
Elektromobilität – Neue Herausforderungen an den Werkstoff Elektroband

Dipl.-Ing. Norbert Brachthäuser
C.D.Wälzholz, Hagen

Nichtkornorientiertes Elektroband ist der bevorzugte Werkstoff in Elektrofahrantrieben. Die besonderen Anforderungen sind hohe Drehzahlen und dadurch bedingt hohe Frequenzen im Magnetkern. Besonders dünne, hoch-Si/Al-legierte Elektrobänder reduzieren die Wirbelstromverluste bei hohen Frequenzen und ermöglichen dadurch hocheffiziente, verlustarme Elektroantriebe. Der Einfluss der Weiterverarbeitung und die Weiterentwicklung der Verbindungstechniken, das Laserschweißen und das Verkleben mit Backlack, werden dargestellt.

Non-grain-oriented electrical steel is the preferred material for electrical drives in cars and trucks. The special requirements are high r.p.m. and therefore high frequencies in the magnetic core. Extra thin, high silicon/aluminium –alloyed electrical steel reduces the core losses at high frequencies and allows highly efficient electrical drives at low losses. The impact of the further processing of electrical steel as well as the development of two connecting technologies, such as laser welding and glueing with “Backlack”-varnish will be presented.

Einleitung

Nicht kornorientiertes Elektroband ist eine weichmagnetische Stahlsorte, die in elektrischen Maschinen als Eisenkern den magnetischen Fluss bündelt und verstärkt. Das Material beeinflusst wesentlich die Leistungsfähigkeit und Effizienz der Elektromaschinen.

Die hohen Drehzahlen der Elektromotoren für PKW's sind eine technische Herausforderung für die Hersteller von Elektroband. Während leistungsstarke Elektromotoren für Industrieanwendungen bei Drehzahlen von maximal 5000 bis 8000 Umdrehungen pro Minute arbeiten, kann die Drehzahl von elektrischen Automobilantrieben bis zu viermal höher liegen. Elektromotoren, die diese Energie möglichst effizient auf die Straße bringen sollen, brauchen Eisenkerne, die möglichst geringe Ummagnetisierungsverluste aufweisen.

Die Qualität des eingesetzten Elektrobandes ist mit entscheidend für die Effizienz, die Kosten und die Umsetzbarkeit künftiger Elektrofahrantriebe.

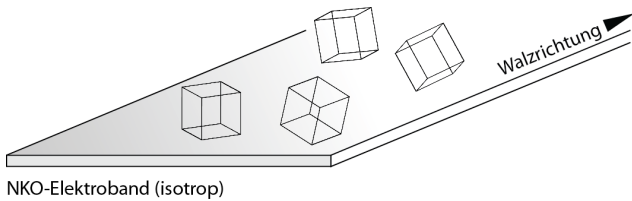
Eine weitere Herausforderung ist die technologisch anspruchsvolle Fertigung der Lamellenpakete bei vertretbaren Kosten.



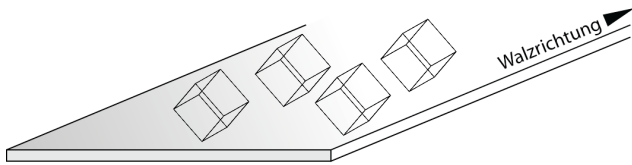
Bild 1: Hybrid-Antrieb (Quelle: Sachs)

1 Eigenschaften und Herstellung von Elektroband

Auf Grund seiner guten magnetischen Eigenschaften und geringer Herstellkosten hat Elektroband die größte Bedeutung innerhalb der Gruppe weichmagnetischer Werkstoffe. Elektroband basiert auf Fe-Si-Legierungen und wird als kaltgewalzt und geglühtes Material in Dicken zwischen 0,20 – 1,00 mm und Breiten bis 1250 mm hergestellt. Man unterscheidet zwei Arten von Elektroband, das nicht kornorientierte (NKO-Elektroband) und das kornorientierte (KO-Elektroband)[1].



NKO-Elektroband (isotrop)



KO-Elektroband (anisotrop)

Bild 2: Unterscheidung NKO und KO-Elektroband

NKO-Elektroband weist nahezu keine kristallografische Textur auf, d.h. die magnetischen Eigenschaften sind in allen Richtungen fast gleichmäßig, Bild 2. NKO-Elektroband wird deshalb in elektrischen Maschinen eingesetzt, da hier in der Regel keine magnetische Vorzugsrichtung gewünscht wird. KO-Elektroband weist eine kristallografische Textur auf, welche eine magnetische Vorzugsrichtung bewirkt und deshalb idealerweise in Leistungs- und Verteilungstransformatoren zum Einsatz kommt.

