

Das Wesen des elektrischen Leitungsstromes

Autor(en): **Hübner, Roland**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Pionier : Zeitschrift für die Übermittlungstruppen**

Band (Jahr): **42 (1969)**

Heft 5

PDF erstellt am: **29.06.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-561519>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern. Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Das Wesen des elektrischen Leitungsstromes

Fortsetzung «Das freie Elektron»

Verbinden wir die Pole einer Batterie über einen Kupferdraht mit einer Glühlampe, so stellen wir fest, dass diese leuchtet. Wir schliessen daraus, dass der elektrische Strom die Ursache dieses Leuchtens ist.

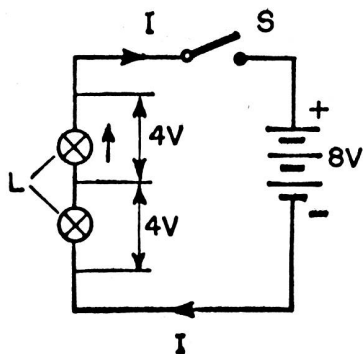


Fig. 1 Elektrischer Stromkreis. Beim Schliessen des Schalters S fliesst der Leitungsstrom I und bringt die Glühlämpchen L zum Leuchten.

Wie entsteht dieser Strom und woraus besteht er?

Die Antwort holen wir uns aus den Erkenntnissen, die uns die moderne Atomphysik vermittelt hat. Wir haben bereits erfahren, wie ein freies Elektron entsteht. In den metallischen Leitern sind die Elektronen der äusseren Schale sehr locker an ihr Atom gebunden. Dies gilt auch für das Element Kupfer, das in weitestem Masse als Stromleiter verwendet wird. Kupfer (Cu) hat die Ordnungszahl $Z=29$, besitzt also 29 Protonen und dementsprechend 29 Elektronen, sein Atomgewicht beträgt 63,57. Von den 29 Elektronen laufen 28 auf inneren Bahnen (Elektronenschale) und zwar 2 auf der ersten, also der dem Kern nächsten, 8 auf der zweiten und 18 auf der dritten. Diese Bahnen sind, entsprechend der magischen Vorschrift im Atom ($2 \cdot 1, 2 \cdot 2^2, 2 \cdot 3^2 \dots$) vollbesetzt, sie sind fest an das Atom gebunden. Ein einziges Elektron befindet sich auf der vierten, der äussersten Schale, die somit nur schwach besetzt ist. Dementsprechend ist dieses Hüllelektron nur locker an den Kern gebunden. Es hat die Aufgabe, die Bindungen zu den Nachbaratomen des Kristallgitters herzustellen; denn alle Festkörper besitzen einen Kristallaufbau. Dieses eine Elektron steht für die Stromleitung zur Verfügung, es lässt sich leicht aus seinem Verband abspalten. Dies gelingt, wie wir gehört haben, durch Erwärmung, elektrische Feldstärken oder Anlegen eines elektrischen Potentials an den Leiter. Dieses Elektron wird dann zu einem freien- oder Leitungselektron. Diese Leitungselektronen sind zwischen den einzelnen Atomen bzw. Atomresten frei beweglich. Alle bewegen sich mit der gleichen Geschwindigkeit.

Um einen Begriff zu geben, wie es in bezug auf die Zahl und Anordnung dieser Elektronen in einem elektrischen Leiter aussieht, seien einige Zahlen angegeben:

In 1 cm^3 Kupferleiter befinden sich nicht weniger als 10^{23} Atome und somit auch 10^{23} freie Leitungselektronen. Die Zahl entspricht ungefähr einer Ladung von 16 000 Coulomb oder 5 Ah.

Im Augenblick, da wir die Batterie (nach Fig. 1) einschalten, werden die im negativen Pol der Batterie angesammelten Elektronen in den Leiter hineingedrückt, während auf der anderen Seite, am positiven Pol, entsprechende Anziehungskräfte wirken, welche die Leitungselektronen zum + Pol hinziehen. Als Folge ergibt sich ein von — nach + fließender elektrischer Strom¹⁾. So steht es in den meisten Schulbüchern.

