

MIT DÜNNEN DRÄHTEN ZUM SCHNELLEN ZUG KOMMEN

Ein Forschungsprojekt im Werkstoffentwicklungs- und Prüflabor

>> von Norbert Jost, Simon Kött, Dorothea Nobiling, Andreas Zilly > *Oft sind es scheinbar ganz alltägliche Werkstoffe in alltäglichen Anwendungen, die für den technischen Fortschritt ganz unbemerkt Höchstleistungen vollbringen müssen. So auch Kupfer, welches schon sehr alt, aber immer noch hochaktuell ist.*

Einführung

Kupfer hat eine lange Geschichte: Es ist das erste Gebrauchsmetall des Menschen. Da es in manchen Gegenden in der Natur in metallischer reiner Form vorkommt, konnte es schon vor über 10.000 Jahren durch bloßes Hämmern bearbeitet werden. Da es lange Zeit das für den Menschen einzig nutzbare Metall blieb, wurde sogar eine ganze Epoche, nämlich die Bronzezeit, nach einer Kupferbasis-Legierung benannt. Das Anwendungsspektrum von Kupfer ist sehr breit, und es kommen sowohl reines Kupfer als auch eine Vielzahl von Kupferlegierungen zum Einsatz. In der Industrie werden Kupferwerkstoffe schon sehr lange verwendet. Das Hauptanwendungsgebiet ist der Elektrosektor, in dem vor allem Kupfer in niedrig legierter Form zu Kabeln, Seilen, Drähten, Schienen und Bändern sowie zu einer Vielzahl von Elektrobauteilen verarbeitet wird. Seine herausragend gute Leitfähigkeit für Wärme und elektrischen Strom wird nur von Silber übertroffen.

In jüngster Zeit hat die fortschreitende Industrialisierung, vor allem im asiatischen Raum und dort insbesondere in China, zu einer stark wachsenden Nachfrage nach Kupfer geführt. So ist der weltweite Kupferbedarf in den letzten 30 Jahren von 7,8 Mio. Tonnen pro Jahr auf über 18 Mio. Tonnen (2006) gestiegen. Die Wirtschaftskrise bewirkte zwar kurzzeitig einen etwas rückläufigen Verbrauch des „roten Goldes“, jedoch ist ein Ende dieser großen Nachfrage mit einer zunehmenden Verknappung der Ressourcen und der daraus resultierenden steigenden Preise in absehbarer Zeit nicht zu erwarten. Derzeit wird bis zum Jahr 2025 ein Kupferverbrauch von jährlich 28,5 Mio. Tonnen prognostiziert, wovon alleine 40% auf China entfallen sollen.¹ Der wachsende Bedarf dürfte zudem einen Kupferabbau in Deutschland in absehbarer Zeit wieder rentabel machen. Derzeit befindet sich im Gebiet der Oberlausitz das größte Kupfererzvorkommen Europas.

Ein großer Vorteil bei der Gewinnung und Verarbeitung von Kupfer ist seine Recyclingfähigkeit von nahezu 100%. Gegenwärtig wird ein Drittel des Kupferbedarfs durch Wiederverwertung gedeckt. Durch die hohe Lebensdauer der Produkte aus Kupfer (vor allem im Bausektor) beträgt die mittlere Rücklaufzeit annähernd 50 Jahre. Da derzeit weltweit sehr viele Städte, Industrieanlagen und Verkehrswege entweder neu gebaut oder modernisiert werden, besteht ein sehr hoher Bedarf an neuem Material, welches erst in vielen Jahren wieder als Schrott zur Verfügung stehen wird. Darum ist ein optimaler Materialeinsatz mehr denn je zu einem entscheidenden Wettbewerbsvorteil geworden.

