

Die Auswahl ist begrenzt, elektrische Leiterwerkstoffe im praktischen Einsatz

## Elektrische Leiter – Alternativen zu Kupfer?

*Die Auswahl von elektrischen Leiterstoffen ist sehr beschränkt. Obwohl Kupfer in letzter Zeit enorm teuer geworden ist, bestehen kaum Alternativen dazu. Aluminium ist ein Leichtmetall, lässt sich aber in der Elektrotechnik nur sehr beschränkt anwenden. Was es sonst noch alles zu bedenken gilt beim Einsatz von Leiterwerkstoffen zeigt dieser Beitrag.*

Aluminium ist ein guter elektrischer Leiter; erreicht seine Leitfähigkeit doch immerhin rund 65% des Wertes von Kupfer. Damit verfehlt Aluminium aber knapp das Siegertreppchen der Leitfähigkeiten aller Metalle, auf dem Silber die Goldposition einnimmt. Die Silbermedaille geht an Kupfer, während Gold selbst »nur« die Bronzemedaille erhält. Aluminium folgt mit etwas Abstand auf dem vierten Platz. Danach kommt eine Weile nichts (**Tabelle 1**). Gold und Silber kommen auf Grund der hohen Preise in Kabeln, Drähten, Leitungen und elektrischen Maschinen nicht in Betracht, sondern allenfalls als Anschlussdrähte in integrierten Schaltungen, wo sie nur milligrammweise benötigt werden. Alle anderen bekannten Elemente und Verbindungen, sofern überhaupt elektrisch leitend, folgen erst mit einigem Abstand. Legierungen verschiedener Metalle haben ganz generell eine erheblich niedrigere Leitfähigkeit als reine Metalle. Es bleiben also mit Kupfer und Aluminium nur zwei Metalle mit einer wirtschaftlich verwertbaren elektrischen Leitfähigkeit übrig, wobei das Kupfer das Mass aller Dinge abgibt. So wird die Leitfähigkeit von Kupfer für Leitzwecke (Cu-ETP-1, Cu-OF-1 oder Cu-OFE) nach den Unterlagen des Deutschen Kupferinstituts mit 58,58 MS/m angegeben. Dies entspricht 101% des International Annealed<sup>1</sup> Copper Standard IACS, der schon seit 1913 die Standard-Leitfähigkeit technischen Kupfers auf 58,00 MS/m festlegt und an dem sich auch andere Leiterwerkstoffe messen lassen müssen.



*Bild 1: Erstmals auf der Hannover Messe 2003 der Öffentlichkeit vorgestellt: Aus Kupfer gegossene Kurzschlussläufer.*

Spezifische Widerstände einiger metallener Werkstoffe und verschiedener Böden				
	$\Omega \cdot m$ (bei 20°C)		$\Omega \cdot m$	
			von	bis
Silber	$0,0160 \cdot 10^{-6}$	Seewasser	0,1	1
Kupfer (99,95%)	$0,0175 \cdot 10^{-6}$	Leitungswasser	5	100
Gold	$0,0220 \cdot 10^{-6}$	Destilliertes / demin. Wasser	2000	100000
Aluminium	$0,0270 \cdot 10^{-6}$	Eis	10000	100000
Leitlegierung (CuCrZr)	$0,0375 \cdot 10^{-6}$	Gartenerde, Mutterboden, Moor	5	50
Wolfram	$0,0550 \cdot 10^{-6}$	Poröser Kalk	30	100
Messing (CuZn37)	$0,0645 \cdot 10^{-6}$	Nasser Beton	30	100
Eisen	$0,1000 \cdot 10^{-6}$	Trockener Beton	2000	10000
Edelstahl	$1,0000 \cdot 10^{-6}$	Sand	200	2500
Blei	$0,2080 \cdot 10^{-6}$	Kies, Schotter	2000	3000
Widerstandsdraht (CuNi44Mn1)	$0,4900 \cdot 10^{-6}$	Quarzit, verwittertes Kalkgestein	300	1000
Kohle	$40,0000 \cdot 10^{-6}$	Felsen	1000	10000

*Tabelle 1: Spezifische Widerstände metallener Werkstoffe, zum Vergleich einige andere, z. B. in der Debatte um die Erdung, ebenfalls als »leitfähig« angesehene Stoffe wie Wässer und verschiedene Böden*

### 1. Metalleiter

Aluminium ist ein Leichtmetall mit nur etwa 35% der Dichte des Schwermetalls Kupfer, und darüber hinaus liegt der stets nach Gewicht – korrekt gesagt Masse – bemessene Tagespreis zeitweise erheblich unter dem für Kupfer. Zurzeit kostet das Kilogramm Aluminium weniger als halb so viel wie ein Kilogramm Kupfer. Entscheidend für die Bedarfsmenge ist jedoch der Leiterquerschnitt und damit das eingesetzte Volumen, nicht Masse bzw. Gewicht eines Leiters. Heute muss man mit etwa 6 Euro für einen Liter Aluminium bezahlen, so können es für einen Liter Kupfer leicht 50 bis 60 Euro werden. Trotz besserer Leitfähigkeit des Kupfers kostet eine Kupferleitung mit gleichem Leitverhalten wie Aluminium das Siebenfache. Warum kommen – ausser beim gegossenen Läuferkäfig des Asynchronmotors – fast nur Kupferleiter zum Einsatz?

