

Technologische Eigenschaften und die Bedeutung der Umformbarkeit von Cu-Werkstoffen für Steckverbinder im Automotive-Bereich

Theobald, S., Buresch, I., Hofmann, U. (1)

Die Anforderungen an Werkstoffe für Steckverbinder im Automobilbereich nehmen auf Grund der Miniaturisierung elektronischer Komponenten ständig zu. Hohe Festigkeiten bei gleichsam hoher elektrischer Leitfähigkeit, sowie guter Umformbarkeit sind das Entwicklungsziel. Beschichtung und Biegebarkeit des Werkstoffs sind für die Oberflächenrauheit und damit auch für die elektrischen Kontakteigenschaften im umgeformten Bereich verantwortlich. Der Beitrag stellt Methoden zur Bestimmung von Kontaktwiderstand und Oberflächentopographie der Biegekante vor. Die technologischen Eigenschaften verschiedener Steckverbinderwerkstoffe werden gezeigt.

Derzeit ist eine rasante Weiterentwicklung der Automobilelektronik zu beobachten. Neue Anwendungen für Sicherheit, Leistung und Komfort lassen die Komplexität des Bordnetzes zunehmen und sind nur durch den Einsatz modernster elektronischer Komponenten zu realisieren. Elektronik wird in Sensoren, Aktoren und Schalter integriert, die wiederum über Bussysteme mit den Steuerungen für Motor, Getriebe, Bremsen usw. verbunden sind. Eine immer höhere Bedeutung kommt dabei den Steckverbindern zu, die oft wesentlich für Zuverlässigkeit, Baugröße und Kosten elektronischer Komponenten verantwortlich sind. Mit zunehmendem Umfang des Bordnetzes nimmt die Anzahl der Steckverbinder zu. Durch den Trend „Elektronik vor Ort“ in mechanische Funktionen zu integrieren steigen auch die Anforderungen an die Komponenten. Höhere Temperaturen und erhöhte Vibrationsbelastung sind sehr stark funktionsbeeinflussende Faktoren, die hohe thermische Stabilität und Verschleißbeständigkeit fordern. Eine Reduzierung des Bauraumes hingegen stellt hohe Anforderungen an die Verarbeit-

barkeit der Materialien zur Herstellung der Steckverbinder. Steckverbindungen enthalten immer mehr Einzelpole. Bezogen auf den einzelnen Steckverbinder im Gehäuse bedeutet dies einen Trend hin zur Miniaturisierung und einteiligen Designs. Übertragen auf das Grundmaterial müssen gut leitfähige, hochfeste aber sehr gut biegbare/verformbare Werkstoffe eingesetzt werden. Da die Funktionszone im Steckverbinder zur Stromübertragung – der Kontaktbereich – auch oft einer Verformung unterzogen wird spielt dieser Punkt bei der Werkstoffauswahl aber auch bei der Beurteilung/Prüfung der Steckverbinder-Qualität eine sehr große Rolle. Die Anforderungen sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Die Verformbarkeit eines Werkstoffes hängt von der Legierungszusammensetzung, dem Festigkeitszustand, der Gefügeausbildung, der Biegeparameter Biegewinkel und –radius sowie Umformgeschwindigkeit und –art ab. Somit ist eine exakte Beurteilung der verformten Bereiche im Hinblick auf eine mögliche Funktionsbeeinträchtigung des Steckverbinders notwendig. Der folgende Beitrag zeigt anhand der Einflussfaktoren auf die Kontaktierung einer Steckverbindung eine Methode zur objektiven Beurteilung verformter Bereiche auf und stellt die Biegebarkeit verschiedener Hochleistungs-Cu-Werkstoffe im Vergleich dar.

Umformung, Oberflächentopografie und Kontaktwiderstand

Die Verformbarkeit des Materials, seine Oberflächenstruktur und der Stanz-Biegeprozess sind verantwortlich für die Oberflächenrauheit im

Anforderungen an Steckverbinder	Technologische Werkstoffeigenschaften
gute Wärmeabfuhr, geringe Selbsterwärmung	hohe elektrische und thermische Leitfähigkeit
gute Federeigenschaften, hohe Kontaktnormalkraft	hohe mechanische Festigkeit
dauerhaft konstante Kontaktnormalkraft	thermische Stabilität, Relaxationsbeständigkeit
Miniaturisierung	Umformbarkeit, hohe Festigkeit, hohe Leitfähigkeit
kleiner Kontaktwiderstand	glatte Oberflächen, Beschichtungen
Vibrationsfestigkeit	Mikroverschleißeigenschaften, Ermüdungsverhalten