Bei NKO-Elektroband unterscheidet man den nicht schlussgeglühten Zustand (semi-finished = SF) und den schlussgeglühten Zustand (fully-finished = FF). Der Zustand SF erfordert eine Teileglühung der Lamellen oder gestapelten Pakete. Der Zustand FF wird in der Regel nach dem Verarbeiten nicht zusätzlich geätzt.

Im Nachfolgenden wird über NKO-Elektroband im schlussgeglühten Zustand (NKO-FF) berichtet.

Zu den wichtigen magnetischen Eigenschaften zählen der Ummagnetisierungsverlust, die magnetische Polarisation sowie die Permeabilität, Bild 3.

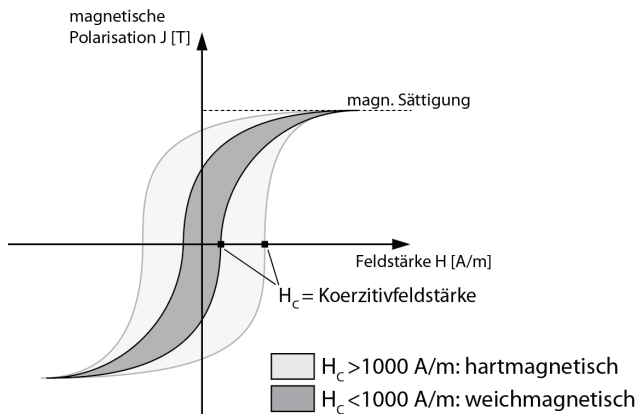


Bild 3: Magnetische Kenngrößen für Elektroband

Die Steigung der Magnetisierungskurve ist ein Maß für die Permeabilität. Der Gesamtverlust eines Eisenkerns setzt sich zusammen aus dem Hystereseverlust und dem Wirbelstromverlust. Den Einfluss der Korngröße auf die Hystereseverluste zeigt Bild 4.

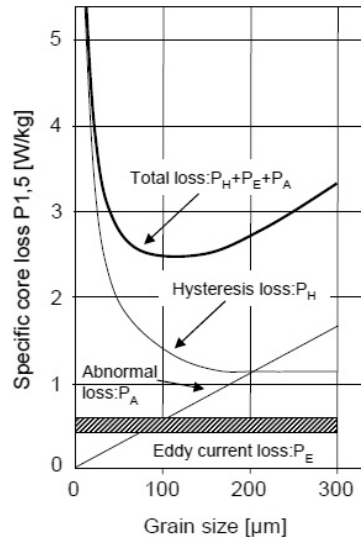
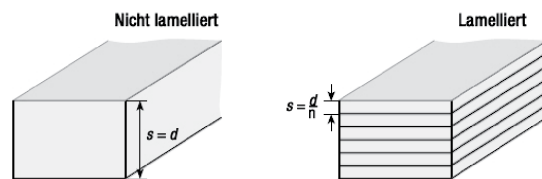


Bild 4: Einfluss der Korngröße auf die Verlustanteile [2]

Mit steigender Frequenz steigt der Wirbelstromanteil deutlich an, und zwar zum Quadrat der Frequenz. Zur Verringerung der Ummagnetisierungsverluste werden Eisenkerne lamelliert, Bild 5.



$$\text{Ummagnetisierungsverlust: } P_{\text{gesamt}} = P_H + P_W$$

P_H = Hystereseverlust/statischer Anteil (Fläche der Hystereseschleife)
 P_W = Wirbelstromverlust/dynamischer Anteil

$$P_W = \frac{(\pi f s B)^2}{6 \rho \rho_e}$$

f = Frequenz
s = Lamellendicke
B = Magnetische Flussdichte
ρ = Dichte
ρ_e = Spez. elektr. Widerstand
d = Magnetkerndicke

$$P_W(\text{nicht lamelliert}) > P_W(\text{lamelliert})$$

Bild 5: Verringerung der Ummagnetisierungsverluste durch Lamellierung von Magnetkernen [1]

Als Standard-Dicken haben sich 0,35 mm, 0,50 mm und 0,65 mm etabliert. Die Güten sind in EN 10106 [3] genormt.

Hochfrequente Anwendungen, wie z.B. E-Antriebe im Automobil werden mit reduzierten Materialdicken zwischen 0,20 bis 0,35 mm ausgelegt, siehe hierzu Abschnitt 2. Elektroband wird mit bis zu ca. 5 % (Silizium + Aluminium) legiert, um über die Steigerung des elektrischen Widerstandes eine zusätzliche Reduzierung der Wirbelstromverluste zu erreichen. Legierungen mit niedrigeren Legierungsanteilen bieten hingegen den Vorteil einer hohen Sättigungspolarisation und Permeabilität sowie einer guten Wärmeleitfähigkeit, Bild 6.