## Elektrische Maschinen

Um eine technisch, vor allem vom Wirkungsgrad her, äquivalente Maschine mit Aluminium zu wickeln, müssen die Stromdichten gegenüber Kupfer auf etwa  $\frac{2}{3}$  gesenkt, also die Leiterquerschnitte entsprechend um den Faktor  $\frac{3}{2}$  verstärkt werden. Dadurch müssen die Blechpakete und alle mechanischen Bauteile vergrößert werden. Bei Dynamoblech besteht jedoch derzeit eine ähnliche Verknappung auf den Weltmärkten wie beim Kupfer – mit den entsprechenden Auswirkungen auf die Preise. Die Kostenersparnis beim Leiterwerkstoff wird hierdurch wieder aufgezehrt. Daher gibt es seit einigen Jahren Bestrebungen, auch den Läuferkäfig aus Kupfer zu gießen. Inzwischen sind solche Rotoren kommerziell verfügbar und in begrenztem Umfang im praktischen Einsatz (Bild 1). Das Problem war dabei die mit 1083 °C wesentlich höhere Schmelztemperatur des Kupfers gegenüber komfortablen 650 °C bei Aluminium und der dadurch bedingte Verschleiss der Gussform. Zum Glück konnten diese Probleme mittlerweile gelöst werden, und eine Gussform mit

wirtschaftlich verwertbarer Lebensdauer steht heute zur Verfügung.

## Kabel und Leitungen

Bei Kabeln und Leitungen spielt das Argument des Platzbedarfs jedoch in den meisten Fällen nur eine untergeordnete Rolle. Der Löwenanteil der Querschnittsfläche einer Niederspannungs-Mantelleitung im Bereich bis etwa 10 mm<sup>2</sup> je Leiter (Bild 2) oder eines Hochspannungskabels (Bild 3) geht auf das Konto des Isolierstoffs. Der Querschnitts-Aufschlag für Aluminium geht darin mehr oder weniger unter. Zumindest bei herkömmlichen Kunststoffleitungen ist das so. Mineral isolierte Kabel und Leitungen (Bild 4) bieten über ihre absolute Brandsicherheit hinaus einen erheblichen Platzvorteil gegenüber gewöhnlichen Kunststoffleitungen. Diese Mineralisierten Kabel und Leitungen wurden zeitweise auch mit einer Hülle aus Aluminium statt Kupfer hergestellt, doch auch das hat sich nicht durchgesetzt.

Und zur Gebäudeinstallation wird in den meisten europäischen Ländern vorwiegend oder ausschliesslich Kupfer verwendet. Warum lassen die meisten europäischen Normen Aluminium im Bereich bis 16 mm<sup>2</sup>, teilweise bis 10 mm<sup>2</sup>, überhaupt nicht zu?

Massgeblich hierfür sind vor allem drei Gründe

- Aluminium ist zwar recht duktil (plastisch verformbar), aber nicht so duktil wie Kupfer. Die Enden in Wänden verlegter steifer Drähte, z. B. in UP-Dosen und an Wandauslässen, brechen nach mehrmaligem Biegen ab. Problematisch wird es, wenn das Drahtende im Inneren der Isolierhülle ganz kurz vor dem Abbrechen steht und in diesem Zustand weiter betrieben wird. Der Fehler bleibt so lange unbemerkt, bis die Leitung einmal mit einem nennenswerten Strom (in der Nähe des Nennstroms) belastet wird, was Jahre dauern kann. Dann schmilzt die Engstelle durch, was wiederum wegen des niedrigeren Schmelzpunktes und der niedrigeren Wärmeleitfähigkeit von Aluminium wesentlich leichter vorkommen kann als bei Kupfer. Ein entstehender Lichtbogen an der Einschnürstelle kann sogar dazu führen, dass sich das Aluminium entzündet und abbrennt wie eine Zündschnur.
- Aluminium überzieht sich an der Luft sehr schnell mit einer harten, widerstandsfähigen Oxidschicht, die elektrisch nicht leitet und daher das Kontaktieren erschwert. Es können Übergangswiderstände auftreten, die wiederum mit Brandrisiko enden. Kupfer oxidiert ebenfalls an der Luft, doch behindert diese Oxidschicht die Kontaktierung eigenartigerweise nicht, obwohl auch Kupferoxide (CuO und Cu<sub>2</sub>O) mit ihren gegenüber dem elementaren Metall um rund 13 Zehnerpotenzen schlechterer Leitfähigkeit kaum als Leiter zu betrachten sind.
- Aluminium neigt zum Langzeitfließen. Der Werkstoff gibt bei starkem Druck mit der Zeit nach. So können anfangs feste Anschlüsse allmählich locker werden. Dieses Problem lässt sich mit entsprechendem Mehraufwand bei der Verbindungstechnik lösen, und bei Leitungen mit relativ wenigen Verbindungsstellen wie z. B. Hochspannungs-Freileitungen lohnt sich dieser Aufwand, in verzweigten Netzwerken wie z. B. innerhalb von Gebäuden jedoch nicht.



