

**Zeitschrift:** Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

**Herausgeber:** Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

**Band:** 67 (1976)

**Heft:** 20

**Artikel:** Sorgen um Kupfer im Bereich der Elektrotechnik

**Autor:** Imhof, A.

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-915217>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 16.01.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# Sorgen um Kupfer im Bereich der Elektrotechnik

Von A. Imhof

621.315.55 : 669.3

Ermittlungen über die Kupfervorkommen der Welt und den Kupferverbrauch lassen erkennen, dass in einigen Jahrzehnten nur noch Recyclingkupfer verfügbar sein wird. Wenn es bis dahin nicht gelingt, andere geeignete Elektrizitätsleiter zu erzeugen, wird die Elektrotechnik einen katastrophalen Zusammenbruch erleiden. Andere Metalle, die als Stromleiter in Betracht fallen, vermögen die Situation wenig zu verbessern. Der Autor befasst sich mit den in Aussicht stehenden Kupfererzvorkommen, dem Kupferrecycling, den technischen Massnahmen zur Kupfereinsparung, der Supraleitertechnik, der Entdeckung von nichtmetallischen Leitern, ferner den theoretischen Untersuchungen über die metallische Hochdruckphase des Wasserstoffs und mit den politischen Problemen betreffend die Bodenschätze. Den Abschluss bilden einige Empfehlungen über Folgerungen aus den vorgelegten Tatsachen.

*Les études sur l'importance des gisements de cuivre dans le monde et de la consommation de ce métal montrent que, dans quelques décennies, on ne disposera que du cuivre recyclé. Si, d'ici-là, on ne parvient pas à produire d'autres conducteurs de l'électricité, l'électrotechnique subira un effondrement catastrophique. D'autres métaux pouvant servir de conducteurs n'amélioreront guère la situation. L'auteur s'occupe des gisements de minerai de cuivre encore disponibles, du recyclage du cuivre, des moyens techniques d'économiser le cuivre, de la technique des supraconducteurs, de la découverte de conducteurs non métalliques, ainsi que des recherches théoriques sur la phase métallique de l'hydrogène sous haute pression et des problèmes politiques concernant les ressources minières. Il termine par quelques recommandations au sujet des conséquences résultant des faits exposés.*

## 1. Einführung

Seitdem die Umwelt stark ins Bewusstsein der Menschen gerückt ist, sind auch die Bodenschätze zu einem wichtigen Problem für Zukunftsstudien geworden. Man ist sich endlich gewahr geworden, dass sie bei dem rasch steigenden Abbau nicht ewig ausbeutbar sein werden. Da und dort findet man Tabellen, in denen auf Grund der heutigen Kenntnisse Zeiten der wahrscheinlichen Erschöpfung genannt werden (Tabelle I). Dabei konstatiert man eine psychologisch merkwürdige Erscheinung: Technik und Wirtschaft reagieren hierauf praktisch nicht, sogar wenn gemäss solchen Informationen in wenigen Jahrzehnten für sie lebenswichtige Stoffe zu versiegen drohen. In Diskussionen hierüber zeigt sich, dass die einen solchen Schätzungen keinen rechten Glauben schenken, andere an eine alle Hindernisse überwindende Technik glauben.

Die nachfolgenden Betrachtungen beziehen sich auf die Annahme, dass das Kupfer als lebenswichtiger Baustein der ganzen Elektrotechnik in nicht allzuferner Zeit zu den «seltenen Metallen» gehören werde. Nach den Tabellen I und II (diese entstanden zu verschiedenen Zeitpunkten) wird dieses Datum schon in einigen Jahrzehnten erreicht. Damit müsste die Elektrotechnik und mit ihr ein Grossteil der Maschinenteknik arg schrumpfen und radikale Änderungen erfahren, die einer erheblichen Entwicklungszeit bedürfen. Unter der Annahme, dass doch noch sehr ergiebige Fundstätten für Kupfer entdeckt werden, könnte der kritische Zeitpunkt der Elektrotechnik um vielleicht etliche Jahrzehnte hinausgeschoben werden, bleibt aber eine Realität, wenn nicht grundlegende Wandlungen eintreten.

Nachfolgend seien die verschiedenen Einflüsse auf das Problem diskutiert. Die einzelnen Faktoren sind an sich bekannt, sollen aber hier im spezifischen Zusammenhang mit der drohenden Erschöpfung der Kupferreserven betrachtet werden. Den Verfasser erstaunt es, dass die Elektrotechnik noch in aller Ruhe ihren Weg schreitet, als wäre ihre Zukunft vom Standpunkt ihrer Rohstoffe mit aller Sicherheit gewährleistet.

Zum Leidwesen der Elektrotechnik wird Kupfer für sehr zahlreiche und aufwendige andere Dinge verwendet, insbesondere im Hochbauwesen für Dächer, Wandverkleidungen usw. Da aber für die meisten dieser Anwendungen auch andere Möglichkeiten bestehen, wenn auch zum Teil weniger gute, geht der Wunsch des Elektrotechnikers dahin, den grössten Teil des Kupfers für seine Anwendungen reserviert

zu sehen. Dies durchzusetzen scheint utopisch zu sein, handelt es sich doch dabei um Eingriffe in weltweite wirtschaftliche und politische Interessen.

Der Verfasser ist sich durchaus bewusst, dass er ein Problem aufscheucht, dessen Lösung, so ernst und dringlich es ist, fast unmöglich erscheint. Darüber nachdenken sollte der Elektrotechniker gleichwohl. Dabei wird er selbstverständlich nach Ausweichmöglichkeiten suchen. Es sei nachfolgend versucht, auf diese Probleme und mögliche Auswege wenigstens skizzenhaft einzugehen.

## 2. Metallische Ersatzleiter

Kupfer ist sowohl im Hinblick auf seine hohe elektrische Leitfähigkeit wie aus Gründen seiner mechanischen und arbeitstechnischen Eigenschaften, seiner chemischen Beständigkeit, aber auch wegen seiner relativen Häufigkeit das weitaus zweckmässigste Metall für elektrische Stromleiter.

