

Ziel dieses Kapitels ist es, dem Leser Wissen über die Eigenschaften und den Herstellungsprozess von Kupferlackdraht zu vermitteln. Dazu werden typische Materialien und Geometrien des Drahtquerschnitts (Profildraht) sowie alternative Ausführungsformen wie Litzdraht vorgestellt. Anschließend wird die Prozesskette zur Herstellung des Lackdrahtes detailliert eingeführt.

2.1 Leitereigenschaften

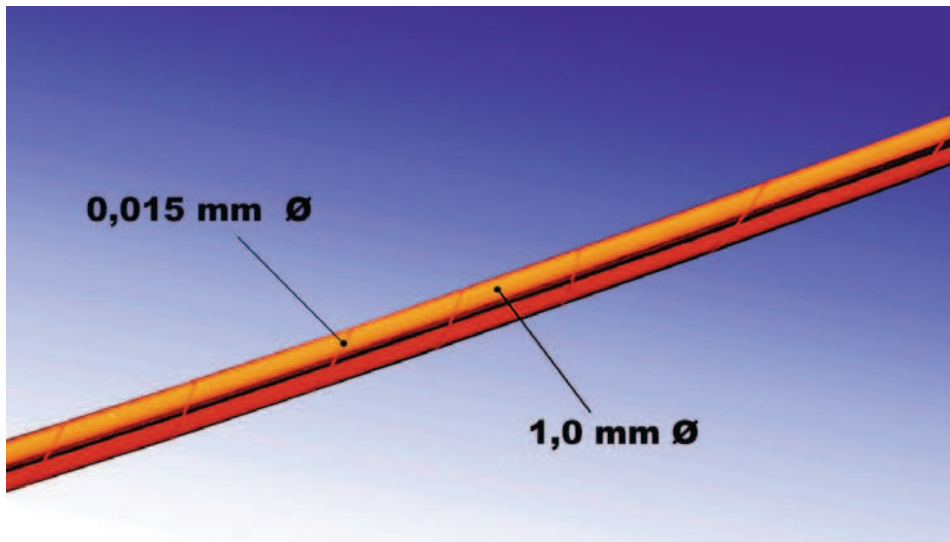


Abb. 2.1 Dimensionen der verschiedenen Drahthalbzeuge

Dieser Abschnitt beschäftigt sich eingehend mit Kupfer als Leitermaterial und stellt neben diesem noch weitere alternative Materialien vor. Neben den elektrischen Eigenschaften, werden Einflüsse auf die mechanischen und thermischen Eigenschaften von Kupfer diskutiert. Für die Verwendung von Kupferlackdraht werden die nach DIN 60317 genormten Verarbeitungseigenschaften vorgestellt. Neben dem Material werden auch unterschiedliche Geometrien diskutiert, die von Hilfen zur Auslegung von Litzendrähten bis zur Verwendung von Profildrähten reichen.

Entsprechend richtet sich dieser Abschnitt an Leser, welche die Eigenschaften von Wickeldrähten interessiert, sei es aus dem Bereich der Fertigung oder der Entwicklung von Wickelgütern.

2.1.1 Kupfer im Einsatz als elektrischer Leiter

Kupfer hat sich in der Elektrotechnik wegen seiner hervorragenden elektrischen Leitfähigkeit von $\kappa_{Cu} = 60 \text{ m}/(\Omega \text{ mm}^2)$ durchgesetzt. Im Vergleich zu anderen Metallen bietet lediglich Silber eine bessere Leitfähigkeit von ca. 6 %, bei jedoch deutlich höheren Rohstoffkosten. Um diese hohen Leitfähigkeitswerte zu erreichen, ist Kupfer mit einem möglichst geringen Anteil an Verunreinigungen erforderlich. So muss zur Sicherstellung der in den ISO-Normen verlangten Mindestleitfähigkeit von $\kappa_{Cu,min} = 58 \text{ m}/(\Omega \text{ mm}^2)$ für die Drahtherstellung, Elektrolytkupfer mit einer Reinheit von mindestens 99,90 % verwendet werden [DKI-00]. Einige typische Materialkennwerte sind in Tabelle 2.1 zusammengefasst. Für einen einfachen Vergleich wurden die Werte auf die Kupferwerte in % normiert.

