

Beitrag zur Untersuchung der Ermüdungseigenschaften dünner Drähte aus Kupferbasiswerkstoffen unter Biegewechselbeanspruchung nach ASTM B470 – 02

Schymura, M. A.; Fischer, A. (1)

Komponenten aus Kupfer und Kupferbasiswerkstoffen werden in vielen Industriebereichen verwendet. Innerhalb der verschiedenen Industriezweige ergibt sich ein breites Anwendungsspektrum. Vor dem Hintergrund der Betriebskosten- und Emissionssenkung sowie der Optimierung des Materialeinsatzes spielen Leichtbaukonzepte eine immer größere Rolle. Die Umsetzung findet dabei über Werkstoffe mit einer geringeren Dichte, über den Einsatz hochfester Werkstoffe bei kleineren Querschnitten und/oder eine Änderung der Konstruktion statt. Im Bereich der Kabeltechnik stellt sich daher die Frage, ob es möglich ist, unter Berücksichtigung der erforderlichen mechanischen Eigenschaften die Querschnitte von Kabeln und Litzen so zu verringern, dass eine Gewichtseinsparung z.B. für den Einsatz in der Automobilindustrie möglich ist, um so den CO₂-Ausstoß sowie Produktions- und Betriebskosten zu senken [1]. Trotz der Verwendung immer leichter und dünner konstruierter Bauteile steigt das Leergewicht heutiger PKWs. Der 2011er Opel Astra ist beispielsweise 600 kg schwerer als sein 1986er Vorgängermodell [2]. In modernen Automobilen liegen dabei ca. 50 % der Herstellungskosten in der Elektronik [1]. Die Länge der verbauten Kabel beträgt pro PKW z.T. mehr als 2 km [2]. Vor dem Hintergrund steigender Rohstoffpreise, wie z.B. der Verfünffachung des Kupferpreises in den letzten 10 Jahren, lassen Gewichtseinsparungen im Bereich des Kabelbaums neben der Emissions- und Betriebskostensenkung eine Verringerung der Produktionskosten erwarten [3].

Eine Möglichkeit zur Gewichtsreduzierung liegt in der Verringerung des Drahtdurchmessers. Die Bauteile unterliegen im Einsatz aber zusätzlich einer Ermüdungsbeanspruchung durch Vibrationen, so dass bei dünneren Drähten die Grenzen der zyklischen mechanischen Belastbarkeit berücksichtigt werden müssen. Das Ermüdungsverhalten von Kupfer und seinen Legierungen ist aus werkstoffkundlicher Sicht gut untersucht [4, 5]. Dies gilt aber im Wesentlichen für großvolumige Proben. Drahtgeometrien, die ein großes Oberfläche-Volumen-Verhältnis aufweisen [6], sind seltener behandelt worden. Vergleichende

Untersuchungen beider Geometriezustände fehlen gänzlich. Aus eigenen Arbeiten zu austenitischen Stählen ist bekannt, dass sich Werkstoffe in Proben mit großem und kleinem Oberflächen-Volumen-Verhältnis sowohl unter monotonen als auch unter zyklischen Belastungen unterschiedlich verhalten [7, 8].

Dieser Beitrag zeigt einen ersten Ansatz zur Erarbeitung und statistischen Absicherung von zyklischen Kennwerten für ein breites Spektrum von Kupferbasiswerkstoffen in Form von Drähten bzw. Litzen unter Verwendung einer industriell üblichen und nach [9] standardisierten Prüfvorrichtung.