Diese Darstellung ist jedoch zu stark vereinfacht. In Wirklichkeit sind die Vorgänge im Leiter weit komplexer. Die Natur macht uns eben nicht den Gefallen, alle ihre Geheimnisse wie auf einem Präsentierbrett offen darzulegen. Wir müssen diese durch intensive Forschung erst erkämpfen und entschleiern. Nicht immer gelingt dies vollständig. Auch nicht beim elektrischen Strom. Aber unser Wissen ist doch durch die moderne Physik wesentlich grösser geworden.

Wir haben vorhin die riesige Zahl von Elektronen bestaunt, die es bereits in einem winzigen Leiterstück gibt. Es ist daher anzunehmen, dass die Elektronen dicht gedrängt und dicht gepackt in relativ geringem Abstand voneinander, nebeneinander und hintereinander im Leiter liegen.

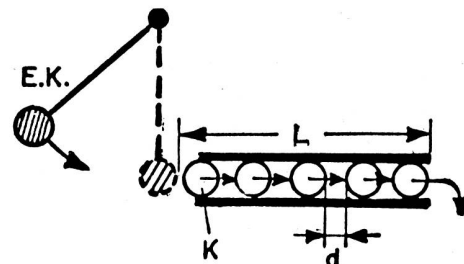


Fig. 2 Prinzip der Fortbewegung der Elektronen in einem Leiter, dargestellt an Glaskugeln in einem Rohr von der Länge L. Beim Anstossen der ersten Kugel K durch das Pendel E.K. wird dessen Energieimpuls bis zur letzten Kugel weitergeleitet, wobei sich aber jede einzelne Kugel nur um eine minimale Strecke d weiterbewegt.

Man kann sich den Vorgang an dem Beispiel der «Glaskugeln» besser vergegenwärtigen. Wir reihen (nach Fig. 2) einige Glaskugeln hintereinander, in nur geringem Abstand «d» voneinander, in einem Rohr auf. Ein kurzer Anstoss der ersten Kugel genügt, um zu erreichen, dass, fast zur gleichen Zeit, die letzte Kugel aus dem Rohr fällt. Während des Zusammenstosses der Kugeln brauchte jede einzelne nur den Weg «d» zurückzulegen, der im Verhältnis zur Rohrlänge sehr gering ist. Es war die Impulsenergie der Pendelkugel, die der ersten Kugel vermittelt wurde und die fortlaufend bis zur letzten weitergegehen wurde. Ähnlich stellt man sich den Vorgang mit den Leitungselektronen vor. Ein Elektron des negativen Pols der Batterie stösst das erste Leitungselektron an. Dieses bewegt sich im «Schneckentempo» von $v < 1 \text{ mm/s}$ zum nächsten Elektron und gibt diesem den Impuls weiter und so fort,

¹⁾ Nach einer früheren Bezeichnungsweise wird die Stromrichtung von + nach — angegeben; diese ist heute überholt.

bis ans Leitungsende. Dies geht aber äusserst rasch vor sich, denn die Elektronen liegen ja sehr dicht beieinander. Die Impulsgeschwindigkeit erreicht dabei 20 000 km/s bis nahezu Lichtgeschwindigkeit. Es ist also keineswegs das Elektron selbst, das etwa von einem Ende des Leiters zum andern rasen müsste, sondern lediglich sein Impuls.

Der elektrische Strom ist somit nichts anderes als ein über die Leitungselektronen übertragener Leitungsimpuls! Der Einfachheit halber spricht man in der Praxis einfach vom «Fliesen von Elektronen» oder kurz vom «elektrischen Strom». Ob diese «Impulstheorie» der Wirklichkeit entspricht, darüber gibt es, wie überall im Atomgeschehen, keine völlige Sicherheit. Es existieren auch andere Theorien, wie zum Beispiel jene, welche den Elektronenstrom mit einem gleichzeitigen Photonenstrom im Leiter in Verbindung bringt. Wir wollen jedoch auf diese Hypothesen nicht weiter eingehen.