Tabelle 1: Anforderungen an Steckverbinder im Automotive-Bereich

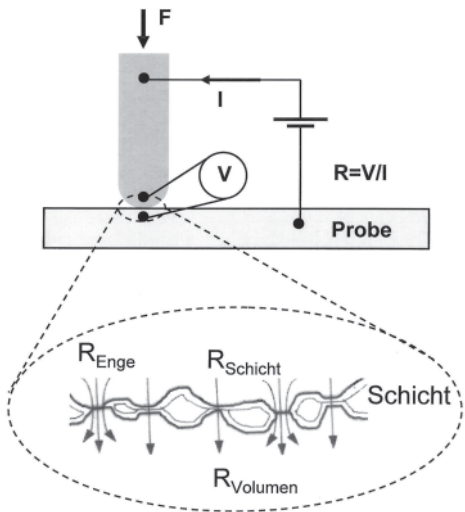


Bild 1: Prinzip der Kontaktwiderstandsmessung (ein halbkugelförmiger Goldkontakt wird mit definierter Kraft F auf die Probenoberfläche gedrückt, der Widerstand wird unter Trockenkreisbedingungen gemessen) und eine schematische Darstellung der Kontaktfläche

Biegebereich. Die Leistungsfähigkeit eines einzelnen elektrischen Kontakts wird aus zwei Gründen durch Oberflächenrauheit und Festigkeit/Härte der Kontaktpartner beeinflusst.

Erstens haben beide Eigenschaften Auswirkungen auf den Kontaktwiderstand [1,2]. Wenn beide Oberflächen uneben sind, berühren sie sich nur auf kleinen Flächen. Sofern diese nicht durch isolierende Schichten (Oxide usw.) belegt sind, leiten sie den elektrischen Strom. Die so entstehenden Kontaktflächen werden auch A-Spots genannt. Ihre Anzahl hängt von der Rauheit, der Oberflächenhärte und der Kontakt-Normalkraft ab. Weil die Fläche aller A-Spots immer kleiner als die geometrisch mögliche Kontaktfläche ist, entwickelt sich ein „Enge-Widerstand“. Allgemein setzt sich der Kontaktwiderstand aus dem Widerstand des Materials, dem Enge-Widerstand und dem Schichtwiderstand zusammen (Bild 1).

Das Ziel ist die Realisierung eines kleinen, stabilen Kontaktwiderstandes bei niedrigen Kontaktkräften. Dies ist Voraussetzung für niedrige Steckkräfte.

Zum zweiten kann die Rauheit als Maß für die Zuverlässigkeit eines

Steckverbinders betrachtet werden. Eine Aufrauung der Oberfläche entwickelt sich in Bereichen, die z.B. durch Biegen, Tiefziehen oder Prägen umgeformt wurden [3]. Die Ausprägung der Rauheit hängt ab von den mechanischen Eigenschaften des Bandmaterials und den Parametern des Umformprozesses. Starke Orangenhaut oder sogar Risse entstehen als Folge hoher lokaler Verformungen oder niedriger Duktilität des Materials.

Die Messung der Oberflächenrauheit kann somit als ein Bewertungskriterium für die Leistungsfähigkeit von Steckverbindern dienen.

Ein Beispiel für die Wechselwirkung zwischen Kontaktnormalkraft, Rauheit, Härte und Kontaktwiderstand ist in Bild 2 dargestellt. Der Kontaktwiderstand wurde unter Trockenkreisbedingungen in Vierleitertechnik gemessen. Ein Kontaktpartner ist ein goldener Stift mit halbkugelförmiger Kuppe, der mit definierter Kraft auf die zu untersuchende Bandprobe gedrückt wird.

Die Zahl und Ausdehnung der A-Spots wächst mit steigender Normalkraft durch elastische und plastische Deformation. Folglich nehmen der Enge-Widerstand und damit der Kontaktwiderstand mit zunehmender Kontaktnormalkraft ab. Bei niedrigen Rauheitswerten und/oder weichen Oberflächen ist eine Vergrößerung der A-Spots nach Zahl und Fläche bevorzugt. Daher ist bei gleicher Kontaktkraft der Kontaktwiderstand für die gebürstete Struktur größer als für die gewalzte Oberfläche. Eine weitere Reduzierung des Kontaktwiderstandes ist durch die Beschichtung des Grundmaterials z. B. mit Zinn zu erreichen.