Bild 2: Auch bei Installations- und Anschlussleitungen kleiner Querschnitte nimmt der Leiterwerkstoff den kleineren Teil am Gesamt-Querschnitt ein



Bild 3: Bei Hochspannungskabeln dominiert beim Gesamt-Querschnitt bzw. Volumen der Isolierstoff den Leiterwerkstoff.



Bild 4: Mineral isolierte Leitungen im Querschnitt.

Auf Grund des zweiten geschilderten Problems sollten Aluminium-Leitenden stets mit stramm angezogenen Schraubkontakten kontaktiert werden, aber gerade diese sind auf Grund des dritten Punktes oft nicht dauerhaft. Abhilfe schaffen im Prinzip Federkontakte, doch werden dadurch dann wieder die Oxidschichten zum Problem. Es kommt in beiden Fällen zu langsam ansteigenden Übergangswiderständen und somit wiederum zu Brandgefahr. Die alten Aluminiuminstallationen in Ostdeutschland und den meisten osteuropäischen Ländern genossen zwar »Bestandesschutz«, doch stellt dieser lediglich einen wirksamen Schutz vor etwa drohenden Verbesserungen dar. Um aber die derart »geschützten« Installationen mit neuen Anlagenteilen verbinden zu können, gibt es spezielle Verbinder mit Federkraft-Kontaktdruck und eine spezielle Kontaktpaste aus Fett mit scharfkantigen Metallpartikeln. Die Partikel drücken sich beim Verbinden durch die bereits bestehende Aluminiumoxidschicht, und das Fett schützt vor erneuter Korrosion.<sup>2</sup>

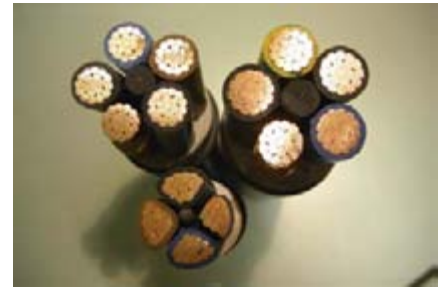


Bild 5: Nur bei Niederspannungs-Hochstromkabeln dominiert der Leiterwerkstoff den Gesamt-Querschnitt

Auch in Hochspannungskabeln wird Kupfer als Leiterwerkstoff bevorzugt, denn die dort in Frage kommenden Isolierwerkstoffe sowie die äussere Abschirmung sind teuer, und selbst die nur geringe bei Aluminium erforderlich werdende Vergrösserung des Gesamtquerschnitts des Kabels kompensiert wiederum die Einsparung beim Leiterwerkstoff – anders als bei Niederspannungs-Energiekabeln grösserer Querschnitte (Bild 5). Nicht vergessen werden sollte auch, dass die Abschirmung immer aus Kupfer gefertigt wird, weil es anders nicht geht, und wenn für die Leiter Aluminium gewählt wird, muss nach dem – wenn auch langen – Leben eines solchen Kabels beim Verschrotten ein weiterer Arbeitsschritt eingefügt werden, um die Metalle voneinander zu trennen.

Dabei lebt der nackte Werkstoff Kupfer nicht nur lange, sondern praktisch ewig. Er lässt sich ohne Qualitätsverlust beliebig oft wieder aufbereiten. Etwa 45% der heute benötigten Menge wird aus Schrott erzeugt, und die daraus hergestellten Produkte, ob Kabel, Transformatoren, Wasserrohre oder Dachdeckung, werden sehr lange genutzt, im Durchschnitt vielleicht 40 Jahre. Vor 40 Jahren aber war der Bedarf nur etwa halb so hoch wie heute. Also werden rund 90% des damals eingesetzten Materials heute wieder verwendet. Ähnliches gilt für andere Metalle. Es lässt sich sagen: Metalle werden nicht verbraucht, sondern genutzt.

