkante zeigt in Walzrichtung, eine Flächendiagonale zeigt quer zur Walzrichtung. Die Abweichung der Würfelkante zur Walzrichtung beträgt beim Standardmaterial üblicherweise bis 7° und beim hochpermeablen Material bis 3°. Die Größe der Körner beträgt mehrere Millimeter bis Zentimeter, Abb. 3 und 4.

3 Eigenschaften von Elektroband

Grundsätzlich sind beim Elektroband die gleichen Werkstoffeigenschaften wie bei den klassischen Stahlbändern von hoher Relevanz. Demgegenüber unterscheidet sich das Elektroband von den anderen Stahlbandprodukten durch die hohe Bedeutung seiner magnetischen Eigenschaften, insbesondere des spezifischen Ummagnetisierungsverlustes, der magnetischen Polarisation (durch das magnetische Material bewirkter Anteil der Flussdichte) und der Permeabilität (Magnetisierbarkeit des Werkstoffes), Tabelle 1.

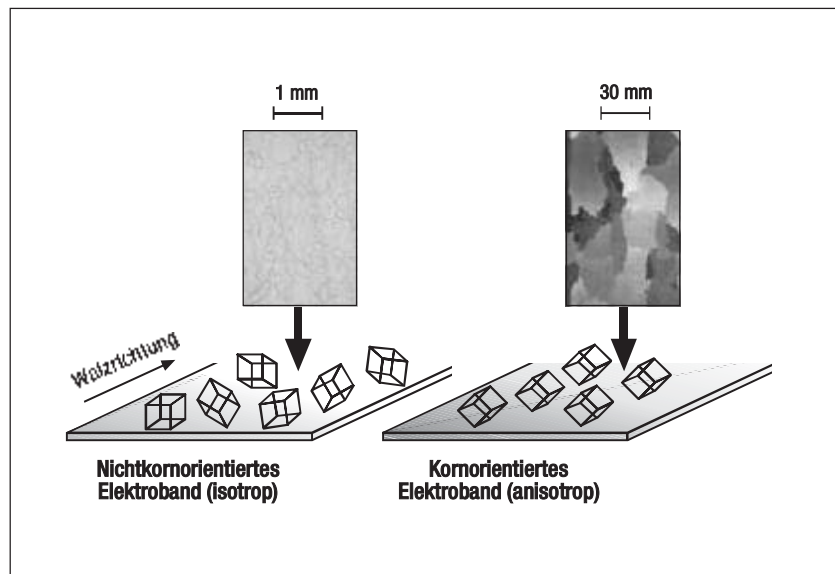


Abb. 3: Kornorientierung und Gefüge beim Elektroband

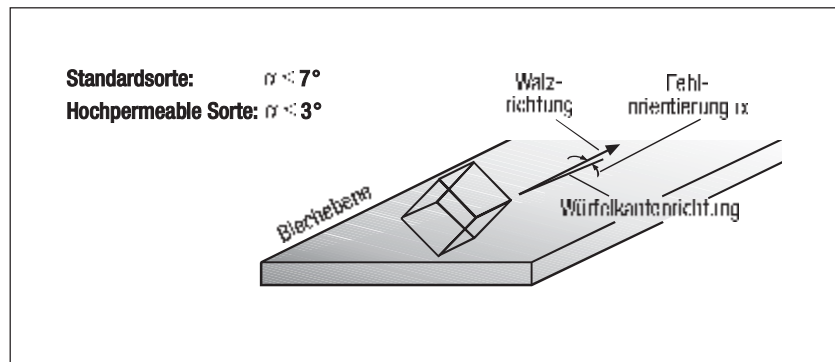


Abb. 4: Kornorientiertes Elektroband mit Goss-Textur

Eine entscheidende Maßnahme, den Ummagnetisierungsverlust in Magnetkörpern zu senken, besteht darin, den magnetischen Werkstoff zu lamellieren, Abb. 5. Daher wird das Elektroband, bedingt durch die Anforderungen des Marktes, in verschiedenen Dicken gefertigt. Dabei wird das nichtkornorientierte Elektroband vorrangig in den Dicken 0,50 mm und 0,65 mm hergestellt, aber auch 0,35 mm und 1,00 mm sind gebräuchlich. Durch das Schichten der Lamellen zu Kernen werden insbesondere bei großen Kernhöhen sehr enge Toleranzen bezüglich der Banddicke erforderlich.

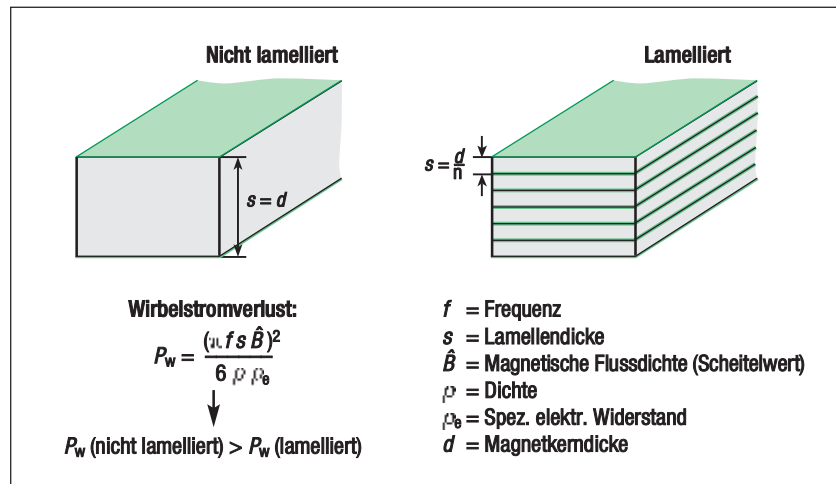


Abb. 5: Verringerung des Ummagnetisierungsverlustes durch Lamellierung von Magnetkernen

<p>Geometrische Eigenschaften</p> <ul style="list-style-type: none"> • Breite • Dicke • Balligkeit • Kantenanschärfung
<p>Mechanisch-technologische Eigenschaften</p> <ul style="list-style-type: none"> • Streckgrenze • Zugfestigkeit • Härte • Dehnung • Verarbeitbarkeit
<p>Andere Werkstoffeigenschaften</p> <ul style="list-style-type: none"> • Chemische Zusammensetzung • Isolation • Wärmeleitfähigkeit • Elektrische Leitfähigkeit
<p>Magnetische Eigenschaften</p> <ul style="list-style-type: none"> • Spezifischer Ummagnetisierungsverlust • Magnetische Polarisation • Permeabilität

Tabelle 1: Relevante Eigenschaften von Elektroband

Bei kornorientiertem Elektroband sind die Banddicken 0,35 mm, 0,30 mm, 0,27 mm und insbesondere für hochwertige Leistungstransformatoren 0,23 mm gebräuchlich, wobei diese Dicke angesichts der schwierigen Kaltumformbarkeit besondere Anforderungen an die Kaltwalztechnik stellt (in besonderen Fällen werden auch andere Dicken bereitgestellt, z. B. 0,18 mm für Wickeltransformatoren bzw. Enddicken > 0,35 mm für spezielle Zwecke).

Zur wirksamen Unterdrückung der Ausbildung von Wirbelströmen ist es insbesondere bei großen Blechkernquerschnitten und den damit verbundenen hohen Induktionsspannungen erforderlich, die Lamellen aus Elektroband mit einem isolierenden Überzug zu versehen. Elektroband kann daher nach der letzten Glühung beim Hersteller mit einer vorwiegend 1 bis 3 µm dicken Isolation beschichtet werden.

Beschichtungen mit Lack auf anorganischer oder organischer Basis, wie sie beim nichtkornorientierten Elektroband üblich sind, erhöhen die Standzeit der Stanzwerkzeuge ganz beträchtlich und werden oft aus diesem Grund auch bei kleinen Magnetkernabmessungen verwendet.

Beim kornorientierten Elektroband übt eine komplex zusammengesetzte anorganische Beschichtung eine Zugspannung auf den Blech-

werkstoff aus. Diese Zugspannung bewirkt eine magnetisch günstige Strukturierung der magnetischen Domänen (siehe Kapitel 9.2) und verringert dadurch bei hochpermeablen Sorten den Ummagnetisierungsverlust um bis zu 5%.

Eine wichtige Methode, den Ummagnetisierungsverlust zu senken, besteht im Zulegieren von Silizium. Mit steigendem Siliziumgehalt wird der spezifische elektrische Widerstand des Elektrobandes erhöht und dadurch der Ummagnetisierungsverlust reduziert. Leider sinkt mit steigendem Siliziumgehalt die Kaltumformbarkeit des Elektrobandes, und daher wird bei den handelsüblichen Elektrobandsorten, die ausschließlich im walztechnischen Prozess hergestellt werden, ein Siliziumgehalt mit einem Massenanteil von 3,2 % nicht überschritten.

Die genauen Angaben zu den magnetischen Eigenschaften der verschiedenen Elektrobandsorten findet man in der Regel in den Produktkatalogen der Elektrobandhersteller. Einige Beispiele werden für nichtkornorientiertes Elektroband, Abb. 6, und für kornorientiertes Elektroband, Abb. 7, aufgeführt. Ergänzt um gerätespezifische Korrekturfaktoren (Baufaktoren), werden solche Kurven in der Regel von den Konstrukteuren zur Auslegung von elektrischen Systemen eingesetzt.

