

Kupfer im Automobil – Potentiale bis 2020

Ladewig, B. (1)

Kupferwerkstoffe sind für viele Anwendungen im Automobil der Werkstoff erster Wahl. Insgesamt summiert sich die derzeit eingesetzte Kupfermasse im PKW auf durchschnittlich ca. 25 kg. Wie wird sich aber der Kupfereinsatz im Automobil zukünftig entwickeln?

Kupferwerkstoffe sind durch eine Vielzahl von Legierungselementen in ihren Eigenschaftsbandbreiten stark variierbar. Daher finden sie im Automobil in den verschiedensten Anwendungsgebieten Einsatz. So werden sie nicht nur aufgrund ihrer häufig guten elektrischen Leitfähigkeit eingesetzt, sondern auch aufgrund ihrer mechanischen Eigenschaften, z.B. als Messing in Synchronringen von Schaltgetrieben oder als Bronze in Gleitlagern. Der größte Anteil der heutzutage im Automobil verwendeten Kupfermasse wird im Antriebsstrang sowie seinen elektrischen Nebenaggregaten wie dem Generator und dem Anlasser, im Kabelbaum und im Karosseriebau eingesetzt. Die größten Veränderungen in der eingesetzten Kupfermasse werden in den nächsten Jahren im Antriebsstrang und seinen elektrischen Nebenaggregaten sowie im Kabelbaum zu beobachten sein.

Kupfereinsatz im Automobil – Kabelbaum

Der Kabelbaum besteht aus einer hohen Anzahl von Leitungen zur Signal- und Stromübertragung, deren Leiterwerkstoff derzeit primär Kupfer ist. Typische Leitungen zur Signalübertragung besitzen einen Nennquerschnitt von 0,35 bis 0,5 mm². Bei Leitungen zur Stromübertragung muss man zwischen Standardleitungen zur Übertragung von relativ geringen Strömen mit einem Nennquerschnitt von 0,5 bis 6 mm² und Batterieleitungen mit einem Nennquerschnitt von 6 bis 160 mm² differenziert werden. Die Leitungen eines Kabelbaums

summieren sich je nach Fahrzeugklasse auf eine Länge von rund 800 bis zu 3.000 Metern. Die Länge hängt von den eingesetzten Elektronik-

umfängen ab, die in der Regel mit der Fahrzeugklasse korrespondieren. Die Erfahrungen der letzten Jahre haben gezeigt, dass technologische Neuerungen zunächst in den höheren Fahrzeugklassen eingeführt wurden und anschließend sukzessive auch in den unteren Fahrzeugklassen Einzug hielten. Unter diesem Aspekt ist mit einer Annäherung der Kabellängen der unteren Fahrzeugklassen an die oberen Fahrzeugklassen und damit auch einer Zunahme der eingesetzten Kupfermasse zu rechnen.

Allerdings gibt es Bestrebungen, Kupfer als Leiterwerkstoff durch andere Werkstoffe zu ersetzen. Die wichtigsten Treiber für diese Bestrebungen sind eine Gewichts-, Bauraum- und ganz besonders eine Kostenreduzierung. Insbesondere bezüglich des Kostenaspekts hat sich Kupfer in den letzten Jahren mit einer Preissteigerung von über 250 % negativ entwickelt. Die Anforderungen an den Leiterwerkstoff in Signal- und Stromleitungen sind gleich, allerdings mit unterschiedlichen Priorisierungen. Das ideale Leitermaterial hätte bei gleicher Leitfähigkeit sowie Bruchdehnung wie Kupfer eine höhere Zugfestigkeit, um eine Querschnittsreduktion für Signalleitungen zu erzielen. Zusätzlich sollte der Werkstoff eine geringere Dichte besitzen, günstiger sein und bei anderen Eigenschaften wie Flexibilität und Verarbeitbarkeit auf einem vergleichbaren Niveau wie Kupfer liegen. Solch ein Wunschwerkstoff existiert derzeit nicht. Es sind allerdings Werkstoffe verfügbar, die Kupfer in einzelnen Aspekten übertreffen, ohne in anderen Bereichen wesentlich schlechter zu sein.