### Kompetenz-Gerangel? Nein danke

Die sonstigen technologisch wichtigen Eigenschaften – neben der elektrischen Leitfähigkeit – von Kupfer und Aluminium unterscheiden sich jedoch so sehr, schon allein wenn man z. B. an die Dichte denkt, dass sich die jeweiligen Anwendungsgebiete seit alters her recht deutlich abgrenzen lassen (Bild 6). Viel Neues tut sich hier auch nicht. Als einzige Neuerung der letzten Zeit sind wohl die gegossenen Kupferrotoren anzusehen (Bild 1). Echte Alternativen tun sich daher traditionell in lediglich drei, jetzt in vier Bereichen der Elektrotechnik auf, in denen beide Werkstoffe zum Einsatz kommen:

- **Nieder- und Mittelspannungskabel:** Im Einzelfall muss hier entschieden werden, ob ein grösserer Kabelquerschnitt oder ein höheres Kabelgewicht das kleinere Übel ist. Ausserdem ist das Aluminiumkabel in der Regel um einiges billiger. Es bleibt aber zu berücksichtigen, dass das Kupferkabel auch hier aus den genannten Gründen der Duktilität und der Kontaktierbarkeit die grösseren Sicherheitsreserven bietet und sich wegen des kleineren Querschnittes wesentlich leichter verlegen lässt, denn die Steifigkeit wächst mit dem Quadrat des Querschnitts, also mit der vierten Potenz zum Durchmesser! Auch sind schon sehr kleine Kupferkabel als mehrdrätige Leiter erhältlich, Aluminiumkabel aber erst ab 10 mm<sup>2</sup> Nennquerschnitt, und die Einzeldrähte sind immer noch sehr dick. So genannte »feindrätige« und »feinstdrätige« Leiter sind aus technischen Gründen nur aus Kupfer verfügbar. Dies treibt den zuletzt genannten Unterschied auf die Spitze und hat schon zu bösen und auch teuren Überraschungen geführt, die jedoch nichtsdestoweniger auf dem Papier als Einsparung auftauchten, weil auf diesem der Mehraufwand beim Verlegen nicht auftauchte, wohl aber der niedrigere Beschaffungspreis des Materials.<sup>3</sup>
- **Transformatoren:** Hier ist das Problem des Wickelraums nicht so scharf wie bei Motoren, weswegen der Einsatz von Aluminium immerhin in Frage kommt. Schliesslich muss der Hauptstreukanal, der Freiraum zwischen Ober- und Unterspannungswicklung, aus drei Gründen ein gewisses Mindestmass ohnehin aufweisen: Isolation, Kurzschlussstrom-Begrenzung und Kühlung.<sup>4</sup> Jedoch wird auch der Transformator mit Aluminiumwicklung grösser, sofern die Verluste und alle anderen wichtigen Betriebsdaten wie die Kurzschlussspannung, auf dem

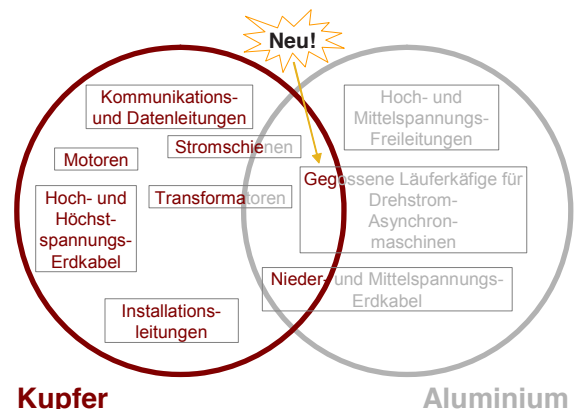
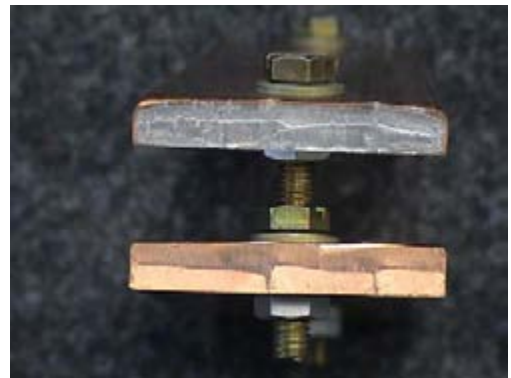


Bild 6: Kupfer und Aluminium im praktischen Einsatz: Wenig Überschneidung

gleichen Pegel gehalten werden sollen wie bei einem äquivalenten Typen mit Kupferwicklungen (sonst wäre er nicht äquivalent = gleichwertig!). Das Gesamtgewicht des – wenn auch geringfügig grösseren – Transformators mit Aluminiumwicklungen ist aber etwas geringer, auch die Kosten sind etwas geringer.