Verwendung als Bahnleitmaterial

Ein konkreter und technisch sehr anspruchsvoller Anwendungsfall von Kupferlegierungen ist die Verwendung als Leitmaterial für die Oberleitungen elektrischer Bahnen. Da Kupfer aufgrund von Oxidationsvorgängen relativ schnell seine typische goldene Färbung verliert, sobald es den Witterungseinflüssen ausgesetzt ist, sind die Oberleitungsbauteile zunächst für den Laien nicht auf den ersten Blick als Kupferwerkstoffe erkennbar. Bereits 1890 wurden Oberleitungen aus Kupfer eingesetzt, nachdem die elektrische Eisenbahn von Werner von Siemens entwickelt worden war. Bei den Fahrleitungen handelt es sich um hochkomplexe Systeme aus mehreren stromführenden Komponenten, von denen die einen hauptsächlich statisch beansprucht werden und andere wiederum hochdynamischen Belastungen ausgesetzt sind. Die Leistungsübertragung von dem Oberleitungssystem auf die Triebfahrzeuge soll störungsfrei unter ständigem elektrischen und mechanischen Kontakt erfolgen. In der Praxis wird dies dadurch realisiert, dass der Stromabnehmer gegen den Fahrdraht gepresst wird. Dieser Anhub führt während der Fahrt zu einer Entstehung von Impulsen, die sich in Form von Wellen längs der Oberleitung ausbreiten. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit dieser Wellen resultiert aus der so genannten Wellengleichung und ist von der Vorspannung sowie von der Dichte des Fahrdrahtes abhängig. Wenn die Fahrgeschwindigkeit genauso groß wird wie die Wellenausbreitungsgeschwindigkeit, dann wächst die Auslenkung des Fahrdrahtes theoretisch ins Unendliche. Dadurch ist eine Stromaufnahme nicht mehr gewährleistet. Daher sind der Fahrdraht und seine Vorspannung so zu wählen, dass die Wellenausbreitungsgeschwindigkeit nach praktischen Erfahrungen ungefähr das 1,5-fache der Fahrgeschwindigkeit beträgt. Diese durch die Materialeigenschaften bedingte physikalische Grenze wird als „catenary barrier“, als Oberleitungsgrenze bezeichnet und ist, vergleichbar mit der Schallgrenze bei Flugzeugen, eine ständige Herausforderung für die Ingenieure bei weiteren Geschwindigkeitserhöhungen.²

Da die Zahl der Hochgeschwindigkeitszüge und damit der Neubau und Ausbau an entsprechenden Bahnstrecken in den nächsten Jahren stetig steigen wird, ist ein sehr hoher Bedarf an Bahnleitmaterial vorhersehbar, welches insbesondere den immer weiter steigenden Beanspruchungen dieser Materialien standhalten kann. Der internationale Eisenbahnverband rechnet damit, dass allein in Europa bis 2020 das Schienennetz für Hochgeschwindigkeitszüge eine Zunahme von über 300% auf dann 9.000 km Streckenlänge erreichen wird. Auch außerhalb von Europa wächst die Nachfrage nach Hochgeschwindigkeitszügen extrem stark an. Die schnellen Züge treten dabei zunehmend in Konkurrenz zu den transkontinentalen Fluglinien.³ Nach Herstellerprognosen werden in den nächsten 20 Jahren weltweit 6.000 Bestellungen für Hochgeschwindigkeitszüge erwartet. Die Geschwindigkeiten werden dabei stetig ansteigen. Liegen derzeitige Regelgeschwindigkeiten noch bei rund 300 km/h, so werden Geschwindigkeiten von über 350 km/h, wie z.B. bei dem geplanten Großprojekt „California High-Speed Rail“ an der Westküste der USA, bald Standard sein.⁴

