

Trends von Leiterwerkstoffen bei Signalleitungen im Automobil

Schill, M. (1); Steuff, W. (2)

In der Verkabelung von Automobilen werden derzeit größtenteils noch konventionelle Kupferleitungen eingesetzt. Die zunehmende Komplexität der Bordnetze durch immer neue Funktionen führt zu einer erhöhten Leitungsanzahl, was eine Zunahme des Gewichts bedingt. Diesem Trend steht die von der EU vorgeschriebene Reduktion der CO₂-Abgaswerte gegenüber. Für das Jahr 2015 sind 125 g CO₂/km und ab dem Jahr 2020 nur noch 95 g CO₂/km zulässig. Wenn man nun bedenkt, dass eine Gewichtszunahme von 10 kg ungefähr einem Mehr an 1g /km CO₂-Ausstoß entspricht, erkennt man einen Handlungsbedarf. Auch haben die hohen Rohstoffpreise in den Jahren 2007/2008 die Suche nach alternativen Leitermaterialien nochmals verstärkt. Die kurzfristige Entspannung der Rohstoffpreise durch die weltweite Wirtschaftskrise ist nur von beschränkter Dauer und hat die Suche nicht unterbrochen sondern eher intensiviert.

In einem ersten Schritt wird das Bordnetz analysiert und optimiert. So wird die Architektur im Hinblick auf Leitungsverlegung (Leitungslängen) und Dimensionierung (Querschnittsreduktion) auf Basis des aktuellen Leitermaterials Kupfer betrachtet. Da diese Optimierungen seit längerem regelmäßig durchgeführt werden, und ein Teil des ständigen Optimierungsprozesses zur Gewichts- und Kosteneffizienz sind, stößt man schnell an Grenzen.

Um diese Grenzen zu überwinden und neue Potenziale zu erschließen wird der Einsatz von alternativen Leitermaterialien forciert. Hier stehen eine Vielzahl Materialien zur Verfügung und müssen sich mit dem bewährten Universalleitermaterial Kupfer messen lassen, was nicht einfach ist. So hat sich bereits sehr früh Kupfer (neben anderen gediegenen Metallen) als ein gut verarbeitbares, abbaubares und zu verhüttendes Material herausgestellt, dem eine eigene Zeitepoche, die Kupfersteinzeit (in Mitteleuropa von ca. 4300 v. Chr. bis 2200 v. Chr.) gewidmet wurde. Im Zuge der Elektrifizierung Ende des 19. Jahrhunderts musste ein Medium gefunden werden, das den Strom möglichst verlustfrei über mehr oder weniger weite Strecken übertragen konnte. Ein elektrischer Leiter besitzt freie Ladungsträger, die zum

Transport der geladenen Teilchen genutzt werden können. Die elektrische Leitfähigkeit, auch Konduktivität genannt wird in Siemens/Meter angegeben. Kupfer besitzt nach Silber die beste Leitfähigkeit, vor Gold und Aluminium (Silber 61 S/m, Kupfer 58 S/m, Gold 44 S/m, Aluminium 36 S/m).

Reines Kupfer hat sich in Bezug auf seine physikalischen und ökonomischen Eigenschaften als Leitermaterial großflächig durchgesetzt. Den generellen Ersatz von Kupfer durch ein einziges alternatives Leitermaterial wird es in

absehbarer Zeit nicht geben. Um Alternativen zu finden, müssen vielmehr der Einsatzzweck und die Rahmenbedingungen der einzelnen Leitungen betrachtet und bewertet (Bild 1) werden. So kann in einem ersten Schritt ein Leitungssatz in zwei große Kategorien unterteilt werden: Signalleitungen und Powerleitungen.

Bei Signalleitungen steht die Signalübertragung im Vordergrund. Aufgrund der geringen Ströme kann der Leitungswiderstand höher sein, ohne dass es zu einer für die Anwendung kritische Verlustleistung im Kabel kommt. Die Stromstärke liegt in der Regel unter 0,5 A. Die bislang gängigen Querschnitte für Signalleitungen im Automobil liegen zwischen 0,35 mm² und 0,75 mm².