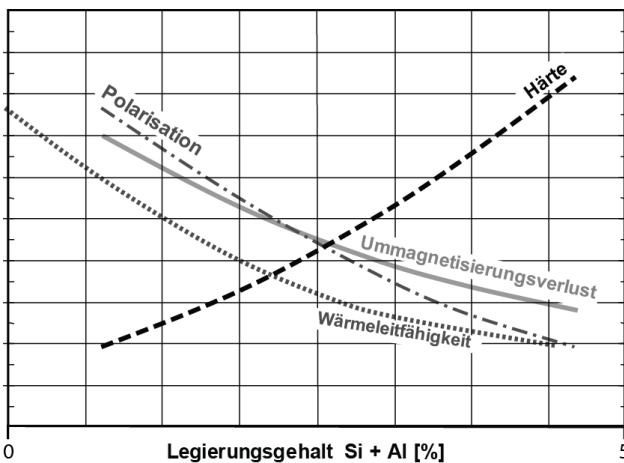


Bild 6: Elektroband-Einfluss der Legierungselemente auf die mechanischen, physikalischen und magnetischen Eigenschaften

Elektroband wird mit modernsten, metallurgischen Prozessen hergestellt: Oxygen-Stahlwerk, sekundärmetallurgische Behandlung u.a. zur

Entschwefelung, Vakuum-Behandlung zur Tiefstentkohlung, Stranggießen, Warmwalzen, Beizen, Kaltwalzen, Durchlaufglühen, Lackieren/Isolieren der Oberfläche und Längs- und Querteilen der Bänder, Bild 7. Die Begleit- und Spurenelemente werden im Stahlwerk auf ein möglichst niedriges Niveau reduziert. Zur Vermeidung von magnetischen Alterungseffekten muss Elektroband auf extrem niedrige Kohlenstoffgehalte eingestellt werden. Die Warmwalz- und Schlussglühparameter müssen genau abgestimmt sein, um die geforderten magnetischen Eigenschaften einzustellen.

Häufig wird Elektroband in lackierter Ausführung verwendet. Zur Anwendung kommen wasserlösliche, umweltfreundliche Lacke auf organischer oder anorganischer Basis. Die lackierten bieten gegenüber blanken Oberflächen folgende Vorteile:

- deutliche Verbesserung der Stanzbarkeit (Erhöhung der Werkzeugstandzeiten)
- elektrische Isolation der Lamellen, dadurch weitere Reduktion der Wirbelstromverluste im Paket
- Korrosionsschutz

Besondere Anforderungen, wie die Schweißbarkeit, die Wärmebebeständigkeit gegenüber Arbeitstemperaturen oder Entspannungsglühbehandlungen der Lamellenpakete, eine chemische Beständigkeit gegenüber Flüssigkeiten, Ölen oder Stanzhilfsmitteln, müssen bei der Auswahl des Elektroband-Lackes ebenfalls berücksichtigt werden. Elektroband-Lacke sind genormt in DIN EN 10342 [4]. Die rein organischen EC3-Lacke sind Phenolharz-basierte Systeme und ermöglichen eine