So ist für Stromkabel besonders eine hohe Leitfähigkeit bei geringem Gewicht und niedrigen Materialkosten gefordert. Gleichzeitig besitzen die Materialeigenschaften Zugfestigkeit, Flexibilität und Bruchdehnung wegen der großen Leiterquerschnitte eine geringere Relevanz. Diese Eigenschaften erfüllt Aluminium aufgrund des aktuell ca. 2,5-fach niedrigeren Preises gegenüber Kupfer und einem 50 % geringeren Gewicht bei gleicher elektrischer Leitfähigkeit am besten. Nachteilig für den Werkstoff Aluminium als Leitermaterial ist seine geringere Flexibilität gegenüber Kupfer und der erhöhte Bauraumbedarf von ca. 60 %. Der Kostenvorteil, den der Werkstoff Aluminium bietet, wird teilweise durch aufwendigere Verbindungstechnologien reduziert. Da die Vorteile der Kosten- und Gewichtsreduktion in stärkerem Fokus stehen, existiert für Kupfer in Stromleitungen zunehmend eine hohe Substitutionsgefahr durch Aluminium.

Bei Signalleitungen wird das Ziel der Gewichts-, Bauraum- und Kostenreduktion über eine Reduzierung des Leiterquerschnittes verfolgt. Diese Herangehensweise ist möglich, da bei Signalleitungen, im Gegensatz zu Stromleitern, die Leitfähigkeit eine untergeordnete Rolle spielt. Eine Reduzierung des Querschnittes von Kupferkabeln ist aufgrund der geringen Zugfestigkeit des Werkstoffes mit heutigen Produktionsverfahren kaum möglich. Ziel ist es, einen Werkstoff zu wählen, der bei einer höheren Zugfestigkeit und günstigerem Preis als Kupfer auch die anderen Anforderungen wie Flexibilität und Verarbeitbarkeit an einen Leiter erfüllt.

Als beste Alternative hat sich neben niedrig legiertem Kupfer Messing erwiesen, die eine Legierung aus Kupfer und Zink darstellt. Der Preis von Zink beträgt ca. 1/4 desjenigen von Kupfer und die Dichte ist mit 7,14 g/cm³ gegenüber 8,93 g/cm³ bei Kupfer

geringer. Somit ist eine volumetrisch identische Messinglitze gegenüber einer Kupferlitze leichter und auch günstiger. Gleichzeitig besitzt Messing eine höhere Zugfestigkeit, so dass sich Leiter mit einem kleineren Querschnitt von 0,22 mm² produzieren lassen. Dies führt zu einer weiteren Gewichts- und Kostenreduzierung sowie zusätzlich zu einer Bauraumreduzierung. Das Gewicht einer Messingleitung zur Signalübertragung mit einem Nennquerschnitt von 0,22 mm² reduziert sich um ca. 40 % gegenüber einer gleichwertigen Kupferleitung mit einem Nennquerschnitt von 0,35 mm². Die Rohstoffkosten können sogar um ca. 50 % gesenkt werden.

Neben der Wahl eines alternativen Leiterwerkstoffes könnte sich die eingesetzte Kupfermasse im Kabelbaum auch durch technologische Neuerungen reduzieren. Hier seien als Beispiele eine höhere Bordnetzspannung und die Signalübertragung über Stromkabel genannt.

In dem Umfang, in dem die Bordnetzspannung steigt, sinkt der benötigte Leiterquerschnitt eines Stromkabels. So würde beispielsweise eine Verdopplung der Bordnetzspannung eine Halbierung des Leiterquerschnittes zulassen. In den letzten zehn Jahren wurde das Ziel eines 42 V-Bordnetzes verfolgt. Die daraus resultierende Verringerung der Kabelquerschnitte würde die eingesetzte Kupfermasse im Kabelbaum deutlich reduzieren. In nächster Zukunft ist jedoch kein Trend hin zur Abschaffung des 14 V-Bordnetzes zu erkennen. Hybrid- und Elektrofahrzeuge nutzen allerdings bereits heutzutage Spannungen von bis zu 650 V zur Versorgung der elektrischen Antriebe mit Strom. Aufgrund der hohen zu übertragenen Leistungen ergeben sich aber trotz der hohen Spannung Kabel mit einem großen Querschnitt. Diese sind derzeit aus Kupfer gefertigt, allerdings könnte als Leiterwerkstoff zur Versorgung eines zentralen Elektromotors auch Aluminium verwendet werden. Die Verfügbarkeit eines Hochvoltbordnetzes in einem Automobil wird teilweise dazu führen, dass einzelne Hochlastverbraucher, die bisher über das 14 V-Bordnetz betrieben wurden,

zukünftig über das Hochvoltbordnetz betrieben werden. Dadurch verringern sich die Kabelquerschnitte zur Anbindung dieser Verbraucher.