Powerleitungen sind für die Stromversorgung der Verbraucher zuständig. Hier spielt die Leitfähigkeit eine zentrale Rolle. Die Stromstärke liegt über 0,5 A und die Querschnitte sind von 0,5 mm² bis 95 mm² breit gestreut. Batterieleitungen sind in diesem Zusammenhang separat zu betrachten,

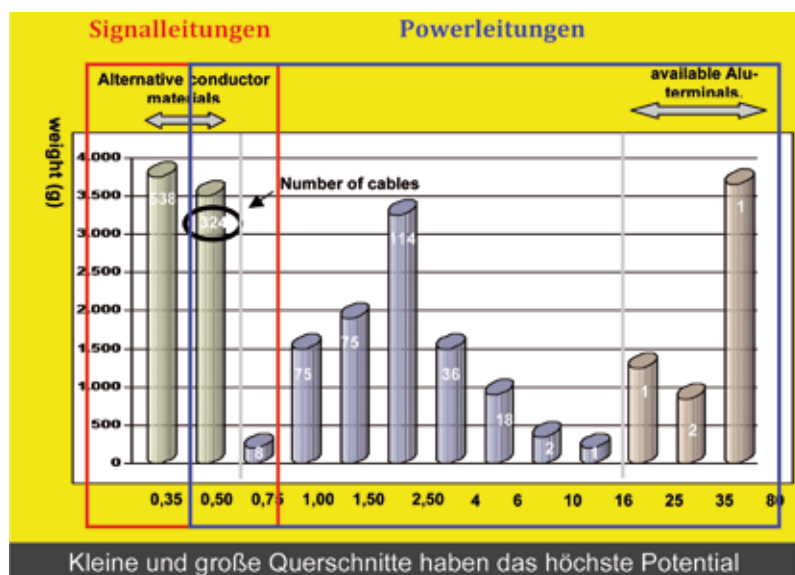


Bild 1: Verteilung der Leitungsquerschnitte in einem repräsentativen Automobil-Bordnetz

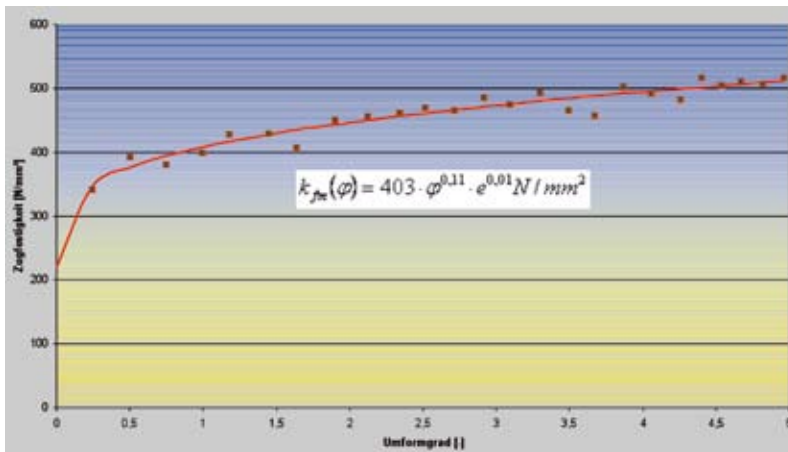


Bild 2: Verfestigungskurve für Cu-ETP im feindrächtigen Bereich

während für den gesamten Kabelbaum das Thema Bauraum eine zentrale Rolle spielt, ist dies bei Batterieleitungen nicht unbedingt der Fall. Batterieleitungen sind nicht in den Hauptkabelsatz integriert. Somit können auch alternative Leitermaterialien mit einer geringeren Dichte und geringerer Leitfähigkeit, wie zum Beispiel Aluminium, eingesetzt werden. Eine Gewichtsreduktion wird mit dem Preis der Erhöhung des Leiterquerschnittes erkauft. Nicht an jeder Stelle im Automobil ist Platz für eine Erhöhung des Querschnittes.