Tab. 2.1 Materialkennwerte und Preise von verschiedenen Metallen (Stand 06.2015)

Metall	Rel. Elektrische Leitfähigkeit	Rel. Wärmeleitfähigkeit	Rel. Wärmeausdehnung	Normierte Dichte	Normierte Kosten
Silber	106	108	112	118	8917
Kupfer	100	100	100	100	100
Gold	72	76	100	217	633333
Aluminium	62	56	135	30	28
Magnesium	39	41	153	19	42
Zink	29	29	176	80	36
Nickel	25	15	76	100	208
Kobalt	18	17	71	100	550
Stahl	13-17	13-17	71	82	10
Platin	16	18	53	242	595000
Zinn	15	17	124	82	258
Blei	8	9	165	127	32

Für die Verarbeitung von Kupfer als Wickeldraht gibt es in Bezug auf die Materialeigenschaften verschiedene internationale Normen. So beschreibt die DIN EN 1977 *Kupfer*

und Kupferlegierungen für die Produktion von Vordraht aus Kupfer, einem Halbzeug für die Drahtherstellung. Die DIN EN 13601 beschreibt Kupfer und Kupferlegierungen für Stangen und Drähte aus Kupfer für die allgemeine Anwendung in der Elektrotechnik. Die DIN EN 13602 Kupfer und Kupferlegierungen beschreibt spezifisch die Eigenschaften von gezogenem Runddraht aus Kupfer zur Herstellung elektrischer Leiter, welche durch die DIN EN 13605 für Kupfer und Kupferlegierungen mit Anwendung für Profile und profilierte Drähte aus Kupfer für die Anwendung in der Elektrotechnik ergänzt wird.

Charakteristik von Standard-Wickeldrähten

Ziel dieses Abschnittes ist es, einige zentrale Eigenschaften von Standard-Wickeldrähten vorzustellen. Neben den elektrischen Eigenschaften werden weitere anwendungsrelevante Eigenschaften von Standard-Wickeldrähten, wie beispielsweise Geometrie oder Mindestbruchdehnung, in der DIN EN 60317 festgelegt. Die maximal erlaubte Abweichung für den Außendurchmesser eines Drahtes in Abhängigkeit des Blankdrahtdurchmessers und der Isolationsstärke von Grad 1 bis Grad 3 ist in Abbildung 2.2 dargestellt. Dabei wird deutlich, dass die Isolationsstärken ähnliche Durchmesserabweichungen haben. Diese liegen jedoch deutlich über den Abweichungen des Blankdrahtes, für einen Bereich bis zu 4 mm.