Mit Hilfe der Maxwell'schen Gleichungen¹⁾ lässt sich «der Impuls dem elektrischen Feld im Leiter gleichsetzen, das durch gegenseitige Beeinflussung der Elektronen zustande kommt». Nach Maxwell ist somit «der elektrische Strom lediglich eine wandernde elektromagnetische Feldstörung. Die Elektronen werden durch das elektrische Feld in Bewegung gesetzt.»

Die Ursache des elektrischen Stromes ist stets ein Spannungsunterschied zwischen den Leitungsenden, der die Bewegung der Elektronen und den Impuls veranlasst (Fig. 3).

Die ihres Hüllelektrons beraubten Leiteratome werden zu positiv geladenen Atomresten, «Ionen». Die Atomkerne selbst bleiben im festen Leiter während des gesamten Elektronenflusses in Ruhe. Auf ihrem Weg stossen die Elektronen mit den Atomresten des Kristallgitters zusammen und werden abgebremst. Sie müssen dabei einen Widerstand überwinden. Die hierbei zu vollbringende Leistung setzt sich in Wärme um. Die Elektronenkonzentration und die freie Weglänge des Elektrons hängen von der Art des betreffenden Elements, das heisst vom Material des Leiters ab. Als Leitermaterial dienen zum Beispiel Cu, Al, Fe und Ag. Der spezifische Widerstand ρ bestimmt die Leitfähigkeit des Leiters. Er wird gemessen in $\Omega \text{ mm}^2/\text{m}$. Die Zahl der Elektronen im Leiter ist unabhängig von der Temperatur, dagegen ist ihre Aktivität eine Funktion der Temperatur. Bei normaler Zimmertemperatur (ca. 20 °C) besitzen die metallischen Leiter einen sehr geringen Widerstand; zum Beispiel beträgt der spez. Widerstand für Kupfer nur 0,0175. Daher können sich die Elektronen relativ ungehemmt bewegen und der Leiter erwärmt sich kaum. Erst dann, wenn wir die Spannung an dem Leiter über das zulässige Mass hinaus erhöhen und dadurch eine grössere Zahl freier Elektronen in Bewegung setzen, oder bei gleichbleibender Spannung, den für einen zulässigen Strom bemessenen Leiterquerschnitt stark reduzieren, beginnt ein allgemeines Stossen und Drängen der Elektronen im Leiter. Als Folge erwärmt sich dieser. Die Erwärmung kann soweit gehen, dass der Leiter glühend wird und durchschmilzt, ein Vorgang, der sich beispielsweise in den Schmelzsicherungen, bei Kurzschluss im Stromkreis, abspielt. Für eine im Rohr verlegte Cu-Leitung von beispielsweise 2,5 mm² Querschnitt (mit $\rho = 0,0175 \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$) ist ein Strom von maximal 15 A

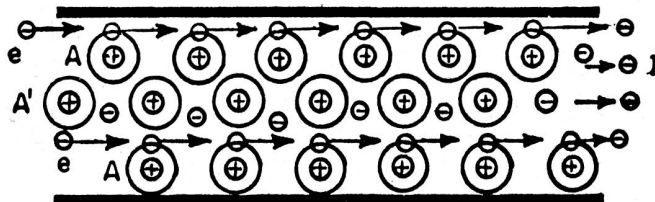


Fig. 3

Prinzipdarstellung des Vorganges der Stromleitung I in einem Leiter. Die freien Elektronen e bewegen sich zwischen den Atomen A und Atomresten A' des Leitermaterials, und zwar nur um ein ganz kurzes Stück. Sie geben dabei ihren Energieimpuls an das nächste Elektron weiter.

dauernd zulässig. Dabei tritt noch keine merkbare Erwärmung des Leiters auf, seine Elektronen können sich noch hinreichend frei bewegen. Erst bei 20 A, ein Wert für den dann normalerweise die Sicherung bemessen wird, tritt eine fühlbare Erwärmung des Leiters ein.

