

Flacher Mikrolackdraht treibt die Miniaturisierung der Elektronik

Die Ausstattung moderner Automobile mit zahlreichen elektrischen Komfortfunktionen erfordert das Miniaturisieren der Elektronik. Vor allem die Aktorik muss wegen des begrenzten Bauraums möglichst kompakt gefertigt werden. Das zur Kern-Liebers-Firmengruppe gehörenden Unternehmen Bruker-Spaleck zeigt, wie sich mit Mikrolackdrähten neben Sperrmagneten oder elektropneumatische Wandler auch Klein- und Kleinstmotoren sicher ansteuern lassen.

AUTOR



Dr.-Ing. Dipl.-Phys. Benjamin Hertweck

ist Leiter Technologieentwicklung und Simulation bei Kern-Liebers in Schramberg.

auch in der Aktorik bei kritischen Platzverhältnissen, etwa bei Sperrmagneten oder elektropneumatischen Wandlern.

ANWENDUNGSBEISPIEL 1: KAMMERWICKLUNG

Zunächst soll der Nutzen des Flachdrahts am Beispiel einer Kammerwicklung skizziert werden. Es wurde hier ein Flachdrahtquerschnitt (Dicke mal Breite) von $d \cdot b = (0,32 \cdot 0,65) \text{ mm}^2$ gewählt, das entspricht einem flächenäquivalentem Runddrahtdurchmesser von $D = 0,57 \text{ mm}$. Es wird eine typische Lackschicht mit einer Dicke von $s = 12 \text{ }\mu\text{m}$ gewählt. Die Kammerwicklung beträgt $N = 44$ Wicklungen. Für den Runddraht folgt mit diesen Randbedingungen nach **BILD 1** ein Kupferfüllfaktor $k_{\text{Cu,rund}} = A_{\text{Cu}} / A_{\text{Kammer}}$ [1] von $k_{\text{Cu,rund}} = 75,5 \%$. Dabei wurde eine optimierte Wicklung betrachtet.

Verwendet man den entsprechenden Flachdraht, kann der Kupferfüllfaktor auf $k_{\text{Cu,FD}} = 86,0 \%$ erhöht werden. Zusätzlich wird für den Aufbau der Kammer die notwendige Querschnittsfläche von $A_{\text{K,rund}} = 11,4 \text{ mm}^2$ auf $A_{\text{K,FD}} = 10,1 \text{ mm}^2$ reduziert. Dieses Beispiel zeigt dabei deutlich, dass eine Entwicklungskooperation zwischen Drahtlieferant und Motorenhersteller bereits in der Entwicklungsphase sinnvoll ist, um innovativ am Markt erfolgreich zu sein. Denn die Stei-

MINIATURISIERUNG DER ELEKTRONIK

Im Zuge der Miniaturisierung sowie der verschärften gesetzlichen Rahmenbedingungen zur Effizienzsteigerung erhöht sich der Innovationsdruck auf Hersteller von Elektroantrieben und -komponenten für verschiedenste Applikationsbereiche. Flach- und Profildrähte mit kleinen Querschnitten, wie sie unter anderem von den Unternehmen Bruker-Spaleck (Kern-Liebers-Firmengruppe) und Heermann in Zusammenarbeit hergestellt werden, können dabei unter anderem im Automobilsegment vor allem in Hilfsmotoren im Bereich der Kleinst- und Kleinmotoren entscheidende Vorteile mit sich bringen. Verwendung finden diese Mikrodrähte



500 μm

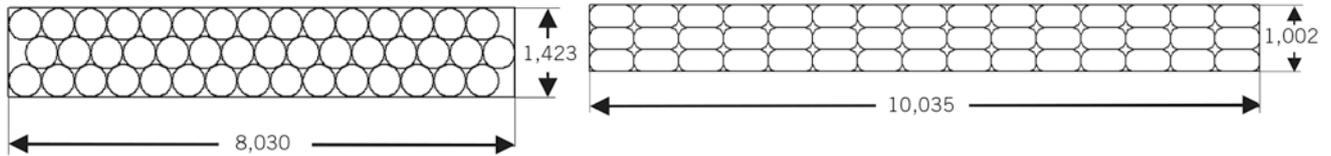


BILD 1 Skizze einer Kammerwicklung zur Verdeutlichung der Vorteile eines Flachdrahts zu einem Runddraht (Angaben in mm) © Kern-Liebers

gerung des Füllfaktors ist in den meisten Fällen nur bei angepassten konstruktiven Rahmenbedingungen realisierbar. Darüber hinaus können durch ein geeignetes konstruktives Design die höheren Herstellkosten des Flachdrahts im Vergleich zum Runddraht kompensiert werden.