In Tabelle III sind diejenigen Metalle aufgeführt, die einen niedrigen spezifischen elektrischen Widerstand aufweisen. An der Spitze steht Silber, das seines Preises wegen als Stromleiter ausfällt. Auf Kupfer folgt Gold und dann Aluminium, welches letzteres, wie auch einige seiner Legierungen, heute schon in beträchtlichen Mengen für Stromleiter (sowohl Übertragungsleitungen als auch Spulenwicklungen)

Nichtregenerierbare Rohstoffe [1]<sup>1)</sup>

Tabelle I

Rohstoff	Bekannte Reserven  [in 1000 t]	Mittlere jährliche Zuwachsrate des Verbrauchs  [in %]	Ausreichend für ... Jahre bei steigendem Verbrauch	Ausreichend für ... Jahre bei steigendem Verbrauch und 5facher Reservemenge
Aluminium	1 170 000	6,4	31	55
Chrom	775 000	2,6	95	154
Kobalt	2 180	1,5	60	148
Kupfer	308 000	4,6	21	48
Eisen	100 000 000	1,8	93	173
Blei	91 000	2,0	21	64
Molybdän	4 950	4,5	34	65
Nickel	66 500	3,4	53	96
Silber	170	2,7	13	42
Zinn	4 350	1,1	15	61
Wolfram	1 320	2,5	28	72
Zink	123 000	2,9	18	50

<sup>1)</sup> Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.



verwendet wird. Es wird die Not der Elektrotechnik voraussichtlich um einige Jahrzehnte hinausschieben, nicht aber dauernd beheben.

Die übrigen in der Tabelle genannten Metalle haben einen spezifischen Widerstand, der zwei- bis dreimal so hoch ist wie derjenige des Kupfers. Werden dann noch Forderungen wie Bearbeitungseigenschaften (Drahtziehen), Zugfestigkeit, Härte, Elastizitätsmodul usw., ferner Preise, Häufigkeit ihres Vorkommens und Entbehrlichkeit wegen andern wichtigen Verwendungen in Betracht gezogen, so scheiden sie alle als *dereinstiger Kupferersatz* aus.

Dagegen gibt es schon heute zahlreiche, aus zwei bis drei verschiedenen Metallen bestehende Stromleiter. Sie bezwecken eine hohe Zugfestigkeit zu erlangen oder an Kupfer aus ökonomischen Gründen zu sparen. Bekannt sind vor allem Kupfer-Stahl- und Kupfer-Aluminium-Kombinationen für Freileitungen. Ein Aluminiumdraht mit Kupferüberzug eignet sich für Wicklungen. Des weitern werden zahlreiche Legierungen von Kupfer mit ein bis zwei andern Metallen in verschiedensten prozentualen Beimengungen verwendet, deren spezifische Leitfähigkeit in der Größenordnung von 30...50 % derjenigen des Kupfers liegt.

### 3. In Aussicht stehende Erzvorkommen <sup>2)</sup>

#### 3.1 Metallhaltige Sedimente

Sedimente, die hohe Gehalte an unedlen Metallen wie Zink, Kupfer, Blei, Mangan und Eisen aufweisen, sind in verschiedenen Gebieten entdeckt worden, besonders im Zentralgraben des Roten Meeres und an einigen Zentralozeani-

<sup>2)</sup> In Tabelle I enthalten, in Tabelle II nicht berücksichtigt.

Die Kupfervorräte der Welt und ihre Lebensdauer [2]

Tabelle II

Kontinent bzw. Land	USBM <sup>1)</sup> BfB <sup>2)</sup>		Lebensdauer der bekannten Vorräte in Jahren	
	Mio t	Mio t	bei konstanter Förderung	bei steigender Förderung
Kanada	27,2	33,9	55,3	26,4
USA	73,5	77,1	49,8	32,7
Nordamerika	100,7	111,0	n.a.	n.a.
Chile	50,8	63,0	91,9	47,5
Peru	20,0	22,7	107,0	58,9
übr. Lateinamerika	n.a. <sup>3)</sup>	10,2	n.a.	n.a.
Lateinamerika	70,8	95,9	n.a.	n.a.
Zambia	24,5	27,2	39,8	26,2
Zaire	18,1	19,1	49,5	29,1
übr. Afrika	n.a.	7,0	n.a.	n.a.
Afrika	42,6	53,3	n.a.	n.a.
Europa	n.a.	14,7	n.a.	n.a.
Asien	n.a.	18,7	n.a.	n.a.
Australien und Ozeanien	n.a.	10,9	n.a.	n.a.
übrige westliche Welt	58,1		60,3	27,6
westliche Welt insgesamt	272,2	304,5	59,1	32,8
Ostblock	36,3	(36,3)	36,6	20,4
Welt insgesamt	308,5	(340,8)	54,9	28,7

<sup>1)</sup> US-Bureau of Mines, Stand 1. Januar 1972

<sup>2)</sup> Bundesanstalt für Bodenforschung, 1. Januar 1971

<sup>3)</sup> n.a. = nicht angegeben bzw. pauschal angegeben

Metalle mit niedrigem spezifischem elektrischem Widerstand  $\rho$

Tabelle III

Metall	Spezifischer Widerstand $\rho$ $\Omega \text{ mm}^2/\text{m}$	Temperaturkoeffizient $\alpha$ $10^{-3} \text{ K}^{-1}$	Dichte $\delta$ $\text{g/cm}^3$
Silber	0,016	3,8	10,5
Kupfer	0,017	3,9	8,93
Gold	0,0206	4,0	19,28
Aluminium	0,0265	4,7	2,7
Beryllium	0,032	9,0	1,85
Calcium	0,040	4,2	1,54
Rhodium	0,043		12,42
Magnesium	0,0446	4,2	1,74
Wolfram	0,049	4,8	19,25
Molybden	0,053	4,7	10,2
Kobalt	0,056	5,9	8,89
Zink	0,057	4,2	7,13
Eisen	0,088	4,6	7,88

schen Schwellen wie dem Eastern Pacific Rise. Bislang können nur die in den Sedimenten des Roten Meeres auftretenden Metallkonzentrationen als wirtschaftlich interessant bezeichnet werden. Die Sedimente sind gewöhnlich von metallführender heisser Sohle überlagert, die sich in Senken des Meeresbodens innerhalb des Zentralgrabens zufolge ihrer hohen Dichte gesammelt hat.

Seit ihrer Entdeckung in den frühen sechziger Jahren werden diese Sedimente untersucht. Diejenigen mit den höchsten bisher festgestellten Metallgehalten wurden 1969 im Atlantis-II-Tief nachgewiesen. Sie enthalten im Durchschnitt 3,4 % Zn und 1,3 % Cu. Es werden auch Durchschnittsgehalte von 6 % Zn und einige % Cu genannt. Diese Werte gelten für Sedimente in Tiefen von mehr als 2000 m, die als potentielle Erzlagerstätten angesehen werden dürfen.