Signalleitungen

Ein wesentlicher Punkt bei der Betrachtung des Portfolios an Alternativen im Bereich Signalleitungen ist die mechanische Belastung. So wirken beim Einbau bestimmte Zugkräfte auf jeden einzelnen Kabelstrang. Um eine Beschädigung zu vermeiden, fordern derzeit die meisten OEM's eine Mindestzugfestigkeit der Leitung selbst von ca. 70 N, was bei weichem Kupfer einem Leiterquerschnitt von 0,35 mm² entspricht.

Dagegen tritt die Leitfähigkeit ein wenig in den Hintergrund, da auch bei höherem Widerstand die digitalen Signale über kurze Distanzen im Automobil verlustfrei transportiert werden können.

Eine Gewichts- und Bauraumreduktion durch Querschnittsreduktion alleine ist mit konventionellen, weich geglühtem Kupfer nicht mehr möglich. Es müssen höherfeste Materialien zum

Einsatz kommen. Kupferlegierungen bieten mit ihrer erhöhten Zugfestigkeit eine klare Alternative. So sind mit Messing, Bronze oder Kupfer-Magnesium Alternativen vorhanden, die eine Querschnittsreduktion von 0,35 mm² auf bis zu 0,09 mm² zulassen. Leiterquerschnitte von 0,09 mm² sind aufgrund noch fehlender Qualifikationen bei Leitungen, Kontaktteilen und Steckersystemen als Einzelader kurzfristig nicht im Automobil einsetzbar. Wohingegen Querschnitte von 0,22 mm², 0,18 mm², wie auch 0,14 mm² realistisch kurzfristig Einzug ins Automobil finden können. In diesem Querschnittsbereich gibt es bereits neben den Leitungen auch geeignete Kontaktsysteme, die teilweise beim OEM freigegeben sind. Neben Legierungen lassen sich auch Werkstoffverbunde, wie z.B. kaschierte Materialien einsetzen. Ein Vertreter dieser Gruppierung ist der kupferkaschierte Stahldraht (CCS).

Ausgewählte Alternativen und deren Stärken und Schwächen

Der derzeit etablierte Standard in Signalleitungen im Automobilsektor sind Litzen aus rekristallisierend geglühtem Cu-ETP. Die angestrebte Miniaturisierung erfordert eine Festigkeitssteigerung gegenüber diesem Standard.

Cu-ETP ziehhart

Die offensichtlichste Lösung liegt in dem Auslassen der Schlussglühung bei

dem bekannten Werkstoff. Die Verfestigungskurve für Cu-ETP (Bild 3) wurde nach Hensel-Spittel [1] im feindrächtigen Bereich mit

$$k_{fm}(\varphi) = 403 \cdot \varphi^{0,11} \cdot e^{0,01} \text{ N/mm}^2$$

regressiert. Das bedeutet, dass nach dem Ziehprozess nicht eine Festigkeit von 220 N/mm², sondern von ca. $R_m \approx 500 \text{ N/mm}^2$ erreicht wird. Das würde bedeuten, dass im ziehharten Zustand ein Querschnitt von 0,16 mm² ausreichen würde, die gleiche Reißlast zu ertragen wie der derzeit verwendete Standard. Das würde einer Gewichteinsparung von 54 % entsprechen.

Zum detaillierteren Verständnis der Zustandsveränderungen bei dieser Variante sind Querschliffe des bisherigen Standards mit der harten Alternative verglichen worden. Dabei sind die Drähte jeweils auf einer mehrstufigen Mehrdrahtziehanlage mit einem Umformgrad $\phi > 5$ bei Geschwindigkeiten von $v > 15 \text{ m/s}$ am letzten Ziehstein gefertigt worden.

Die geglühte Standardvariante Bild 3 zeigt ein feinkristallines, gleichmäßiges Gefüge. Das ziehharte Muster Bild 4 weist dagegen eine ungleichmäßige Gefügestruktur auf. Im Außenbereich ist ein sehr feinkörniges Umformgefüge zu erkennen, das im Längsschliff auch extrem gestreckt ist. Dagegen ist die Korngröße im Kern erheblich größer.