Merkblatt 401

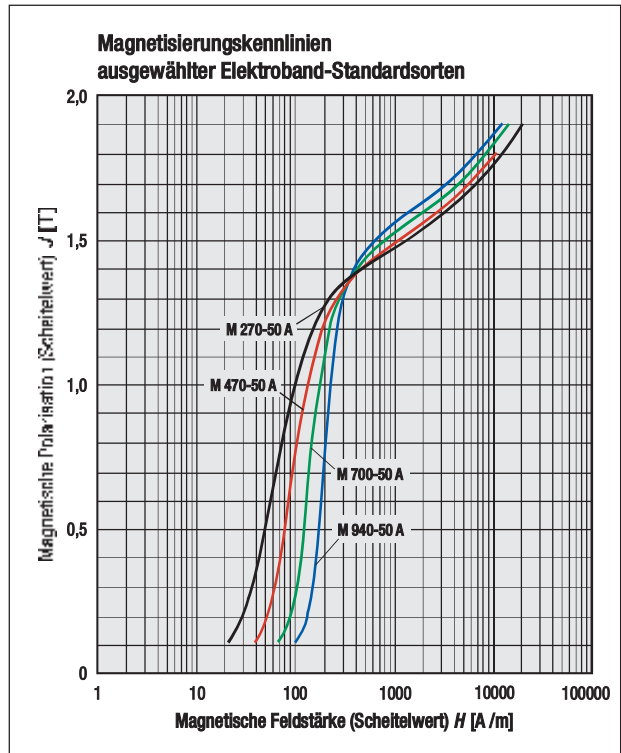
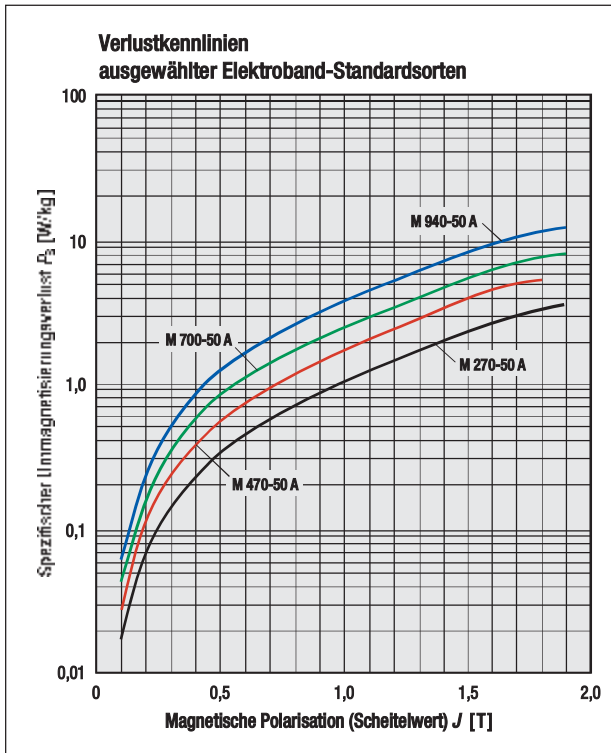


Abb. 6: Magnetische Eigenschaften von schlussgeglühtem nichtkornorientiertem Elektroband (50 Hz, 0,50 mm Dicke, gemessen an Proben, die jeweils zu 50 % in Längs- und in Querrichtung geschnitten wurden)

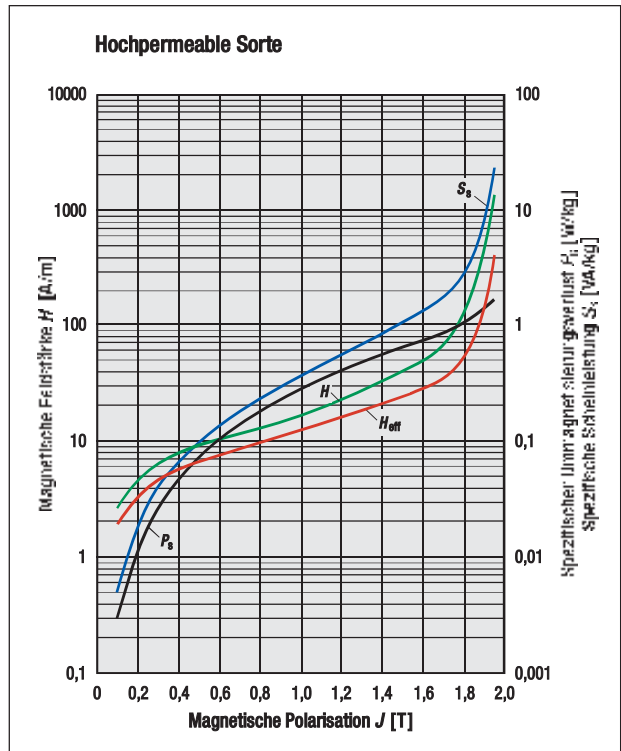
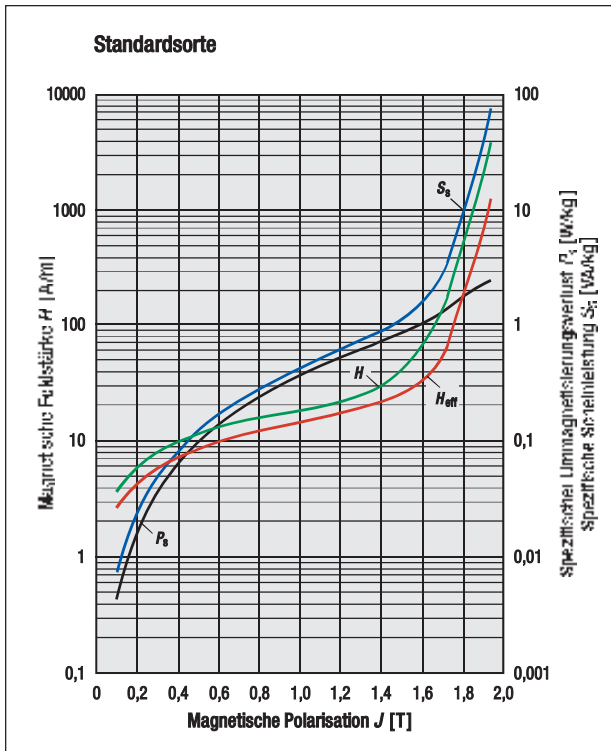


Abb. 7: Magnetische Eigenschaften von kornorientiertem Elektroband (Probe in Längsrichtung geschnitten, 50 Hz, 0,27 mm Dicke)

4 Herstellung von Elektroband

Die Herstellung von Elektroband ist in mehrere Prozessschritte zu unterteilen: Stahl-, Warmband- und Kaltbanderzeugung, Wärmebehandlung und Bandbeschichtung sowie Zurichtung in den Adjustageanlagen, **Abb. 8, Tabellen 2 und 3**.

Die chemische Zusammensetzung der Schmelze, d. h. die Einstellung des Silizium- und des Aluminiumgehalts und der Gehalte anderer Legierungselemente sowie die Verhinderung von für das Elektroband nicht erwünschten Bestandteilen (z. B. Chrom, Titan), wird im Stahlwerk festgelegt. Eine ganz wesentliche Rolle in der Entwicklung des Elektrobandes

spielt die Verbesserung der Primär- und insbesondere der Sekundärmetallurgie. Durch entsprechende Maßnahmen konnte die Reinheit der Schmelzen gesteigert und ihr Kohlenstoffgehalt deutlich auf Werte zwischen 20 ppm und 30 ppm verringert werden. Dadurch werden die magnetischen Eigenschaften der heutigen Elektrobandsorten merklich verbessert.



Abb. 8: Anlagen zur Herstellung von Elektroband (Kaltwalz-Reversiergerüst, oben links, Durchlauf-Glühofen, oben rechts, Hochtemperaturglühung beim komorientierten Elektroband, unten links, Domänenverfeinerung mit Laser, unten rechts)

Merkblatt 401

Nichtkornorientiertes Elektroband				
Konventionelle Verfahren				Entwicklung
Schlussgeglüht		Nicht schlussgeglüht		Schlussgeglüht oder nicht schlussgeglüht
Stahlherstellung	Stahlherstellung	Stahlherstellung	Stahlherstellung	Stahlherstellung
Dünnbrammengießen (50 mm)	Stranggießen (215 mm)	Dünnbrammengießen (50 mm)	Stranggießen (215 mm)	Bandgießen (2–3 mm)
Ausgleichsofen	Brammendurchwärmung	Ausgleichsofen	Brammendurchwärmung	
	Warmwalz-Vorstraße		Warmwalz-Vorstraße	
Warmwalz-Fertigstraße	Warmwalz-Fertigstraße	Warmwalz-Fertigstraße	Warmwalz-Fertigstraße	
Beizen + Besäumen	Beizen + Besäumen	Beizen + Besäumen	Beizen + Besäumen	Beizen + Besäumen
Warmbandglühung*	Warmbandglühung*	Warmbandglühung*	Warmbandglühung*	Warmbandglühung*
Kaltwalzen	Kaltwalzen	Kaltwalzen	Kaltwalzen	Kaltwalzen
Schlussglühung	Schlussglühung	Rekristallisationsglühung	Rekristallisationsglühung	Schlussglühung oder Rekristallisationsglühung
Isolationsauftrag*	Isolationsauftrag*	Nachverformung und/oder Isolationsauftrag*	Nachverformung und/oder Isolationsauftrag*	Nachverformung und/oder Isolationsauftrag*
Besäumen, Längs- und/oder Querteilen in den Adjustageanlagen				
Be- und Verarbeitungsverfahren beim Kunden (Stanzen, Schneiden, Stanzpaketieren, Schweißen, Nieten, Kleben und andere)				
Stanzteil- oder Magnetkern-Entspannungsglühung bzw. Stanzteil- oder Magnetkern-Schlussglühung*				