- **Stromschienen:** Hier verliert das Argument des Raumbedarfs weiter an Gewicht, ist aber andererseits immer noch ein Faktor. Zum Dritten kommt bei Stromschienen eine grosse Menge Leitermaterial zusammen mit nur wenig Isolierstoff auf engstem Raum zum Einsatz. Dies lässt die Unterschiede bei den Materialpreisen deutlicher hervortreten. Zum Vierten treten jedoch auch auf engem Raum viele Verbindungsstellen auf, was die Kontaktierungsprobleme des Aluminiums stärker zum Tragen kommen lässt. In der Summe all dieser Aspekte entsteht wieder eine Pattsituation, die die Frage der Material-Auswahl zu einer solchen der Philosophie macht. Es muss jedoch Acht gegeben werden, nicht wieder Preise mit Kosten zu verwechseln. Bei der Auslegung nach Preis neigt Aluminium dazu, als vorteilhafter aus dem Vergleich hervorzugehen; unter Berücksichtigung aller Kosten auch im Betrieb kann Aluminium vom Kupfer meist noch etwas lernen. Ausserdem geniesst Kupfer offenbar das bessere Ansehen oder das bessere Aussehen, denn es gibt auch Stromschienen aus Aluminium mit Kupferbeschichtung – nicht zur besseren Kontaktierung, denn beim Bohren, Stanzen und Schrauben geht die Beschichtung ohnehin verloren, sondern aus ästhetischen Gründen (Bild 7).
- Neu hinzugekommen sind die *Kupferrotoren* (Bild 1): Hier spielt die auf gleichen Raum bezogen wesentlich grössere Leitfähigkeit des Kupfers die entscheidende Rolle. Dies war es wert, alle technologischen Probleme in Angriff zu nehmen, wie erwähnt und an entsprechenden Stellen im Einzelnen nachzulesen.



*Bild 7: Es gibt Stromschienen aus vollem Kupfer und solche, die eine Hülle aus Kupfer mit einem Kern Aluminium besitzen.*

Unbestreitbare Domäne des Aluminiums ist die Hochspannungs-Freileitung,<sup>5</sup> wo der Raumbedarf kein Kriterium darstellt, umso mehr aber das Gewicht. Die geringere Festigkeit des Aluminiums bedingt zwar, dass die Leiterseile durch einen Stahlkern verstärkt werden müssen, doch dies ändert nichts daran, dass sich diese kostengünstig herstellen und die Werkstoffe sich bei der Verschrottung durch magnetische Abscheidung leicht wieder trennen lassen.

## 2. Nicht metallene Leiter – eine echte Alternative?

Die so genannten Halbleiter wie Germanium und Silizium, im periodischen System der Elemente zwischen den Metallen und den Nichtmetallen angeordnet, die die Elektronik in ihrer heutigen Form erst ermöglichen, geben ein Thema für sich ab, das hier nicht behandelt werden kann. Aber haben denn darüber hinaus die Metalle die Eigenschaft der elektrischen Leitfähigkeit für sich gepachtet, oder gibt es auch noch andere Stoffe, die sich hiermit nützlich machen können?

### **Für Spezialzwecke: Kohlenstoff**

Einmal kennen wir die Kohle-Elektroden in Schmelzöfen, früher auch in Lichtbogenlampen, und Kohlebürsten zum Kontaktieren der Kollektorlamellen in Gleichstrommaschinen. Bürsten heissen sie nur, weil ihre Vorläufer aus Kupfergeflecht bestanden und daher so aussahen. Auch Glühlampen wurden anfänglich nicht mit Wendeln aus Wolfram, sondern mit Glühfäden aus Kohlenstoff gefertigt.

### **Wichtig für die Elektrochemie: Flüssige Leiter**

Dann gibt es Elektrolyte, bestehend aus Wasser und einem Inhaltsstoff, der sich darin löst und Ionen bildet. Dieser Vorgang liegt dem Funktionieren der Elektrolyse, der Batterien und Akkumulatoren zu Grunde und verleiht auch dem Erdreich seine – wenn auch vergleichsweise sehr mässige – Leitfähigkeit, die zudem stark vom Wetter abhängt. Bekanntlich werden Erdungswiderstände im Zweifelsfall immer nach heftigen Regenfällen gemessen, um irgendeinen mehr oder weniger willkürlich festgelegten Grenzwert erfüllen zu können. Es ist jedoch zu beachten, dass die Werte der spezifischen Widerstände in Tabelle 1 links alle mit dem Faktor  $10^{-6}$  versehen sind. Zwischen den spezifischen Widerstandswerten der Metalle und dessen, was sich gemeinhin Erde nennt, liegen also zwischen 6 und 12 Zehnerpotenzen!