Ausser dem Roten Meer, das zurzeit als einzigartig gilt, darf mit der Möglichkeit weiterer ähnlicher rezenter oder fossiler Vorkommen gerechnet werden. Solen mit vergleichbar hohen Temperaturen und noch höheren Metallgehalten kennt man aus Bohrungen in einigen weit auseinanderliegenden Gebieten wie z. B. Kalifornien, Pennsylvanien oder der Tscheleken-Halbinsel im Kaspischen Meer. Die Lagerstätten auf Zypern befinden sich an der Grenzfläche zwischen dem Sediment und dem Gestein [3]. Die genannten Rohstofflagerstätten werden als aussichtsreich angesehen. Doch sind noch erhebliche Probleme auf dem Gebiet der Prospektion, der Gewinnung und Aufbereitung ungelöst.

#### 3.2 Kupfer in Manganknollen [4]

Nach jüngsten Ermittlungen enthalten die sog. Manganknollen des Zentralpazifiks 12 Milliarden Tonnen Kupfer; das ist etwa das Vierzigfache der Kupfervorkommen der westlichen Welt. Annähernd kugelförmige Mn/Fe-Knollen wurden erstmals während der *Challenger-Expedition* (1873–1876) aus dem Ozean geborgen. Sie galten viele Jahre lang als rein wissenschaftliche Kuriosität. Als man jedoch das massierte Auftreten und die oft hohen Gehalte an Cu, Ni und Co erkannte, richtete sich das Augenmerk auf die Möglichkeit, die Knollen als Rohstoffquelle auszubeuten. Seit etwa 1962 hat deshalb die Manganknollenforschung eine erhebliche Intensivierung erfahren.



Mangankrusten überziehen in den tiefen Teilen der Ozeane meist die anstehenden Felsen und Gerölle. Manganknollen sind aber ebenso häufig auf der Sedimentoberfläche anzutreffen. Ihre Grösse schwankt zwischen der eines Sandkorns und einer Kugel von mehr als 20 cm Durchmesser. Besonders im Pazifik wurde die Mehrzahl der Knollen in Gebieten von rotem Tiefseeton gefunden. Sie bilden oft auf der Sedimentoberfläche ein beinahe lückenloses Pflaster. Dass ausserhalb des Sedimentes noch weitere Lagen auftreten, in denen sich Knollen angereichert haben, wurde durch Knollenfunde in Kernen aus Schwere- und Kolbenloten wahrscheinlich.

Die chemische Zusammensetzung der Manganknollen variiert in den verschiedenen Teilen der Ozeane in weiten Grenzen. Im allgemeinen ist die Zusammensetzung der Manganknollen auf dem Meeresboden aber über viele Quadratkilometer sehr gleichförmig.

Bei der Förderung von Manganknollen aus Wassertiefen von mehr als 4000 m treten grosse Probleme auf, besonders wenn erhebliche Mengen in kurzer Zeit zu gewinnen sind, um den Abbau wirtschaftlich zu gestalten. Unter den heutigen Gegebenheiten lohnt sich die Förderung denn auch noch nicht.

### 3.3 Die Metallvorräte des Meerwassers

Ein Forschungsteam der Universität Sussex ist in bezug auf das Schwinden nichtregenerierbarer Rohstoffe sehr skeptisch. «Man hat geschätzt, dass das Meerwasser einen Vorrat für 1000 Mio Jahre an Natrium, Magnesium, Chlorit und Bromid enthält; einen mehr als 1 Mio Jahre reichenden Vorrat an Schwefel, Borax, Kalium, Molybden, Uran, Zinn und Kobalt, und mehr als 1000 Jahre an Nickel und Kupfer.» Darnach sind die Gesetze des Wachstums lediglich gesetzt «durch die wirtschaftlichen und technologischen Fähigkeiten des Menschen, sich diese Rohstoffvorräte zur Nutzung zu erschliessen». Die Schwierigkeit bei solcher Nutzung ist die ausserordentlich geringe Konzentration der genannten Stoffe.

## 4. Neue Methoden zur Aufspürung von Erzvorkommen

Schürfungen des Bodens zur Entdeckung neuer Erzvorkommen sind aufwendig und zeitraubend. Die Wissenschaft sucht deshalb nach weiteren Methoden. Solche sind die «Biogeochemie» und das «Remote sensing».

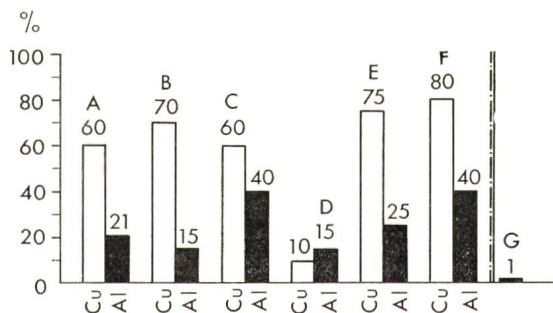


Fig. 1 Rückgewinnungsanteil in % des Metalleinsatzes

A Durchschnitt  
B Bauwesen  
C Transporte  
D Metallwaren  
E Maschinenbau  
F Elektrotechnik  
G Verpackung

### 4.1 Biogeochemie [6]

Diese Bezeichnung wurde einem neuen Fachgebiet gegeben, das sich mit den Beziehungen zwischen Botanik und Geologie des Untergrundes beschäftigt. Ihre Techniken werden beim Suchen nach verborgenen Erzlagern benutzt, indem man Metallsuren-Analysen von Bäumen und anderer Vegetation macht. So fand man bei Untersuchungen einen deutlichen Unterschied im Metallgehalt von Bäumen, die über einem reich mineralisierten Gebiet und einem Gebiet ohne nennenswerte Mineralisation wuchsen.

Beispielsweise wurden im Gebiet der Britania Mining and Smelting Company in der Asche von Bäumen Werte für Kupfer von 210 bis 34 560 ppm gefunden. Werte über etwa 2000 ppm werden als hoch bezeichnet. Hohe Werte geben freilich zunächst nur Hinweise auf die oberflächlichen Schichten des Erdreichs, lassen aber vermuten, dass auch tiefere Schichten erzhaltig sind und sich alsdann Schürfungen rechtfertigen. Es leuchtet ein, dass die Asche von Baumabschnitten über die meist grossen Distanzen zu den Laboratorien leichter zu transportieren ist als umfangreiche Bodenproben.