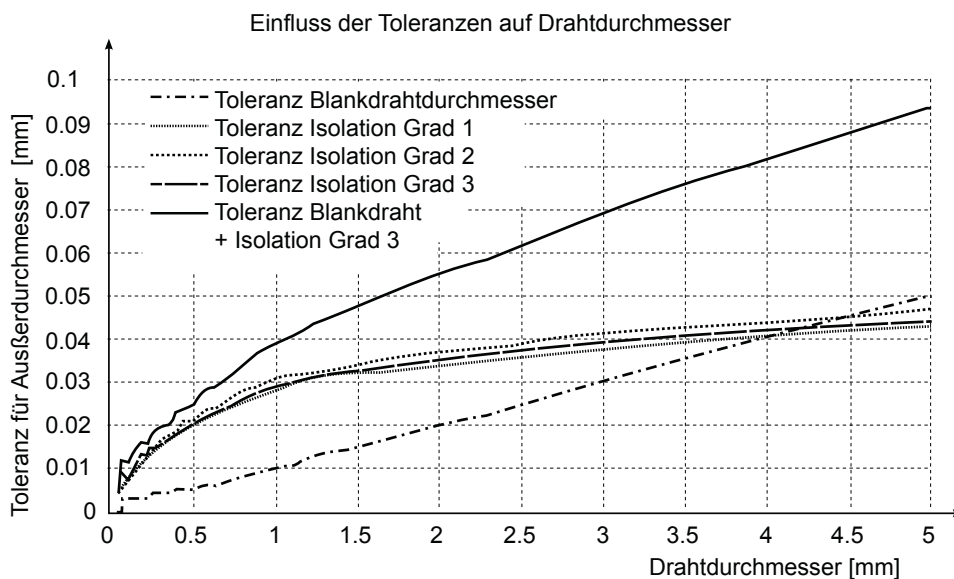


Abb. 2.2 Drahtdurchmesser inkl. Isolation in Abhängigkeit der Toleranzen

Der resultierende mechanische Füllfaktor, also das Verhältnis von Drahtquerschnitten zum gesamten Wickelraum, ist in Abbildung 2.3 für verschiedene Lagenzahlen dargestellt. Dabei wird deutlich, dass kleine Änderungen im Drahtdurchmesser bereits eine große Auswirkung auf den Füllfaktor haben.

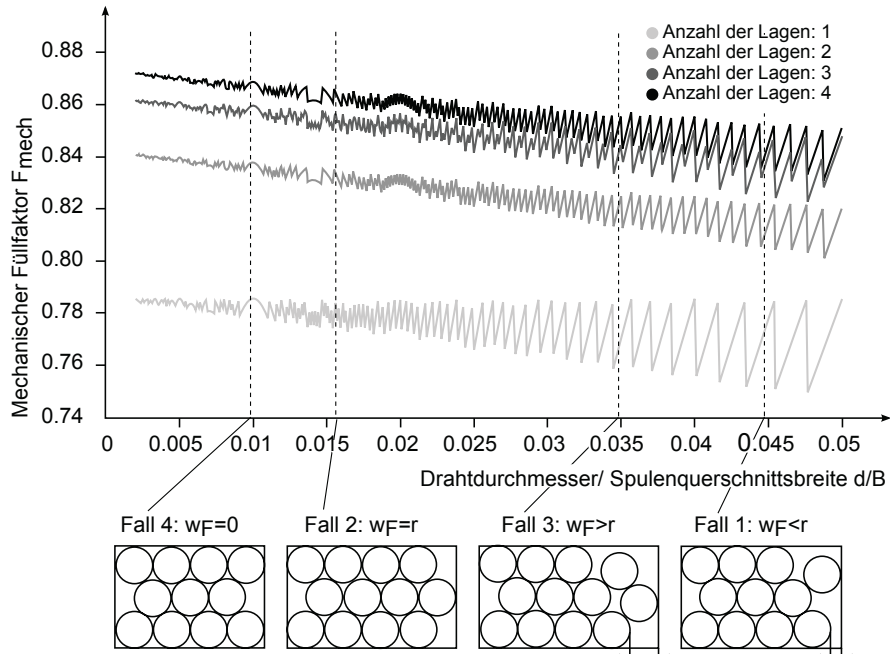


Abb. 2.3 Einfluss von Drahtdurchmesser und Wickelbreite auf den mechanischen Füllfaktor

Zusätzlich werden weitere mechanische Größen, die relevant für die Verarbeitung sind, wie die Rückfederung oder die Bruchdehnung, in der DIN 60317 angegeben (vgl. Abbildung 2.4). Die Bruchdehnung, als Maß für die maximale Umformung des Drahtes, nimmt bei steigendem Drahtdurchmesser zu. Der erlaubte Rückfederungswinkel sinkt. Entsprechend können dicke Drähte stärker belastet werden und weisen eine geringere Rückfederung auf. Die notwendigen Biegekräfte steigen dabei jedoch.