Weitere bemerkenswerte Eigenschaften der Leitungselektronen

Schicken wir einen elektrischen Strom durch einen Draht, so baut sich um den Leiter ein Magnetfeld auf (Fig. 4). Dies ist erklärlich, denn wir wissen, dass jedes sich bewegende Elektron von einem Magnetfeld begleitet ist.

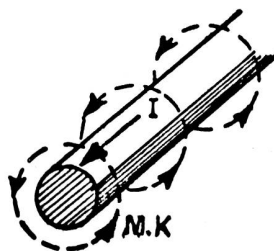


Fig. 4

Magnetische Kraftlinien M.K., die um einen stromdurchflossenen Leiter entstehen.

Wickelt man einen Draht zu einer Spule und schickt Strom hindurch, so entsteht auch hierbei ein Magnetfeld, das proportional zur Windungszahl wächst (Fig. 5). Man nutzt dieses Phänomen in allen elektromagnetischen Geräten aus, wie Relais, Schützen, Türöffner, Klingel, Dämmerungsschalter, Lichtschranken, Ölfeuerwächter, die mit Transistoren oder Kaltkathodenröhren ausgestattet sind.

Bringen wir ein Elektron in ein elektrisches Feld, zum Beispiel zwischen die Platten eines Kondensators, so wird auf das Elektron eine Kraft ausgeübt, welche das Elektron beschleunigt. Es folgt dieser Kraft wie ein zur Erde fallender Stein der Gravitation. Schicken wir das Elektron durch ein Magnetfeld, so treten jetzt zwei Kräfte in Wechselwirkung. Das Magnetfeld und das Feld des Elektrons. Es entsteht eine Kraft senkrecht zu den Kraftlinien und zur Bewegungsrichtung des

¹⁾ Von Maxwell, englischer Physiker (1831—1879), aufgestellt, entsprechend seiner Theorie, nach der das Licht eine «elektromagnetische Wellenbewegung» ist. Anstelle der früheren Annahme eines Äthers treten jetzt ebenso undefinierbare «Felder».

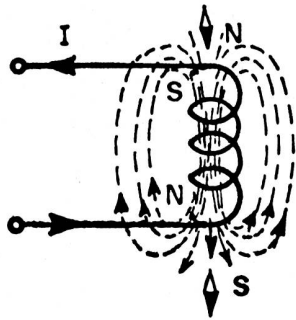


Fig. 5
Um einen zu einer Spule gewundenen Leiter entstehen bei Stromdurchfluss I, ähnlich dem Feld eines Stabmagneten, magnetische Kraftlinien mit ausgeprägtem Nord- und Südpol.

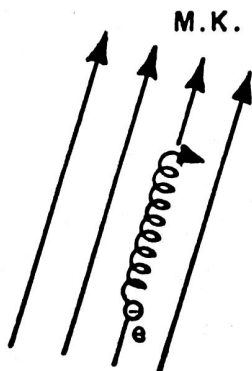


Fig. 6
Ein Elektron erfährt in einem Magnetfeld M.K. eine Ablenkung, die sich zu einer Spiralbewegung auswirkt.