### 4.2 Remote sensing

In den letzten etwa zehn Jahren wurden neue Methoden entwickelt, mittels deren die Erdoberfläche gleichzeitig in verschiedenen Bereichen des elektromagnetischen Spektrums abgetastet wird. Man spricht von «remote sensing», Bestandsaufnahme aus der Luft [7]. Es handelt sich um eine Art Photographie aus der Luft, von Flugzeugen oder von Erdsatelliten aus, mit dem Unterschied zur konventionellen Photographie, dass über den sichtbaren Spektralbereich hinaus elektromagnetische Strahlung aufgenommen und ausgewertet wird. Die so gelieferte Information ist für Fachwissenschaftler verschiedener Richtung von Nutzen. Geologen können eventuelle Bodenschätze nachweisen als Vorarbeit zu späteren Schürfungen. Derartige Fernmessungen sind möglich, weil von der Erdoberfläche, je nach deren Beschaffenheit, spezifische elektromagnetische Strahlungen ausgehen. Die Forschung hat zunächst einmal systematische Untersuchungen zur Identifizierung bekannter Bodenmerkmale anzustellen.

## 5. Recycling

Der Anteil des Kupfer- und Kupferlegierungsschrotts am gesamten Kupferverbrauch ist beträchtlich. Er lag 1972 gesamthaft bei etwa 38 %, für West-Europa allein bei 37,2 %, für USA bei 43,7 %, Kanada 23,3 %, Japan 34,5 % [8]. Davon entfällt etwas weniger als ein Drittel auf raffiniertes Kupfer aus Schrott, etwas über zwei Drittel auf direkten Schrotteinsatz bei Verarbeitungswerken. Ein Teil des Schrotts fällt als Abfall- und als Ausschussmaterial bei der Verarbeitung an, ein Teil am Ende der Lebenszeit kupferhaltiger Objekte wie Energieübertragungsleitungen, elektrische Maschinen und Apparate, Dächer, Wandverkleidungen, Regentraufen (Fig. 1). Ein Teil des gebrauchten Kupfers ist aber örtlich sehr zerstreut und nur unter relativ grossem Arbeitsaufwand zu sammeln. Es ist deshalb anzunehmen, dass der Anteil des Recyclingkupfers in Zeiten des Kupfermangels wachsen wird. Günstig für die Wiedergewinnung ist die sehr geringe Verwitterung des Kupfers.



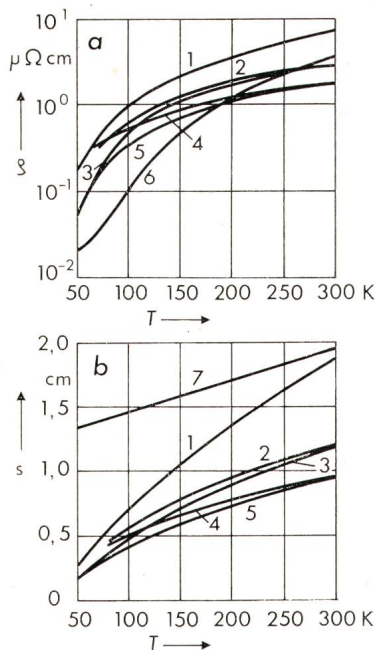


Fig. 2 Spezifischer Widerstand  $\rho$  und Skin-Eindringtiefe  $s$  von Metallen im Temperaturbereich 50...300 K

- |                         |                         |
|-------------------------|-------------------------|
| 1 Nickel, ideal rein    | 5 Kupfer, ideal rein    |
| 2 Aluminium, 99,6 %     | 6 Beryllium, ideal rein |
| 3 Aluminium, ideal rein | 7 Messing               |
| 4 Kupfer, 99,6 %        |                         |

## 6. Technische Massnahmen, die den Kupferbedarf verringern

Alle nachfolgend genannten Massnahmen haben nicht das Sparen von Kupfer als Ausgangspunkt, werden aber hier unter diesem Gesichtspunkt betrachtet.

### 6.1 Anwendung hoher Spannungen

Je höher die elektrische Spannung, desto kleiner ist die Stromstärke, desto kleiner somit der erforderliche Leiterquerschnitt. Die Elektrotechnik verwendet deshalb schon seit langem für jeden Zweck möglichst hohe Spannungen. Die Begrenzung ist für den Niederspannungsbereich gegeben

durch die Berührungsgefährlichkeit, für den Bereich der Hochspannung vor allem durch die Probleme der Isolierung. So sind die Energieübertragungsspannungen nach und nach gewachsen von wenigen kV auf einige hundert kV, ja in neuester Zeit befassen sich diesbezügliche Studien mit Spannungen von mehr als 1000 kV. Die Einsparung an Kupfer an den Übertragungsleitungen ist sehr viel grösser als der Kupferaufwand in den Transformatoren. Der Drang nach hohen Spannungen entstand indes bisher nicht aus der Notwendigkeit, Kupfer seiner schliesslichen Erschöpfung wegen zu sparen, sondern um grosse Energien wirtschaftlich auf grosse Entfernungen übertragen zu können.

### 6.2 Fernheizanlagen mit Speisung durch Kernkraftwerke

Da mit Fernheizanlagen in den einbezogenen Gebieten eine grosse Ausdehnung der elektrischen Raumheizung in kommenden Zeiten des Brennstoffmangels vermieden wird, ist dies eine realistische Lösung, die allerdings die Forderungen der Beleuchtung und der Haushaltsmotoren nicht erfüllt, trotzdem aber mit kleineren Querschnitten der elektrischen Leitungen auskommt.

### 6.3 Örtliche Stromerzeugung

durch Brennstoffzellen-Batterien [9; 10]

Die technische Forschung untersucht zurzeit, inwieweit sich Brennstoffzellen-Anlagen für Leistungen bis etwa 20 MW für die Energieversorgung von Wohnhäusern verwenden lassen. Durch deren Aufstellung in der Nähe der Verbraucher entfallen lange Übertragungsleitungen und Transformatoren. 1967 kam ein Abkommen zwischen der Lieferfirma Pratt & Whitney Aircraft und 28 Firmen der Gasindustrie zustande, in dessen Rahmen eine 12,5-kW-Erdgas-Luft-Brennstoffzellen-Batterie geliefert wurde. Seither stehen Anlagen dieser Art während über 200 000 Betriebsstunden im Einsatz. Vor kurzem kam der Durchbruch zur grosstechnischen Anwendung: Im Rahmen eines 50-Mio-Dollar-Projektes bauten Pratt & Whitney ein 26-MW-Brennstoffzellen-Kraftwerk auf einer Grundfläche von 2000 m<sup>2</sup>, mit einer Bauhöhe von 6 m. Bis 1978 sollen neun weitere Anlagen gebaut werden und bis 1985 liegen provisorische Aufträge für 600 solche Anlagen vor. Als Brennstoff dient Wasserstoff. Brennstoffzellen sind auch in einem Entwicklungsprogramm Japans erwähnt.