Die Zinn-Schicht (Dicke 1,5 µm, Mikrohärtigkeit $H_{IT} 0,05/30/0/30 \approx 1000 \text{ N/mm}^2$) kann viel leichter als der Grundwerkstoff CuNi3Si1Mg ($H_{IT} 0,05/30/0/30 \approx 2800 \text{ N/mm}^2$) deformiert werden. Die Zinnschicht kann die Oberflächenmorphologie des Kontaktpartners annehmen. Folglich wird die effektive Kontaktfläche erhöht und der Kontaktwiderstand verringert, obwohl die elektrische Leitfähigkeit von Zinn geringer ist als von CuNi3Si1Mg.

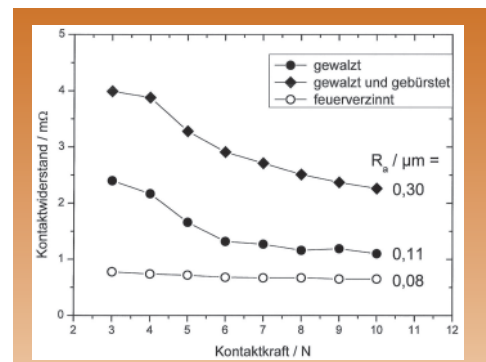


Bild 2: Kontaktwiderstand von gewaltem, gebürstetem (nach dem Walzen) und feuerverzinktem Band aus CuNi3Si1Mg (C7025, Wieland K-55) über der Kontaktnormalkraft

Allerdings sind Beschichtungen aus Zinn nicht für jeden Anwendungsfall geeignet. Einschränkende Faktoren sind hohe Temperaturen oder korrosive Umgebungsbedingungen. Bei Einsatz von Gold und Silber sind die Schichten üblicherweise sehr dünn; durch die galvanische Abscheidung kann die Oberflächenrauheit des Basismaterials nicht ausgeglichen werden. Deshalb sind dort niedrige Kontaktwiderstände nur mit glatten Oberflächen zu erreichen.

Messung der Oberflächenrauheit und der Biegebarkeit

In vielen Fällen ist die Kontaktzone ein verformter Bereich. Da die Leistungsfähigkeit von Kontakten durch die Rauheit der Kontaktfläche beeinflusst wird, ist es notwendig, die Flächenrauheit kleiner, gekrümmter Oberflächenbereiche zu bestimmen.

Die Standardprüfung zur Beurteilung von Biegekanten ist in EN 7438:2000 beschrieben. Proben mit 10 mm Breite, 80 mm Länge und Dicken zwischen 0,08 mm und 2,0 mm werden in ein 90°-Gesenk (V-Block) gebogen. Die Biegeradien werden variiert. Die Dehnung ϵ der äußeren Faser kann nach der Gleichung $\epsilon = (l - l_0) / l_0 = t / (2r + t)$ [4] abgeschätzt werden. Die Lokalisierung mechanischer Spannungen und die Verschiebung der neutralen Faser, die in Wirklichkeit stattfinden, sind durch diese einfache Betrachtung

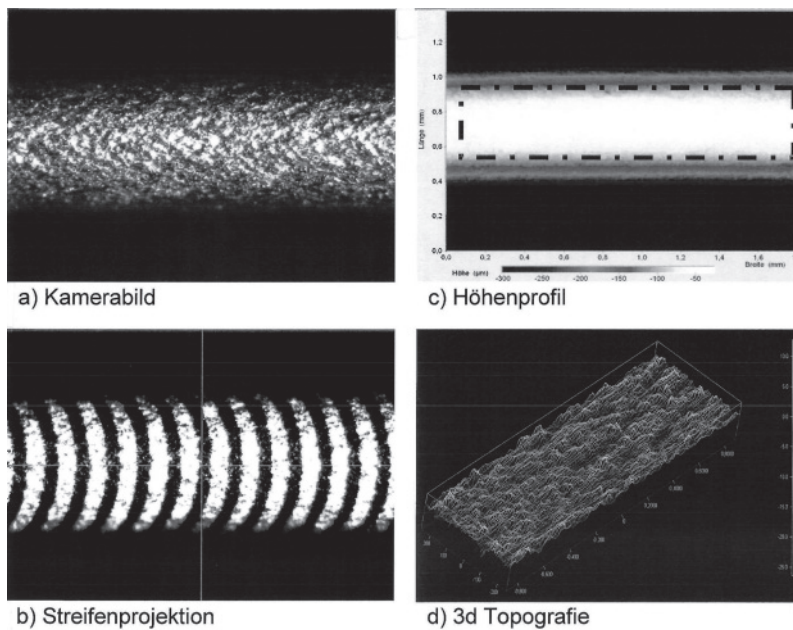


Bild 3: Messprinzip der Streifenprojektion an einer Biegekante (Erläuterungen siehe Text)