### **Elektrisch leitende Kunststoffe – der neue Kabelwerkstoff oder was?**

Elektrisch leitende Kunststoffe im engeren Sinne des Wortes (»intrinsisch leitfähige«), bei denen der Kunststoff selbst leitet, gibt es kaum. Meist handelt es sich um Kunststoffe, die durch Beigaben von Füllstoffen (Edelstahl-

flocken, Stahlfasern, mit Silber beschichtete Glaskügelchen, Grafit, Russ) leitfähig gemacht werden. Der Anteil an solchen Zusätzen wird meist auf wenige Volumenprozent beschränkt, um vorwiegend die Eigenschaften des Kunststoffes nutzen zu können, doch bedeutet dies, dass die Leitfähigkeiten um mindestens 4 Zehnerpotenzen niedriger liegen als bei metallenen Leiterwerkstoffen, bei einigen Materialien auch um 14 Potenzen. Für die meisten Anwendungen genügt das oder soll sogar so sein, denn diese Anwendungen beschränken sich auf Ableitung bzw. Vermeidung statischer Aufladung und Abschirmung hochfrequenter elektrischer bzw. elektromagnetischer Felder und Wellen. Kurz: Mit leitenden Kunststoffen lässt sich momentan kein Metall ersetzen. Wenn die Kunststoffgehäuse gewisser Geräte, die gegen Abstrahlen oder gegen die Einwirkung von Strahlung geschirmt werden müssen, selbst schon (etwas) leitfähig sind, so kann diese Beschichtung entfallen. Es stellt sich natürlich die Frage, weshalb man Kunststoffgehäuse metallisch beschichtet und nicht gleich ein Metallgehäuse nimmt? Die Antwort ist hier einfach: Kunststoffe lassen sich wesentlich preisgünstiger spritzen als Metalle. Bei teuren Laptops kommen Leichtmetallgehäuse zum Einsatz, weil diese bei sehr flachen Aufbauten eine höhere Festigkeit und natürlich auch eine bessere Schirmung bieten.

Intrinsisch leitende Kunststoffe, die also selbst leitend sind, wurden vor etwa 25 Jahren erfunden, einer sogar mit einer Leitfähigkeit, die an die metallenen Leiterwerkstoffe heran reicht. Diese Stoffe sind jedoch allesamt weder schmelz- noch knetbar und unlöslich und daher unmöglich zu verarbeiten. Ausserdem sind sie empfindlich gegen Sauerstoff und verlieren an der Luft recht bald ihre zudem richtungsabhängige und mit dem Fertigungs-Prozess auch noch stark variierende Leitfähigkeit. Solche Eigenschaften sind für die Anwendung als Leiterwerkstoffe undiskutabel, solange sie mit den in diesen Punkten sehr »gutwilligen« Metallen konkurrieren müssen. In einigen Fällen ist es gelungen, diese Eigenschaften etwas günstiger zu gestalten, doch liegen die Leitwerte dann gleich wieder einige Grössenordnungen niedriger. Der Anwendungsbereich beschränkt sich somit wie oben bei den durch Partikel-Beimengungen leitfähig gemachten Kunststoffen auf die Vermeidung statischer Aufladungen, z. B. der Stoff Polyethylendioxythiophen (PEDT) zur Beschichtung von Filmen. Ohne diese Beschichtung würden sich die Filme während der Entwicklung statisch aufladen, und die bei der Entladung entstehenden Blitze würden den Film erneut belichten. Die Fotos sähen alle aus wie bei Gewitter aufgenommen.

Erwähnt werden sollte an dieser Stelle noch, dass elektrisch leitende Kunststoffe schon lange in der elektrischen Energietechnik verwendet werden, und zwar in Hochspannungskabeln. Diese »halbleitenden Schichten« um den metallischen Leiter herum und ein weiteres Mal zwischen der inneren Isolierung und dem äusseren Mantel dienen zur »Feldstärke-Steuerung«. Damit wird das elektrische Feld möglichst homogen gehalten und somit lokale Feldstärke-Überhöhungen vermieden, die zu Glimm-Entladungen und dadurch zur langsamen Zerstörung der Isolation