Es sei hier darauf hingewiesen, dass Brennstoffzellen für ihre Elektroden Metalle benötigen, die auch nicht ewig verfügbar sein werden, wie Silber, Zirkon, Wolfram (Kamid), Kobalt (Phosphid) und Nickel.

## 7. Die Hoffnung auf Supraleiter

In Diskussionen über das Problem der Elektrotechnik nach dem Versiegen der Kupfervorkommen wird auf die Möglichkeit der Verwendung von Supraleitern hingewiesen. Die Technik der Supraleitung, das heisst der sehr hohen Stromleitung bei sehr tiefen Temperaturen, ist in den letzten Jahren erheblich fortgeschritten und in weiterer rascher Entwicklung. In Betracht kommen unter anderem grosse Magnetspulen, Transformatoren und Generatoren, in einiger Zukunft wohl auch Leitungen grosser Energie.

Die Tabellen IV und V [11] geben Auskunft über die kritischen Temperaturen von supraleitenden Metallen und Verbindungen, also die Temperaturen, über welchen keine

Kritische Felder und kritische Temperaturen von supraleitenden Elementen

Tabelle IV

Element	$T_c$ (°K)	$H_0$ (Oe)
Ti	0,4	100
Ru	0,49	66
Zr	0,55	47
Cd	0,56	30
U	0,6	2000
Os	0,71	65
Zn	0,82	52
Ga	1,1	51
Al	1,2	99
Th	1,37	162
Re	1,7	201
Tl	2,39	171
In	3,4	278
Sn	3,72	309
Hg	4,15	411
Ta	4,4	780
V	5,03	1310
La	5,95	1600
Pb	7,17	803
Nb	9,17	1944



Supraleitung besteht. Dass ein parallel zu einem langen supraleitenden Draht verlaufendes Magnetfeld einer gewissen Stärke die Aufhebung der Supraleitung bewirkt, ist bei deren Anwendungen eine Erschwerung. Die Erzeugung der nötigen tiefen Temperaturen bietet eine wesentliche Komplikation und Verteuerung der Supraleiteranwendung und wird diese im weiten Gebiet der kleinen Apparate und Maschinen wie auch der Beleuchtungstechnik verunmöglichen.

Schon bei Temperaturen weit oberhalb des Sprungpunktes, zwischen etwa 50 und 150 K, sinkt der spezifische Widerstand von Leitermetallen ganz beträchtlich (Fig. 2a) [12], so auch von Kupfer und Aluminium um fast eine Grössenordnung. Metallegierungen zeigen dieses Verhalten in sehr viel geringerem Masse. Von weiterem Einfluss auf den Bedarf an Leitermaterial ist der sehr starke Abfall der Skin-eindringtiefe im Leiter schon weit oberhalb der Sprungtemperatur (Fig. 2b). Die technische und wirtschaftliche Ausführbarkeit und der Energieaufwand für die Kühlung bieten in solchen Temperaturbereichen viel weniger schwere Probleme als bei Temperaturen nahe dem absoluten Nullpunkt. Erwähnenswert ist in diesem Zusammenhang die bei tiefen Temperaturen sehr hohe elektrische Festigkeit der für Hochspannungsisolationen bedeutsam gewordenen Gase [13].

### 8. Leiter und Supraleiter aus Polymeren [14...16]

Organische Polymere werden normalerweise als Isolierstoffe verwendet, weshalb polymere elektrische Leiter eine ungewöhnliche Struktur erwarten lassen. Die ersten elektrisch leitenden Polymere ähnelten dem Graphit, der gerade aufgrund derjenigen Eigenschaften leitet, die ihn für die elektrotechnische Anwendung so unhandlich machen. Neuere Arbeiten haben gezeigt, dass Leitung auch in andern Strukturen vorkommt, die sich leichter plastisch verformen lassen. Einige dieser Strukturen haben bereits eine gewisse industrielle Anwendung gefunden. Wesentliche Verbesserungen in der Herstellung von Polymeren mit metallischer Leitfähigkeit oder gar Supraleitfähigkeit erfordern jedoch ein tieferes Verständnis der Leitungsmechanismen in Polymeren. Die Gitterabstände der meisten organischen Kristalle sind gross, da die Moleküle nur durch die schwachen Van der Waalschen Kräfte zusammengehalten werden. Die deshalb

Kritische Temperaturen von supraleitenden Verbindungen Tabelle V

Nb <sub>3-4</sub> Sn	18,1	Mo Ru	10,0
Al Nb <sub>3</sub>	18,0	Ga <sub>4</sub> Mo	9,8
C <sub>x</sub> N <sub>y</sub> Nb	17,8	Ir <sub>2</sub> Nb <sub>3</sub>	9,8
Si V <sub>3</sub>	17,1	Nb <sub>0,2</sub> Re <sub>0,8</sub>	9,7
Ga V <sub>3</sub>	16,8	Tc <sub>6</sub> Zr	9,7
N <sub>x</sub> Nb <sub>y</sub>	16-11	Rh <sub>0,2</sub> Zr <sub>0,8</sub>	9,6
Mo Tc <sub>3</sub>	15,8	Ga <sub>2</sub> Mo	9,5
Mo Tc	14,7	Nb	9,46
Ga Nb <sub>3</sub>	14,5	C <sub>0,5</sub> Mo <sub>x</sub> V <sub>y</sub>	9,3
Mo Re	12,6	Nb <sub>3</sub> Pt	9,3
Mo N	12,5	C Mo	9,26
Au Nb <sub>3</sub>	11,5	C Nb <sub>2</sub>	9,18
Nb <sub>2</sub> Zr	10,8	N Zr	9,05
Nb Tc <sub>3</sub>	10,5	Re <sub>3</sub> w	9,0
In La <sub>3</sub>	10,4	Bi Pb	8,8
C Nb	10,3		

Wie für reine Metalle gilt auch für diese Verbindungen, dass der Sprungpunkt auch von der Grösse des aufgeprägten und des eigenen Magnetfeldes sowie vom äusseren Druck abhängt.