nicht abgedeckt. Die Umformung über immer kleiner werdende Biegeradien führt zu einer Zunahme der Dehnung ϵ bis bei einem bestimmten Grenzzadius sichtbare Risse entstehen.

Neben Radius und Probendicke hängt das Biegeverhalten eines bestimmten Materials noch von der Orientierung zur Walzrichtung, von der Probenbreite und dem Biegeprozess (freies Umformen, Biegen ins Gesenk etc.) ab [5].

Die Biegekanten werden üblicherweise durch visuelle Inspektion (25-fache Vergrößerung) beurteilt. Dabei wird das Ergebnis mit einer Standardbildreihe verglichen und in Klassen eingeteilt. Die Klassen reichen von 1 (glatte Oberfläche) über 2 und 3 (erhöhte Rauheit, Orangenhaut) bis zu 4 und 5 (Anrisse und starke Risse). Das Verfahren basiert auf der Erfahrung der Prüfer und hat eine Streuung von mindestens einer halben Bewertungsklasse. Es ist außerdem nicht unüblich, dass zwischen verschiedenen Labors Uneinigkeit über das Auftreten von Rissen besteht [5]. Die in dieser Arbeit beschriebene Methode wurde entwickelt, um die Nachteile der visuellen Beurteilung zu überwinden.

Bild 3a zeigt das Bild einer Biegekante mit einer starken Orangenhaut. Das Bildfeld beträgt etwa $4 \times 3 \text{ mm}^2$. Zur

Messung der Topografie wird eine Streifensequenz auf die Oberfläche projiziert und mit einer Kamera aufgenommen (Bild 3b). Parallele Streifen auf eine gekrümmte Fläche projiziert erscheinen im Kamerabild dann ebenfalls gekrümmt. Aus dieser Krümmung kann dann für jeden Bildpunkt die Höheninformation ausgewertet werden [6]. Aus dem so erhaltenen Höhenbild (Bild 3c) wird die makroskopische Biegung der Probe herausgerechnet. Man erhält so die Topografie der Biegekante (Bild 3d) aus der dann flächenhafte Rauheitswerte berechnet werden können. Die Höhenskala in Bild 3d reicht von $-25 \mu\text{m}$ bis $+10 \mu\text{m}$.

Die Experimente ergaben, dass die maximale Profiltiefe etwa zehnmal der durchschnittlichen Oberflächenrauheit (R_S) entspricht. Diese leitet sich ab aus Beiträgen parallel (R_x) und senkrecht (R_y) zur Biegekante: $R_S = 0,5 \cdot (R_x + R_y)$ (siehe auch [7]).

Topografieuntersuchungen an Biegekanten

Die Oberflächentopografie hängt mit der Deformation von Kornstrukturen während des Biegens zusammen. Kienzle [8] hat gezeigt, dass die Rauheit des deformierten Materials proportional zur durchschnittlichen

Korngröße D und zur Dehnung ϵ ist - also $R_S = a \cdot D \cdot \epsilon$. Bild 4 zeigt erste Ergebnisse an CuZn30 (Zustand R520). Proben mit verschiedenen Korngrößen wurden um 90° mit der Biegekante parallel zur Walzrichtung gebogen. Die gemessene Oberflächenrauheit ist über dem auf Probendicke normalisierten Biegeradius aufgetragen. $r/t=0$ bedeutet scharfe Biegung und eine Dehnung von 100 % an der Oberfläche, $r/t=1$ führt zu 33 % und $r/t=3$ zu 14% Dehnung. Die Rauheit steigt mit zunehmender Dehnung und/oder zunehmender Korngröße an. Die Linien zeigen theoretische Berechnungen nach Kienzle mit $a=0,07$. In diesem Beispiel zeigte das Material bei $r/t=0$ zwar ausgeprägte Orangenhaut aber noch keine Risse.