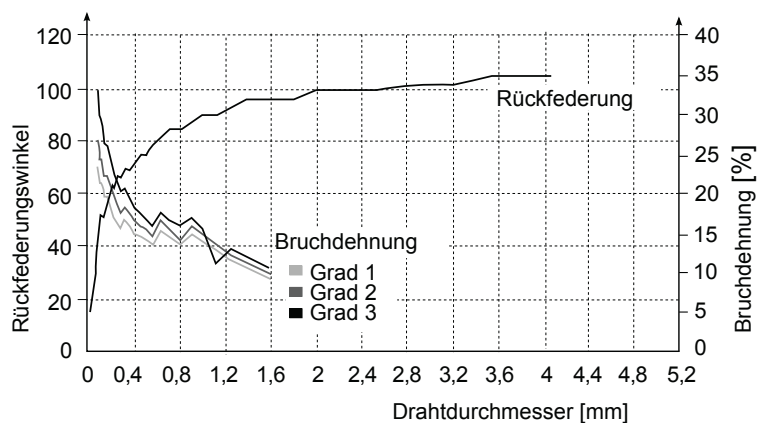


Abb. 2.4 Diagramme zur Rückfederung und Bruchdehnung des Drahtes

Für die Verwendung von Standard-Wickeldraht ist es wichtig zu wissen, dass die Isolation eine genormte Anzahl an Fehlstellen bzgl. der Geschlossenheit besitzen darf. Die Anzahl ist in Abhängigkeit von Drahtdurchmesser und der gewählten Isolationsstärke laut Tabelle 2.2:

Tab. 2.2 Erlaubte Anzahl an Fehlstellen der Isolation nach EN 60317-0-1:2008 (S.18)

Nenn Durchmesser des Leiters in mm		Höchstwert der Fehlerzahl je 30 m		
Über	Bis einschließlich	Grad 1/1B	Grad 2/2B	Grad 3
-	0,05	60	24	-
0,05	0,08	60	24	3
0,08	0,125	40	15	3
0,125	1,6	25	5	3

Elektrische und thermische Eigenschaften von Kupfer

Der spezifisch elektrische Widerstand von Werkstoffen lässt sich allgemein mit der Matthiesenschen Regel bestimmen. Diese beschreibt die Abhängigkeit des spezifischen elektrischen Widerstandes von der Temperatur und der Materialbeschaffenheit, wie beispielsweise Gitterfehler im makroskopischen Aufbau oder Fremdatome durch Legierung des Werkstoffs. Die Abhängigkeit der spezifisch elektrischen Leitfähigkeit von der Legierung durch weitere Materialien oder der Temperatur ist in Abbildung 2.5 dargestellt.

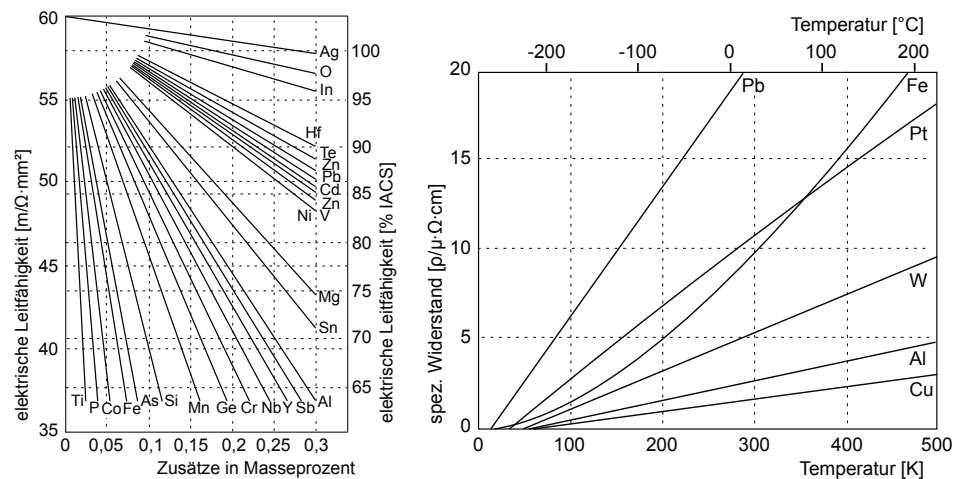


Abb. 2.5 Einflüsse auf die elektrische Leitfähigkeit nach [DKI-00, S.7], [Tif-07, S.70]