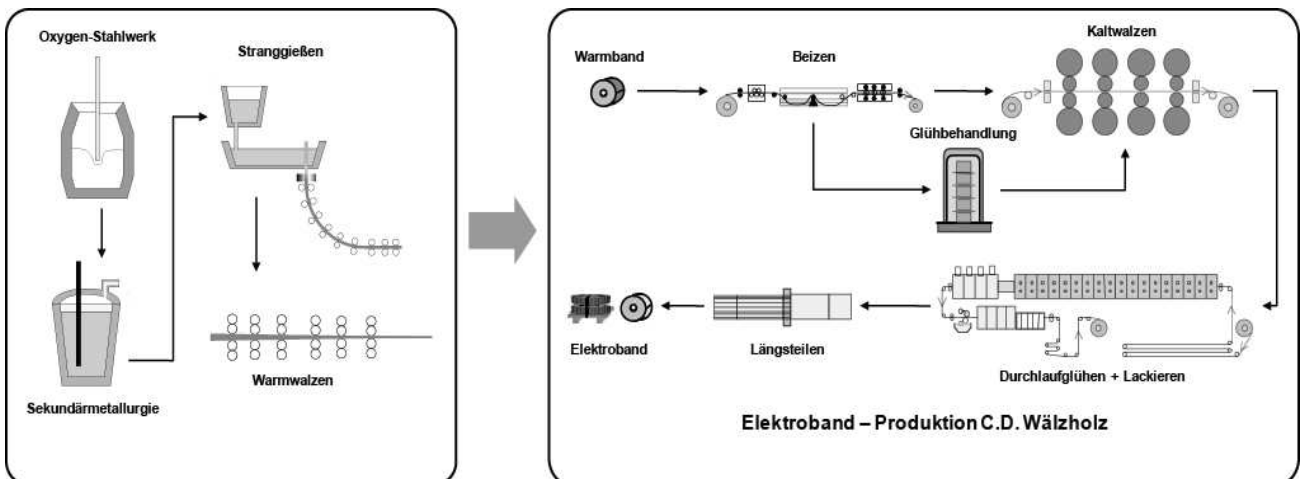


Bild 7: Herstellungsrouten von NKO-Elektroband

deutliche Verbesserung der Stanzbarkeit bei jedoch begrenzter Wärmebeständigkeit. EC5 und EC6-Lacke sind organisch/anorganische Mischsysteme, die neben einer guten Wärmebeständigkeit eine sehr gute elektrische Isolation bei hohen Schichtdicken ermöglichen, Bild 8. EC6-Lacke werden vorzugsweise in Großmaschinen und Generatoren eingesetzt. EC5-Lacke zeigen außerdem bei Einsatz niedriger Schichtdicken sehr gute Schweißbarkeiten.



Bild 8: Prüfung des Isolationswiderstandes gem. ASTM A717[5]

2. Eigenschaften von Elektrobänder für Hybrid- und vollelektrische Automobilantriebe

Im Gegensatz zu klassischen Industrieantrieben mit Nennfrequenzen von 50 oder 60 Hz werden Hybrid- und elektrische Fahrtriebe auf Grund ihrer hohen Drehzahlen in einem deutlich höheren Frequenzbereich beansprucht. Während in Anwendungen mit niedrigen Frequenzen die Hystereseverluste dominant sind, treten bei höheren Frequenzen die Wirbelstromverluste eindeutig in den Vordergrund. Die Auswahl des geeigneten Elektrobandes ist deshalb stark abhängig von der Frequenz. Automobilfahrtriebe werden häufig im höher frequenten Bereich, z.B. 1000 Hz, beansprucht. Durch den quadratischen Anstieg der Wirbelstromverluste mit der Frequenz, steigen die Gesamtverluste deutlich an. Dem wird durch Absenkung der Dicke und Einsatz des höchst

möglichen Si- + Al-Gehaltes zur Anhebung des elektrischen Widerstandes entgegnet. Ziel ist eine Absenkung der Wirbelstromverluste. Eine Anhebung des Si+Al-Gehaltes ist aus Gründen der Kaltwalzbarkeit auf max. ca. 5 % begrenzt. Bild 9 zeigt den Vergleich verschiedener Banddicken mit jeweils gleicher Legierung. Der Vorteil dünner Elektrobänder herunter bis 0,20 mm ist bei hohen Frequenzen deutlich erkennbar, wohingegen eine weitere Absenkung der Dicke in der Praxis nur noch geringe Vorteile bringt. Vermutlich werden die theoretischen Wirbelstromverlustvorteile eines 0,10 mm dünnen Elektrobandes durch Verarbeitungsspannungen teilweise kompensiert. Auch die hohen Herstellungskosten und technischen Schwierigkeiten bei der Verarbeitung von Elektrobändern < 0,20 mm, z.B. Stanzen, sind zu beachten. Nach heutigem Erkenntnisstand werden deshalb Banddicken zwischen 0,20 und 0,35 mm für Elektrofahrantriebe zum Einsatz kommen. Mit den europäischen Elektrobänderherstellern und der deutschen Automobilindustrie (VDA) werden voraussichtlich die Sorten NO20 (0,20 mm), NO25 (0,25 mm) und NO30 (0,30 mm) vereinbart und als Erweiterung in die Norm DIN EN 10303 [6] aufgenommen.