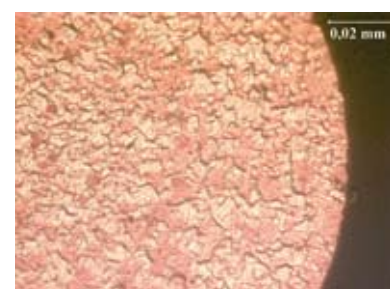
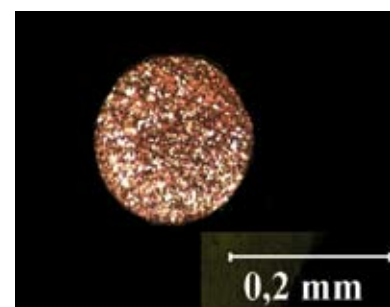


Bild 3: Querschliff eines Drahtes Ø 0,18 mm rekristallisierend geglüht

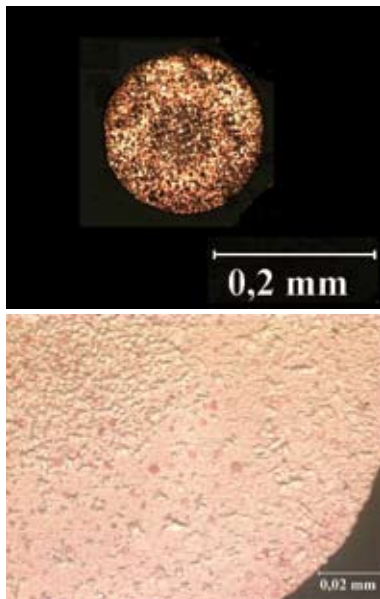


Bild 4: Querschliff eines Drahtes Ø 0,18 mm hart gezogen

Allerdings ist aus der Praxis bekannt, dass hartes Kupfer selbst bei Raumtemperatur über die Zeit an Festigkeit verliert. Deswegen ist das Risiko der Entfestigung während der Lagerung in einer Klimakammer bei 60 °C simuliert worden (Bild 5). Die Ergebnisse zeigen, dass die Praxiserfahrung zutrifft und nach ca. 6 Wochen die ziehharte Kupferlitze wieder nur noch die gleiche Festigkeit aufweist wie die gegläute. Das heißt, dass die Festigkeit nach dem Ziehprozess wegen der Transport- und Lagerzeit beim Kabelhersteller und Konfektionär bei Anlieferung an das Band des Automobilherstellers nicht mehr gewährleistet werden kann.

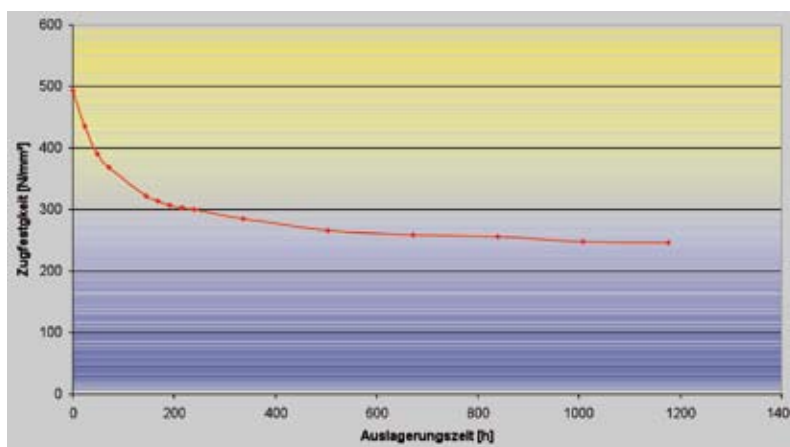


Bild 5: Entfestigung von Cu-ETP ziehhart über die Zeit bei einer Lagertemperatur von $\theta = 60\text{ °C}$

Kupferlegierungen

Um den Effekt der Entfestigung bei Raumtemperatur auszuschließen, sind Alternativen im Bereich der Kupferlegierungen untersucht worden:

- CuZn37 (CW508L [2]); weich,
- CuMg0,2 (CW127C [2]); ziehhart,
- CuSn0,15 (CW117C [2]); ziehhart.