Materialien und Experimentelle Methoden

Untersuchte Legierungen

Die Bandbreite der untersuchten Legierungen kann der Legende in Bild 1 entnommen werden. Die Legierungen liegen in den meisten Fällen jeweils in einem „weichen“ und einem „harten“ Zustand vor, wobei die „harten“ Zustände über unterschiedliche Verfestigungsmechanismen erreicht werden. Die Drähte sind je nach Legierung kaltverfestigt, mischkristallverfestigt, ausscheidungsgehärtet oder nutzen mehrere dieser Verfestigungsmechanismen. Zum Vergleich wurden eine Al-Legierung (mit Al > 99,5 Gew.-%), ein mit Kupfer überzogener Aluminiumdraht (Cu-Clad-Al) und ein mit Kupfer überzogener Stahldraht (Cu-Clad-Fe) untersucht. Herstellungs- und legierungsabhängig weisen die Drähte einen Durchmesser von 0,25 mm bzw. 0,3 mm auf. Die Dicke des Kupferüberzuges beträgt beim Cu-Clad-Al $16 \pm 1 \mu\text{m}$, beim Cu-Clad-Fe $49 \pm 3 \mu\text{m}$. Diese Drähte sind ebenfalls kaltverfestigt.

Außer den im Labor gezogenen Drähten CuAg0.1 und CuSn0.3, sind alle Drähte direkt der Fertigung entnommen und auf entsprechenden Rollen geliefert worden.

Leitfähigkeit und Mechanische Prüfung

Vor der mechanischen Prüfung wurde die Leitfähigkeit der Drähte mittels einer Messbrücke, Resistomat 2302 der Firma Burster (Gernsbach, Deutschland), an Drähten der Länge 1000 mm gemessen. Die Durchführung der Zugversuche erfolgte entsprechend [10] bei Raumtemperatur. Die Biegewechselprüfung (BWP) wurde an einer Biegewechselmaschine (BWM) der Firma GTS Test Solutions (Berlin, Deutschland) bis zum Drahtabriss durchgeführt (Bild 2). Das Belastungskollektiv umfasst die Biegedurchmesser (BD) mit 2, 4, 6, 8 und 10 mm, Biegewinkel (BW) mit $\pm 60^\circ$ und $\pm 90^\circ$, Belastungsfrequenz von 1 Hz und axiale Last von 67 g. Aus dem Gewicht der Last resultiert eine nominelle Spannung von 13,4 MPa für $\varnothing = 0,25 \text{ mm}$ und 9,5 MPa für $\varnothing = 0,3 \text{ mm}$. Der Abstand der BD wird mittels einer Fühlerlehre auf 0,3 mm bzw. auf 0,4 mm eingestellt. Pro Legierung, Wärmebehandlungszustand und Lasthorizont, der über den BD und BW definiert wird, wurden fünf Proben

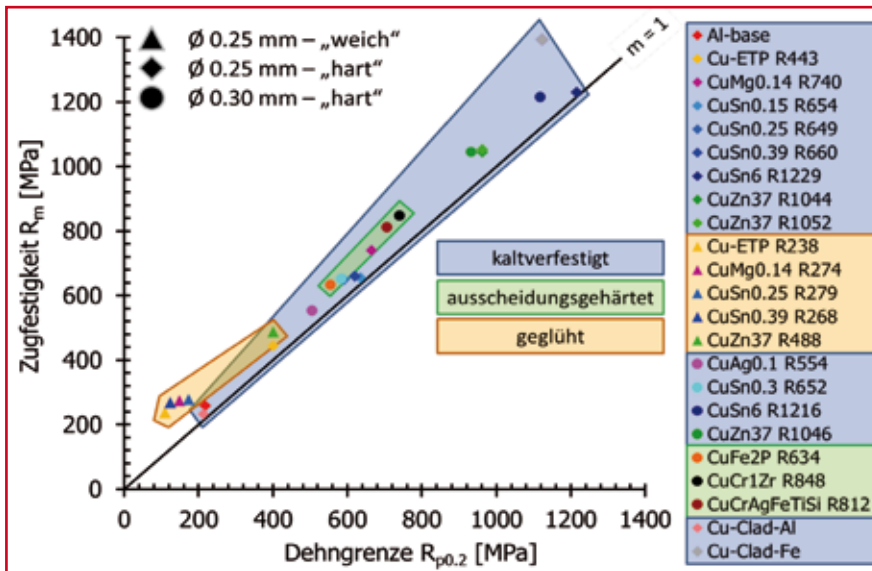


Bild 1: Gemittelte Festigkeitskennwerte aus dem Zugversuch, die ausscheidungsgehärteten Drähte sind zudem kaltverfestigt