Hochgeschwindigkeitsbahnstrecke.
Quelle: nkt cables GmbH



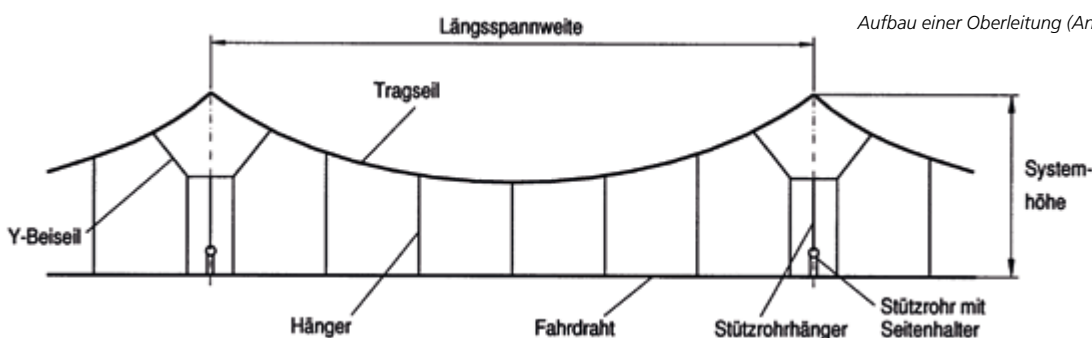
In Kontinentaleuropa sind bei Neubauvorhaben inzwischen ebenfalls Geschwindigkeiten zwischen 300 bis 360 km/h üblich.⁵ Es wurden zwar in den fünfziger Jahren bereits Geschwindigkeitsrekorde mit elektrischen Loks von über 350 km/h erreicht, doch sind es auf den heutigen Hochgeschwindigkeitsstrecken die über lange Strecken durchweg gefahrenen hohen Geschwindigkeiten, die die extremen Belastungen mit sich bringen.

Innerhalb eines Oberleitungssystems stellen die senkrecht angebrachten, so genannten Hängerseile eine sehr wichtige Komponente dar. Durch die in der Fahrleitung auftretenden Schwingungen kann es besonders an den Hängerseilen zu einer gefährlichen Materialermüdung kommen, die letztlich zum Bruch führt. Sobald dies eintritt, erhöht sich die Belastung der benachbarten Hängerseile, was wie eine Art Kettenreaktion wiederum zu einer Verminderung der Lebensdauer führt. Ein weiteres Problem tritt dann auf, wenn es zu einer Kollision zwischen einem gebrochenen Hängerseil und dem Stromabnehmer kommt, was aufgrund der hohen Geschwindigkeiten sehr schnell zu Beschädigungen führen kann. Daher kann der Bruch eines einzelnen „Hängers“ eine Reparatur an der Bahnstrecke mit entsprechenden Ausfällen und kostenintensiven Folgen erforderlich machen.

Befasst man sich mit der Optimierung sowohl der mechanischen als auch der elektrischen Eigenschaften der Bahnleitmaterialien, so befindet man sich in einem Zielkonflikt aus Festigkeit und elektrischer Leitfähigkeit. Zur Zeit beträgt der Stromverbrauch der elektrischen Bahnen in Europa ca. 50 TWh/Jahr, was einem Anteil an der europäischen Stromerzeugung von 2% entspricht. Die Energieverluste zwischen der Einspeisestelle und dem Stromabnehmer des Zuges betragen dabei jedoch beispielsweise unter Volllast ungefähr 35%. Die Anteile der Leitungsverluste des Oberleitungssystems haben davon wiederum einen Anteil von 18%-Punkten.⁷ Ein ICE der aktuellen Baureihe verfügt beispielsweise über eine Antriebsleistung von 8.000 KW. Dies entspricht in etwa der Leistung von 100 durchschnittlich motorisierten Mittelklasse-Autos. Um diese hohen Leistungen möglichst verlustarm übertragen zu können, wäre die Leitfähigkeit von reinem Kupfer, wie es unter anderem in den Datenkabeln von Computern verwendet wird, geradezu ideal.