ANWENDUNGSBEISPIEL 2: INDUKTIONSSPULEN

Induktionsspulen sind eine weitere, zentrale Applikation von Lackdraht. Verwendung finden diese typischerweise als Strombegrenzer oder -stabilisatoren, als Filter von Strömen oder zum Dämpfen von Störungen. Standardmäßig werden hier aus Kostengründen Runddrähte verwendet. Um Bauraum zu minimieren, bietet der Einsatz von Flachdraht ein hohes Potenzial. Durch eine geschickte Wahl des Dicke-zu-Breite-Verhältnisses kann bei konstanter Leiterquerschnittsfläche eine erste Verkürzung der Spule erzielt werden; die Windungszahl bleibt dabei gleich. Da nach der Gl. 1 von Wheeler [2]

$$\text{Gl. 1} \quad L = \frac{d_{sp}^2 \cdot N^2}{l_{sp} + 0,45 \cdot d_{sp}} \quad (\mu\text{H})$$

$$\approx \frac{d_{sp}^2 \cdot N^2}{N \cdot d_{dr} + 0,45 \cdot d_{sp}} \quad (\mu\text{H})$$

die Induktivität mit sinkender Spulenlänge zunimmt, kann bei geeignetem Design die Anzahl der Windungen sogar reduziert werden. Dabei wird die gleiche Induktivität wie bei der ursprünglichen Runddrahtspule erreicht. Somit wird effektiv weniger Halbzeug in Form von Kupferlackdraht benötigt, woraus Möglichkeiten zur Gewichtseinsparung folgen. Dies ist in BILD 2 beispielhaft dargestellt.

VARIANTEN UND AUSFÜHRUNGEN DES DRAHTS

Neben den bekannten und etablierten Leiterwerkstoffen Reinkupfer, wie Cu-ETP1, Cu-OF1, Cu-HCP oder Cu-DHP (DIN EN 1777 / Kupfer und Kupferlegie-

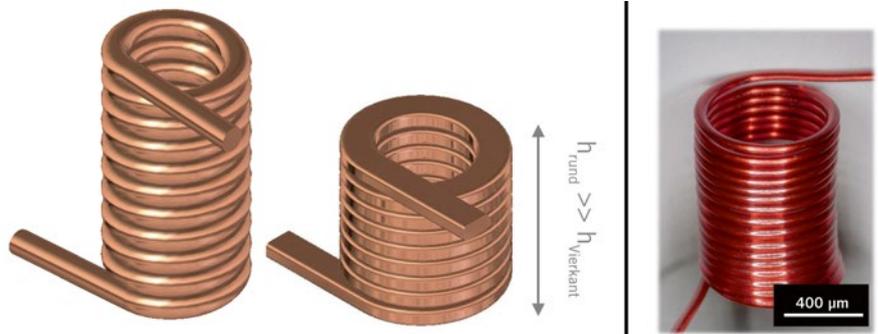


BILD 2 Verdeutlichung der Bauraumeinsparung am Beispiel einer Induktionsspule (links), Realisierung eines Modells im Musterbau (rechts) © Kern-Liebers

rungen – Vordraht aus Kupfer), kommt vor allem den niedrig legierten Kupferwerkstoffen wie CuMg0,2 oder CuSn0,15 aufgrund ihres guten Kompromisses aus elektrischer Leitfähigkeit und mechanischer Festigkeit erhöhte Bedeutung zu. Vor allem bei Bauteilen mit vibronischer Belastung ist hier eine ansteigende Nachfrage bemerkbar [3]. Aluminium stellt im Kontext Leichtbau aufgrund des guten Verhältnisses von elektrischer Leitfähigkeit zu Dichte in den vergangenen Jahren einen wichtigen Leiterwerkstoff dar. Ein weiteres Argument für die Verwendung dieses Materials liegt im Rohmaterialpreis. Dieser beträgt zurzeit etwa ein Drittel des Kupferpreises. Reinaluminiumsorten wie Al99,5 oder Al99,7 finden dabei am häufigsten Anwendung. Unter den Legierungen ist vor allem der Werkstoff AlMgSi für mechanisch beanspruchte Bauteile relevant, wenn zusätzlich hohe Anforderungen an die Leitfähigkeit gestellt werden [4].