Die elektrische Leitfähigkeit ist definiert als der Kehrwert des elektrischen Widerstandes. Die elektrische Leitfähigkeit des Kupferdrahtes kann jedoch nicht nur in der Produktion durch die Beimischung weiterer Metalle beeinflusst werden, sondern auch durch dessen Verarbeitung. So kann durch die Verarbeitung und wiederholte Biegeumformung eine Kaltverfestigung des Materials eintreten, die die elektrische Leitfähigkeit reduziert. In Abschnitt 3.1.1 wird auf diese Thematik genauer eingegangen. Für die Wärmeleiteigenschaften gilt eine ähnliche Gesetzmäßigkeit, wobei Kupfer ebenfalls eine sehr gute Leitfähigkeit besitzt, die nur von Silber übertroffen wird. Die Wärmeleiteigenschaften sind insbesondere relevant für die thermische Auslegung von Baugruppen. Die elektrische Verlustleistung von Spulen wird, abgesehen von der Blindleistung induktiver Bauelemente, vollständig in Wärme umgewandelt. Daher erwärmen sich Spulen im Betrieb und unter hoher Last sehr stark. Entsprechend ist eine gute Wärmeleitfähigkeit des eingesetzten Spulendrahts Voraussetzung, um ein Überhitzen des Bauteils zu verhindern. Durch die zunehmende Abhängigkeit des elektrischen Widerstandes von der Temperatur steigen mit höherer Leitertemperatur die elektrischen Verluste. Dies ist vor allem kritisch für Anwendungen mit einem konstant hohen Stromfluss. Demzufolge ist für einen hohen Wirkungsgrad eine effektive Kühlung des Bauelements oder der Baugruppe notwendig. Das thermische Längenzwachstum ist für Kupfer im Vergleich zu den anderen Metallen eher gering, was eine Maßhaltigkeit der Baugruppe auch bei höheren Betriebstemperaturen ermöglicht. Daher existieren Anwendungen für Elektromotoren, die in Betriebsumgebungen von -80 °C bis 300 °C liegen [Dem-11].

Mechanische Eigenschaften von Kupfer

Die hohe Verbreitung von Kupfer in der Elektrotechnik und anderen technischen Bereichen kann, neben den positiven elektrischen Eigenschaften, auf die guten mechanischen Eigenschaften, insbesondere bzgl. der Verarbeitung, zurückgeführt werden. Kupfer ist ein sehr duktiler Material und lässt sich entsprechend gut, auch im kalten Zustand, plastisch verformen. Ein Maß für die Verformbarkeit von Materialien ist ein möglichst hoher Umformgrad, auch Umformvermögen genannt. Dieser ist für Kupfer sehr hoch, was durch ein Beispiel aus der Drahtherstellung gezeigt werden kann. So ist es möglich, den Querschnitt eines runden Drahtes um mehr als 99 % durch ein kontinuierliches Drahtziehen zu reduzieren, ohne das Material zu beschädigen [DKI-00]. Im Gegensatz zu vielen anderen Materialien besitzt Kupfer keine feste Streckgrenze. Das heißt, dass es keinen festen Übergang vom elastischen in den plastischen Bereich gibt. Als Streckgrenze wird daher typischerweise ein Wert von 0,2 % der Dehngrenze definiert. Diese liegt für Kupfer in der Regel zwischen 40 N/mm^2 und 80 N/mm^2 . Die Abhängigkeiten der Härte, Streckgrenze und der Dehnung von der Verformung bzw. Belastung sind in Abbildung 2.6. dargestellt. Bei der Betrachtung fällt auf, dass Verformungen bis 10 % vergleichsweise geringe Auswirkungen auf die mechanischen Verarbeitungseigenschaften durch Umformung haben.

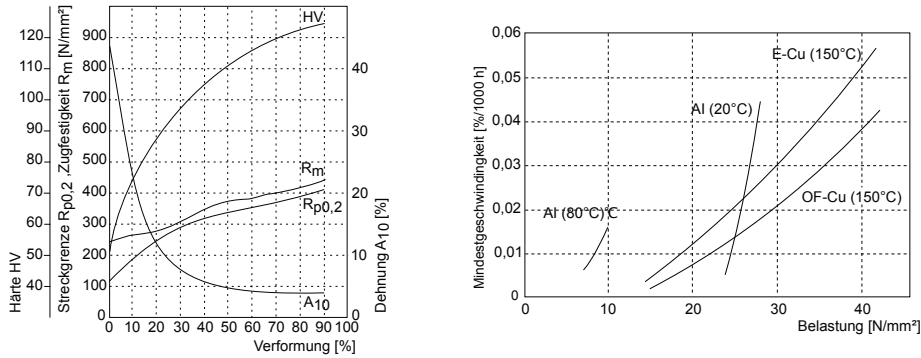


Abb. 2.6 Einflüsse auf die mechanischen Eigenschaften nach [DKI-00, S.9]