Doch an diesem Punkt kommt ein gravierender Nachteil von reinem Kupfer ins Spiel. Seine Festigkeit ist nämlich für viele Anwendungen einfach zu gering. Daher kann es für Hochgeschwindigkeitsstrecken aufgrund der erforderlichen Vorspannung des Fahrdrahtes (bei einer ICE-Strecke entspricht diese einem dauerhaft aufgebrachten Gewicht von immerhin 2,7 Tonnen) nicht eingesetzt werden. Da aber sämtliche festigkeitssteigernden Maßnahmen in der Regel zu einer Verminderung der Leitfähigkeit führen, ist man bestrebt, einen vertretbaren Kompromiss zu erzielen. Um die Festigkeit zu erhöhen, kommen verschiedene Techniken zum Einsatz. Zum einen ist dies die so genannte Kaltverfestigung. Hier nutzt man eine beim Walzen und Ziehen der Drähte auf ihre endgültige Abmessung eintretende Festigkeitssteigerung. Darüber hinaus werden, ähnlich wie bei den festeren Stählen, auch bei Kupfer andere, in der Regel metallische Elemente in geringen Mengen bei der Erschmelzung hinzulegiert. Die Fremdatome, die sich in ihrem Durchmesser von den Kupferatomen unterscheiden und in dem kristallinen Kupfergefüge einlagern, führen ebenfalls zu einer Verfestigung des Werkstoffes. Diese bildet sich je nach Konzentrationsverhältnis entweder als Mischkristall- oder als Ausscheidungsverfestigung aus. Durch entsprechende Wärmebehandlungsmethoden lassen sich diese Vorgänge bei der Herstellung und Verarbeitung gezielt beeinflussen, wobei i.d.R. auch Kombinationen aus den unterschiedlichen Mechanismen zur Festigkeitssteigerung angewendet werden.

Bis in die siebziger Jahre war z.B. das Schwermetall Cadmium ein solch gängiges Legierungselement. Aufgrund seiner umweltschädlichen und toxischen Eigenschaften wurde es jedoch weitgehend durch Magnesium ersetzt. Die dadurch deutlich anspruchsvoller gewordene Verarbeitung erfordert ein großes Know-How und wird weltweit nur von wenigen Herstellern wirklich beherrscht.



Aufbau einer Oberleitung (Ansicht quer zur Fahrtrichtung).⁶

Vorgehensweise bei der Optimierung

In einem abgeschlossenen Vorlauf-Forschungsprojekt, das durch die Finanzierung der Landesstiftung Baden-Württemberg ermöglicht wurde, konnten zunächst umfangreiche Kenntnisse über die Untersuchungsmethoden von Kupfer und den speziellen Einsatz in Bahnleitungen gewonnen werden. Um beispielsweise mikroskopische Analysen durchführen zu können, müssen die Proben sehr sorgfältig vorbereitet werden. Kupfer ist in der metallographischen Präparation relativ anspruchsvoll. Vor allem Kupfer in reiner Form und mit geringen Legierungsgehalten ist sehr weich, zäh, leicht verformbar und neigt schnell zur Kratzerbildung. Erst mit genügend Erfahrung ist man in der Lage, solche hochwertigen Gefügeaufnahmen zu machen, auf denen neben allen technischen Aspekten auch eine schöne optische Seite von Kupfer zur Geltung kommt.



Gefügeaufnahme einer gegossenen Kupferlegierung (200-fach vergrößert).
Foto: Dorothea Nobiling

Ein derzeit aktuelles Forschungsprojekt richtet den Fokus speziell auf eine ganzheitliche Verbesserung der Hängerseile. Dadurch soll ein wesentlicher Beitrag geleistet werden, um die Betriebssicherheit, die Verfügbarkeit und nicht zuletzt die Wirtschaftlichkeit von Bahnstrecken noch effizienter und optimaler zu gestalten. Dies setzt jedoch genaue Kenntnisse über die tatsächlich auftretenden Belastungen voraus. Die Hängerseile können zunächst als stehende Seile, wie die Seile von Brücken, betrachtet werden, auf welche im Ruhezustand eine nahezu statische Belastung wirkt. Durch den Fahrdrahtanhub des Zuges erfahren sie eine Biegung und werden in Schwingung versetzt. Aufgrund des sehr komplexen mechanischen Verhaltens eines aus sehr vielen so genannten Litzen bestehenden Seiles durch die wendelförmige Umschlingung der einzelnen Drähte und Litzen

mit ihren punktförmigen Kontaktstellen kommt es zu sehr unterschiedlichen und komplexen Beanspruchungsverläufen über den Seilquerschnitt.^{8,9}