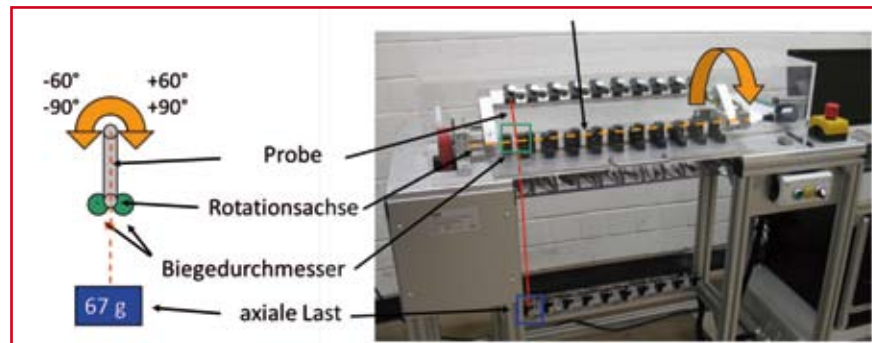


Bild 2: Biegewechselmaschine und Funktionsprinzip

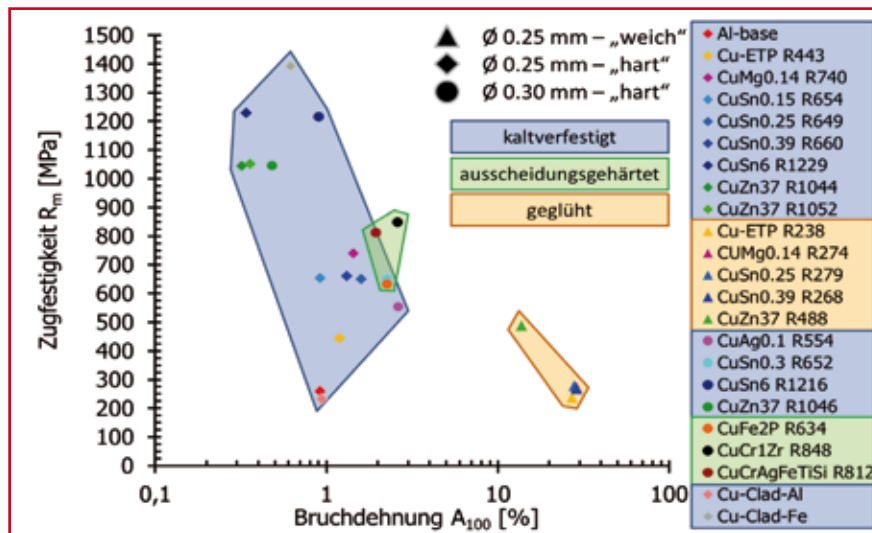


Bild 3: Zugfestigkeit über Bruchdehnung

bei Raumtemperatur und ausgewählte Legierungen zusätzlich bei 105 °C ermüdet. Während der Prüfungen wurden der elektrische Widerstand und die Proben-temperatur kontinuierlich gemessen. Die Änderung der elektrischen Widerstände der Proben während der BWP war

< 0,01 mΩ/LW und damit im Rahmen dieser Arbeit vernachlässigbar.

Fraktografie

Die Bruchflächen wurden nach der BWP mittels eines Rasterelektronenmikrosko-

pes (REM) vom Typ LEO 1530 - GEMINI der Firma Zeiss (Oberkochen, Deutschland) an jeweils acht nach der niedrigsten und höchsten Bruchlastspielzahl bei den BD = 2 mm und BD = 10 mm ausgewählten Proben untersucht.