Neben einmaligen mechanischen Belastungen, beispielsweise während der Verarbeitung, ist die hohe Zeitstandfestigkeit von Kupfer mit einer gegen Null tendierenden Kriechgeschwindigkeit ein Vorteil. Diese beschreibt die Ausdehnung des Materials unter Dauerlast. Die Dauerstandfestigkeit ist insbesondere für den Bau großer Elektromotoren relevant, in welchen die Wicklung als Baugruppe neben den elektrischen auch mechanische Funktionen übernimmt. Typische Verarbeitungseigenschaften von verschiedenen Festigkeitsklassen eines Kupfermaterials (Cu-ETP) sind in der folgenden Tabelle 2.3 zusammengefasst.

Tab. 2.3 Verarbeitungseigenschaften von Cu-ETP [DKI-00]

Festigkeitsklasse	Elektrische Leitfähigkeit in $m/\Omega mm^2$	Zugfestigkeit R_m in N/mm^2	0,2 % Streckgrenze $R_{p0.2}$ in N/mm^2	Brinellhärte HV
R200	58	200-250	max. 100	55
R220	58	220-260	max. 140	55
R240	57	240-300	max. 180	80
R290	57	290-360	max. 250	95
R360	56	min. 360	320	min 110

Generell gilt, dass eine höhere mechanische Festigkeit des Kupfers zu geringfügig schlechteren elektrischen Eigenschaften führt. Entsprechend können Drähte mit höherer Festigkeit aufgrund ihrer mechanischen Robustheit im Prozess größere Belastungen erfahren, besitzen jedoch ein verringertes Umformvermögen. Daraus resultiert eine mögliche Verarbeitung mit höheren Belastungen, beispielsweise durch höhere Prozessgeschwindigkeiten, jedoch meist verbunden mit schlechteren Produktmerkmalen des Wickelgutes, wie ein höherer elektrischer Widerstand oder eine schlechtere Endkontur des Drahtes. Eine ausführliche Erläuterung findet sich dazu im Abschnitt 3.1.1. Der zugrunde liegende physikalische Effekt kann in [Kug-09] nachgelesen werden.

Chemische Eigenschaften von Kupfer

Zu den chemischen Eigenschaften von Kupfer zählt die gute Korrosionsbeständigkeit. Grund dafür ist die Ausbildung einer Oxidschicht an der Oberfläche, welche die darunter liegenden Schichten vor reaktiven Medien schützt. Bekannt ist dieser Effekt bei alten Kupferdächern, bei denen sich aufgrund der Witterung eine grüne Oxidschicht ausbildet. Durch die Einwirkung von Komplexsalzen kann die Bildung dieser Schicht jedoch verhindert werden. Entsprechend besteht dann die Gefahr einer kompletten Zersetzung des Kupferleiters. Zusätzlich besitzt Kupfer noch weitere Eigenschaften, wie beispielsweise eine antibakterielle Wirkung, die aber aufgrund des Fokus dieses Buch nicht weiter diskutiert wird. Weiterführende Informationen können über das Deutsche Kupferinstitut oder die Copper Alliance eingeholt werden. [DKI-00]

Die Verwendung von Kupfer in der Elektrotechnik beruht auf dem Verhältnis von Kosten zu spezifischer Leitfähigkeit. Die guten Umformeigenschaften des Materials ermöglichen eine gute Verarbeitung. Das sind die Gründe für die aktuelle Dominanz von Kupfer als Leitermaterial für die verschiedensten Arten von Spulen.