Für feste Materialien mit niedriger Duktilität wird die kritische Dehnung bereits bei Werten von $r/t > 0$ erreicht. Engere Biegeradien führen zu Rissen auf der Biegekante, was zu einer Zunahme der Rauheit führt. Dies kann mit der beschriebenen Methode gemessen und visualisiert werden. Bild 5 zeigt ein Beispiel für CuNi1Co1Si (C7035, Wieland-K57). Die Oberflächenrauheit R_S ist über r/t aufgetragen. R_S nimmt mit zunehmendem r/t ab. Die eingefügten Bilder zeigen Beispiele der Oberflächentopografie. Die Höhenwerte sind in Graustufen skaliert. Die dunklen Bereiche im linken Bild ($r/t = 0$) zeigen steile Einschnitte mit Tiefen von mehr als $10 \mu\text{m}$ - was

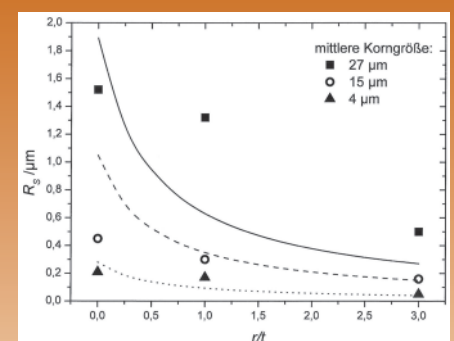


Bild 4: Optisch gemessene Oberflächenrauheit über auf Probendicke bezogenen Biegeradius für verschiedene Korngrößen in CuZn30 (C2600, Wieland M30), Zustand R520, 90°-Biegung parallel zur Walzrichtung

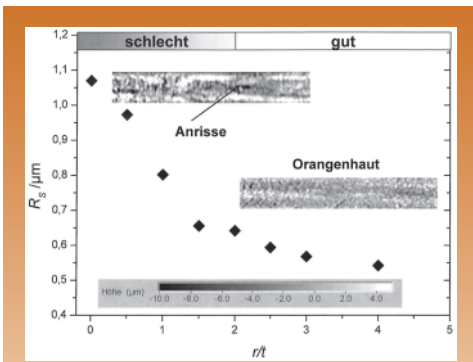


Bild 5: Optisch gemessene Oberflächenrauheit über auf Probendicke bezogenen Biegeradius für CuNi1Co1Si (C7035, Wieland K57), $R_{p0,2} = 825 \text{ MPa}$, 90° -Biegung parallel zur Walzrichtung, Bildfeld der Topografiebilder: $2 \text{ mm} \cdot 0,3 \text{ mm}$

deutlich auf Anrisse hinweist. Das rechte Bild ($r/t=4$) ist frei von Rissen. Mit diesen Ergebnissen wird es möglich, einen kritischen Biegeradius zu spezifizieren, der einem kritischen Rauheitswert entspricht. Der Übergang vom rissfreien zum rissbelasteten Material findet bei einem $r/t=2$ statt. Der kritische Rauheitswert liegt für diesen Werkstoff bei $R_s = 0,65 \mu\text{m}$. Es konnte gezeigt werden, dass eine befriedigende Korrelation zwischen den gemessenen Resultaten und den Ergebnissen der visuellen Inspektion

(bei ausreichend großer Anzahl visueller Inspektionen) besteht [9].

Vergleich der Biegeeigenschaften verschiedener Werkstoffe

Durch visuelle Inspektion oder objektive Messung kann für jeden Werkstoff ein minimal möglicher Biegeradius MBR angegeben werden. Bild 6 zeigt den MBR für einige wichtige Cu-basierte Bandwerkstoffe in Abhängigkeit der Dehngrenze $R_{p0,2}$ und der elektrischen Leitfähigkeit (in % IACS). Mit zunehmender Festigkeit tritt eine Verschlechterung der Biegebarkeit auf. Mischkristallgehärtete Werkstoffe (Bronze und Messing, offene Symbole in 6) erlauben scharfkantige Biegungen nur für Festigkeiten $R_{p0,2} < 500 \text{ MPa}$. Außerdem ist die elektrische Leitfähigkeit im Vergleich mit den ausscheidungsgehärteten Legierungen (gefüllte Symbole in Bild 6) deutlich schlechter.