Die erforderliche Reißlast bei dem weichen Messing (CuZn37) wird mit einem Querschnitt von $0,18\text{ mm}^2$ erreicht. Das heißt, es kann gegenüber dem bisher verwendeten Standard das Litzengewicht halbiert werden. Bei entsprechenden Tests wurde auch keine Spannungsrisskorrosion beobachtet. Die Paarung mit dem Crimp ist unbedenklich, weil auch die meisten Crimps aus Messing bestehen. Die Messingvariante hat alle relevanten Tests [3, 4] erfolgreich absolviert, ist prozesssicher bei der Crimpkontaktierung beherrschbar und seit mehr als zwölf Monaten problemlos in der realen Erprobung.

Litzen aus niedriglegierten Kupferlegierungen wie CuMg0,2 oder CuSn0,15 kombinieren im ziehharten Zustand die nötige thermische Stabilität mit einer Festigkeit von $R_m > 650\text{ N/mm}^2$. Das bedeutet, dass eine Litze von $0,14\text{ mm}^2$ für die geforderte Reißlast ausreicht und gleichzeitig sogar 65 % Materialgewicht gegenüber dem aktuellen Standard eingespart werden können. Erste Erfahrungen mit dem Crimpen von harten Kupferlegierungen liegen vor und sind vielversprechend. Inwieweit die harte Litze unter

Betriebsbedingungen relaxiert und es somit zu einem Ansteigen des Übergangswiderstandes am Crimpkontakt kommt, ist noch zu überprüfen. Entsprechende Untersuchungen laufen momentan.

Fertigungstechnisch ist all den beschriebenen Kupferlegierungen gemeinsam, dass der Fertigungsweg im Gegensatz zum Cu-ETP nicht über den effizienten Gießwalzdrahtweg geht, sondern über den aufwändigeren Up-cast-Prozess läuft. Außerdem führen auch geringere Ziehgeschwindigkeiten und kürzere Schlaglängen zu einem erheblich höheren Fertigungsaufwand.

Werkstoffverbunde

Mit kupferummanteltem Stahldraht [5] (Stacu) in hart gezogenem Zustand kann die geforderte Reißlast ebenfalls mit einer Litze $0,14\text{ mm}^2$ sehr gut eingehalten werden. Damit kann eine Gewichtsersparnis von 65 % erreicht werden.

Allerdings besteht die Gefahr, dass es bei der Kombination des unedlen Kernmaterials mit dem edleren Mantelwerkstoff unter feuchten Umgebungsbedingungen zur Korrosion kommt.

Biegewechselversuch

Neben der reinen Festigkeit ist bei vielen Anwendungen im Automobil auch die Biegewechselfestigkeit ein entscheidendes Kriterium. Signalleitungen sollen ja auch im Bereich der Tür- oder Heckklappenscharniere nicht brechen. Auch soll die Leitung den Vibrationen im Motorraum standhalten.

Um dieses Phänomen standardisiert zwischen den einzelnen Alternativen vergleichen zu können, wird die Biegewechselfestigkeit in einem Aufbau gem. ASTM B470 [6] simuliert.

Die Prüfvorrichtung [7] (Bild 6) wird eingesetzt, um zu ermitteln, wie viele Bewegungen eine Litze aushält, bis es zum Ausfall kommt. Dazu werden die Prüflinge in die Prüfvorrichtung eingespannt und in einem Winkel von ± 60 Grad fortlaufend hin- und hergebogen. Um definierte, mechanische Bedingungen zu erreichen, werden die Litzen über wechselbare Radien von



Bild 6: Testmaschine für die Feststellung der Biegewechselfestigkeit [7]

1 mm geführt. Die Biegegeschwindigkeit liegt bei 60 Zyklen pro Minute. Die ASTM-Norm [6] schreibt vor, die Litze mit einer Gewichtskraft zu beaufschlagen, die dimensionsabhängig ist. Bei den Tests zur Beurteilung der miniaturisierten Signalleitungen wird jedoch das Gewicht, mit dem die Litze während der Biegetest vertikal belastet ist, in Abweichung zur ASTM bei allen Querschnitten konstant gehalten. In der Realität bleiben die von außen einwirkenden Kräfte auch bei einer Querschnittverringering konstant. Dem wird in den Versuchen mit einer gleichbleibenden Prüfkraft von mit 2,6 N Rechnung getragen.