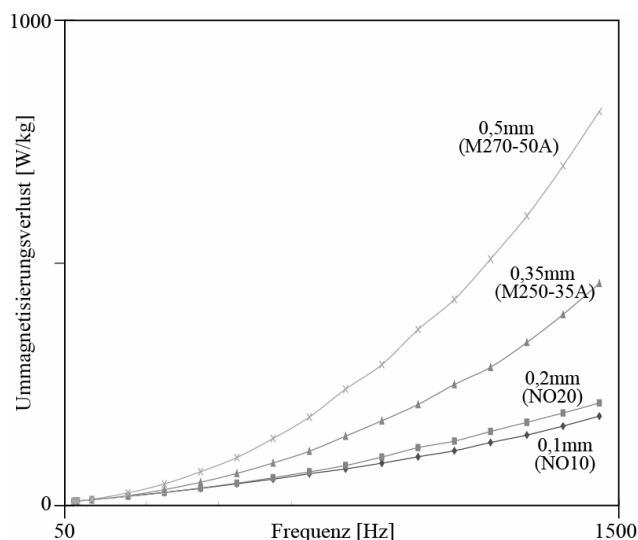


Bild 9: Einfluss der Blechdicke auf die Ummagnetisierungsverluste

Eine weitere Besonderheit der elektrischen Automobilantriebe stellt die mechanische Beanspruchung dar. Bei hohen Drehzahlen treten hohe mechanische Belastungen im Bereich der Rotorzähne auf, die je nach Design eine Mindeststreckgrenze des Elektrobandes von > 300 Mpa oder sogar deutlich höher erfordern. Für den

Elektrobandhersteller kann diese Zusatzforderung eine Anpassung des Herstellungskonzeptes und eine Kompromissfindung zwischen niedrigen Ummagnetisierungsverlusten und hohen Streckgrenzen bedeuten.

3. Verarbeitung von Elektroband

Elektroband wird als Breitband oder in Verwendungsbreite (Spaltband), in einigen Fällen auch als Tafeln, geliefert. Die Herstellung von Blechlamellen zum Aufbau von Magnetkernen erfolgt durch Stanzen oder Schneiden. Häufig erfolgt das Stanzen in Folgeschnittwerkzeugen über moderne Schnell-Läufer-Pressen mit hohen Schnittzahlen. Der Komplettschnitt ist das bevorzugte Stanzverfahren für große Stanzteile und komplizierte Schnittformen. Nach dem Stanzen werden die Blechlamellen aufeinander geschichtet und durch Niete, Klammern, Schweißen, Umgießen oder Kleben in eine stabile Paketform gebracht, Bild 10. Blechpakete, die durch Niete oder Klammern fixiert werden, haben an den dafür vorgesehenen Stellen Löcher bzw. Ausnehmungen. Das Verbinden durch Schweißen erfolgt mit oder ohne Zusatzwerkstoff unter Schutzgas an der Außenkontur. Das Umgießen erfolgt in Spritzgießmaschinen, wobei auch gleich die gewünschte Form entsteht.

Bei vielen Verarbeitungsprozessen werden Spannungen oder sogar Materialverformungen in das Material eingebracht. Hieraus können Verschlechterungen der magnetischen Eigenschaften resultieren, die bei der Berechnung des Magnetflusses berücksichtigt werden müssen. Durch Wahl einer besonderen Verbindungstechnologie, z.B. der Backlacktechnik, können diese Einflüsse weitgehend vermieden werden.

4. Fortschrittliche Verbindungstechnologien

Die Anforderungen an die Genauigkeit und Stabilität von Lamellenpaketen für Elektroantriebe sind hoch. Sie nachträglich zu bearbeiten, ist schwierig und aufwändig. Verformungen und Spannungen sind weitgehend zu vermeiden, um die hohen Anforderungen an Verlustminimierung und magnetischen Fluss erfüllen zu können. Bei aktuellen Konstruktionen für elektrische Fahrtriebe werden neben konventionellen Stanzpaketier-Verbindungen zunehmend mit Lichtbogen geschweißte oder mit der

Backlacktechnik geklebte Pakete eingesetzt. Nachfolgend werden zwei fortschrittliche Verfahren, die Backlacktechnik und das Laserschweißen vorgestellt.

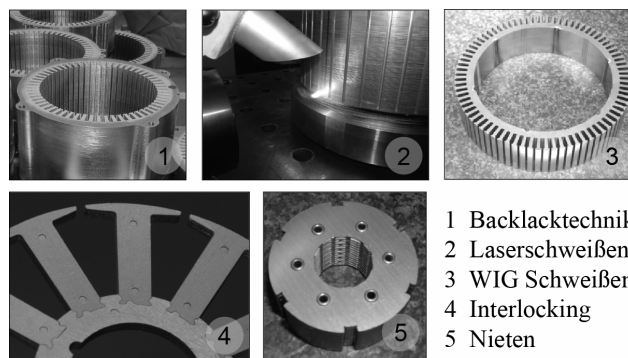


Bild 10: Verbindungstechnologien (Quelle: LCD-Lasercut)