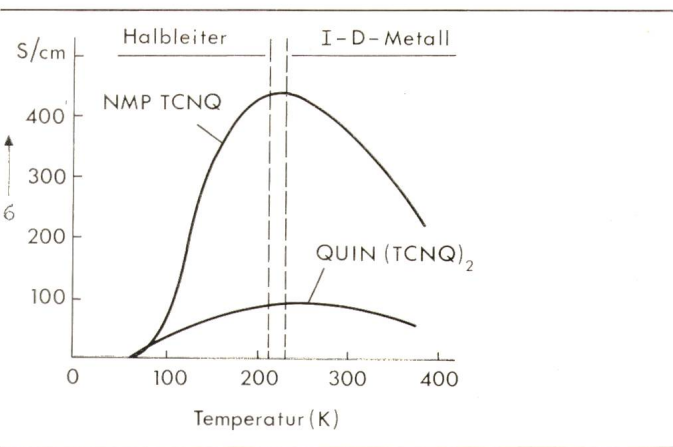


Fig. 3 Abhängigkeit der Leitfähigkeit «metallischer» TCNQ-Salze von der Temperatur [16]

geringe elektrische Kopplung, die den elektrischen Übergang zwischen benachbarten Molekülen erschwert, stellt das Haupthindernis für die Leitung dar. Die Elektronen bewegen sich daher durch thermisch aktiviertes Hüpfen (hopping). Ihre lange Verweilzeit auf den jeweiligen Molekülen ergibt eine entsprechend geringe Beweglichkeit.

Fig. 3 zeigt ein Beispiel für die Abhängigkeit der Leitfähigkeit «metallischer» TCNQ-Salze von der Temperatur. Obwohl diese Salze eine metallische Leitfähigkeit besitzen, unterscheiden sie sich von Metallen, indem sie bei der Abkühlung zum Halbleiter werden. Die höchsten Leitfähigkeiten der TCNQ-Salze mit polymeren Kationen liegen bei 10<sup>-2</sup> S/cm. Sie sind in organischen Lösungsmitteln löslich und bilden spröde Filme. Sie zersetzen sich allmählich an der Luft und verlieren dabei ihre Leitfähigkeit.

Radikalkationen sind ebenfalls elektronische Leiter. Zu ihnen gehören die Polyanilin-Radikationen mit Stapelstrukturen. Sie sind mit dem Anilinschwarz nahe verwandt, das bei sorgfältiger Darstellung eine relativ hohe Leitfähigkeit aufweist und wärmebeständig ist. Auf dieser Grundlage wurde ein Polymer der Leitfähigkeit 5 · 10<sup>-2</sup> S/cm entwickelt, das im Pressverfahren bearbeitbar ist. Man versuchte, es als Batterie-Elektrode zu verwenden.

Das Salz TTF + TCNQ zeigte als Einkristall (Fig. 4) eine stark anisotrope metallische Leitfähigkeit, die von 10<sup>3</sup> S/cm bei Zimmertemperatur auf einen Maximalwert von 1,5 · 10<sup>4</sup> S/cm bei 66 K steigt, den höchsten Wert, der je für organisches Material gefunden wurde. Bei 58 K findet ein Metall-Isolator-Übergang statt.

Vor kurzem ist erstmals bei einem Polymer Supraleitung festgestellt worden. Bei Absenkung der Temperatur bis auf 0,25 K gingen Polyschwefelnitridkristalle schlagartig in den supraleitenden Zustand über [14].

Diese auszugsweisen Notizen aus zahlreichen Anstrengungen der Forschung zeigen, dass man zurzeit noch weit davon entfernt ist, grosse Hoffnungen auf den Ersatz von Kupfer durch organische Stromleiter hegen zu dürfen. Immerhin ist der Anfang eines Weges beschritten. Im Hinblick auf Kupferersatz wären polymere Leiter besonders wertvoll, deren höchste Leitfähigkeit im Gebiet der Zimmertemperatur liegt. Ein Hauptproblem bei der Entwicklung von Polymeren hoher Leitfähigkeit ist die Kombination von Leitfähigkeit, Bearbeitbarkeit und genügenden mechanischen Eigenschaften.



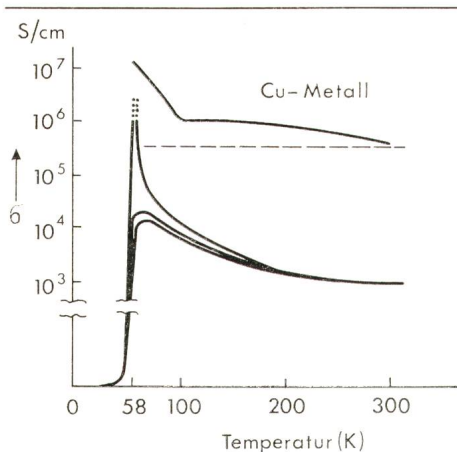


Fig. 4 Metallische Leitfähigkeit von TTF-TCNQ-Salzen als Funktion der Temperatur

### 9. Metallischer Wasserstoff

Mit Hilfe von Höchstdruck erscheint es möglich, aus vertrauten Stoffen neuartige Stoffe herzustellen, die bis anhin unbekannte Eigenschaften aufweisen. Theoretische Untersuchungen haben ergeben, dass die hypothetische metallische Hochdruckphase (3...8 Mbar) des Wasserstoffs ein Hochtemperatur-Supraleiter sein könnte [17]. Der metallische Wasserstoff kann aber nur dann praktische Bedeutung erlangen, wenn er auch bei Lockerung des Druckes während langer Zeit metallisch bleibt. Während alle bisher bekannten Supraleiter ihre hohe elektrische Leitfähigkeit erst in der Nähe des absoluten Temperaturnullpunktes gewinnen und entsprechend aufwendige Kühlmaschinen benötigen, deuten theoretische Überlegungen darauf hin, dass metallischer Wasserstoff, als neues Leichtmetall, schon bei wesentlich höheren Temperaturen supraleitend wäre. Freilich ist zu bedenken, dass die im metastabilen Wasserstoffmetall gespeicherte Energie diejenige des Sprengstoffes Trinitrotoluol weit übersteigt, es sich also um eine höchst gefährliche Substanz handelt.

In den bisherigen Untersuchungen auf diesem Gebiet ist es gelungen, den nötigen Druck zu erreichen. Die Forschung hat mit riesigen Schwierigkeiten zu kämpfen; doch fliessen ihr der grossen Bedeutung wegen (Raumfahrt) in den USA und in Russland die nötigen Mittel zu.

Es sei hier darauf hingewiesen, dass Wasserstoff das häufigste Element im Universum ist und in einem weiten Dichte- und Temperaturbereich existiert. Vieles deutet darauf hin, dass Wasserstoff auch in einem zukünftigen Energiesystem als Ersatz für die natürlichen Kohlenwasserstoffe eine ganz grosse Rolle spielen wird.