Für die hier gezeigten Untersuchungen ist das Versagenskriterium die Anzahl der Biegezyklen bis zum Reißen der Litzen.

Alle untersuchten Alternativen zeigen eine erheblich drei bis 28fach höhere Biegewechselfestigkeit als der bisher verwendete Standard aus Cu-ETP. Nur die Variante mit einer Querschnittsfläche von 0,22 mm² aus hartem Cu-ETP erreicht nur rund ein Viertel der Referenzwerte.

Zusammenfassung

Versuchsergebnisse

Es können Material- und Gewichtsreduktionen bei Signalleitungen gegenüber dem bisher verwendeten Standard auf Cu-ETP mit einem Querschnitt von 0,35 mm² über innovative Lösungsansätze ohne Abstriche an der Reißlast realisiert werden.

Die einfachste Lösung ist eine Litze aus ungeglühtem Cu-ETP mit einem Querschnitt von 0,22 mm². Die Gewichtseinsparung liegt bei 37 %. Der elektrische Widerstand liegt um 59 % höher. Die Biegewechselfestigkeit liegt nur bei etwa einem Viertel. Es tritt aber schon bei Lagertemperatur eine Entfestigung des Werkstoffs ein, so dass die geforderte Reißlast zwar direkt nach dem Ziehprozess erreicht wird, aber beim Einbau am Band des Fahrzeugherstellers und erst recht nicht während des Betriebs des Fahrzeuges gewährleistet werden kann.

Mit einer Messinglitze 0,18 mm² im weichgeglühten Zustand können Material und Gewicht um 55 % verringert werden. Der elektrische Widerstand steigt auf das Achtfache. Diese Alternative ist erfolgreich ohne technische Einschränkungen geprüft und im Probeinsatz.

Mit niedrigelegierten Kupferlegierungen im ziehharten Zustand reicht ein Querschnitt von 0,14 mm² aus. Damit können bis zu 65 % Gewicht und Material eingespart werden. Der elektrische Widerstand liegt um das Drei- bis Vierfache höher. Die Relaxationsbeständigkeit der Litze im Crimp während des Fahrzeugeinsatzes ist noch zu untersuchen, bevor eine abschließende Aussage getroffen werden kann.

Ebenso können die mechanischen Anforderungen erfolgreich mit einer Stacu-Litze 0,14 mm² bei 42 % Gewichtseinsparung erreicht werden. Der elektrische Widerstand ist bei dieser Alternative etwa um das Sechsfache höher. Allerdings ist das Risiko der Korrosion unter feuchten Umgebungsbedingungen noch nicht abschließend bewertet.

Die hier dargestellten Alternativen zeigen, dass es von Interesse ist, andere Werkstoffe und Werkstoffzustände zu untersuchen, um bei kalkulierbarem Risiko Gewichts- und Materialeinsparungen realisieren zu können. Die hier dargestellten Varianten zeigen dieses Potenzial auf, stellen aber sicherlich nicht einen Absolutheitsanspruch. Vielmehr zeigen sie die Notwendigkeit nach weiteren Untersuchungen, um die optimale Lösung für Leiterwerkstoffe von Signalleitungen im Automobil zu finden.

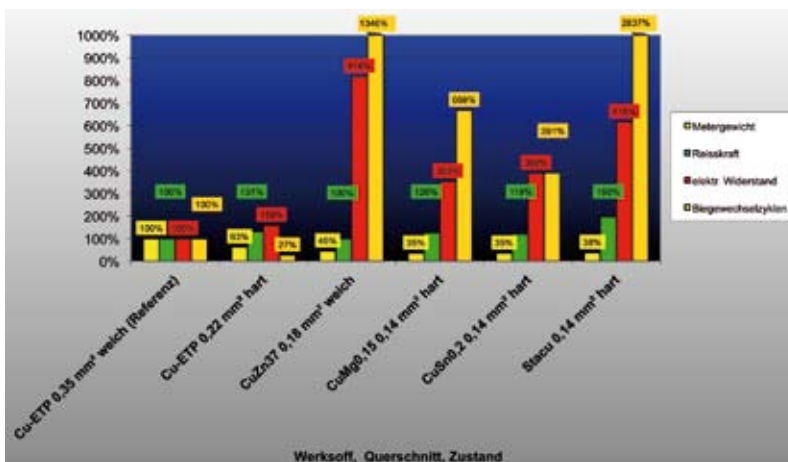


Bild 7: Testergebnisse der mechanischen und elektrischen Eigenschaften verschiedener Alternativen für Signalleitungen