Elektrons und als Folge eine Spiralbewegung (Fig. 6). Die Schlussfolgerung, welche 1823 der Däne Oersted, die Franzosen Ampère, Biot und Savart und der Engländer Faraday daraus zogen war die: «Wenn ein von einem Elektronenstrom durchflossener Leiter einem Magnetfeld ausgesetzt wird, so erfährt er eine Kraftwirkung». Ordnet man solche Leiter auf einem zylindrischen Rotor an und schickt durch sie einen elektrischen Strom, dann baut sich um den Leiter ein magnetisches Feld auf. Es entstehen somit zwei Felder, jenes des Ankers und das des Rotors, die einander beeinflussen; denn gleichnamige Pole stossen sich ab. Durch diese Magnetkräfte wird ein Drehmoment auf die Leiter ausgeübt, so dass der Rotor in Drehung versetzt wird und an der Welle des Motors mechanische Energie abgenommen werden kann. Der Elektromotor war geboren worden. Nach diesem Prinzip arbeiten alle unsere Elektromotoren; auch der Lautsprecher im Radioapparat macht sich diese Eigenschaft zunutze.

Bewegen wir einen stromlosen Leiter in einem Magnetfeld so entstehen auch hier wieder zwei Felder, die aufeinander Kräfte ausüben, denn auch die im Leiter befindlichen Elektronen, die jetzt lediglich mechanisch mit dem Leiter bewegt werden, entwickeln ein Magnetfeld. Wenn wir den Leiter dabei kurzschliessen, bewirken diese beiden Kräfte ein Fliesen der Elektronen im Leiter. Hierauf beruht das dynamo-

elektrische Prinzip, nach dem unsere elektrischen Stromerzeuger, die Generatoren oder Dynamomaschinen arbeiten (Fig. 7).

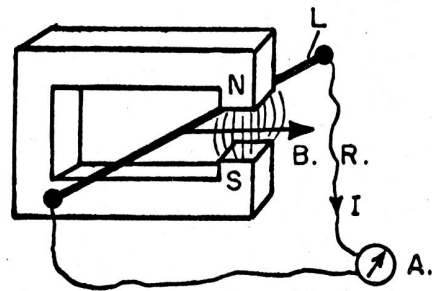


Fig. 7
Dynamoprincip: Bewegung eines Leiters in einem Magnetfeld B.R. verursacht im Leiter das Fliesen eines elektrischen Stromes I.

Leiter und Nichtleiter

Stoffe, in denen sich die Elektronen leicht bewegen können, heissen Leiter. Zu den Leitern sind fast alle Metalle zu zählen. Sie sind dadurch gekennzeichnet, dass bei ihnen die Elektronen der äusseren Schale nur sehr locker an den Kern gebunden sind. Die Atome sind durch eine Wolke freier Elektronen miteinander verbunden. Der Widerstand den die Metallionen der Elektronenwanderung entgegensetzen hängt vom Leitermaterial (Element) ab, er wird ausgedrückt durch den spezifischen Widerstand ρ oder die Leitfähigkeit γ . Anhaltspunkte bezüglich ρ und γ vermittelt die folgende Tabelle:

Stoff (Element)		ρ (Ω mm ² /m)	γ (m/ Ω mm ²)
Silber	Ag	0,016	61
Kupfer	Cu	0,017	58
Aluminium	Al	0,028	35,7
Gold	Au	0,1	10
Eisen	Fe	0,21	4,8

Mit steigender Temperatur nimmt die Leitfähigkeit ab. Das ist erklärlich, denn durch die bei Erwärmung hervorgerufenen starken thermischen Schwingungen der Moleküle und Atomreste des Kristallgitters wird die fortschreitende Bewegung der Elektronen in Stromrichtung gehemmt, der Widerstand des Leiters vergrössert. Bei den meisten Metallen nimmt der Widerstand mit steigender Temperatur durchschnittlich um 0,4 %/°C zu.