Ergebnisse und Diskussion

Bild 1 zeigt die Ergebnisse der Zugversuche bzgl. der gemessenen Festigkeiten. Alle untersuchten Drähte weisen eine plastische Reserve auf, wobei Cu-Clad-Al, CuSn0.39 und CuSn6 die niedrigsten Differenzen zwischen der Dehngrenze $R_{p0,2}$ und der Zugfestigkeit R_m zeigen. Unter den Cu-Legierungen verfügt Cu-ETP R238 über die niedrigsten, CuSn6 R1229 über die höchsten Festigkeitskennwerte. Lediglich der Eisendraht Cu-Clad-Fe zeigt eine höhere Zugfestigkeit. Die Bruchdehnungen aller Drähte, ausgenommen der Cu-Basisdrähte im Zustand „weich“ liegen dabei unter 3 % und sinken in grober Näherung mit der Zugfestigkeit (Bild 3). Die Al-Drähte erreichen dabei lediglich Festigkeiten im Bereich der geglühten niedriglegierten Cu-Drähte. Bild 4 zeigt, dass der Leitwert mit zunehmendem Legierungselementgehalt von 54 auf 6 MS/m sinkt, wobei der Al-Draht einen Wert von 34 MS/m erreicht.

Der Übersichtlichkeit halber ausgewählte Ergebnisse der BWP sind in Bild 5 in Form von Wöhlerkurven in Abhängigkeit des Kehrwertes des Biegeradius - also qualitativ der Spannungsamplitude - dargestellt. Der Steilabfall aller Kurven zeigt, dass es sich im Fall der aufgebracht Belastung um eine Untersuchung im Kurzzeitfestigkeitsbereich handelt, da keine Bruchlastspielzahlen über 7000 LW erreicht werden. Eine Extrapolation bis zur Bruchlastspielzahl von 2 Mio. LW, die üblicherweise als Grenzlastspielzahl zur Abschätzung der Dauerfestigkeit angesetzt wird, ist nicht sinnvoll.

Die fraktografischen Untersuchungen zeigen, dass ca. 30 % der Bruchflächen nicht symmetrisch sind (Bild 6), was ein Hinweis auf überlagerte Biege- und Torsionsmomente, die z.B. vom Eigenspannungszustand der Proben bzw. dem Prüfaufbau herrühren könnten. Zudem weisen alle Drähte Verschleißerscheinungsformen auf den Drahtmantelflächen auf. Die Analyse der Kontaktbedingungen (Bild 7) zwischen Draht und BD zeigt, dass bei idealen Kontaktbedingungen, d.h. der Draht liegt in jedem Punkt am BD an, der Drahtaußenradius sogar im Fall des BD mit $r = 5$ mm