4.1 Backlacktechnik

Die Backlacktechnik ist ein Klebverfahren. Ein spezieller Elektroleack wird mittels Walzlackierung über gummibeschichtete Rollen (Coil-Coating-Verfahren) auf das Elektroband aufgetragen. Das Einbrennen und Trocknen der Lackschicht im Durchlaufofen erfolgt in der Art, dass ein nicht 100 % getrockneter und somit klebefähiger Zustand entsteht. Hierzu ist eine genaue Temperatur- und Geschwindigkeitssteuerung erforderlich. Nach dem Ausstanzen und Paketieren der Lamellen wird das Paket unter Druck und Temperatur beim Weiterverarbeiter in einem Ofen verbacken. Bild 11 zeigt die Parameter für das Verbacken bei Einsatz des Backlack-Typs PE75W.

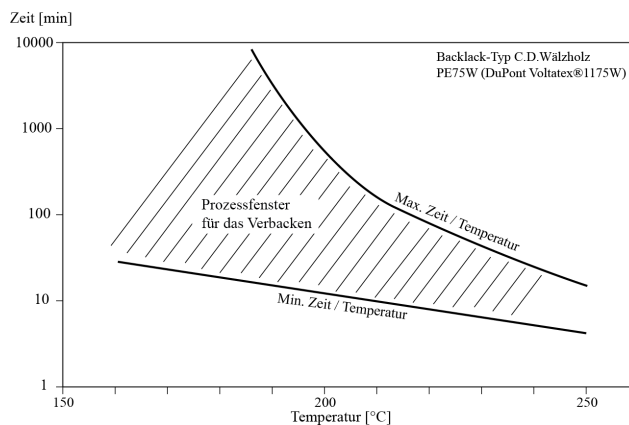


Bild 11: Backlacktechnik – Parameter für das Verbacken

Die gebackenen (geklebten) Pakete sind kompakt und flüssigkeits-dicht. Aufwändige Nachbearbeitungen können entfallen. Komplizierte Paketgeometrien sind möglich. Der Magnetfluss wird nicht durch Schweißnähte oder für das Stanzpaketieren notwendige Ausnehmungen unterbrochen. C.D.Wälzholz hat Backlacksysteme zusammen mit den Lacklieferanten weiter entwickelt, so dass heute prozesssichere Systeme mit hohen Klebefestigkeiten zur Verfügung stehen. Aktuelle Entwicklungsprojekte befassen sich mit der weiteren Prozessabsicherung, Entwicklung von Lacksystemen mit kürzeren Verbackungszeiten sowie der Vermeidung von Ausquetschrückständen beim Verbacken.

Nachteile der Backlacktechnik sind die begrenzte Temperaturbeständigkeit (ca. 110°C) und die höheren Prozesskosten durch den zeitaufwendigen Verbackungsprozess.

4.2 Laserstrahlschweißen

Das Laserstrahlschweißen hatte bislang für das Verbinden von Elektrolechpaketen nur eine geringe Bedeutung. Im Vergleich zum verbreiteten WIG-Lichtbogenschweißen fallen die höheren Investitionskosten auf. Entscheidend für die Wirtschaftlichkeit eines Verfahrens sind aber nicht die Investitionskosten, sondern die Fertigungskosten pro Teil. Eine Arbeitsgruppe, bestehend aus den Firmen Laser Cut AG, Denbüren (LCD), Trumpf Laser GmbH + Co. KG (TLS), Schweißwerk AG (SWD) und C.D.Wälzholz KG (CDW) hat in einem gemeinsamen Entwicklungsprojekt die Anwendbarkeit und Grenzen der Lasertechnik für die Anwendung zum Verbinden von Elektrolechpaketen untersucht [7]. Tabelle 1 zeigt die Übersicht der verwendeten Werkstoffgüten mit ihren wichtigsten Eigenschaften.

Es wurde bewusst auch der Si- und Al-Gehalt des Stahls variiert, um mögliche Einflüsse auf die Schweißbarkeit zu ermitteln. Als Isolationslacke dienten zwei temperaturbeständige Typen auf anorganisch /organischer Basis mit und ohne organische Füllstoffe, aufgetragen in verschiedenen Schichtdicken und mit unterschiedlichen Isolationswiderständen. Um möglichst fertigungsnahe Schweißergebnisse zu erzielen, setzte das Projektteam Lamellenpakete aus gestanzten Blechen ein.