2.1.2 Andere Leitermaterialien

In Abhängigkeit von der Anwendung können neben anderen Reinmaterialien auch verschiedene Kombinationen von Leitermaterialien zum Einsatz kommen.

Tab. 2.4 Vergleich: Aluminium, Kupfer und kupferbeschichtete Leiter nach [Bec-13, S.8]

	Kupfer	Aluminium	CCA (10 %)
Vorkommen der Erde	0,01 %	7,75 %	-
Dichte	8,92 g/m ³	2,70 g/m ³	3,63 g/m ³
Schmelzpunkt	1083 °C	658 °C	658 °C
Wärmeausdehnung	17,0 x 10 ⁻⁶ 1/K	23,5 x 10 ⁻⁶ 1/K	-
Wärmeleitfähigkeit	385 W/mK	230 W/mK	240 W/mK
Spez. Wärmekapazität	382 J/(kg K)	896 J/(kg K)	862 J/(kg K)
E-Modul	13,0 x 10 ⁴ MPa	7,1 x 10 ⁴ MPa	-
Elektrische Leitfähigkeit – DC	> 58,58 m/(Ω mm ²)	> 35,67 m/(Ω mm ²)	> 37,35 m/(Ω mm ²)*
El. Leitfähigkeit –AC (>5MHz)	> 58,58 m/(Ω mm ²)	> 35,67 m/(Ω mm ²)	> 58,58 m/(Ω mm ²)
Preis (Stand 2014)	5,741 €/kg	1,416 €/kg	3,6 €/kg – 13,7 €/kg
Schweißbarkeit	Gut	Schlecht	Gut
Oxidationsrate	Gering	Hoch	Gering
Umformbarkeit	Gut	– Biegefestigkeit – Langzeitfließen	– Biegefestigkeit

Als häufigste Alternative zu Kupfer wird Aluminium in Reinform verwendet. Daraus leitet sich auch der Trend zum kupferbeschichteten Aluminium (engl. copper-clad-aluminum), kurz CCA, genannt ab. Aufgrund des Skin-Effektes sinkt für höhere Frequenzen die Eindringtiefe des Stromes in den Leiter (vgl. Abschnitt 1.2.2). Entsprechend ist die Leitfähigkeit im äußeren Leiterradius wichtig und kann durch eine Kupferbeschichtung verbessert werden. Die resultierenden Eigenschaften im Vergleich mit reinen Aluminium- bzw. Kupferleitern sind in Tabelle 2.4 dargestellt.

Der Vorteil der Beschichtung liegt neben der Leitfähigkeit in den niedrigeren Materialkosten von Aluminium als Trägermaterial. Allerdings lässt sich dieses im Gegensatz zu Kupfer schlechter verarbeiten. Ein Kontaktieren, beispielsweise durch Schweißen, ist nicht oder nur schwer möglich und die erlaubte mechanische Beanspruchung ist deutlich geringer im Vergleich zu Kupfer. Die thermischen Eigenschaften sind gemischt. So ist die Leitfähigkeit insgesamt geringer, jedoch die Wärmekapazität höher. Das heißt, es wird mehr Energie benötigt, um einen Aluminiumleiter zu erwärmen als einen Kupferleiter. Der erwärmte Aluminiumleiter gibt die Wärme jedoch langsamer an seine Umgebung ab. Die Wahl des Leitermaterials hat dementsprechend immer einen Einfluss auf die Produkt- und Produktionseigenschaften. Auch wenn eine höhere Wirtschaftlichkeit des Produktes durch geringere Materialpreise erreicht werden kann, ist es möglich, dass sich Änderungen für andere Produktparameter aufgrund veränderter Materialeigenschaften ergeben. Als Beispiel für das Design können verschiedene Spulenkörperradien oder deren Eckenradien genannt werden.