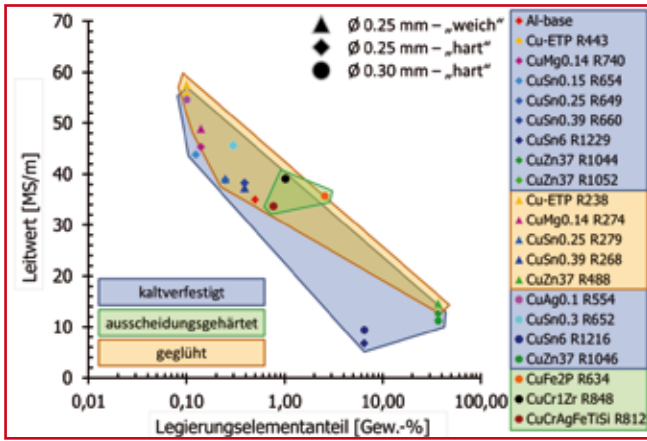


Bild 4: Leitwert in Abhängigkeit vom Legierungselementanteil in Gewichtsprozent

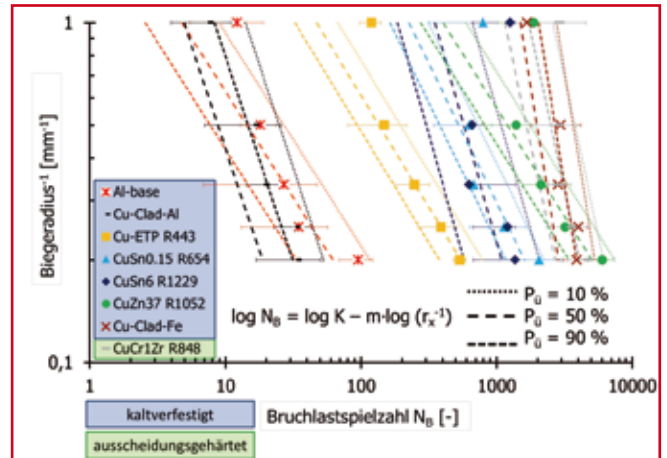


Bild 5: Wöhlerkurven ausgewählter Drähte

einer Dehnung von annähernd 5 % ausgesetzt wäre. Das würde aufgrund der gemessenen Bruchdehnungen, mit Ausnahme der geglähten Drähte, zu Drahtbruch im ersten Lastwechsel führen. Der Draht zeigt bei normgemäßem Aufbau aber einen bogenförmigen Verlauf zwischen den BDs, was zu geringeren Dehnungen führt. Weiterhin findet eine reversierende Relativbewegung zu den BD statt, was die Verschleißerscheinungsformen auf den Mantelflächen erklärt. Unter Berücksichtigung der überlagerten Beanspruchungen sind daher die Ergebnisse der BWP nach Norm als qualitativ zu bewerten. Eine qualitative Reihung bzgl. der zyklischen Eigenschaften bei Raumtemperatur ist aber möglich.

Aus Bild 8 wird deutlich, dass mit Ausnahme von CuZn37 R1044 alle Drähte bei einem BW von 60° höhere Bruchlastspielzahlen aufweisen als bei einem BW von 90°. Vergleicht man die Bruchlastspielzahlen von CuZn37 R1046 (Ø = 0,30 mm) und CuSn6 R1216 (Ø = 0,30 mm) mit denen von CuZn37 R1052 (Ø = 0,25 mm)

und CuSn6 R1229 (Ø = 0,25 mm), so ist erkennbar, dass die Bruchlastspielzahlen mit zunehmendem Drahtdurchmesser bei beiden BW abnehmen. Dünnere Drähte sind demnach zyklisch belastbarer.

Der Vergleich zwischen $R_{p0.2}$ und der Biegewechselfestigkeit zeigt, wie aus Bild 9 hervorgeht, keinen Zusammenhang. Während unter quasistatischer Belastung das Zulegieren von Zinn in CuSn6 R1229 zur höchsten Festigkeit führt, weist bei der vorliegenden zyklischen Belastung das mit Zink legierte CuZn37 R1052 die höchsten Bruchlastspielzahlen auf. Der Einfluss der unterschiedlichen und überlagerten Verfestigungsmechanismen und der Oberflächengüte nach Kaltverfestigung und/oder überlagerter Verschleißbeanspruchung lassen dieses nicht zu.

Ein ähnliches Bild ergibt sich im Vergleich der Bruchlastspielzahlen bei RT zu den 105 °C-Werten (Bild 10). Die o.a. äußeren und inneren Einflüsse erlauben aufgrund der großen Streuungen keine direkten Rückschlüsse. Gleichwohl reihen sich die Werkstoffe bei 105 °C wie bei RT.

Wenn der Leitwert als weiteres Kriterium berücksichtigt wird, verhält sich der ausscheidungsverfestigte CuCr1Zr in 0,3 mm im Vergleich deutlich besser. Aluminiumbasiswerkstoffe schneiden bei ähnlichem Leitwert deutlich schlechter ab.