Tabelle 1: Laserschweißversuche: Übersicht über die eingesetzten Elektrolechgüten

Güte nach EN 10106	(Si+Al) in %-Gehalt	Wärmeleitfähigkeit [$\mu\Omega^*m$]	Lacksorte CDW**	Ist-Schichtdicke je Seite [μm]	Isolationswiderstand [Ω^*cm^2]***
Dicke 0,35mm					
M270-35A	3,37	21,8	AN50	0,7	9
M270-35A	3,35	21,8	AN8	0,9	18
M270-35A	3,30	22,1	AN8	1,5	46
M270-35A	3,45	21,5	AN8	3,1	694
Dicke 0,50mm					
M800-50A	1,40	34,0	AN50	0,7	17
M800-50A	1,44	33,7	AN8	0,8	23
M800-50A	1,42	33,8	AN8	1,5	41
M800-50A	1,42	33,8	AN8	3,8	515
Dicke 0,20mm					
M270-50A	3,32	22,0	AN50	0,6	11
M270-50A	3,37	21,8	AN8	0,8	30
M270-50A	3,37	21,8	AN8	1,5	58
M270-50A	3,38	21,8	AN8	3,7	455
Dicke 0,20mm					
NO20*	3,40	21,7	AN8	0,9	12

* nach EN10303

** Lackbezeichnung Hersteller C.D. Wälzholz

*** nach ASTM A 717-06

AN8 = Lackhersteller Fa. Rembrandtin EB5308

AN50 = Lackhersteller Fa. Rembrandtin EB5350

Geschweißt wurden die Pakete bei TLS auf einer TrueLaser Cell 3010 mit Strahlquelle Scheibenlaser TruDisk 4002 mit maximal 4 kW Laserleistung. Variiert wurden:

- 3 verschiedene Nahtvorbereitungen und Nahtquerschnitte
- Schweißgeschwindigkeit
- Fokusslage
- Einfach-/Doppelfokus
- Laserleistung
- Vorpresskraft

Beurteilungskriterien waren:

- Visuelle Prüfung der Schweißnähte (Risse, Poren)
- Maximal erreichbare Schweißgeschwindigkeit mit noch guten Schweißnähten
- Scherkräfte
- Scherspannungen

Die Parameterstudien beim Schweißen der unterschiedlichen Elektrolechpakete zeigten, dass jede Elektrolechgüte eine Anpassung der Schweißparameter erfordert und auch die maximal erreichbare Schweißgeschwindigkeit bei den verschiedenen Blechgüten variiert.

Je nach Blechgüte lassen sich Prozessgeschwindigkeiten von bis zu 6 m/min für riss- und porenfreie Schweißnähte erreichen. In einigen Versuchen zeigte sich, dass die Qualität der Schweißungen nicht konstant war, und an der Oberfläche zum Teil sichtbare Poren und Risse auftraten. Zur Steigerung der Fertigungssicherheit

sind Optimierungen der Parameter zur Erreichung hoher Schweißgeschwindigkeiten erforderlich.

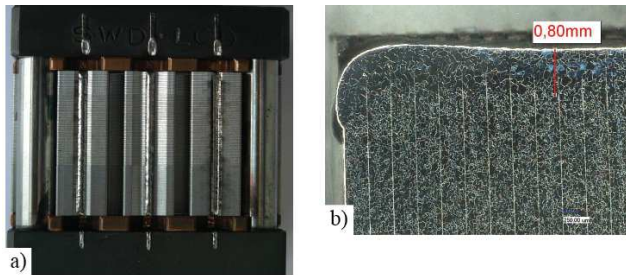


Bild 12: a) Draufsicht auf Laser geschweißten Probekörper und b) Längsschliffbild einer Schweißnaht im Elektroblech M270-50 A mit Dünnschicht-Lackierung

Ähnlich wie bei anderen Applikationen zeigt sich der Laser dem Lichtbogenschweißen überlegen, da er höhere Schweißgeschwindigkeiten ermöglicht, weniger personalintensiv ist und wesentlich reproduzierbarer arbeitet, als der Lichtbogen. Scheibenlaser oder Hochleistungsdiodenlaser als Strahlquelle verringern den Energieeinsatz gegenüber CO₂-Lasern deutlich. Zu dem weist der Laser beim Schweißquerschnitt und beim Zugang zur Schweißstelle eine höhere Flexibilität auf, als der Lichtbogen.

5. Ausblick

Weltweit wurden im Jahr 2007 14 Mio. Tonnen Elektroband produziert. Größter Anteil mit 8,2 Mio. Tonnen entfiel auf Asien mit den mit Abstand größten Steigerungsraten in der Zukunft, Bild 13 [8].