Da die an der Bahnstrecke auftretenden Schwingungen mit dem bloßen Auge weder erfasst noch analysiert werden können, wurden im Rahmen des Projektes Filmaufnahmen mit einer High-Speed-Kamera an einer Hochgeschwindigkeitsbahnstrecke gemacht (selbstverständlich mit der Genehmigung der Deutschen Bahn), welche dann im Labor ausgewertet wurden. Ein aktueller Untersuchungsschwerpunkt liegt bei der Auswertung der Drahtbrüche von gebrochenen Hängerseilen von der Bahnstrecke. Dazu wurde speziell eine Vorrichtung konzipiert, mit der in einem modernen 3-D-Mikroskop und in einem hochauflösenden Raster-Elektronen-Mikroskop (REM) eine schnelle Aussage über die Schadensursache der

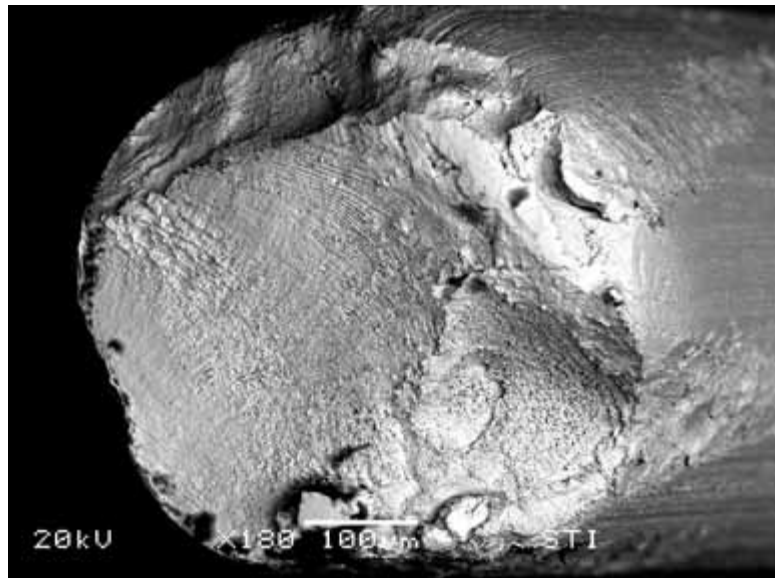


*links: Dorothea Nobiling bei der
Mikroskopie von Drahtbrüchen.
Foto: Andreas Zilly*

*unten: Drahtbruch (REM-Aufnahme,
180-fach vergrößert).
Foto: Ursula Christian*

einzelnen Drähte eines Seils getroffen werden kann. Anhand charakteristischer Merkmale an der Bruchoberfläche lassen sich Aussagen über die Schadensursache jedes einzelnen Drahtes und somit in der Summe für das ganze Seil treffen.

Da die Seile in einem Dauerprüfstand einer Partnerfirma unter genormten Bedingungen bis zum Bruch getestet werden, wird diese Untersuchungsmethode an diesen Seilen auf die gleiche Weise durchgeführt um festzustellen, inwieweit die Prüfbedingungen mit der realen Belastung übereinstimmen. Diese recht aufwändige und gründliche Untersuchungsmethode ist durchaus ein Alleinstellungsmerkmal der Forschung im Pforzheimer Werkstoffentwicklungs- und Prüflabor. Da die Prüfung von ganzen Seilen aufgrund der hohen Lebensdauer sehr zeitintensiv ist, wurde ein eigener Prüfstand entwickelt, mit welchem die einzelnen Drähte dynamisch bis zum Bruch belastet werden können. Die Art und Abfolge der Belastungen wurde dabei dem an der Bahnstrecke real auftretenden Beanspruchungsprofil nachempfunden. Damit lassen sich sehr schnell Rückschlüsse vom mechanischen Verhalten eines einzelnen Drahtes auf ein ganzes Seil ziehen. Diese Art der Prüfung wird Recherchen zufolge bisher lediglich bei Stahlseilen für die Fördertechnik wie z.B. im Kran- und Aufzugbau eingesetzt. Bei Kupferseilen hingegen betritt das Pforzheimer Forscherteam damit absolutes Neuland. Dieser Prüfstand befindet sich derzeit zwar noch in der Erprobungsphase, lässt aber mit seinen Alleinstellungsmerkmalen schon bald vielversprechende Ergebnisse erwarten.