Die Übertragung von Daten über stromführende Leitungen würde die gesamte Kabellänge im Automobil drastisch reduzieren, da der Bedarf für Kabel zur Signalübertragung stark zurückgehen würde. Dieser Ansatz wird vom DC-Bus Konsortium, bestehend aus mehreren OEM und Automobilzulieferern, verfolgt. Die größte Hürde zur Einführung dieser Technologie ist die verlustfreie Datenübertragung. Datenverluste können zu Stande kommen, da die Stromkabel in der Regel anfälliger für Störungen sind und der Strom verprascht ist.

Kupfereinsatz im Automobil – Nebenaggregate des Antriebsstrangs

Neben der Bereitstellung des Drehmoments zum Antrieb treibt der Verbrennungsmotor mechanisch weitere Aggregate an. Dies sind üblicherweise der Generator zur Erzeugung von Strom, die Wasser- und Ölpumpe, teilweise noch die Hydraulikpumpe zur Lenkkraftunterstützung sowie bei klimatisierten Fahrzeugen der Klimakompressor. Der Antrieb der Nebenaggregate benötigt Energie und erhöht somit den Verbrauch des Verbrennungsmotors. Da die Nebenaggregate nicht kontinuierlich drehzahlabhängig angetrieben werden müssen, kann man durch eine bedarfsgerechte Regelung den Verbrauch des Verbrennungsmotors spürbar senken.

Lässt man eine Schwankung der Batteriespannung innerhalb gewisser Grenzen zu, kann mit einer intelligenten Regelung des Generators Energie eingespart werden. Ziel ist es, im Schubbetrieb und bei Bremsvorgängen maximalen Strom zu erzeugen, und bei Beschleunigungsvorgängen den Generator entsprechend mit weniger Last zu betreiben. Diese Technologie wird beispielsweise bei BMW als Teil des EfficientDynamics Konzeptes bereits eingesetzt und erfordert einen etwas leistungsfähigeren Generator mit einer höheren Kupfermasse als konventionelle Generatoren.

Zur bedarfsgerechten Regelung der anderen Nebenaggregate eignet sich der elektrische Antrieb. Eine elektrische Lenkkraftunterstützung ist bereits in der PKW Kompakt- und Mittelklasse zu finden und ersetzt zunehmend die mechanisch angetriebene hydraulische Servolenkung. Dies führt zu einer Kraftstoffersparnis von ca. 0,2 l/100km. Aktuelle Bestrebungen gehen dahin, auch die Wasser- und Ölpumpe elektrisch anzutreiben. Eine elektrische Wasserpumpe kommt heutzutage bereits in einzelnen Fahrzeugen zum Einsatz und hat sich bewährt. Durch diese Technologie lässt sich der Kraftstoffverbrauch um ca. 0,15 l/100km senken. Diese Ersparnis wird teilweise durch eine verkürzte Warmlaufphase des Verbrennungsmotors erreicht. Die elektrische Ölpumpe ist bisher nicht im Massenmarkt vertreten, da ein Ausfall der Ölpumpe bei laufendem Motor zwangsläufig zu einem Motorschaden führt. In solch kritischen Anwendungen setzen sich neue Technologien schwer durch. Außerdem besteht die Möglichkeit, eine volumenstromgeregelte Ölpumpe einzusetzen, welche ähnliche Verbrauchsvorteile wie eine elektrische Ölpumpe ermöglicht. Ein elektrisch angetriebener Klimakompressor ist insbesondere für Vollhybridfahrzeuge notwendig, um den Fahrgastraum auch beim rein elektrischen Betrieb klimatisieren zu können.

Der Einsatz von Elektromotoren zum Antrieb der Nebenaggregate wird sich zukünftig immer stärker durchsetzen. Ziel ist es dabei, den Kraftstoffverbrauch zu senken. Durch diese Entwicklung wird der Kupfereinsatz im Automobil zunehmen.