## Supraleiter

Unter Supraleitung versteht man das physikalische Phänomen, dass bestimmte Stoffe bei Unterschreiten einer bestimmten »Sprungtemperatur« plötzlich jeglichen ohmschen Widerstand verlieren und Strom somit verlustfrei leiten. Mit Entdeckung der Hochtemperatur-Supraleitung vor gut 20 Jahren sprangen die Sprungtemperaturen über Nacht vom Bereich um 4 K in den Bereich von 100 K. Das entspricht immerhin dem 25-fachen Abstand zum absoluten Nullpunkt. Man könnte ganz grob vereinfachend sagen, damit habe sich die Anwendung und der Einsatz solcher Leiter um den Faktor 25 vereinfacht. So kann jetzt der sehr viel billiger herzustellende flüssige Stickstoff statt des flüssigen Heliums als Kühlmittel herangezogen werden. Nichtsdestoweniger ist immer noch 100 K = -173°C – und der Aufwand zur Kühlung ist entsprechend. Dieser Aufwand lohnt sich jedoch insbesondere in Anwendungen, die sich einen weiteren Vorteil mancher Supraleiter zu Nutze machen, welche nämlich Stromdichten im Bereich vom Hundertfachen dessen ermöglichen, was metallene Leiterwerkstoffe auf Grund ihrer Erwärmung zulassen. So lassen sich extrem starke Magnetfelder für die Kernforschung und die medizinische Diagnostik erzeugen oder kleinere, leichtere Maschinen für Anwendungen bauen, in denen Volumen oder Gewicht von ausserordentlich grosser Bedeutung sind. Lange haben diese speziellen, schwer vermittelbaren Anwendungen hinter den Kulissen, der breiten Öffentlichkeit weitgehend verborgen, ihre segensreichen Wirkungen entfaltet, bis vor kurzem der Industrieverband Supraleitung<sup>6</sup> gegründet wurde, der sich um die öffentliche Anerkennung dieser Leistungen bemüht. Von einem militärischen Schiffsantrieb sowie von einer 8 MW grossen Windkraftanlage ist hier die Rede. Einen konventionellen Generator dieser Leistungsklasse aus Kupfer und Eisen in die entsprechende Höhe zu hieven dürfte mit vorhandenen Mitteln nicht möglich sein. Der supraleitende Kurzschlussstrom-Begrenzer dürfte in Zukunft die Netzbetriebstechnik revolutionieren. Waren bisher die Forderungen nach einer verschwindend kleinen Netzimpedanz im normalen Betrieb und nach einer hinreichend grossen im Kurzschlussfall unvereinbar und mussten durch Kompromisse überbrückt werden, so ist dieser Spagat jetzt im Prinzip möglich, und einzelne Anlagen stehen in der praktischen Erprobung. Eine weitere wichtige Kenngrösse des Supraleiters ist nämlich ausser der Sprungtemperatur auch die Sättigungs-Stromdichte, bei der die Supraleitung ebenso plötzlich wieder zusammenbricht wie sie gekommen ist. Ein konventioneller metallener Leiter, meist aus Kupfer gefertigt und als Umhüllung des Supraleiters ausgeführt, übernimmt dann für den kurzen Moment bis zur Abschaltung den Strom und begrenzt diesen durch seinen ohmschen Widerstand. Lange hat die Elektrotechnik auf dieses Ei des Kolumbus gewartet.

Mit Skepsis hingegen sind die zahlreichen Meldungen aus jüngster Zeit zum Energiespar-Potenzial der Supraleiter zu bewerten. Die hier angeführten Netzbetriebsmittel wie Höchstspannungserdkabel und Grosstransformatoren

verfügen bereits über Wirkungsgrade deutlich über 99%, ein so genannter Grenzleistungs-Transformator ( $\approx 800$  MVA) z. B. 99,75% bei voller Last und 99,80% bei halber Last. In Stromnetzen wie denen Deutschlands, Österreichs und der Schweiz gehen vom Kraftwerk bis zur Steckdose nicht mehr als 5% der gesamten Energie verloren – und hiervon der grösste Teil in dem stark verzweigten Niederspannungsnetz. So haben Verteil-Transformatoren Wirkungsgrade von »nur« 98,5% bei voller Last und 99,0% bei halber Last. Fallen die Verluste bei halber Last auf ein Viertel, so bleibt der Energie-Aufwand für die Kühlung auf die so genannten »kryogenen« Temperaturen eines Supraleiters stets in voller Höhe bestehen. Ein (relativ grosser) Verteiltrafo von z. B. 1 MVA Nennleistung müsste sich also mit 15 kW, bei halber Last mit deutlich weniger als 5 kW, auf 100 K halten lassen, damit überhaupt noch eine Energie-Ersparnis übrig bleibt – und selbst dies würde nur die Kupferverluste einsparen, nicht die in der Lebensdauerkosten-Berechnung wirklich teuren Eisenverluste. Berechnungen haben ergeben, dass für ein Höchstspannungs-Erdkabel ab einer Übertragungsleistung von 5 GW eine positive Energiebilanz übrig bliebe. Das entspräche der Leistung von 5 Kernkraftwerken der Leistung von Leibstadt und damit ist auch schon klar, dass dies kein Sinn macht.