Kostenmäßige Einschätzung

Es besteht eine Vielzahl an Alternativen zu Kupfer auf dem Markt. Die existierenden Spezifikationen sind auf das bisher verwendete Standardleitermaterial CU-ETP (weich) zugeschnitten. Der Einsatz von Alternativen bedingt unwillkürlich Anpassungen der existierenden Spezifikationen aufgrund der unterschiedlichen Eigenschaften der alternativen Leitermaterialien gegenüber Standardkupfer. Die Auswahl kann nicht alleine nach technischen,

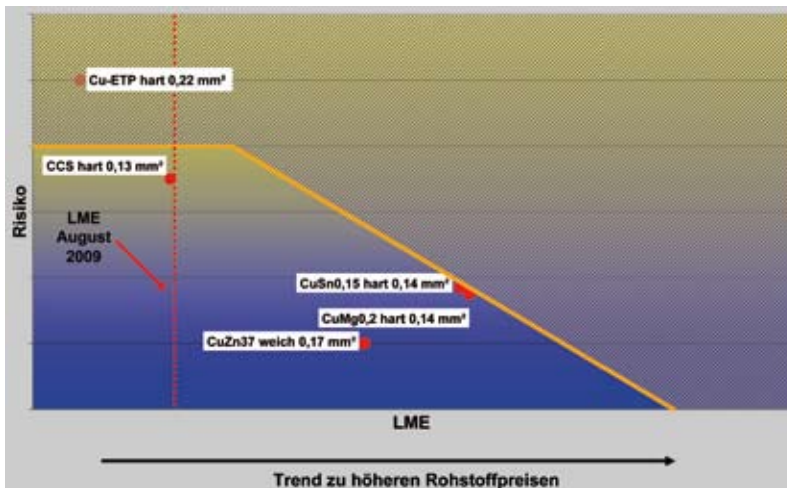


Bild 8: Break-Even-point der verschiedenen Alternativen in Abhängigkeit vom Kupferpreis und deren Risiken bei der Realisierung

ohne Betrachtung der wirtschaftlichen Aspekte wie auch umgekehrt erfolgen. Die technischen und die teils volatilen kommerziellen Vorteile müssen im Einzelfall geprüft und gegeneinander abgewogen werden. Eine Querschnittsreduktion bedeutet nicht automatisch Kostenreduktion. Die Kostenbestandteile einer Litze sind Metall, Drahtzug und Verlitzkosten. Alternative Werkstoffe / Legierungen werden auf anderer Metallbasis als Kupfer gehandelt (bis zu ca. 20 % höher als DEL) und sind bis auf Messing und Aluminium meist teurer als Kupfer. Der Drahtzug von harten Materialien bedingt einen höheren Verschleiß von Ziehsteinen, gegebenenfalls mehr Ziehstufen und geringe Ziehgeschwindigkeit. Je kleiner der Querschnitt ist, desto kleiner ist auch der Einzeldrahtdurchmesser, was zu höheren Ziehkosten führt. Zudem ist bei kleineren Querschnitten die Schlaglänge geringer. d.h. bei gleicher Verlitzgeschwindigkeit wird weniger Litze pro Zeiteinheit hergestellt. Grundsätzliches zu höherfesten Legierungen:

- Die Kosten für Drahtzug und Verlitzen (auch Umarbeitskosten genannt) steigen mit höherfesten Materialien, sowie bei extrem kleinen Querschnitten.
- Die Rohstoffkosten liegen bei höherfesten Legierungen in der Regel über Kupfer.
- Die höheren Kosten für Umarbeit und den Rohstoff selbst, müssen durch Reduktion der Einsatzmenge

pro Kabelkilometer (Querschnittsreduktion), welche wiederum zu erhöhten Umarbeitskosten führt, aufgefangen werden.