Tabelle 2: Herstellung von nichtkornorientiertem Elektroband

* Fertigungsschritte für besondere Anforderungen

Kornorientiertes Elektroband			
Konventionelle Verfahren		Entwicklung	
Standard	Hochpermeabel	Standard/Hochpermeabel	
Stahlherstellung	Stahlherstellung	Stahlherstellung	Stahlherstellung
Stranggießen (215 mm)	Stranggießen (215 mm)	Dünnbrammengießen (50 mm)	Bandgießen (2–3 mm)
Brammenvorwärmung*	Brammenvorwärmung*		
Prerolling*	Prerolling*		
Brammendurchwärmung	Brammendurchwärmung	Ausgleichsofen	
Warmwalz-Vorstraße	Warmwalz-Vorstraße		
Warmwalz-Fertigstraße	Warmwalz-Fertigstraße	Warmwalz-Fertigstraße	
Besäumen	Besäumen	Besäumen	Besäumen
Warmbandglühung*	Vorglühung*		
Strahlen + Beizen	Strahlen + Beizen*		
Vor-Kaltwalzen	Vor-Kaltwalzen*		
Zwischenglühung	Ausscheidungsglühung	Ausscheidungsglühung	Ausscheidungsglühung*
	Strahlen + Beizen	Strahlen + Beizen	Strahlen + Beizen
Kaltwalzen	Kaltwalzen	Kaltwalzen	Kaltwalzen
Entkohlungsglühung	Entkohlungsglühung	Entkohlungsglühung	Entkohlungsglühung
Klebschutzauftrag	Klebschutzauftrag	Klebschutzauftrag	Klebschutzauftrag
Hochtemp.-Haubenglühung	Hochtemp.-Haubenglühung	Hochtemp.-Haubenglühung	Hochtemp.-Haubenglühung
Schlussbeschichtung	Schlussbeschichtung	Schlussbeschichtung	Schlussbeschichtung
Spannungsfreiglühung	Spannungsfreiglühung	Spannungsfreiglühung	Spannungsfreiglühung
	Domänenverfeinerung*	Domänenverfeinerung*	Domänenverfeinerung*
Besäumen, Längs- und/oder Querteilen in den Adjustageanlagen			
Be- und Verarbeitungsverfahren beim Kunden (Stanzen, Schneiden, Kleben und andere)			
Stanzteil- oder Magnetkern-Entspannungsglühung*			

Tabelle 3: Herstellung von kornorientiertem Elektroband

* Fertigungsschritte für besondere Anforderungen

Während in der Standard-Warmbandherstellung alle erforderlichen Prozessstufen einzeln durchgeführt werden, verbinden moderne Verfahren, wie Dünnbrammengießen oder Bandgießen, mehrere Produktionsschritte zu einem. Sie sparen dadurch Herstellungskosten und eröffnen neue Möglichkeiten der Eigenschaftsbeeinflussung. So z. B. brachte der Einsatz der Dünnbrammengießtechnologie eine deutliche Verbesserung der Qualität des nichtkornorientierten Elektrobandes im Hinblick auf die Fehlerquote, die Geometrie des Bandes, die Bandausführung sowie die magnetischen Eigenschaften. Durch ständige Optimierung und Erweiterung dieser Technologie auf breiteres Sortenspektrum werden weitere Verbesserungen erwartet.

Die ersten Erfahrungen beim Einsatz des Bandgießens in der Erzeugung von Elektroband eröffnen neue Perspektiven für die Entwicklung kosten- und eigenschaftsoptimierter Sorten.

Bei den **nichtkornorientierten schlussgeglühten Elektrobandsorten** erfolgt nach dem Beizen von Warmbändern das Kaltwalzen in mehreren Walzdurchgängen (Walzstiche) auf die gewünschte Enddicke, üblicherweise 0,35 bis 1,00 mm. Bei hochsilizierten Elektrobandsorten hat sich wegen der hohen Umformkräfte das reversierende Walzverfahren ganz besonders bewährt. Das Band wird anschließend im Durchlaufofen unter Schutzgasatmosphäre schlussgeglüht, wobei das Walzgefüge rekristallisiert, der Kohlenstoffgehalt auf sehr niedrige Werte eingestellt und eine Grobkornbildung herbeigeführt wird. Nach dieser Glühbehandlung kann das Elektroband je nach Kundenwunsch unisoliert bleiben, aber auch ein- oder beidseitig isoliert werden. In der Adjustage (Zurichtung) wird es dann zu Breitband, Spaltband oder zu Tafeln längs und quer geteilt.

Es existieren jedoch auch nichtkornorientierte Elektrobandsorten, bei denen die geforderten Eigenschaften erst bei den Herstellern von Lamellen oder gestapelten Magnetkernen nach einer besonderen Glühung (Stanzteilglühung, Magnetkern-

glühung) erreicht werden. Diese Sorten bezeichnet man als **nicht schlussgeglühtes Elektroband**. Die Sorten werden nach dem Kaltwalzen rekristallisierend geglüht (Haubenofen oder Durchlaufofen) und anschließend mit einem geringen Umformgrad (kritische Verformung für gezieltes Kornwachstum) kaltgewalzt. In der Regel werden nicht schlussgeglühte Elektrobandsorten ohne Isolierung geliefert.

Sowohl bei dem schlussgeglühten als auch bei dem nicht schlussgeglühten Elektroband gibt es Sorten, die ein besonders gutes Magnetisierungsverhalten bei einem vergleichbaren Ummagnetisierungsverlustniveau wie im Falle von Standardsorten aufweisen. Diese hochpermeablen Elektrobandsorten werden in einem besonderen Verfahren hergestellt.

Die Herstellung des **kornorientierten Elektrobandes** ist bis zum Warmband ähnlich der des nichtkornorientierten Elektrobandes, wobei hier durch einen besonderen Ablauf des Warmbandprozesses das spätere Gefüge im Fertigband gezielt beeinflusst wird.

Das 2,0 bis 2,5 mm dicke Warmbreitband wird geglüht und entzundert oder nur einer Entzunderung unterworfen. Das anschließende Kaltwalzen wird in zwei Stufen mit einer dazwischenliegenden Glühbehandlung oder einstufig durchgeführt. Das auf die Enddicke gewalzte Material wird einer Entkohlungsglühung unterzogen, wobei die Bandoberfläche mit einem Trennmittel versehen wird, um bei der nachfolgenden Hochtemperaturglühung, **Abb. 8**, das Kleben der einzelnen Bandwindungen zu vermeiden. Nach der Hauben-Hochtemperaturglühung werden die Bänder in einem Arbeitsgang isoliert, thermisch gerichtet und spannungsarm geglüht.

Auch beim kornorientierten Elektroband gibt es hochpermeable Sorten mit sehr niedrigem spezifischem Ummagnetisierungsverlust und hervorragendem Magnetisierungsverhalten.

Um den Ummagnetisierungsverlust weiter zu senken, wird bei be-

stimmten kornorientierten Elektrobandsorten zusätzlich eine spezielle Laserstrahlbehandlung oder seltener eine mechanische Behandlung der Bandoberfläche (sogenannte Domänenverfeinerung – siehe Kapitel 9.2) durchgeführt. Danach erfolgt wie bei den anderen Elektrobandsorten das Längs- und Querteilen zu Breitband, Spaltband oder zu Tafeln.

5 Prüfung von Elektroband

Um die Qualitätsprüfungen der verschiedenen Elektrobandsorten zu ermöglichen, sind bestimmte Eigenschaften von Elektroband, wie

- spezifischer Ummagnetisierungsverlust bei bestimmten Polarisationswerten,
- magnetische Polarisation bei bestimmten magnetischen Feldstärkewerten,
- andere magnetische, technologische und geometrische Eigenschaften

weltweit genormt (siehe Kapitel 11).

Zur Ermittlung von magnetischen Eigenschaften werden grundsätzlich zwei genormte Messverfahren eingesetzt: das Epsteinmessverfahren und das Tafelmessverfahren, **Abb. 9**.

Zur weiteren Absicherung des Glühprozesses wird als zusätzliches Hilfsmittel eine nicht genormte, kontinuierliche Messung des Ummagnetisierungsverlustes am Durchlaufofen eingesetzt.



Abb. 9: Geräte zur Ermittlung von magnetischen Eigenschaften an Elektrobandproben (Messgerät mit Epsteinrahmen, links, Tafelmessgerät, rechts)

6 Be- und Verarbeitung von Elektroband

Elektroband bzw. Elektroblech ist ein hochwertiges Walzstahlfertigerzeugnis, dem bei der Lagerung sowie bei der Verarbeitung Rechnung zu tragen ist. Das Material muss so gelagert werden, dass es vor Feuchtigkeit und vor Beschädigungen geschützt ist. Die Verarbeitung soll so erfolgen, dass Behandlungen, die eine bleibende Verformung und damit eine Verschlechterung der magnetischen Eigenschaften nach sich ziehen, zu vermeiden sind, **Abb. 10**. Elektroband wird als Breitband oder in Verwendungsbreite (Spaltband), in einigen Fällen auch als Tafeln geliefert. Beim Längsteilen des Breitbandes zu Verwendungsbreiten ist auf eine exakte Messereinstellung zu achten. Ferner muss der Aufwickelzug für das Spaltband so gewählt werden, dass keine Überdehnung des Werkstoffes eintritt. Ein Richten des Elektrobandes beim Einlauf in Stanz- oder Abläng-einrichtungen ist bei nichtkornorientiertem schlussgeglühtem Elektroband sowie bei kornorientiertem Elektroband zu vermeiden. Bei der Verarbeitung von nichtkornorientiertem nicht schlussgeglühtem Elektroband wirken sich diese Einflüsse nicht aus, da üblicherweise noch eine Schlussglühung der Stanzteile erfolgt.