### 10. Bodenschätze und Politik

Die Forderung nach einer neuen Weltwirtschaftsordnung, die den spezifischen Problemen der entwicklungsbedürftigen Länder, die heute rund  $\frac{2}{3}$  der Weltbevölkerung repräsentieren, entsprechen und damit ihren Belangen Rechnung tragen soll, zieht sich wie ein roter Faden durch die Kette der internationalen Konferenzen der letzten Zeit. Hierbei stehen die Bodenschätze und insbesondere Fragen der Ausbeutung, des Rechts der Verfügbarkeit über die Rohstoffe, der Preisbildung und der Weiterverarbeitung im Mittelpunkt der Diskussionen.

Die Rohstoffländer haben erkannt, wie sehr die Industrienationen auf Mineralrohstoffe angewiesen und durch eine beeinträchtigte Rohstoffversorgung verwundbar sind. Viele von ihnen haben sich in einer «Gruppe 77» zusammengeschlossen, die bereits auf über 100 Staaten angewachsen ist. Es gehört zu ihrer Strategie, zunächst die ausschliessliche Verfügungsgewalt über ihre Rohstoffe zu bekommen und alsdann eine möglichst gleichgerichtete politische Linie zu fixieren, um ein konformes wirtschaftspolitisches Verhalten zu erreichen.

Für die westlichen Volkswirtschaften geht es nicht allein um Fragen der künftigen Rohstoffversorgung, sondern um die Veränderung der Weltwirtschaftsordnung und damit u. U. sogar um die Begründung einer neuen Weltordnung schlechthin. Offenbar ist in Zukunft mit einem weit höhern Risiko beim Aufschluss und beim Abbau von Lagerstätten in sehr vielen Rohstoffländern zu rechnen. Das kann Verzögerungen im Aufschluss der Lagerstätten mit entsprechender Beeinflussung der Preise bedeuten [18].

In bezug auf die Erzvorkommen der Tiefsee stehen ebenfalls wirtschaftliche und politische Fragen von grosser Bedeutung auf dem Spiel, vor allem deshalb, weil die Natur ihre Schätze ungleichmässig verteilt hat. Für einige Staaten sind die Bodenschätze unter dem Meer viel zugänglicher als für andere, wobei Ausbeutung und Abbau überall dort, wo bisher noch keine Nation Sonderrechte für sich beansprucht hat, gewichtige Fragen aufwerfen. Nur wenige verfügen über die finanziellen und technischen Mittel zur Ausbeutung. Die Lösung solcher Probleme ist im wesentlichen eine politische Angelegenheit und bedarf internationaler Abkommen. Der Meeresbodenausschuss der Vereinten Nationen (Sea Bed Committee) befasst sich damit schon seit acht Jahren. Ein Vorschlag betrifft die Schaffung einer Weltbehörde, bei welcher für alle wissenschaftlichen Expeditionen nach Gebieten ausserhalb der Jurisdiktion einzelner Staaten um eine Genehmigung nachgesucht werden müsste. Zur Bewältigung der vielen wissenschaftlichen Aufgaben gibt es bereits Organisationen: Die zwischenstaatliche ozeanographische Kommission (IOC), den Internationalen Rat der wissenschaftlichen Unionen (ICSU) und das wissenschaftliche Meeresforschungskomitee (SCOR) [5].

### 11. Folgerungen

Wenn es nicht rechtzeitig, d. h. innerhalb etwa eines halben Jahrhunderts, gelingt, das umfangreiche Problem der elektrischen Stromleiter ohne wesentliche Mengen an Kupfer gut zu lösen, so läuft die Elektrotechnik Gefahr, katastrophal zusammenzubrechen. Dies träfe auch viele Sektoren des allgemeinen Maschinenbaues, die stark von der Elektrotechnik abhängen. Die Schwierigkeiten werden noch erhöht durch den Wegfall auch vieler anderer Werkstoffe. Das Vertrauen auf arme Kupfervorkommen erfährt Einbusse durch den Umstand, dass deren Ausbeutung sehr grosse Energiemengen und deren Erzeugung wiederum grosse Mengen Werkstoffe erfordern würde, analog einem Rückkopplungsprozess. Zudem macht die Wissenschaft immer wieder aufmerksam auf die grossen Gefahren, die dem Klima der Erde durch zu grosse Energiemengen drohen.

Es wäre somit an der Zeit, dass sich die einschlägigen Organisationen und Industrien ganz ernsthaft mit den in diesem Aufsatz skizzierten Problemen befassen würden. Das



Thema würde sich durch seine Vielfalt und Bedeutung vorzüglich eignen für ein periodisches internationales Symposium.

## Literatur

- [1] O. H. C. Messner: Hier irrte der Club of Rome. Pro Metall 28(1975)145, S. 4...6.
- [2] W. Gocht: Handbuch der Metallmärkte: Erzvorkommen, Metallgewinnung, Metallverwendung, Preisbildung, Handelsregelungen. Berlin/Heidelberg, Springer-Verlag, 1974.
- [3] E. Bullard: Mineralische Rohstoffe aus der Tiefsee. Endeavour 33(1974)119, S. 80...85.
- [4] J. S. Tooms: Rohstoffe aus dem Meer und ihre Gewinnungsmöglichkeiten. Endeavour 31(1972)114, S. 113...117.
- [5] Forschung und Seerecht. Endeavour 32(1973)116, S. 50.
- [6] H. V. Warren: Biogeochemie in Kanada. Endeavour 31(1972)112, S. 46...49.
- [7] B. H. Grimes und J. Hubbard: Bestandaufnahme der Natur aus der Luft. Endeavour 31(1972)114, S. 130...134.
- [8] M. Diethelm: Recycling – ein altes Kreislaufelement der Kupferwirtschaft in aktuell gesamtwirtschaftlicher Betrachtung. Pro Metall 28(1975)145, S. 7...9.
- [9] A. Imhof: Elektrochemische Brennstoffzellen. STZ 71(1974)15/16, S. 287...290.