- Die Gesamtkosten hängen stark vom schwankenden Rohstoffpreisniveau insgesamt wie auch dem volatilen Unterschied des alternativen Materials zum Kupfer selbst ab.
- Grundsätzlich kann gesagt werden, je geringer das Rohstoffpreisniveau ist, desto weniger ökonomisch attraktiv sind alternative Werkstoffe.

Fazit:

- Eine vom Rohstoffpreisniveau unabhängige kostengünstigere Alternative mit höherfesten Legierungen oder Verbundwerkstoffen gegenüber Kupfer ist nicht bei verfügbar.

Zu jedem alternativen Leitermaterial gibt es einen zum Kupferpreis gerechneten Break Even Point, ab dem sich das alternative Leitermaterial kommerziell gegenüber Kupfer rechnet. Möchte man eine Lösung, die vom Rohstoffpreisniveau gegenüber Kupfer unabhängig ist (quasi keinen Break Even Point zu Kupfer besitzt), so muss man beim Kupfer selbst bleiben. Cu-hart ist kostentechnisch attraktiv, aber in seinen mechanischen Eigenschaften thermisch nicht stabil. CuZn37 ist technisch erprobt, aber bei dem aktuellen Rohstoffpreisniveau kommerziell gegenüber einer Cu-Leitung uninteressant. Gleiches gilt für die beiden niedrig legierten Kupferlegierungen CuSn0,15 und CuMg0,2. Ein etwas differenzierteres Bild zeigt sich

bei der Betrachtung der Stacu-Leitung. Diese zeigt sich bereits bei aktuellem Rohstoffpreisniveau kommerziell mit Kupfer vergleichbar und steht in fortgeschrittener technischer Erprobung. Ein markteinheitliches Vorgehen gibt es zu den beschriebenen, wie zu anderen alternativen Werkstoffen auch, derzeit noch nicht. Alle haben ihre Stärken und Schwächen. Das Pendel ist noch nicht endgültig zugunsten des einen oder anderen Materials ausgeschlagen. Kleine Veränderungen in den technischen Eigenschaften, oder prozessbedingte Kostenreduktionen können das technisch-kommerzielle Gesamtpaket eindeutig zu Gunsten eines Materials verändern, was in Anbetracht der aktuellen Dynamik in diesem Thema und unter Berücksichtigung, dass bislang keines der Materialien in einem Volumenmodell in großem Umfang Verwendung findet, von großem Vorteil zugunsten des Materials, welches als erstes in größeren Mengen eingesetzt wird, sein wird.

Literatur

- [1] Hensel, A.; Spittel, T.: Kraft- und Arbeitsbedarf bildsamer Formgebungsverfahren, VEB Verlag für Grundstoffindustrie; 1978; Leipzig
- [2] DIN CEN/TS 13388:2008-08 „Kupfer und Kupferlegierungen: Übersicht über Zusammensetzungen und Produkte; Beuth-Verlag, Berlin; 2008
- [3] LV 112: 2006-11: Elektrische Leitungen für Kraftfahrzeuge einadrig, ungeschirmt, Arbeitskreis „Prüfrichtlinie für Kfz-Steckverbinder“; 2006
- [4] Slow-Motion-Test für Kfz-Kontaktierungen: 2007-06, Arbeitskreis „Prüfrichtlinie für Kfz-Steckverbinder“; 2007
- [5] DIN 48203-7:1984-03: „Drähte und Seile für Leitungen aus Stahlkupfer (Staku)“ Beuth-Verlag, Berlin; 1984
- [6] N.N.: ASTM B 470: Standard Specification for Bonded Copper Conductors for Use in Hookup Wires for Electronic Equipment, ASTM International, 2002; West Conshohocken, PA (USA)
- [7] Biegewechselsmaschine: Lebensdauerprüfung von Litzen, Fa. GTS Test Solutions; Berlin; 2007, http://www.gts-online.net/pdf/Prospekt_Biegewechselsmaschine.pdf?lang=de&lang=de&lang=de&lang=de

- (1) Dr. Markus Schill, LEONI Kabel GmbH, Roth
- (2) Dr. Wolfgang Steuff, LEONI Draht GmbH, Weissenburg