6.1 Nichtkornorientiert schlussgeglüht

Die Herstellung von Blechlamellen zum Aufbau von Magnetkernen erfolgt durch Stanzen oder Schneiden. Je nach Gegebenheit wird heute eine der fünf möglichen Trennverfahren angewandt:

- Folgeschnitt
- Komplettschnitt
- Einzelnutung
- Laserstrahlschneiden
- Wasserstrahlschneiden

Der Folgeschnitt eignet sich besonders für die Verarbeitung von Bandmaterial. Das Band wird auf den vor der Stanze befindlichen Ablaufhassel gespannt und über eine Vorschubeinrichtung taktförmig in das Werkzeug eingeführt. Bei jedem Takt wird ein Teil der späteren Form ausgestanzt, d. h., Stator- und Rotorblech oder Basis- und Jochteil werden in bestimmter Folge ausgetrennt. Diese fallen durch die Werkzeugmatrize und werden mit Hilfe einer Auffangvorrichtung aufgereiht. Der Einsatz von Folgeschnittwerkzeugen erfolgt meist in modernen Schnellläuferpressen, die mit hohen Schnittzahlen arbeiten.

Ein besonderer Vorteil des Folgeschnitts ist, dass hierbei gitterlose Verarbeitung angewandt werden kann. Die Kante des fertigen Bleches

ist dann identisch mit der Bandkante. Es handelt sich also um eine besonders materialsparende Anordnung.

Der Komplettschnitt ist das bevorzugte Stanzverfahren für große Stanzteile und für komplizierte Schnittformen. Komplettschnittwerkzeuge werden wegen der meist größeren Vorschublängen in langsamer laufenden Pressen eingebaut. In bestimmten Fällen werden auch vorgeschchnittene Blechtafeln eingelegt. Die fertigen Stanzteile werden wegen ihrer Größe meist von Hand gestapelt.

Bei der Einzelnutung wird jede für die Wicklung vorzusehende Nute in eine sich drehende Ronde eingestanzt. Mit Hilfe der Einzelnutung können auch Teile größeren Durchmessers bearbeitet werden, ebenso Lamellen für konische Verschiebeanker-motoren, bei denen die Außendurchmesser der Rotorbleche immer größer und die Innendurchmesser der Statorbleche immer kleiner werden.

Beim Laserstrahlschneiden wird die Energie des Laserstrahls zur Trennung der Blechteile verwendet. Diese Methode ist besonders für die Prototypenfertigung sowie für kleine Serien geeignet und stellt, wegen der möglichen negativen Wirkung der Wärmeeinflusszone auf die magnetischen Eigenschaften des Werkstoffes, höchste Ansprüche an die Qualität des Verfahrens und der technischen Einrichtungen.



Abb. 10: Verarbeitung von Elektroband von der Lamelle (links) zum Magnetkern (rechts)
oben: Energieerzeugung (Generator)
Mitte: Energieübertragung/-verteilung (Transformator)
unten: Energienutzung (z. B. Elektromotor)

Das Wasserstrahlschneiden nutzt die Energie des unter hohem Druck wirkenden Wasserstrahles. Diese Methode beeinflusst am geringsten die magnetischen Eigenschaften des Elektrobandes, ist jedoch wegen der verhältnismäßig niedrigen Prozessgeschwindigkeit und wegen Einschränkungen in der Lamellenform derzeit nur für die Prototypenfertigung geeignet.

Die Maßgenauigkeit der Stanzteile wird durch fünf wesentliche Einflüsse bestimmt:

- Präzision des Werkzeuges
- Konstruktion der Schneidanlage
- Geometrie der Lamelle
- Beschaffenheit des Elektrobandes
- Fertigungstechnik

Beim Stanzen entsteht z. B. ein Stanzgrat, der mit dem Verschleiß des Werkzeuges zunimmt. Der Grat soll so klein wie möglich gehalten werden, weil er die Stapel­eigenschaften des Blechpakets verschlechtert und Kurzschlüsse zwischen den Blechen bewirken kann.

Eine Isolationsschicht bringt üblicherweise eine wesentliche Stanzbarkeitsverbesserung mit sich. Besonders positiv wirkt sich hier ein Isolierlack ohne Pigmente aus. Bei unisolierten Blechen ist eine Verbesserung der Stanzbarkeit durch Schmiermittel zu erreichen, die unmittelbar vor dem Stanzen auf die Blechoberfläche aufgebracht werden. Nach dem Stanzen werden die Blechlamellen aufeinandergeschichtet und durch Nieten, Klammern, Schweißen, Umgießen oder Kleben in eine stabile Paketform gebracht.

Blechpakete, die durch Nieten oder Klammern fixiert werden, haben an den dafür vorgesehenen Stellen Löcher bzw. Ausnehmungen. Das Zusammenheften durch Schweißen erfolgt mit oder ohne Zusatzwerkstoff unter Schutzgas an der Außenkontur.

Das Umgießen erfolgt in Spritzgießmaschinen, wobei auch gleich die gewünschte Form entsteht.

Für das Kleben von Blechpaketen eignen sich besondere Isolationsarten, die vom Elektrobandhersteller bereits aufgebracht werden. Nach Einwirkung von Wärme und Druck, abhängig von der Paketgröße, erfolgt ein Verkleben der einzelnen Blechlamellen.

Inwieweit die einzelnen Verarbeitungsschritte die magnetischen Eigenschaften des Werkstoffes beeinflussen, stellen die Tabellen 4 und 5 dar.

Verarbeitungsschritt	Arbeitsbereich $J < 0,5 \text{ T}$	Arbeitsbereich $J 0,5 \text{ T bis } 1,5 \text{ T}$	Arbeitsbereich $J > 1,5 \text{ T}$
Schneiden	gering	hoch	sehr gering
Verpressen der Lamellen	kein	gering bis mittel	kein
Schweißen	gering	mittel	kein
Kleben	kein	gering	kein
Stanzpaketieren, Nieten	sehr gering	gering bis mittel	sehr gering
Einschrumpfen der Magnetkerne ins Gehäuse	sehr gering	gering bis mittel	sehr gering

Tabelle 4: Bewertung des Einflusses verschiedener Verarbeitungsschritte auf das Magnetisierungsverhalten des nichtkornorientierten schlussgeglühten Elektrobandes

Verarbeitungsschritt	Niedrigsilizierte Sorten	Mittelsilizierte Sorten	Hochsilizierte Sorten
Schneiden	gering	mittel	hoch
Verpressen der Lamellen (beschichtet)	kein	kein	kein
Verpressen der Lamellen (unbeschichtet)	kein	sehr gering	gering bis mittel
Schweißen	sehr gering	gering	mittel
Kleben	kein	sehr gering	gering
Stanzpaketieren, Nieten	sehr gering	gering	mittel
Einschrumpfen der Magnetkerne ins Gehäuse	gering	gering	mittel

Tabelle 5: Bewertung des Einflusses verschiedener Verarbeitungsschritte auf das Verlustverhalten des nichtkornorientierten schlussgeglühten Elektrobandes

6.2 Nichtkornorientiert nicht schlussgeglüht

Die Herstellung der Lamellen erfolgt wie zuvor beschrieben. Zur Stanzbarkkeitsverbesserung werden meist Schmiermittel aufgebracht.

Nach dem Stanzen wird die Schlussglühung in kontinuierlich arbeitenden Glühöfen meistens unter entkohlender Atmosphäre durchgeführt. Dabei werden die Stanzteile zwischen 750 °C und 850 °C rekristallisiert, weitgehend entkohlt, und es wird grobes Korn erzielt. Bei unbeschichteten Lamellen kann durch Zugabe von Wasserdampf eine Oxidschicht als Isolation aufgebracht werden. Neben dem hier beschriebenen Verfahren können – je nach Anforderung und vorhandener Einrichtung – auch andere Glühverfahren angewandt werden.

6.3 Kornorientiert

Das kornorientierte Elektroband wird überall dort mit Vorteil verwendet, wo der magnetische Fluss in einer Richtung verläuft. Das ist vorwiegend der Fall in Transformatoren, Drosselspulen und Wandlern. Die Kerne für Verteilungs- und Leistungstransformatoren werden aus Zugschnitten geschichtet. Für Kleintransformatoren und Übertrager finden Schnittband- und Ringkerne oder gestanzte Lamellen Anwendung.