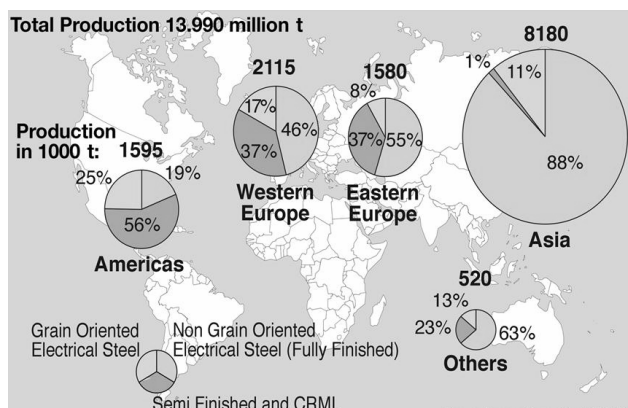


Bild 13: Elektrobandproduktion 2007 nach Regionen [8]

Der größte Anteil der Produktionsmenge entfällt mit ca. 70% auf das NKO-FF-Elektroband. Die Dicke des Elektrobandes hat einen starken Einfluss auf die Kapazitätsrechnung. Ein typischer 20 t-Ring mit 0,50

mm Dicke hat eine Länge von etwa 4 km. Ein Ring mit Dicke 0,20 mm bereits eine Länge von 10 km. Je dünner das Material, desto länger die Produktionszeit auf den Walz- und Glühanlagen. Für die Anwendung in Automobilantrieben müssen deshalb neue Kapazitäten, speziell für diesen Dickenbereich geschaffen werden. Die McKinsey Marktstudie, Bild 14, erwartet in 2020 7 Mio. Neufahrzeuge mit elektrischen Antrieben und 18 Mio. mit Hybridantrieben. Mit einem Elektrowandgewicht von 40 – 100 kg pro Elektrofahrzeug und 10 – 30 kg pro Hybridantrieb ergibt sich ein zusätzlicher Bedarf von 0,5 – 1,2 Mio. Tonnen NKO-FF-Elektroband, was einem Anteil von 5 – 13 % der derzeitigen Weltkapazität bedeutet.

2020 Annual sales of hybrid and electric vehicles
McKinsey&Company 2009, Scenario S110

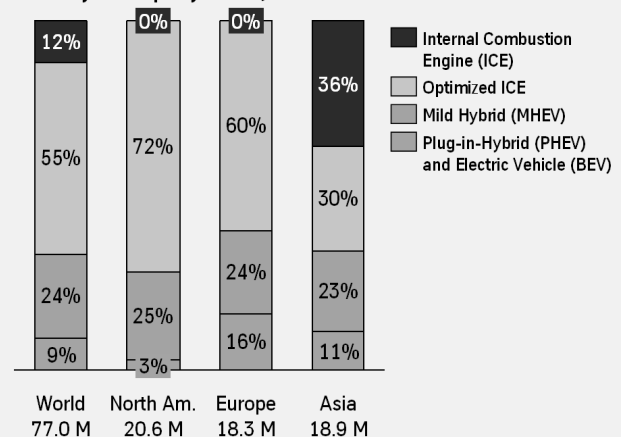


Bild 14: McKinsey Marktstudie Elektromobilität [9]

Literatur:

- [1] Stahl-Informations-Zentrum: Merkblatt 401: Elektroband und -blech. Stahl-Zentrum, Düsseldorf, 2005
- [2] Bölling, F., et al., Trends und Ziele in der Entwicklung hochwertiger Elektrobleche, Stahl und Eisen 107, Heft 23, S. 1119-1124, 1987
- [3] DIN EN 10106: Kaltgewalztes, nicht kornorientiertes Elektroblech und -band. Beuth-Verlag, Berlin 2007.
- [4] DIN EN 10342: Magnetische Werkstoffe - Einteilung der Isolationen auf Elektroblech und -band und daraus gefertigten Stanzteilen. Beuth Verlag, Berlin 2005.

-
- [5] ASTM A717 Standard Test Method for Surface Insulation resistivity of single strip specimens. Beuth Verlag, Berlin 2006.
- [6] DIN EN 10303: Dünnes Elektroblech und -band aus Stahl zur Verwendung der mittleren Frequenzen. Beuth Verlag Berlin, 2001.
- [7] Brachthäuser, N., et al., Laserstrahlschweißen von paketierte Elektroblechen. ATZ produktion, Heft 03, S. 38 – 43, 2011.
- [8] Böhm, T., et al., Electrical steel - current and future applications of a challenging material in the automotive industry, SCT 2011, Steels in Cars and Trucks, Salzburg, 2011.
- [9] McKinsey and company 2009