Die Herstellung der beschriebenen Flachdrähte basiert dabei auf dem Flachwalzen von Runddraht. Diverse, komplex aufgebaute Walzlinien ermöglichen bei der Fertigung ein breites Abmessungsspektrum. Konkret sind dabei folgende Merkmale entscheidend [5]:

- Walzlinien mit unterschiedlicher Anzahl von Walzgerüsten
- Walzgerüste mit unterschiedlichen Walzendurchmessern sowie fein jus-

tierbare Tänzer (Umsetzung von Zugkräften), um die relevanten Umformparameter Breitung und Längung einstellen zu können

- effektives Rekristallisationsglühen zum Abbau der Kaltverfestigung
- hohe Toleranzanforderungen an die Werkzeuge zur Erzielung höchster Oberflächengüten der Drähte.

Basierend auf diesen Faktoren kann das Abmessungsspektrum unterhalb der Lackdraht-Norm DIN EN 60317 (Technische Lieferbedingungen für bestimmte Typen von Wickeldrähten) bedient werden, also konkret unterhalb des Querschnitts $d \cdot b = (0,80 \cdot 2,00) \text{ mm}^2$. Als Mindestmaße der hier beschriebenen Lackdrähte können die in TABELLE 1 aufgeführten Werte betrachtet werden.

Gegen konkurrierende Verfahren, beispielsweise aus dem Bereich des Strangpressens, zeichnet sich das Endprodukt durch eine sehr hohe Oberflächengüte und geometrische Genauigkeit über große Produktionslose aus.

Merkmal	Aluminium	Kupfer
Mindestdicke [mm]	0,050	0,030
Mindestbreite [mm]	0,5	0,5
Dicke-zu-Breite-Verhältnis	3 - 50	2,5 - 80

TABELLE 1 Darstellung der Fertigungsmöglichkeiten im Bereich Mikroflachdraht © Kern Liebers

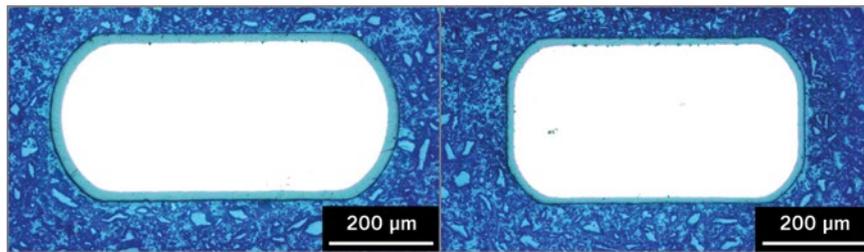


BILD 3 Exemplarische Darstellung von flachem Feinlackdraht: hergestellt mit einem konventionellen Duowalzgerüst (links) und einem Vierkantwalzgerüst (rechts) © Kern-Liebers

Lacksorte		Temperatur-index [-]/Einsatztemperatur [°C]	Wärmeshock [°C]	Bemerkungen
Polyurethan	V155	≥ 157	190	Exzellente Verzinnbarkeit, gute thermische Festigkeit, pinholebeständig
	V180 / V190	≥ 180 / 200	220 / 230	Gut verzinnbar, hohe Wärmefestigkeit, pinholebeständig
Polyesterimid	W180V	≥ 194	230	Noch verzinnbar, hohe thermische Beständigkeit
	W200	≥ 205	240	Sehr hohe thermische Beständigkeit
Polyesterimid mit Polyamid-deckschicht	W210	≥ 210	250	Sehr gute mechanische, chemische und thermische Eigenschaften
Polyamidimid	W220	≥ 220	270	Noch höhere thermische und chemische Belastbarkeit als W210
Polyimid	W240	≥ 240	300	Spezialprodukt mit höchster thermischer und chemischer Belastbarkeit

TABELLE 2 Darstellung der zentralen Lacke und ihrer Eigenschaften © Kern-Liebers | Heermann

Im einfachsten Fall ergibt sich bei der Verwendung eines konventionellen Duowalzgerüsts nach **BILD 3** (links) eine Naturkante, die sich durch eine runde Form auszeichnet. Die Verwendung eines technisch aufwendigeren Vierkantwalzgerüsts erlaubt die Ausformung der Kanten, **BILD 3** (rechts).