Bei der Herstellung der Zuschnitte für den Kern eines Transformators ist die Richtungsabhängigkeit der magnetischen Eigenschaften zu beachten. Das auf Verwendungsbreite geschnittene Band wird überwiegend mittels Ablängautomaten auf die erforderliche Länge mit entsprechendem Winkel zugeschnitten. Vorzugsweise werden die jeweils für einen Kern benötigten Schenkel- und Jochbleche geschnitten und so abgelegt, dass der nachfolgende Aufbau des Kerns erleichtert wird. Die magnetischen Eigenschaften des kornorientierten Elektrobandes werden durch mechanische Spannungen, die sich bei der Verarbeitung nicht im-

mer vermeiden lassen, verschlechtert. Der Grad der Verschlechterung hängt vom Werkzeugzustand sowie von der Werkzeugeinstellung und den Abmessungen der Zuschnitte ab. Eine Spannungsarmglühung (nach Angabe des Herstellers) des auf Verwendungsbreite geschnittenen Bandes oder der Zuschnitte ergibt weitestgehend eine Wiederherstellung der magnetischen Eigenschaften auf die Ausgangswerte des Werkstoffes. Wenn auf eine Spannungsarmglühung verzichtet wird, so ist eine Überprüfung der magnetischen Eigenschaften des kornorientierten Elektrobandes nach den einzelnen Verarbeitungsschritten empfehlenswert.

Schnitt- und Ringbandkerne werden auf Wickelautomaten hergestellt. Die Wickelrichtung ist hierbei stets die Vorzugsrichtung des kornorientierten Elektrobandes. Wegen der beim Wickeln eingebrachten Spannungen und plastischen Verformungen ist eine Spannungsarmglühung der Kerne unumgänglich. Als Kernblech für Kleintransformatoren finden Stanzteile aus kornorientiertem, aber auch nichtkornorientiertem Elektroband Verwendung. Das Stanzen erfolgt üblicherweise im Folgeschneidverfahren. Ob eine Spannungsarmglühung der Kernbleche notwendig ist, hängt vom jeweiligen Anwendungsfall ab.

7 Anwendungen von Elektroband

Eines der wichtigsten Merkmale elektrischer Systeme ist der Wirkungsgrad. Dieser wird in Wechselwirkung mit den nachfolgend aufgeführten Kriterien, u. a. durch einen anwendungsoptimierten Einsatz des Elektrobandes, wesentlich beeinflusst, **Abb. 11**.

- **Auslegung**
Der Konstrukteur legt in seinem Entwurf die Höhe der magnetischen Aussteuerung, die Form und Dicke der Blechlamellen, die Materialsorte, das Arbeitsmedium, das Fügeverfahren für den Blechkern etc. fest.
- **Werkstoff**
Die Werkstoffauswahl bestimmt ihrerseits die mögliche Aussteuerung, die erforderliche Blechdicke oder auch die möglichen Verarbeitungsverfahren. Die im Kern oder in der Wicklung entstehende Verlustwärme bestimmt die Auslegung der vorzusehenden Kühlung, damit die maximal zulässigen Wicklungs- oder Kerntemperaturen nicht überschritten werden.

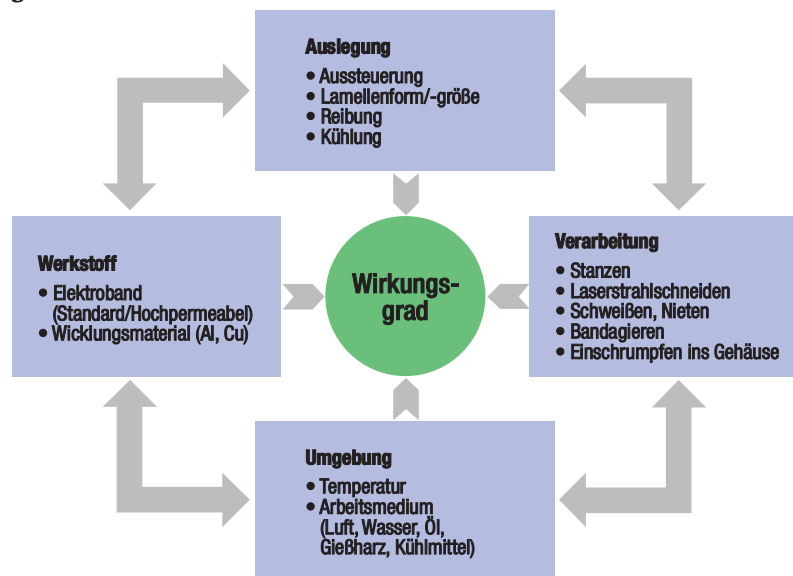


Abb. 11: Beeinflussung des Wirkungsgrades in elektromagnetischen Systemen

• **Verarbeitung**

Die Herstellungsverfahren der Blechlamellen und deren weitere Verarbeitung verursachen durch eingebrachte Spannungen zusätzliche Ummagnetisierungsverluste, die letztlich als Baufaktor in die Berechnung des Konstrukteurs eingehen. Außerdem ist zu berücksichtigen, dass nicht alle Sorten mit allen Verfahren verarbeitet werden können. So ist z.B. das Schweißen als Magnetkernfügetechnik bei dicken organischen Isolierschichtungen ungeeignet.



• **Umgebung**

Die Umgebungsfaktoren beeinflussen den Wirkungsgrad direkt bzw. indirekt. Bei der direkten Beeinflussung kann z.B. die Kerntemperatur sich unmittelbar auf den Wirbelstromverlust und die magnetische Polarisation auswirken. Bei der indirekten Beeinflussung handelt es sich um die Möglichkeit der Wärmeabfuhr aus dem Magnetkern. Die Wechselwirkungen des Arbeitsmediums mit dem Werkstoff (Elektroband und Isolierlack) – zu nennen sind hier Korrosion, Ölverträglichkeit, Ammoniakbeständigkeit – sind außerdem in der Auslegung zu beachten.



Der Wirkungsgrad elektrischer Maschinen sowie anderer elektromagnetischer Komponenten wird nicht zuletzt durch gesetzgeberische Maßnahmen zukünftig an Bedeutung gewinnen. Hierzu zählen:

- Lichttechnik (Vorschaltgeräte)
- Kühltechnik (Hermetikmotoren)
- Industrieantriebe

Die Magnetkerne aus Elektroband haben die Aufgabe, innerhalb der elektrischen Systeme magnetische Felder zu verstärken und zu leiten. Dabei limitiert die kristallografische Textur (Kapitel 2) den Einsatz von Elektroband in rotierenden Maschinen (nichtkornorientiertes Elektroband) oder in Transformatoren (kornorientiertes Elektroband), **Abb. 12**.

Abb. 12: Anwendung von kornorientiertem Elektroband, z. B. als Transformatorkerne (Bild oben), und nichtkornorientiertem Elektroband, z. B. als Motorkerne (Bild unten)

Zu den vielfältigen Anwendungen von Elektroband, **Abb. 13**, gehören in den Bereichen

- **Energieerzeugung**
 - Wasserkraftgeneratoren
 - Turbogeneratoren
 - Windkraftgeneratoren
 - Dieselsegeneratoren
 - Lichtmaschinen
- **Energieübertragung und -verteilung**
 - Leistungstransformatoren
 - Verteilungstransformatoren

- **Nutzbarmachung von Energie**
 - Normmotoren sowie andere industrielle Klein- und Großantriebe
 - Pumpen, Verdichter und Lüfter
 - Bahnmotoren
 - Linearmotoren
 - Vorschaltgeräte in der Lichttechnik
 - Motoren für Haushaltsgeräte
 - Relais und Schütze
 - Kleintransformatoren für die Steuer-, Schalt- und Schutztechnik
 - Elektroantriebe in der Automatik.