Kupfereinsatz im Automobil – Elektrifizierung des Antriebsstrangs

Individuelle Mobilität durch die Verbrennung fossiler Brennstoffe belastet einerseits die Umwelt und andererseits das Portemonnaie der mobilen Gesellschaft. Die Elektrifizierung des Antriebsstrangs durch Hybridantriebe reduziert den Verbrauch und damit auch die Emissionen sowie

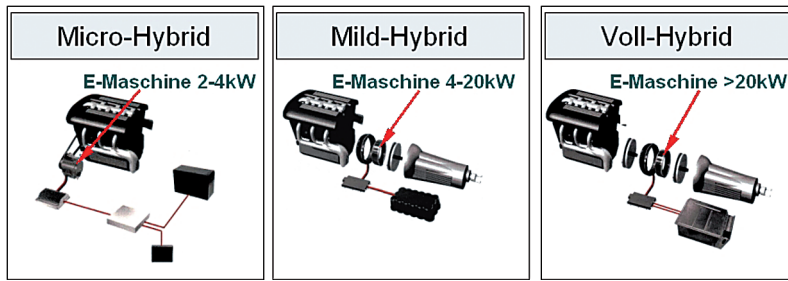


Bild 1: Micro-, Mild- und Voll-Hybrid

die Betriebskosten eines Automobils. Im Gegenzug steigen die Investitionskosten für das Fahrzeug. Die meisten Kunden werden die höheren Investitionskosten nur in Kauf nehmen, wenn sie diese Kosten innerhalb eines bestimmten Zeitraumes wieder einsparen. Somit sind die Marktchancen für ein Hybridfahrzeug um so besser, je höher die Treibstoffkosten sind. Teilweise fördern Staaten den Kauf von Hybridfahrzeugen aus ökologischen Gründen, z.B. durch Steuervergünstigungen, die Befreiung von einer Maut oder durch die Bereitstellung spezieller Fahrspuren in von Stau geplagten Regionen. Die aktuelle Konstellation aus hohen Treibstoffkosten und der politischen Diskussion zur Reduzierung des klimaschädlichen CO₂-Ausstoßes bilden sehr gute Rahmenbedingungen zur Einführung von Hybridfahrzeugen im breiten Massenmarkt.

Es sind drei wesentliche Hybridantriebsarten zu unterscheiden, der Micro-, Mild- und Voll-Hybrid. Diese unterscheiden sich aus Kundensicht in den gebotenen Funktionalitäten, aus Sicht der Kupferindustrie in verschiedenen leistungsstarken Elektromotoren und damit auch in der eingesetzten Kupfermasse. In Bild 1 sind diese drei Hybridvarianten dargestellt.

Der Micro-Hybrid zeichnet sich durch ein Start-Stop-System des Verbrennungsmotors und einen optimierten Generatorbetrieb mit einer intelligenten Bordnetzregelung aus. Diese Funktionalität wird entweder über einen separaten Anlasser und Generator oder einen einzelnen Elektromotor als Starter-Generator System realisiert. Beide Varianten besitzen eine elektrische Gesamtleistung von 2 - 4 kW, welche geringfügig über der

eines konventionellen Systems liegt. Daher ergibt sich durch einen Micro-Hybrid keine signifikante Änderung der eingesetzten Kupfermasse. Das System erzielt Verbrauchsreduzierungen von bis zu 8 % bei geringen Mehrkosten.

Im Mild-Hybrid wird ein Elektromotor mit 4 - 20 kW eingesetzt, der in der Regel direkt auf der Kurbelwelle sitzt. Neben den Funktionalitäten eines Micro-Hybrids unterstützt der Elektromotor den Verbrennungsmotor beim Beschleunigen und kann durch einen Generatorbetrieb des Elektromotors Bremsenergie zurückgewinnen. Durch den Mild-Hybrid lassen sich Verbrauchsreduzierungen von bis zu 25 % bei Zusatzkosten von ca. 2.000 EUR erreichen. Im Elektromotor eines Mild-Hybrids finden je nach Ausführung 0,5 - 2,0 kg Kupfer Einsatz.