- [10] R. A. Haefler: 26-Megawatt-Kraftwerk aus elektrochemischen Brennstoffzellen. NZZ Beilage Forschung und Technik 195(1974)484 vom 6. Nov., S. 73.
- [11] A. Imhof: Anwendung der Supraleitung in der Elektrotechnik. STZ 59(1962)19, S. 389...399.
- [12] D. Peier: Untersuchung von Durchschlagsvorgängen in flüssigem Stickstoff bei hohen Spannungen. Dissertation der Technischen Universität Braunschweig, 1975.
- [13] A. Imhof: Tieftemperatur-Hochspannungsisolierung – eine Anregung. STZ 66(1969)13, S. 237...245.
- [14] Supraleitfähigkeit in Polymeren entdeckt. Bull. SEV/VSE 66(1975)22, S. 1272.
- [15] E. P. Goodings: Leiter und Supraleiter aus Polymeren. Endeavour 34(1975)123, S. 123...130.
- [16] F. Gasser: Hochleitfähige organische Verbindungen. STZ 72(1975)11, S. 225.
- [17] T. Schneider: Metallischer Wasserstoff. NZZ Beilage Forschung und Technik 195(1974)231 vom 20. Mai, S. 21...22.
- [18] G. Florin: Die rohstoffpolitische Diskussion auf Ebene der Vereinten Nationen und ihr Einfluss auf die internationale Rohstoffwirtschaft. Erzmetall 28(1975)11, S. 530...553.

## Adresse des Autors

Prof. Dr. Ing. h. c. Alfred Imhof, Winzerstrasse 113, 8049 Zürich.

## Literatur – Bibliographie

DK: 621.315.61

SEV-Nr. A 493

**Die Isolierstoffe der Elektrotechnik.** Von Curt Brinkmann. Berlin/Heidelberg/New York, Springer-Verlag, 1975, 8°, 437 S. 213 Fig. Preis: gb. DM 128.–.

Obwohl in den letzten Jahren eine Reihe von Büchern über die Isolierstoffe der Elektrotechnik erschienen sind, schliesst dieses Buch in vielerlei Hinsicht eine Lücke, nicht zuletzt deshalb, weil die Literatur über die neueren Isolierstoffe in zahlreichen Fachzeitschriften verstreut ist, die sich der auf diesem Fachgebiet Tätige erst mühsam zusammensuchen muss.

Inhaltlich ist der Stoff so gegliedert, dass einleitend die Grundlagen, wie der Aufbau der Isolierstoffe, deren mechanisches und elektrisches Verhalten, das Verhalten in der Wärme und gegen chemische Einwirkungen, ferner der Einfluss von Stabilisatoren, Weichmachern und Füllstoffen kurz behandelt werden.

Die Isolierstoffe selbst sind in die beiden grossen Gruppen anorganische und organische Isolierstoffe eingeteilt; zur ersten Gruppe gehören die schon länger bekannten «klassischen» Isolierstoffe, zur zweiten vor allem die Thermoplaste, Duromere und Elastomere. Praktisch alle gegenwärtig zur Verfügung stehenden Isolierstoffe von Bedeutung, insbesondere auch die neueren mit erhöhter Wärmebeständigkeit, sind aufgeführt. Es wird jeweils kurz die chemische Struktur, dann eingehender die Herstellung, Verarbeitung und die Werkstoffeigenschaften behandelt, die bei den letzteren durch eine grosse Anzahl von Tabellen und Diagrammen über die mechanischen, elektrischen oder wärmetechnischen Eigenschaften vervollständigt sind. Auch die Einsatzgebiete werden mit zahlreichen praktischen Anwendungsbeispielen, die durch viele Abbildungen ergänzt sind, ausführlich besprochen. Häufig werden auch Angaben über die Strahlenbeständigkeit gemacht. Für die Prüfmethode sind in der Regel die VDE-Bestimmungen oder die DIN-Normen zugrunde gelegt.

Das Buch wendet sich in erster Linie an Elektroingenieure, Elektrotechniker oder Konstrukteure, die praktisch alles, was sie über Isolierstoffe wissen müssen, in gedrängter und übersichtlicher Form in diesem Buch finden. Aber auch der in der Industrie tätige Physiker und der Entwicklungingenieur, die mit Kunststoffproblemen und -anwendungen konfrontiert sind, werden aus ihm erheblichen Gewinn ziehen. Ebenso ist es für den jungen Chemiker oder den Studenten, der sich beruflich mit Isolierstoffen zu beschäftigen gedenkt, eine wertvolle Einführung.

Zu begrüssen ist, dass für die Bezeichnung der Isolierstoffe konsequent die chemische Bezeichnung mit den entsprechenden

Kurzzeichen und nicht die teilweise irreführenden Handelsnamen verwendet werden. Sehr wertvoll ist auch für denjenigen Leser, der näher in die Materie eindringen will, das ausführliche Schrifttumsverzeichnis mit über zweihundert Literaturstellen.

E. Müller

DK 621.316.1

SEV-Nr. A 492 Bd. 1/4

**Les réseaux d'énergie électrique.** Par René Pélissier. 4 volumes. Paris, Dunod, 1971/1976; 8°, 256/316/278/272 p., fig. Prix: broché ffrs. 478.–.

Un réseau électrique est un système multidisciplinaire d'une grande complexité, dont la mission essentielle est de transporter, répartir et distribuer l'énergie électrique économiquement en respectant de sévères contraintes techniques. Il est donc nécessaire de considérer simultanément les aspects techniques et économiques posés par l'exploitation ou la planification des réseaux électriques. C'est dans cette double optique que l'auteur a rédigé cet ouvrage en quatre volumes.

Le premier tome traite principalement des questions qui se rattachent à la qualité du service rendu par un réseau aux consommateurs qu'il dessert. Le deuxième tome aborde les méthodes de calculs nécessaires à l'exploitation à court et à long terme des ensembles interconnectés, et expose les diverses méthodes de réglage. Le troisième tome est consacré aux problèmes d'architecture des réseaux et aux problèmes technico-économiques posés par la planification à long terme. Le quatrième tome traite du problème plus spécifique de la propagation des ondes électriques sur les lignes en régimes permanents et transitoires.

Destiné à l'origine aux étudiants des écoles supérieures, cet ouvrage déborde largement le cadre éducatif et s'adresse également aux ingénieurs responsables des réseaux. Fort de sa vaste expérience à l'échelle mondiale, l'auteur conserve le souci constant d'analyser et de comparer des réseaux réels, et de quantifier systématiquement les diverses grandeurs des équations et des schémas.

Même si l'on relève parfois un manque de rigueur dans certaines définitions de base et quelques erreurs typographiques, cet ouvrage complet et synthétique devrait figurer dans la bibliothèque de chaque ingénieur responsable de la planification ou de l'exploitation des réseaux électriques. On peut regretter toutefois que son coût élevé ne soit pas à la portée de la bourse de la plupart des étudiants.

P.-A. Chamorel