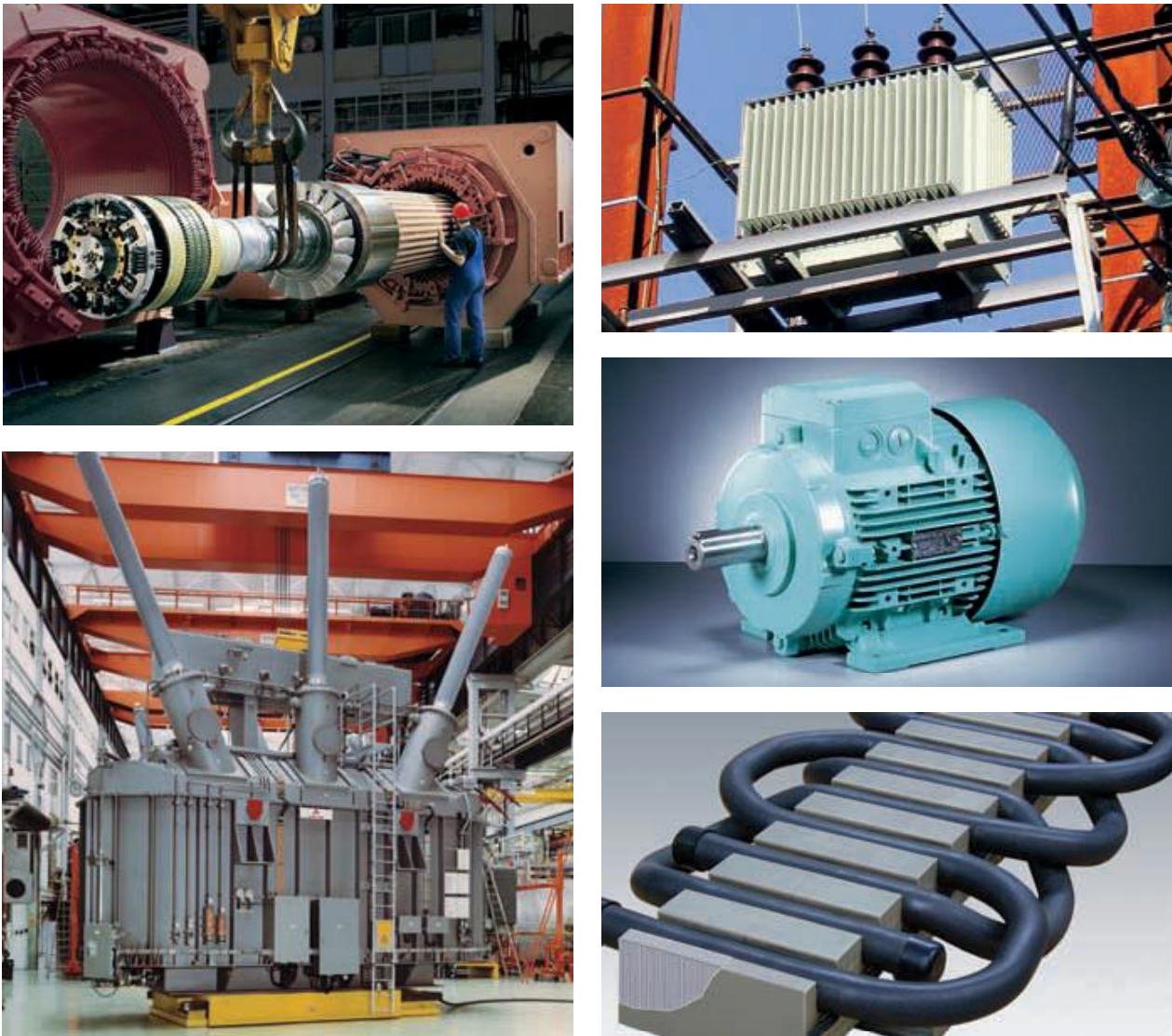


Abb. 13: Elektroband in elektrotechnischen Systemen – Antrieb einer Gasverflüssigungsanlage (links oben), Leistungstransformator (links unten), Verteilungstransformator (rechts oben), Normmotor (rechts Mitte) und Statorpaket für Magnetschwebbahn (rechts unten)

8 Elektroband und Umwelt

Der nachhaltige Umgang mit Energieressourcen wird durch verbessertes Elektroband gefördert. Die Entwicklung des Elektrobandes konzentriert sich darauf, Sorten mit einer für den Anwendungszweck optimalen Eigenschaftskombination und mit für den Kunden vertretbaren Material- und Verarbeitungskosten herzustellen. In den letzten Jahrzehnten sind durch Optimierung der chemischen Zusammensetzung und durch Verbes-

serung der metallurgischen sowie der umform- und glühtechnischen Prozesse große Fortschritte hinsichtlich der magnetischen, der mechanischen und der technologischen Eigenschaften erreicht worden. Somit konnte durch die verbesserte Umwandlung von Energie der Wirkungsgrad von elektrischen Systemen unter Berücksichtigung von Baugröße und der erwarteten Leistung deutlich gesteigert werden. Dies gilt besonders für die „Dauerläufer“, wie Generatoren und Bahnmotoren, die neueren Transfor-

matoren zur Energieübertragung und -verteilung sowie für Pumpen, Lüfter, Kühlschrankkompressoren etc. Durch den gesteigerten Wirkungsgrad wird der Energieverbrauch gesenkt. Die natürlichen Ressourcen und die Umwelt werden nachhaltig geschont.

9 Grundlagen

9.1 Elektromagnetismus, magnetisches Verhalten

Im Jahre 1820 gelang Chr. Oersted der Nachweis der magnetischen Kraftwirkung in der Umgebung bewegter elektrischer Ladungen. Den Raum, in dem diese Kräfte vorhanden sind, bezeichnet man als das magnetische Feld. In Analogie zur mechanischen Kraft ist auch die magnetische Kraft eine richtungsabhängige Größe. Handelt es sich bei den bewegten Ladungen um einen elektrischen Leitungsstrom mit der Stromdichte S , so lässt sich die Oersted'sche Beobachtung in die nachstehende mathematische Form kleiden:

$$\oint \mathbf{H} d\mathbf{l} = \int_A \mathbf{S} d\mathbf{A} \quad (1)$$

Gleichung (1) besagt, dass das Integral über dem Produkt aus der magnetischen Feldstärke \mathbf{H} und dem Randelement $d\mathbf{l}$ längs des Randes l einer Fläche A gleich dem Strom ist, der diese Fläche durchsetzt. Ist dieser Strom zeitlich konstant, so spricht man von einem stationären Strom. Das von ihm erzeugte magnetische Feld ist ein Gleichfeld. Ist jedoch der Strom nach Größe und Richtung veränderlich, so handelt es sich um einen Wechselstrom, und entsprechend ist das Feld ein magnetisches Wechselfeld. Gleichung (1) ist die Grundgleichung des Elektromagnetismus. Die Beziehung

$$\Theta = \int_A \mathbf{S} d\mathbf{A} \quad (2)$$

bezeichnet man als Durchflutungsgesetz mit Θ als elektrische Durchflutung. Die Berechnung des magnetischen Feldes eines beliebig geformten, geschlossenen Leiters ist mit Hilfe der Gleichung (1) recht schwierig. Nach Biot und Savart gestaltet sich dies wesentlich einfacher, wenn man die magnetische Wirkung des Gesamtstromleiters als die Summe der Wirkungen seiner einzelnen Teile denkt. Zerlegt man also den Leiter in unendlich kleine Elemente, so setzt sich die

Gesamtwirkung aus den Elementarwirkungen der Stromelemente zusammen. Obwohl ein solcher Fall experimentell nicht realisierbar ist, hat sich das Biot-Savart-Gesetz in praxi als außerordentlich hilfreich erwiesen.

Entsprechend dem Prinzip von Aktio und Reaktio ist zu vermuten, dass zu der von Oersted gemachten Beobachtung auch die Umkehrung existiert, d. h., es stellt sich die Frage, ob ein stromdurchflossener Leiter in einem Magnetfeld einen Bewegungsantrieb erfährt. Dies ist in der Tat der Fall, denn die Beziehung

$$\mathbf{F} = I (\mathbf{l} \times \mathbf{B}) \quad (3)$$

besagt, dass auf einen von einem Strom I durchflossenen Leiter der Länge l in einem Magnetfeld die Kraft \mathbf{F} ausgeübt wird. \mathbf{B} heißt die magnetische Flussdichte. Sie ist ausschließlich eine Funktion des Ortes, also eine Feldgröße.

Das sich über eine Fläche A erstreckende Integral der magnetischen Flussdichte heißt magnetischer Induktionsfluss:

$$\Phi = \int_A \mathbf{B} d\mathbf{A} \quad (4)$$

Zwischen der magnetischen Feldstärke und der magnetischen Flussdichte gilt im leeren Raum die Beziehung:

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H} \quad (5)$$

Die universelle Konstante μ_0 heißt magnetische Feldkonstante. Ihr Wert lautet:

$$\mu_0 = 4 \pi \cdot 10^{-7} \text{ [Vs/Am]} \quad (6)$$

Das bedeutendste Phänomen der Elektrodynamik sind die elektromagnetischen Induktionserscheinungen. Faraday gilt als deren Entdecker. Die quantitativen Zusammenhänge ergeben sich aus dem Induktionsgesetz, dessen allgemeine Form lautet:

$$\oint \mathbf{E} d\mathbf{l} = \frac{d}{dt} \int_A \mathbf{B} d\mathbf{A} \quad (7)$$

Es besagt: In einem geschlossenen, homogenen Leiterkreis, dessen

Fläche A von einer zeitlich veränderlichen Flussdichte durchsetzt wird, ist jedes Element $d\mathbf{l}$ des Leiters Sitz einer induzierten elektrischen Spannung, die den Wert $\mathbf{E} d\mathbf{l}$ hat. Im ganzen Kreis wird daher die elektrische Spannung $\oint \mathbf{E} d\mathbf{l}$ induziert, die einen induzierten Strom im Leiter zur Folge hat. Es ist nun völlig gleichgültig, ob die Flussänderung unter konstanten geometrischen Verhältnissen durch die Änderung des primären Magnetfeldes oder bei konstantem Feld durch eine Lageänderung des Leiters erfolgt.

Im materieverfüllten Raum gilt:

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (8)$$

Die materialabhängige Größe μ nennt man absolute Permeabilität. Da im leeren Raum $\mu = \mu_0$ ist, kann man die Permeabilität irgendeines Stoffes auf die des leeren Raumes beziehen und erhält auf diese Weise die dimensionslose Größe

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (9)$$

die man als Permeabilitätszahl oder relative Permeabilität bezeichnet. Sie charakterisiert als Stoffkonstante das magnetische Verhalten verschiedener Werkstoffe.

Man unterscheidet drei Hauptgruppen von Werkstoffen:

- Diamagnetische Stoffe mit $\mu_r < 1$
- Paramagnetische Stoffe mit $\mu_r > 1$
- Ferromagnetische Stoffe mit $\mu_r \gg 1$

Wie die Gleichungen (3) und (7) erkennen lassen, sind für den Bau elektrischer Maschinen lediglich die ferromagnetischen Werkstoffe aufgrund ihrer feldverstärkenden Wirkung von Bedeutung. Zu ihnen zählt auch das Elektroband.