Ausblick

Realbeanspruchungen sind zwar immer mit überlagerten Lasten verbunden, so dass die ermittelten zyklischen Werte zur groben Reihung geeignet erscheinen, doch sind für die Ermittlung quantitativer Kennwerte definierte Bedingungen wie z.B. Umlaufbiegeversuche notwendig. Eine Umsetzung unter Verwendung der BMW erscheint zwar grundsätzlich möglich, erfordert jedoch eine veränderte Versuchsführung und letztendlich eine Überarbeitung der Norm.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich beim DKI und bei der ICA für die finanzielle Förderung des Projekts. Ein besonderer Dank geht an Herrn Dr. Ladij Tikana für seine wissenschaftliche und organisatorische Unterstützung. Vitaly Roy, Katerina Schaa, Michael Papoutsis, Sedat Güler, Namik Akçöltekin und Glib Chubaryev sei für die Versuchsdurchführung, Probenpräparation und die kreativen Ideen rund um das Projekt gedankt. Weiterhin danken wir Herrn Dr. Uwe Hofmann für die Zugversuche bei der Firma Wieland-Werke AG und Herrn Dr. Michael Köhler für Leitfähigkeitsuntersuchungen bei der Firma Diehl Metall.

Literatur

[1] Car Training Institute: Automotiv Wire 2010, Fachforum vom 21.09.–22.09.2010, Esslingen 2010

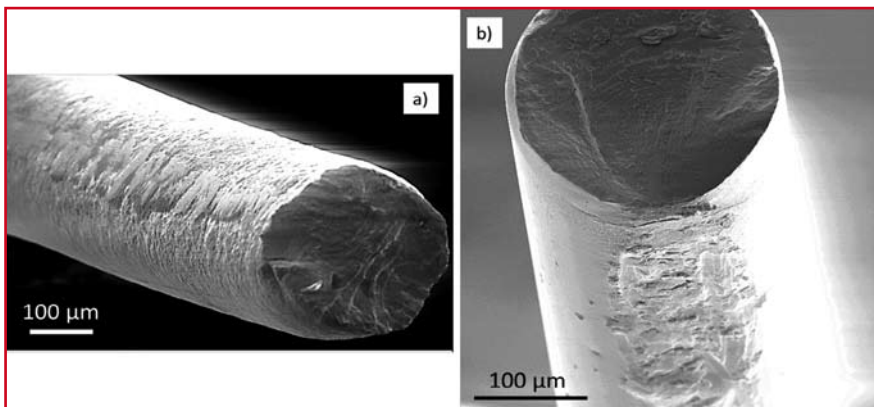


Bild 6: Bruch- und Drahtmantelflächen a) CuCrAgFeTiSi R812 mit symmetrischer Bruchfläche und Verformung auf der Drahtmantelfläche, b) CuZn37 R488 mit asymmetrischer Bruchfläche und starker Verformung der Drahtmantelfläche