Tab. 2.5 Ausgewählte Verwendungsszenarien für alternative Drahtwerkstoffe

Drahtwerkstoff	Einsatzbereich	Technischer Hintergrund
Aluminium	Lautsprecher, Mikrofonspulen; Ballastspulen (Leuchtstoffröhren), Drossel­spulen (Trafo), Kupplungsspulen (Klimakompressor)	– Gewichtsreduktion – Materialkosten
Messing	Antennen und Hohlleiter, Elektronik für Spulen mit dünnen Leiterquerschnitten	– Gute Festigkeit
Silber	Motoren für Medizintechnik, optische Industrie	– Gute Festigkeit – Gute Federeigenschaften – Elektrische Leitfähigkeit
Gold	Antennen, Flip-Chip- und Chip-to-Chip-Bonding	– Gute Eignung für das Kontaktieren
Nickel	Heiz-Anwendungen, Elektronische Komponenten, Chemische und elek- trotechnische Industrie	– Gute mech. Eigenschaften – Korrosionsbeständigkeit – Hoher Temp.-Koeffizient – Hoher spez. el. Widerstand
Spezialdraht CCA	Hochfrequenzspulen	– Hohe elektrische Leitfähigkeit bei geringem Gewicht

Drahtwerkstoff	Einsatzbereich	Technischer Hintergrund
Spezialdraht: Konstantan (55 % Ni 44 % Cr 1 % Mn)	Relais im Motorschutzschalter	– Unabhängiger Widerstand bei versch. Temperaturen
Spezialdraht: Nickel-Chrom	Heizwiderstand für Automobil	– Temperaturresistenz – Chemische Beständigkeit
Spezialdraht: Edelstahl	Schweißdraht	– Gute Eignung für das Schweißen

Für den Wickelprozess kann eine höhere Steifigkeit des Materials zu einer größeren Drahtbelastung und damit zu einem früheren Materialversagen führen. Das Terminieren des Drahtes gestaltet sich bei beschichteten Drähten schwierig, da die Funktionsfähigkeit der Beschichtung gewährleistet sein muss bzw. diese nicht beschädigt werden darf. Neben der Nutzung des Schweißverfahrens sind auch andere Kontaktierprozesse verfügbar, die eine Abhängigkeit der gewählten Materialpaarung der Fügepartner besitzen (vgl. Abschnitt 3.4.2). Generell sind in der Materialauswahl alle nachfolgenden Fertigungsprozesse zu berücksichtigen. Zur Steigerung der Festigkeit des Kupferdrahts wird häufig Silber hinzu legiert. Obwohl Silber eine bessere elektrische Leitfähigkeit als Kupfer besitzt, sinkt die Leitfähigkeit der Legierung aufgrund der Mischkristallbildung. Im Vergleich zu anderen Werkstoffen weist die Legierung mit Silber jedoch die geringste Reduktion der elektrischen Leitfähigkeit auf. Ebenso bewirkt die Legierung eine Verbesserung des Zeitstandverhaltens durch die erhöhte Festigkeit. Das Zeitstandverhalten beschreibt das Ertragen einer Werkstoffspannung ohne Bruch über einen definierten Zeitraum. Die Verwendung weiterer Leitermaterialien ergibt sich in der Regel aus der Anwendung. Einige Beispiele sind in der Tabelle 2.5 zusammengefasst.

Die für die Verarbeitung relevanten Eigenschaften einiger Werkstoffe sind in der Tabelle 2.6 zusammengefasst. Diese können jedoch nach Art der Herstellung stark variieren. So führt eine Erhöhung der Drahhärte zu einer geringeren Streckgrenze. In diesem Kontext soll auch die Bruchdehnung von Materialien genauer definiert werden: Sie ist ein Maß für die Verformbarkeit von Materialien und hängt bei Kupfer direkt mit dem Rekristallisationsgrad zusammen. Sie wird im Zugversuch bestimmt und gibt das Verhältnis von Längenänderung zu Ausgangslänge des Drahtes beim Versagen durch einen Bruch an. Sie ist daher eine zentrale Größe für die Wickeltechnik und beschreibt das maximale Maß der Umformung. Typische Werte liegen zwischen 25 % bei 0,2 mm starken Drähten und 45 % bei 4,1 mm dicken Drähten. Durch jeden Umformvorgang wird die Bruchdehnung, aufgrund der entstehenden Gefügeveränderung herabgesetzt. Bei stark umgeformten Drähten kann sie Werte kleiner als 1 % annehmen. [Syn-15]