Bisher war stets von magnetischen Feldern die Rede, die von bewegten elektrischen Ladungen erzeugt werden. Wie die Erfahrung lehrt, gibt es einige Stahlsorten, in deren Umgebung ein permanentes magnetisches Feld vorhanden ist. Betrachtet man z. B.

einen stabförmigen Körper aus einem derartigen dauermagnetischen Material, so scheint sich das Feld von zwei Zentren in der Nähe der Stabebenen auszubreiten. Die Zentren nennt man Nord- und Südpol. Erfahrungsgemäß gelingt es nicht, die beiden Pole durch wiederholtes Teilen zu trennen.

Der Magnet stellt also einen Dipol mit einem Moment dar. In einem homogenen Magnetfeld erfährt dieser Dauermagnetstab ein Drehmoment. Das Drehmoment wird durch die magnetische Polarisierung J verursacht. Diese ist mit der Flussdichte durch die Gleichung

$$J = B - \mu_0 H \quad (10)$$

verknüpft.

9.2 Elektroband als ferro- und weichmagnetischer Werkstoff

Die Magnetisierbarkeit eines ferromagnetischen Werkstoffes, also der Verlauf der Kurve B vs. H , lässt sich einfach in einem künstlich erzeugten magnetischen Feld messen, Abb. 14.

Durch die Primärwicklung wird ein magnetisches Feld erzeugt. Die magnetische Feldstärke H ist proportional zum Magnetisierungsstrom I . In der Sekundärwicklung wird die elektrische Spannung induziert, die von der feldverstärkenden Wirkung des ferromagnetischen Werkstoffes abhängig und zur magnetischen Induktion B proportional ist. Unter Berücksichtigung des Leerflusses wird die magnetische Polarisierung im Kernwerkstoff berechnet.

Aufgrund von komplizierten, im Innern des Magnetmaterials ablaufenden Prozessen (Bewegungen und Wachstumsvorgänge der magnetischen Domänen, also mikroskopisch kleiner Bereiche in einem ferromagnetischen Material, innerhalb deren die einzelnen atomaren oder molekularen

Magnetpartikel die gleiche Orientierung aufweisen) ergibt sich eine Hysterese, d. h., der Verlauf von B vs. H ist bei wachsender magnetischer Feldstärke H ein anderer als bei abnehmender magnetischer Feldstärke.

Ferromagnetische Werkstoffe zeigen neben einer Hysterese einen nichtlinearen Zusammenhang zwischen der erregenden magnetischen Feldstärke H und der Flussdichte B .

Die Flussdichte im Werkstoff ergibt sich aus der Flussdichte im Vakuum $\mu_0 H$ und der magnetischen Polarisierung J des Werkstoffes und wird mit der Gleichung

$$B = \mu_0 H + J = \mu_r \mu_0 H \quad (11)$$

beschrieben.

Elektrobandsorten werden unter praktischen Gesichtspunkten durch den Verlauf der Kennlinie B vs. H bestimmt. Die Abhängigkeit der magnetischen Flussdichte B von der magnetischen Feldstärke H limitiert die Relevanz der unterschiedlichen Elektrobandsorten für die verschiedenen Einsatzfälle.

Der aufsteigende Ast der Kennlinie schließt sich mit dem absteigenden Ast an den Endpunkten zur Hystereseschleife zusammen. Die Form der Hystereseschleife ist abhängig von

- Größe und Richtung der magnetischen Anisotropien,
- der Größe der Magnetostraktion,
- Art und Anzahl der strukturellen Defekte,
- der Temperatur,
- äußeren mechanischen Spannungen sowie
- der Frequenz des angelegten äußeren Feldes.

Beim Abschalten des Magnetfeldes bleibt ein bestimmter Wert der magnetischen Polarisierung erhalten. Dieser Wert wird als magnetische Remanenz B_r bezeichnet. Die Breite der Hysterese ist durch die Koerzitivfeldstärke H_c bestimmt, diejenige Feldstärke, die notwendig ist, um die Flussdichte auf null zu bringen. Ferromagnetische Werkstoffe mit $H_c < 1000$ A/m nennt

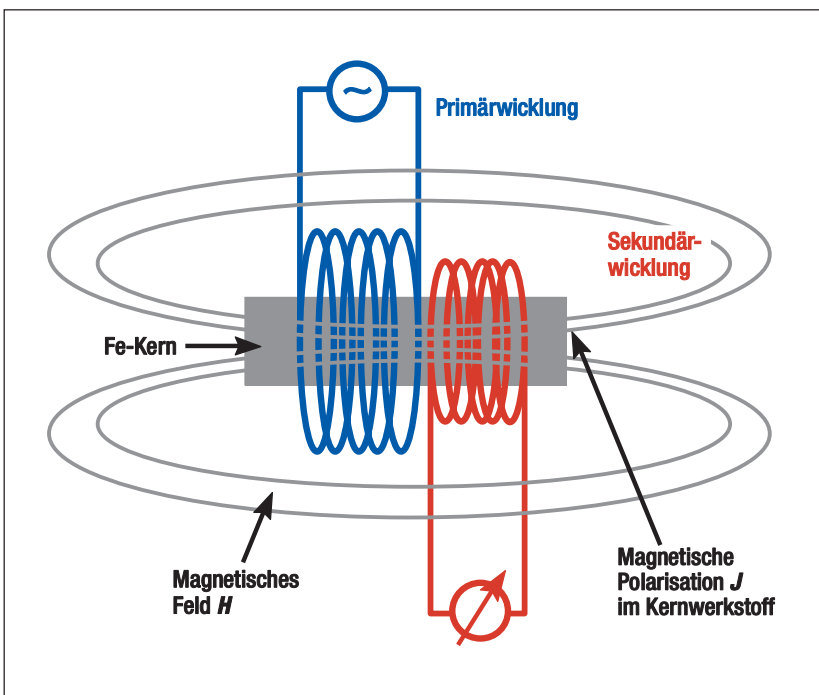


Abb. 14: Magnetisierung ferromagnetischer Werkstoffe

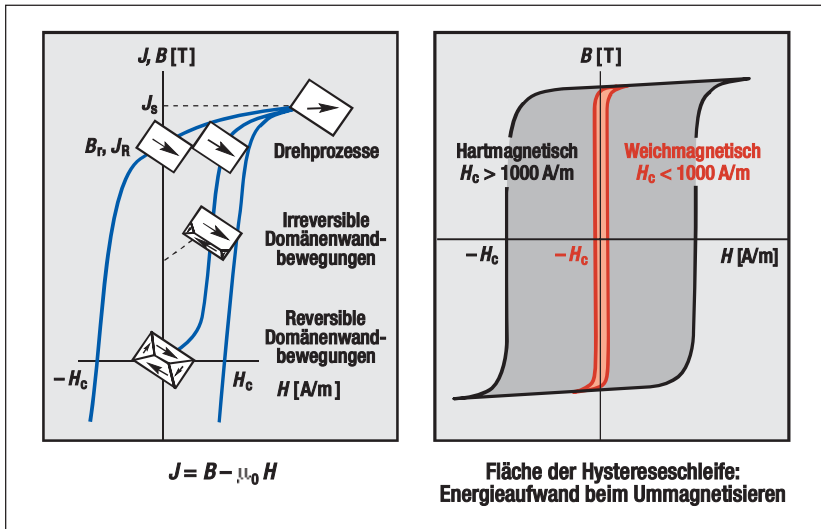


Abb. 15: Hystereseschleifen ferromagnetischer Werkstoffe

man weichmagnetisch (u. a. das Elektroband), solche mit $H_c > 1000$ A/m hartmagnetisch, Abb. 15.

Also durchläuft der Werkstoffzustand bei der Ummagnetisierung im Gleichfeld oder Wechselfeld eine geschlossene Hystereseschleife, deren Flächeninhalt die pro Ummagnetisierungszyklus an die Umgebung abgegebene Energiemenge (Wärmemenge) pro Werkstoffvolumen darstellt. Multipliziert man diese Größe mit der Ummagnetisierungsfrequenz und dividiert das Ergebnis durch die Werkstoffdichte, erhält man die spezifische

Ummagnetisierungsverlustleistung, kurz Ummagnetisierungsverlust P_S .

Die Hysteresefläche ist ein Maß für den Energieaufwand bei der Ummagnetisierung. Bei den weichmagnetischen Werkstoffen lässt sich sowohl die Form der Hystereseschleife als auch der Wert der Koerzitivfeldstärke H_c und der magnetischen Remanenz durch den Herstellungsweg beeinflussen. Im Allgemeinen werden die weichmagnetischen Werkstoffe durch die Koerzitivfeldstärke H_c und die Sättigungspolarisation J_s charakterisiert, Abb. 16.

Der Ummagnetisierungsverlust eines Elektrobandes wie auch anderer weichmagnetischer Werkstoffe, die einem periodischen Wechselfeld ausgesetzt sind, lässt sich in einfacher Näherung als Summe aus dem Hystereseverlust P_H und dem Wirbelstromverlust P_W beschreiben.

$$P = P_H + P_W \quad (12)$$

Die wichtigsten Einflussgrößen, die es bei der Reduzierung der Verluste bzw. bei der Entwicklung von besonders hochwertigen verlustarmen Elektrobandern zu beachten gilt, sind

- der Legierungsgrad,
- die Korngröße,
- der Ausscheidungszustand,
- die kristallografische Textur und
- die Oberflächenbeschaffenheit.

Zur Erzielung niedriger Ummagnetisierungsverluste und hoher Magnetisierbarkeit im Elektroband benötigt man eine grobkörnige Gefügestruktur, die möglichst frei von Verunreinigungen und Fehlstellen ist.