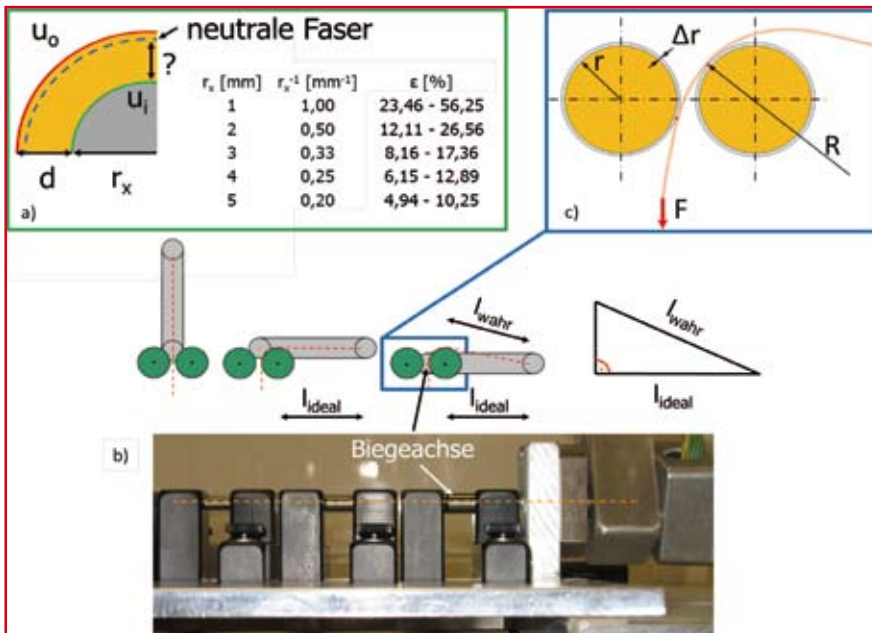


Bild 7: Analyse der Kontaktsituation zwischen Biegedurchmesser und Draht, a) idealer schlupffreier Kontakt, b) Position der Biegeachse führt zu einer Relativbewegung zwischen Draht und Biegedurchmesser, c) angenommener realer Kontakt zwischen Draht und Biegedurchmesser

[2] R. Jäckel: Schlankeitskur für Auto und Co.; Fraunhofer Gesellschaft, Hannover 2006.
 [3] M. Roeder: Ohne Kupfer geht fast nichts; Die Zeit, 07.04.2011 Nr.15, Zeit-verlag Gerd Bucerius GmbH & Co. KG 2011
 [4] L.F. Yakovenko, N.M. Grinberg: The fatigue life and plastic deformation character of copper at low temperatures; International Journal of Fatigue, Vol. 5, 1983, S.239–243
 [5] J.A. Roberson, J.C. Grosskreutz: Fatigue of copper-zinc alloys at 100°K; Acta Metallurgica, Vol. 11, 1963, S.795–798
 [6] R. Hofbeck, et al.: Fatigue of very thin copper and gold wires; Scripta Metallurgica, Vol. 20, 1986, S.1601-1605
 [7] A. Meißner: Mechanische Eigenschaften wenigkristalliner Strukturen; Fortsch.-Ber. VDI Reihe 5, Nr. 731. Düsseldorf: VDI Verlag 2007, ISBN: 978-3-18-373105-3
 [8] S. Weiß: Einfluss der Wenigkristallinität auf das Verformungsverhalten von Werkstoffen und Bauteilen der Medizintechnik; Fortsch.-Ber. VDI Reihe 5, Nr. 734. Düsseldorf: VDI Verlag 2008, ISBN: 978-3-18-373405-4
 [9] American Society for Testing and Materials: Designation B470 – 02, Standard Specification for Bonded Copper Conductors for Use in Hookup Wires for Electronic Equipment, Reapproved 2007
 [10] Deutsches Institut für Normung: DIN EN ISO 6892-1, Metallische Werkstoffe – Zugversuch – Teil 1: Prüfverfahren bei Raumtemperatur, Berlin, Köln: Beuth-Verlag, 2009

(1) *Werkstofftechnik, Universität Duisburg-Essen, Duisburg, Deutschland*

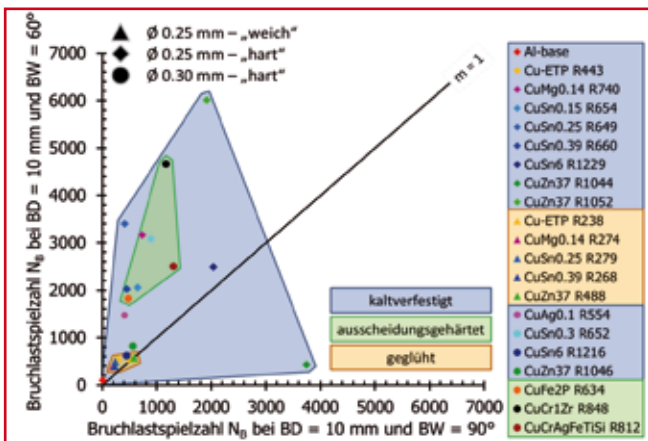


Bild 8: Vergleich zwischen den Mittelwerten der bei Raumtemperatur erreichten Bruchlastspielzahlen bei den Biege- und Bruchdehnungswinkeln $\pm 60^\circ$ und $\pm 90^\circ$ bei einem Biegedurchmesser von 10 mm