Im Voll-Hybrid werden ein oder je nach Ausführung auch zwei Elektromotoren mit je über 20 kW eingesetzt. Neben den Funktionalitäten eines Mild-Hybrids erlaubt ein Voll-Hybrid das rein elektrische Fahren über eine kurze Distanz. Zudem stellt er eine höhere Leistung zum Beschleunigen und Rekuperieren zur Verfügung. Ein Voll-Hybrid reduziert den Verbrauch eines Fahrzeugs um bis zu 40 % bei einem Mehrpreis von ca. 4.000 EUR. In jedem Elektromotor eines Voll-Hybrids finden mehr als 2 kg Kupfer Einsatz. In einem Elektromotor der Siemens AG mit einer kontinuierlichen Leistung von 67 kW (ELFA Drive PV5135) werden beispielsweise 7,2 kg Kupfer verwendet.

Die fossilen Brennstoffe sind endlich und verteuern sich mit zunehmender Knappheit. Elektrofahrzeuge werden derzeit als Ausweg aus der Abhängig-

keit von fossilen Brennstoffen gesehen. Eine elektrische Energiequelle, z.B. eine Batterie oder eine Brennstoffzelle, versorgt hierbei einen oder mehrere Elektromotoren mit Strom zum Antrieb eines Fahrzeugs. Die Einführung von Elektrofahrzeugen wird sich nicht nur auf den Antriebsstrang auswirken, sondern auf das gesamte Fahrzeugkonzept. Es werden komplett neue Systemarchitekturen entstehen, und durch die neuen Freiheitsgrade im Package wird sich das Fahrzeug im Gegensatz zu heute auch optisch verändern. Bereits heute sind Elektrofahrzeuge in Kleinserien am Markt verfügbar. Hierbei handelt es sich in der Regel auf der einen Seite um Stadtfahrzeuge und auf der anderen Seite um Sportfahrzeuge. Die verbauten elektrischen Leistungen reichen von ca. 5 kW bis zu 600 kW. Mit der Leistung steigt entsprechend die eingesetzte Kupfermasse, allerdings entfallen durch Elektrofahrzeuge auch Kupfermassen wie Synchronringe oder Schaltgabeln aus Messing im manuellen Schaltgetriebe, Kupfer als Legierungselement im Motorblock oder auch der Anlasser. Die größten Vorteile eines Elektrofahrzeugs sind der emissionsfreie Betrieb und die geringen Betriebskosten. Die Nachteile sind der hohe Kaufpreis, die kurze Reichweite verbunden mit einem langen Ladezyklus sowie die derzeit noch unausgereifte und teure Batterietechnologie, die in den meisten Fällen einen Austausch der Batterie während eines Autolebens erfordert. Weltweit wird momentan die Weiterentwicklung der Batterietechnologie stark forciert, so dass ein Durchbruch auf diesem Gebiet zu erwarten ist. Zusätzlich gibt es mehrere Infrastrukturprojekte zum Aufbau von öffentlich zugänglichen Ladestationen für Elektrofahrzeuge. Hier sticht besonders das Projekt „Better Place“ hervor. Bis Ende 2011 soll durch dieses Projekt in Israel eine Infrastruktur mit mehr als 500.000 Ladestationen und 100 Batteriewechselstationen aufgebaut werden.

Zusätzlich zu dem Kupfer im Elektromotor, nimmt die Kupfermasse in einem Hybrid- bzw. Elektrofahrzeug auch noch durch Kupfer in der Leis-

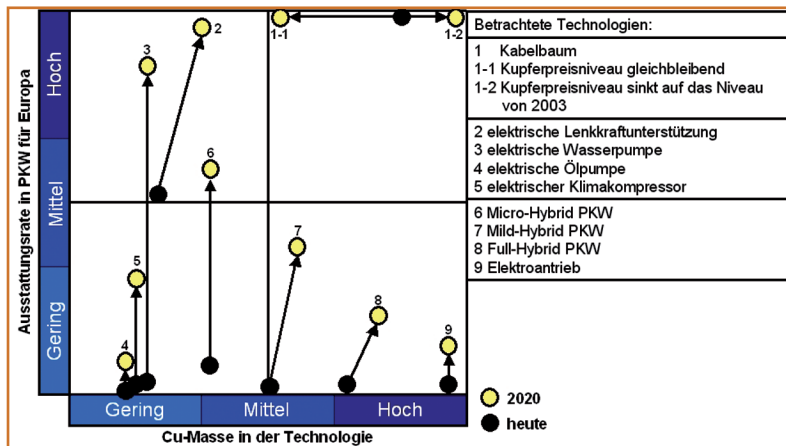


Bild 2: Konsequenzen technologischer Entwicklungen auf den Kupfer-einsatz im PKW 2020