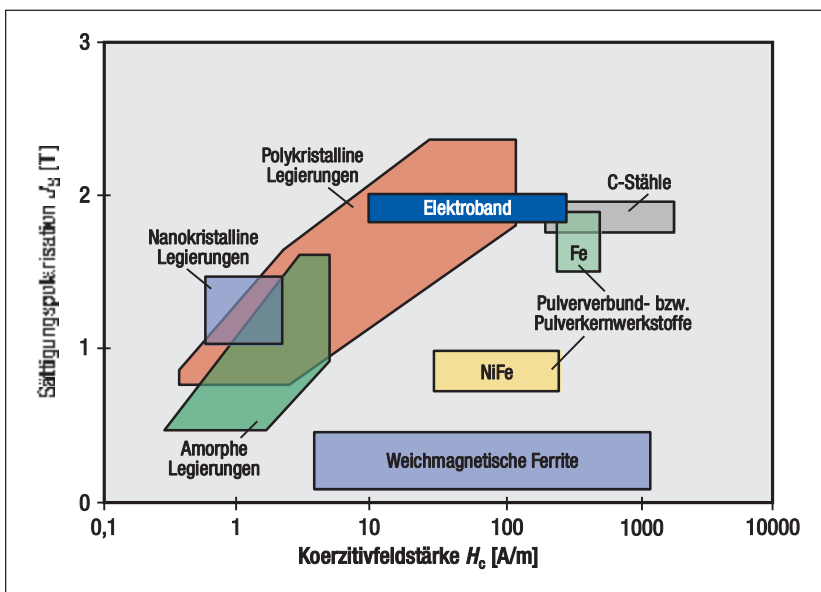


Abb. 16: Klassifizierung weichmagnetischer Werkstoffe

9.3 Formelzeichen

Formelzeichen	Begriff	Einheit
A	Fläche, Kernquerschnitt	m ²
B	Magnetische Flussdichte	T
\hat{B}	Magnetische Flussdichte (Scheitelwert)	T
B_r	Magnetische Remanenz	T
d	Blechpaketdicke	mm
E	Elektrische Feldstärke	V/m
F	Kraft	N
f	Frequenz	Hz
H	Magnetische Feldstärke	A/m
H_c	Koerzitivfeldstärke	A/m
I	Magnetisierungsstrom	A
J	Magnetische Polarisierung	T
J_s	Sättigungspolarisation	T
l	Länge	m
P	Ummagnetisierungsverlust	W/kg
P_H	Hystereseverlust	W/kg
P_s	Spezifischer Ummagnetisierungsverlust	W/kg
P_w	Wirbelstromverlust	W/kg
S	Stromdichte	A/m ²
s	Blechdicke	mm
t	Zeit	s
Φ	Magnetischer Induktionsfluss	Wb
Θ	Elektrische Durchflutung	A
μ	Permeabilität	Vs/Am
μ_0	Magnetische Feldkonstante	Vs/Am
μ_r	Relative Permeabilität (Permeabilitätszahl)	-
ρ	Dichte	kg/m ³
ρ_e	Spezifischer elektrischer Widerstand	$\mu\Omega \cdot cm$

10 Quellennachweis

Merkblatt 401 „Elektroblech“, Stahl-Information-Zentrum, Düsseldorf, 3. Auflage 1983

R. M. Bozorth: „Ferromagnetism“, D. van Nostrand Company, Inc., New York, 1955

G. Wassermann, J. Grewen: „Texturen metallischer Werkstoffe“, Springer Verlag, Berlin, 1962

R. Boll: „Weichmagnetische Werkstoffe“, Vacuumschmelze GmbH, Hanau, 4. Auflage, 1990

A. Schoppa: „Einfluss der Be- und Verarbeitung auf die magnetischen Eigenschaften von schlussgeglühtem nichtkornorientiertem Elektroband“, Dissertation, RWTH Aachen, 2001

A. Schoppa, C.-D. Wuppermann: „Elektroband - Ein anspruchsvoller Stahlwerkstoff für energieeffizienten Einsatz in elektromagnetischen Systemen“, Vortrag Wirtschaftsvereinigung Stahl/Stahlinstitut VDEh, 06.06.2002

J. Schneider, A. Schoppa, C.-D. Wuppermann: „Elektroband für effiziente elektrotechnische Erzeugnisse“, MEFORM 2003, 26.-28.03.2003, Institut für Metallumformung, TU Bergakademie Freiberg, Konferenzband

K. Günther: „Recent Technology Developments in Production of Grain Oriented Electrical Steel“, 16. Soft Magnetic Materials Conference, Düsseldorf, 2003

Tagungsband „Metallurgy and Magnetism“, TU Bergakademie Freiberg, Workshop, 16.-18.06.2004

K. Günther, K. Peters, J. Schneider, A. Schoppa und C.-D. Wuppermann: „Electrical Steel in thin gauges - recent possibility for electrotechnical systems“, Steel Grips, Journal of Steel and Related Materials 2 (2004), No. 4

11 Wesentliche Elektrobändnormen

DIN EN 10106,
Ausgabe: 1996-02

Kaltgewalztes nichtkornorientiertes Elektrolech und -band im schlussgeglühten Zustand

DIN EN 10107,
Ausgabe: 1996-02

Kornorientiertes Elektrolech und -band im schlussgeglühten Zustand

DIN EN 10126,
Ausgabe: 1996-02

Kaltgewalztes Elektrolech und -band aus unlegierten Stählen im nicht schlussgeglühten Zustand

DIN EN 10165,
Ausgabe: 1996-02

Kaltgewalztes Elektrolech und -band aus legierten Stählen im nicht schlussgeglühten Zustand

DIN EN 10251,
Ausgabe: 1997-02

Magnetische Werkstoffe - Verfahren zur Bestimmung der geometrischen Kenngrößen von Elektrolech und -band

DIN EN 10252,
Ausgabe: 1997-05

Magnetische Werkstoffe - Verfahren zur Messung der magnetischen Eigenschaften von Elektrolech und -band bei mittleren Frequenzen

DIN EN 10280,
Ausgabe: 2001-06

Magnetische Werkstoffe - Verfahren zur Messung der magnetischen Eigenschaften von Elektrolech und -band mit Hilfe eines Tafelmessgerätes

DIN EN 10282,
Ausgabe: 2001-06

Magnetische Werkstoffe - Messverfahren zur Bestimmung des Oberflächenisolationswiderstandes von Elektrolech und -band

DIN EN 10303,
Ausgabe: 2001-07

Dünnes Elektrolech und -band aus Stahl zur Verwendung bei mittleren Frequenzen

DIN EN 60404-2,
Ausgabe: 1998-12

Magnetische Werkstoffe - Teil 2: Verfahren zur Bestimmung der magnetischen Eigenschaften von Elektrolech und -band mit Hilfe eines Epsteinrahmens (IEC 60404-2: 1996)

ASTM A 664,
Ausgabe: 1999

Kennzeichnung der Stahlsorten für Elektroleche in ASTM-Normen

ASTM A 677/A 677M,
Ausgabe: 1999

Nichtkornorientiertes schlussgeglühtes Elektrolech

ASTM A 683/A 683M,
Ausgabe: 1999

Nichtkornorientiertes nicht schlussgeglühtes Elektrolech

IEC 60404-1-1 (2004-04) Ed. 1.0
Magnetic materials - Part 1-1:

Classification - Surface insulations of electrical steel sheet, strip and laminations

IEC 60404-8-5 (1989-05) Ed. 1.0
Magnetic materials - Part 8:

Specifications for individual materials. Section Five: Specification for steel sheet and strip with specified mechanical properties and magnetic permeability

IEC 60404-13 (1995-09) Ed. 1.0
Magnetic materials - Part 13:

Methods of measurement of density, resistivity and stacking factor of electrical steel sheet and strip

IEC 60404-8-2 (1998-05) Ed. 2.0
Magnetic materials - Part 8-2:

Specifications for individual materials - Cold-rolled electrical alloyed steel sheet and strip delivered in the semi-processed state

IEC 60404-8-3 (1998-05) Ed. 2.0
Magnetic materials - Part 8-3:

Specifications for individual materials - Cold-rolled electrical non-alloyed steel sheet and strip delivered in the semi-processed state

IEC 60404-8-4 (1998-05) Ed. 2.0
Magnetic materials - Part 8-4:

Specifications for individual materials - Cold-rolled non-oriented electrical steel sheet and strip delivered in the fully-processed state

IEC 60404-8-7 (1998-05) Ed. 2.0
Magnetic materials - Part 8-7:

Specifications for individual materials - Cold-rolled grain-oriented electrical steel sheet and strip delivered in the fully-processed state

IEC 60404-2 (1996-03) Ed. 3.0
Magnetic materials - Part 2:

Methods of measurement of the magnetic properties of electrical steel sheet and strip by means of an Epstein frame

12 Bildnachweis

Bilder und Grafiken wurden mit freundlicher Genehmigung folgender Unternehmen veröffentlicht:

- Alstom Power Generation AG
- Areva Energietechnik GmbH
- Dr. Karl Bausch GmbH & Co. KG
- Dr. Brockhaus Messtechnik GmbH & Co. KG
- Enercon GmbH
- Heinrich Georg GmbH
- Siemens AG
- ThyssenKrupp AG



Stahl-Zentrum

Stahl-Informationen-Zentrum
Postfach 10 48 42
40039 Düsseldorf

E-Mail: siz@stahl-info.de · Internet: www.stahl-info.de