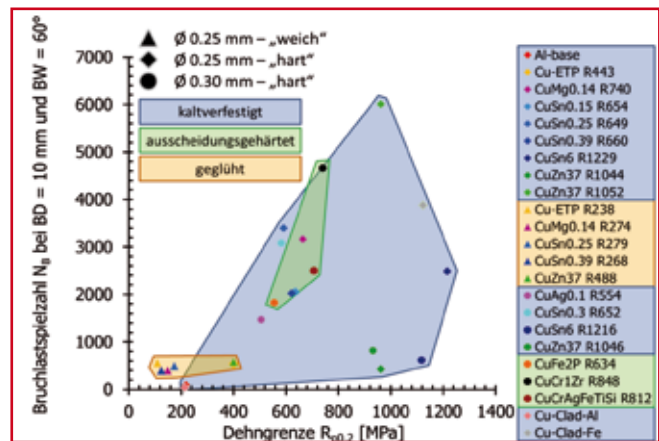


Bild 9: Vergleich der gemittelten quasistatischen und dynamischen Kennwerte am Beispiel der Dehngrenze und der Bruchlastspielzahl beim Biegeradius von 10 mm und Biege- und Bruchdehnungswinkel von 60°

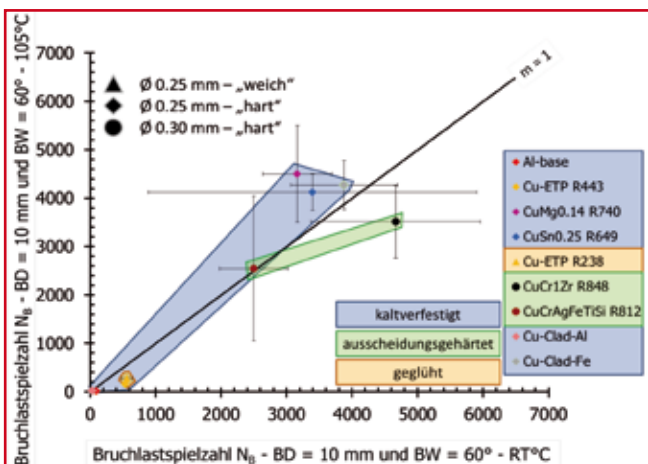


Bild 10: Vergleich der mittleren Bruchlastspielzahlen ausgewählter Legierungen bei Raumtemperatur und 105 °C mit Standardabweichung

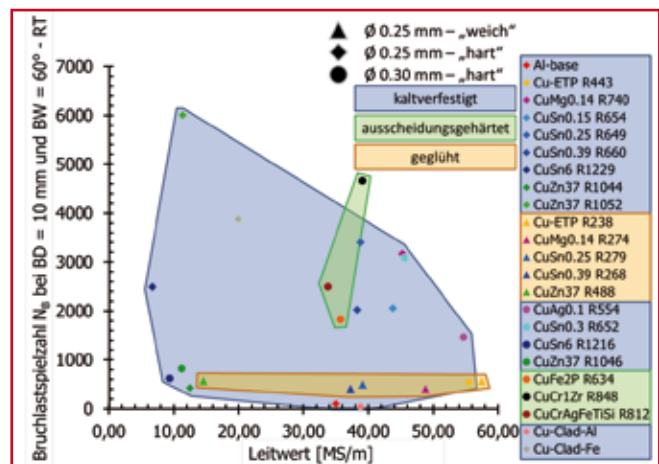


Bild 11: Auftragung der Bruchlastspielzahl beim Biegeradius von 10 mm und Biege- und Bruchdehnungswinkel von 60° über dem Leitwert