*Einzeldrahtprüfstand.
Foto: Dorothea Nobiling*



Ausblick

Neben den aktuellen Untersuchungen und Verbesserungen bereits verwendeter Bahnleitmaterialien gehen weitere Schritte in Richtung auf die Anwendung neuartiger Werkstoffkombinationen und Verarbeitungsmethoden. Hierzu wurden bereits einige Erkenntnisse gewonnen, welche in naher Zukunft noch weiter vertieft werden sollen. Als Forschungspartner konnten dafür das Institut für Metallformung an der Technischen Universität Bergakademie Freiberg sowie ein marktführendes Unternehmen aus diesem Sektor gewonnen werden. Innerhalb dieses Verbundes ist sowohl grundlagen- als auch anwendungsorientierte Forschung möglich, was eine wertvolle und sehr zielführende Kombination darstellt. Ein Hauptaugenmerk liegt dabei auch auf einer Verknüpfung zwischen Forschung und Lehre. Neueste Erkenntnisse können somit unmittelbar in die Lehre einfließen, und Studenten werden in Form von Praktika und Projektarbeiten in die spannenden Forschungstätigkeiten bereits von Beginn an eingebunden und entdecken so hochinteressante Verbesserungspotentiale in alltäglichen, aber in der breiteren Öffentlichkeit doch fast unbekanntem Werkstoffanwendungen

Dr.-Ing. Norbert Jost

ist Professor im Studiengang Maschinenbau und leitet mehrere Forschungsvorhaben mit werkstoffkundlichen Schwerpunkten.

M. Sc. Simon Kött und Dipl.-Ing. (FH) Dorothea Nobiling

sind wissenschaftliche Mitarbeiter am Institut für angewandte Forschung.

M. Sc. Andreas Zilly

ist Laboringenieur im Werkstoffkundelabor des Studiengangs Maschinenbau und promoviert an der Technischen Universität Bergakademie Freiberg.

Literatur:

¹ S. Trage:

Wertvolle Rohstoffe haben ihren Preis.

In: Pictures of the future, 2008. <http://www.siemens.com/innovation/de/publikationen/index.htm>

² M. Müller: **Alstom testet Hochgeschwindigkeitszug.**

In: Frankfurter Allgemeine FAZ.NET, 03.07.2008.

³ C. de Barrin:

Copper in the transport systems of the future: The example of the high-speed train.

European Copper Institute, 2007.

⁴ C. Conkey:

California, Florida Top List to Secure High-Speed-Rail Funds.

In: The Wallstreet Journal Digital Network, 08.05.2009.

⁵ C. Müller:

Gröna Tåget – Schwedens Weg zum Hochgeschwindigkeitsverkehr.

In: El-Eisenbahningenieur 60 (2009), H. 1, [S. 54 – 55].

⁶ F. Kießling, R. Puschmann, A. Schmieder, P. Schmidt:

Fahrleitungen elektrischer Bahnen.

Stuttgart-Leipzig: B. G. Teubner, 2. Auflage 1998.

⁷ J. F. Groeman:

Optimal reduction of energy losses in catenary wires for DC railway systems.

KEMA Nederland B.V., European Copper Institute, 2000.

⁸ S. Ziegler, K.-H. Wehking:

Drahtschwingfestigkeit und Seillebensdauer – Zuverlässiges Berechnungsmodell.

In: Hebezeuge Fördermittel 47 (2007), H. 4, [S. 192 – 195].

⁹ F. Pupke, S. Ouchanin, R. Kawalla, N. Jost, A. Zilly:

Weiterentwicklung und Prüfung der Hängeseile in Oberleitungs-kettenwerken.

In: Elektrische Bahnen. 107 (2009), H. 1 – 2, [S. 77 – 82].

Das Forschungsteam: Dorothea Nobiling, Professor Dr.-Ing. Norbert Jost, Simon Kött, und Andreas Zilly. Foto: Regina Weinland