tungselektronik und durch die Verkabelung zwischen der elektrischen Energiequelle und dem Elektromotor zu. Allerdings besteht hier die Möglichkeit des Einsatzes von Aluminiumkabeln. Eine Ausnahme bildet der Radnabenmotor. Da er sich innerhalb der Felge befindet und mit dem Rad bewegt, wird ein möglichst flexibles Stromkabel benötigt. Die Anforderungen an ein Stromkabel in Verbindung mit einer hohen Flexibilität erfüllt derzeit Kupfer am besten.

Zusammenfassung

Die Kupfermasse im Automobil wird zukünftig zunehmen. Bild 2 zeigt für die betrachteten Technologien die Ausstattungsdaten für PKW in Europa sowie die eingesetzte Kupfermasse für die Gegenwart und prognostiziert für 2020. Mit Ausnahme des Kabelbaums wird die Kupfermasse in jeder Technologie gleich bleiben oder zunehmen. Die Ausstattungsdaten der Technologien werden stark zunehmen.

Der stärkste Treiber wird die Elektrifizierung des Antriebsstrangs und seiner Nebenaggregate sein, um die CO₂-Emissionen und die Betriebskosten eines PKWs zu senken. Nach Berechnungen der Siemens AG wird die durchschnittliche Kupfermasse im PKW in Europa bei einem 30-%igen Marktanteil von Hybrid- und Elektrofahrzeugen um ca. 20 % zunehmen. Prognosen gehen von einer weltweit deutlichen Zunahme von Hybrid- und Elektrofahrzeugen aus. Nach einer Prognose des Center Automotive Research werden 2025 in Europa fast ausschließlich Hybrid- und Elektrofahrzeuge verkauft werden.

Der Einsatz von Kupfer im Kabelbaum hängt stark von der Kupferpreisentwicklung ab. Sollte das Preisniveau nicht deutlich sinken, wird Kupfer als Leiterwerkstoff im Kabelbaum teilweise substituiert werden und die hierfür verwendete Kupfermasse trotz einer Zunahme der eingesetzten Kabellänge abnehmen.

(1) *Dipl.-Ing. Björn Ladewig, Strategie- und Prozessentwicklung der Forschungsgesellschaft Kraftfahrwesen mbH Aachen*

Kazakhmys: Strong demand from Chinese customers

LONDON. 28 Aug. 2008 - Kazakhmys announced a copper cathode production from own material of 157 kt in H1/2008. This is a decline of 4% on the same period last year. The production has recovered after the severe weather in Q1 2008. Oleg Novachuk, Chief Executive of Kazakhmys PLC, said: "Copper production has shown a steady improvement over the first half of the year and we continue to anticipate that production of copper from own material for 2008 will be at least in line with last year." Copper in own concentrate production decreased in H1 2008 compared to H1 2007 largely reflecting the lower ore volumes. Copper concentrate and by-product output were also impacted by ore stockpiles remaining high as some polymetallic ore from the Akbastau and Abyz mines was not processed in the period, whilst improvements were

being carried out at the Karagaily concentrator to raise by-product recovery rates. Both the Zhezkazgan and Balkhash smelters were shutdown for furnace maintenance during H1/2008. Copper rod production was higher in H1/2008, reflecting strong demand from Chinese customers. Zinc in concentrate production declined in H1/2008 compared to H1/2007 largely due to lower ore output from key East and Karaganda mines and zinc grades falling from 3.69% to 3.32%. Silver production in H1/2008 was below H1/2007 largely due to the lower output of ore at the South and Kosmurun mines, only partially offset by the new Akbastau and Abyz mines. The average gold content in ore was higher by 0.17 g/t in H1 2008 at

0.94 g/t, helped by gold-rich ore from the Abyz mine. Work is being undertaken at the Karagaily concentrator to maximise the recovery of gold from Abyz ore which has led to ore from the mine being stockpiled, increasing work in progress and reducing gold production despite the increased gold grade in ore.



Mining operation in the Zhezkazgan region (photo: Kazakhmys)