Neue Entwicklungen wie Wieland K57 (Bild 5) haben höhere Festigkeiten bei gleichbleibend guter Biegebarkeit, Leitfähigkeit und thermischer Stabilität zum Ziel. Es handelt sich um einen ausscheidungshärtenden Werkstoff, der aufgrund seiner Gefügeausbildung trotz höherer Festigkeiten schärfere

Umformprozesse rissfrei ermöglicht. K57 setzt bezüglich der Eigenschaftskombination Leitfähigkeit/Festigkeit/Biegebarkeit die Entwicklung bei CuNi-Si-basierten Legierungen fort und ist daher für einteilige Kontakte und Miniaturisierung prädestiniert.

Zusammenfassung

Die Anforderungen an Steckverbinder im Automotive-Bereich wurden vorgestellt. In dieser Arbeit wurde ein Schwerpunkt auf die Eigenschaften der Oberfläche gelegt. Dabei ist der Kontaktwiderstand, der durch die Oberflächenrauheit beeinflusst wird, eine entscheidende Kenngröße für einen Steckverbinder.

Somit ist es wichtig, die Veränderung der Oberflächentopografie durch Umformung messtechnisch erfassen zu können. Eine geeignete Methode zur Beurteilung und Messergebnisse zur Biegebarkeit von Bandmaterialien wurden vorgestellt.

Im Vergleich einiger Kupferwerkstoffe wurde gezeigt, dass die steigenden Anforderungen durch die fortschreitende Miniaturisierung mit ausscheidungsgehärteten Cu-Hochleistungslegierungen erfüllt werden können.

Literatur

- [1] A. Kreil, W. A. Merl, E. Vinaricky, Elektrische Kontakte und ihre Werkstoffe, Springer Berlin, (1984).
- [2] R. Holm, Electrical Contacts, Springer Berlin, (2000).
- [3] K. Hatakeyama, A. Sugawara, T. Tojyo, K. Ikeda, Factors Affecting Bend Formability of Tempered Copper Alloy Sheets, Mat. Trans. 43, No. 11, (2002), p. 2908.
- [4] G. E. Dieter, Mechanical Metallurgy, McGraw-Hill Book Company, London (1988).
- [5] Understanding Copper Alloys, ed. J. J. Mendenhall, Olin Brass East Alton, Illinois, Winchester Press New York (1977).
- [6] B. Breuckmann, Bildverarbeitung und optische Messtechnik in der industriellen Praxis, Franzis-Verlag, (1992).
- [7] Patent DE 102 13 902 B4, 2004.05.06.
- [8] O. Kienzle, K. Meitzner, Grundlagen einer Typologie umgeformter metallischer Oberflächen, Springer-Verlag, (1965), p. 41.
- [9] S. Theobald, 1st Workshop on Materials Testing, Cairo (2005), p. 8.

(1) S. Theobald, I. Buresch, U. Hoffmann, Wieland-Werke AG, Graf-Arco Str. 36, 89070 Ulm

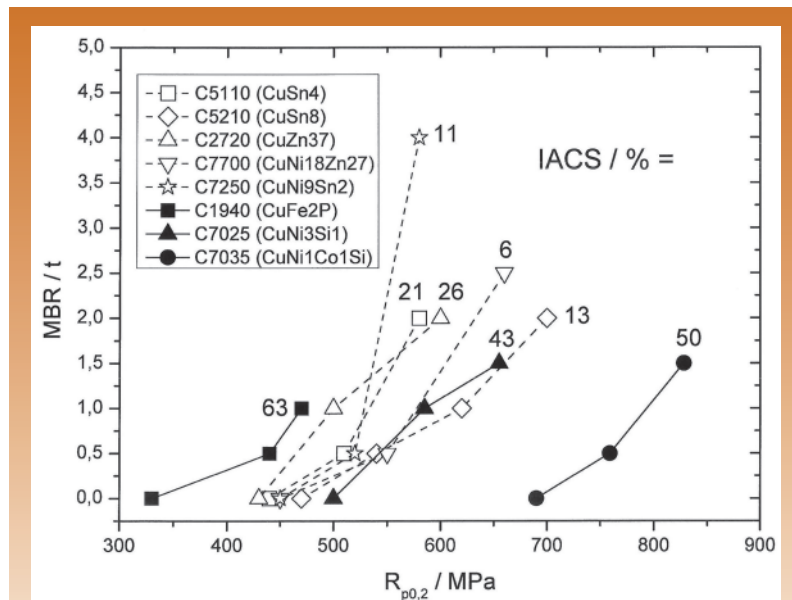


Bild 6: MBR für einige wichtige Cu-basierte Bandwerkstoffe in Abhängigkeit der Dehngrenze $R_{p0,2}$ und der elektrischen Leitfähigkeit (in % IACS).