### Noch einmal Kohlenstoff: »Nanotubes«

Vor etwa 6 Jahren las man in der überregionalen Presse auf einmal von etwas, das sich »Nanotubes« nannte. Ein deutscher Ausdruck ist bisher nicht bekannt, doch machen diese Röhrchen ihrem Namen schon alle Ehre. Es handelt sich hierbei um Röhrchen aus aufgerolltem Grafit mit Durchmessern um 1 nm. Diese hätten dem Vernehmen nach allerhand vorteilhafte Eigenschaften, unter anderen eine »hohe elektrische Leitfähigkeit«, aber was heisst das schon? Der niedrigste Wert des spezifischen Widerstands, den bisher ein Wissenschaftler gefunden hat, ist mit  $0,34 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$  immer noch genau 20 Mal so hoch wie der für Kupfer.

Gleichzeitig aber wollen die Physiker eine immens hohe Strom-Belastbarkeit dieser Röhrchen gemessen haben, die  $10^{11}$  A/mm<sup>2</sup> erreichen kann. Wie ist das möglich? Nur weil die Röhrchen so klein sind, grössenordnungsmässig im Durchmesser 6 Zehnerpotenzen kleiner als die Drähte einer Installationsleitung, also im Querschnitt 12 Zehnerpotenzen. Somit haben sie, auf den Querschnitt bezogen,  $10^6$  Mal so viel Oberfläche zur Ableitung der Wärme zur Verfügung wie der Kupferdraht, entsprechend den Verhältnissen bei kleinen und grossen Transformatoren. Bündelt man aber entsprechend viele Nanotubes, bis man auf einen Querschnitt von 1 mm<sup>2</sup> kommt, so hat das Bündel nach aussen hin zur Wärmeabgabe auch nicht viel mehr Oberfläche zur Verfügung als ein gleichwertiger Draht. Rechnen Sie nach: Ein Würfel von 1 m Kantenlänge hat einen Widerstand von  $0,34 \cdot 10^{-6} \Omega$ . Ein »Nanodraht« von 1 m Länge und 1 mm<sup>2</sup> Querschnitt, gäbe es ihn, hätte dann also 0,34  $\Omega$ . Bei der genannten Stromdichte von  $10^{11}$  A/mm<sup>2</sup> macht das  $10^{11}$  A. Die in einem Meter »Nanodraht« entstehende Verlustleistung wäre also:

$$P = I^2 R = 10^{22} \text{ A}^2 * 0,34 \frac{\text{V}}{\text{A}} = 3,4 * 10^{21} \text{ W} .$$

Fraglos wären die Nanoröhrchen dabei nach einer Nanosekunde verbrannt. Nun stellt sich allerdings die Frage in dieser Form bislang nicht, denn zum Einen ist von einer Anwendung als elektrische Leiter gar nicht die Rede – von was denn dann, wird auf der entsprechenden Internet-Seite<sup>7</sup> auch nicht ganz klar – und zum Anderen ist das längste bisher erschaffene Röhrchen nur 1 mm lang. Das nimmt sich absolut bescheiden aus, doch umgerechnet entspricht es bei einem Draht von 1 mm Durchmesser schon einer Länge von 1 km. Das finden die Physiker aber schon relativ beachtlich, und bekanntlich sehen die alles relativ.

Stefan Fassbinder  
[sfassbinder@kupferinstitut.de](mailto:sfassbinder@kupferinstitut.de)

<sup>1</sup> weichgeglüht

<sup>2</sup> Fritz Hengelhaupt: »Kontaktverbessernde Wirkung von Kontaktpasten für die Elektro-Installation«, »de« 15-16/2001, S. 38

<sup>3</sup> Stefan Fassbinder: »Rationalisierungsmaßnahmen in kommunalen Stromnetzen«, »de« 5/2001, S. 40

<sup>4</sup> Stefan Fassbinder: »Verteiltransformatoren«, Teil 3: »Betriebsverhalten«. Schweizer Zeitschrift für angewandte Elektrotechnik 4/2005

<sup>5</sup> Stefan Fassbinder: »Erdkabel kontra Freileitung«, »de« 9/2001, enthalten im Sonderdruck »Drehstrom, Gleichstrom, Supraleitung – Energie-Übertragung heute und morgen« des Deutschen Kupfer-Instituts, Düsseldorf

<sup>6</sup> [www.ivsupra.de](http://www.ivsupra.de)

<sup>7</sup> <http://www.pa.msu.edu/cmp/csc/nanotube.html>