EIGENSCHAFTEN DER LACKE

Hinsichtlich der Lackcharakteristika besteht eine Vielzahl an Auswahlmöglichkeiten. So können je nach elektrischer Isolationsanforderung Drähte mit unterschiedlichen Lackdicken verwendet werden. Diese sind in Grade 1, 2 und 3 unterteilt. Zuverlässigkeitsanforderungen spielen ebenfalls eine wichtige Rolle. Die Temperaturbeständigkeit

ist zentrales Merkmal für die Auswahl eines Lackdrahts. Diese wird primär durch das Lackmaterial bestimmt. Wie bei Runddrähten kann auch bei Flachdrähten auf alle gängigen Materialien zurückgegriffen werden, wie in **TABELLE 2** dargestellt ist. Eine hohe Umformbarkeit, wie sie beim Wickeln erforderlich ist, wird dabei durch den schichtweisen Aufbau beziehungsweise Auftrag des Lacks realisiert.

Der Temperaturindex nach DIN EN IEC 60172 (Prüfverfahren zur Bestimmung des Temperaturindex von Lackdrähten und bandumwickelten Drähten) gibt in °C die thermische Leistungsfähigkeit eines Isolierstoffs an. Dabei handelt es sich um eine extrapolierte Dauertemperaturbeständigkeit (20.000 h). Das experimentelle Prüfverfahren charakte-

riert die thermische Beständigkeit bei Veränderung der elektrischen Durchschlagsfestigkeit. Die Lebensdauer unter Beanspruchung hängt jedoch von weiteren äußeren Einflüssen wie Feuchtigkeit sowie chemische und mechanische Einwirkung ab.

Der Wärmedruck, auch Erweichungstemperatur genannt, gibt die thermisch bedingte Erweichung des Lacks an. Ab dieser Temperatur kann es an einer Kreuzungsstelle der Drähte zu einem Kurzschluss kommen.

Diese Lacke zeichnen sich durch eine geringe Hochspannungsfehlerzahl aus. Durch Schichtdicken- und Lackauswahl können Durchschlagsspannungen im Bereich von wenigen V bis mehrere kV realisiert werden. Je nach Lackmaterial liegt die auf die Schichtdicke normierte Durchschlagsspannung gegen eine Zylinderspule im Bereich 80 bis 140°V/µm.

ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Ausgehend von konkreten Anwendungen wurden die Potenziale von miniaturisierten Lackdrähten beschrieben. Diese folgen streng aus den Werkstoffeigenschaften von Draht und Lack sowie aus dem Herstellungsprozess. Es ergibt sich eine Vielzahl von Anwendungen, bei denen Vierkantdraht dem Runddraht überlegen ist. Die zur Kontaktierung erforderliche Abisolierung kann dabei beispielsweise auf Laserbasis erfolgen. Neben den eingangs beschriebenen Anwendungsfällen sind beispielsweise Wicklungen in Linearmotoren oder bei induktiven Ladetechniken zu finden.

LITERATURHINWEISE

- [1] Hagedorn, J.; Sell-Le Blanc, F.: Handbuch der Wickeltechnik für hocheffiziente Spulen und Motoren. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2016
- [2] Stiny, L.: Passive elektronische Bauelemente. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2015
- [3] Dies, K.: Kupfer und Kupferlegierungen in der Technik. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 1967
- [4] Kammer, C.: Aluminium Taschenbuch 1: Grundlagen und Werkstoffe. Berlin/Wien/Zürich: Beuth Verlag, 2012
- [5] Kopp, R., Wiegels, H.: Einführung in die Umformtechnik. Aachen: Verlag Mainz, 1999



READ THE ENGLISH E-MAGAZINE
 Test now for 30 days free of charge:
www.ATZelectronics-worldwide.com

digital · interaktiv · mobil

Exklusiv für Abonnenten kostenlos zur gedruckten Ausgabe – das E-Magazin.



GRATIS
für
Abonnenten!



Schlagwortsuche

In Sekundenschnelle die komplette Ausgabe nach einem Schlagwort durchsuchen.



Responsives Webdesign

Zugriff auf Ihr E-Magazin von Desktop, Laptop, Smartphone und Tablet.



PDF-Downloads

Download von Artikeln aus dem umfangreichen Online-Archiv.



Einfach und direkt ohne App

Zugriff ohne App-Store durch direkte Anbindung an die Website mit HTML5-Technologie.



Interaktive Empfehlungen

Zusätzliches Spezialwissen durch verlinkte Quellenangaben der Fachartikel rund um die Heftthemen.



Interaktives Inhaltsverzeichnis

Mit einem Klick zum gewünschten Beitrag.



Interaktive Heftnews und Inhalte

Ergänzende Informationen zum Heft durch verlinkte Firmen- und Produktnews sowie Videos und Bildergalerien.

ATZ elektronik

►► Ihr E-Magazin finden Sie unter: www.emag.springerprofessional.de/atz-elektronik