Nichtleiter oder Isolatoren sind Körper, in denen eine Elektronenbewegung (bei Zimmertemperatur) nur schwer möglich ist. Man findet Nichtleiter bei festen Materialien wie Glas, Porzellan, Bernstein, — bei flüssigen wie destilliertes Wasser, Öl, — und bei gasförmigen, zum Beispiel trockene Luft. 100 %ige Nichtleiter konnte man allerdings noch nirgends in

Buchbesprechung

den Natur entdecken. Bei den Nichtleitern sind die Elektronen so fest an den Atomverband gefesselt, dass fast keine freien Elektronen gebildet werden können. Je fester die Bindung der Elektronen der äusseren Schale ist, um so geringer ist die Leitfähigkeit des betreffenden Stoffes, denn es sind dann nur wenig freie Elektronen im Stoff verfügbar. Erwärmt man Nichtleiter, so kann man eine geringe Leitfähigkeit erreichen, denn dann befreit man durch die Energiezufuhr einige Elektronen. Im Gegensatz zu den Metallen nimmt daher die Leitfähigkeit mit steigender Erwärmung zu.

Zwischen den Leitern und Isolatoren sind die Halbleiter einzuordnen, zu denen vor allem die Kristalle wie Germanium und Silizium zu zählen sind. Im Gegensatz zu den Metallen, bei denen für den elektrischen Stromtransport etwa 10^{22} Elektronen pro cm^3 zur Verfügung stehen, ist der ideale Halbleiter zunächst bei sehr tiefen Temperaturen ein Isolator. Sämtliche Elektronen der äusseren Schale werden für die Bindung im Kristallgitter verwendet und sind daher für einen Stromtransport nicht frei. Erst durch Einfügen (Dotieren) von Fremdatomen, z. B. Antimon, mit einem überzähligen Elektron in der Hülle, gelingt eine bestimmte Stromleitung, welche die Grundlage der Halbleiterfunktion bildet. Die Vorgänge sind natürlich weit komplexer, es würde hier zu weit gehen, näher hierauf einzutreten. Die Halbleitertechnik ist eine Wissenschaft für sich. Eine noch sehr junge Wissenschaft, die im Begriffe ist in sämtliche Gebiete der Elektronik einzudringen. Angefangen von den Halbleiterdioden, den Transistoren und ihren verschiedenen Abwandlungen bis zu den steuerbaren Si-Thyristoren beherrschen heute die Halbleiter fast das gesamte Feld der Technik.

Roland Hübner

(Auszugsweise aus dem im Verlag Orell Füssli in Vorbereitung befindlichen Buch «Licht und Materie-Rätsel und Wunder» von R. Hübner.)

World Radio-TV Handbook

Aus der Fülle der jeweils auf Jahresbeginn erscheinenden technischen Publikationen sei an dieser Stelle einmal ein fremdsprachiges Werk der Leserschaft näher gebracht. Seit Jahren bemüht sich die World Radio-Television Handbook Co. Ltd., Hellerup, Dänemark, mit Erfolg, ihren Lesern alljährlich ein umfassendes Nachschlagewerk über Rundfunk und Fernsehen zu schaffen, ein Werk, dessen Vollständigkeit in der Welt wohl einzigartig dasteht.

Die Ausgabe 1969 des «World Radio-TV Handbook» liegt nun vor. Von ihr kann gesagt werden, dass sie die vorangehenden Publikationen an Vollständigkeit und Genauigkeit noch weit übertrifft. In dem rund 350 Seiten umfassenden Lexikon (es gibt leider keine deutsche Übersetzung dieser englischen Ausgabe) findet der interessierte Leser eine derartige Vielfalt an Information, dass hier aus Platzgründen mit einer unvollständigen Aufzählung Vorlieb genommen werden muss. Der Hauptteil des Buches besteht aus einer Zusammenstellung aller Rundfunkstationen, gegliedert nach Erdteilen und Ländern. Dass das Schweizer Radio nun auch auf 192,0 m in einer Stärke von 160 kW sendet, dass sich die Ryukyu-Inseln alle 15 oder 30 Minuten mit dem Satz «Ryukyu hoso desu» auf 1250 kHz melden, dass das Pausenzeichen von Radio Warschau einer Etüde von Chopin entnommen wurde und dass der Schweizerische Kurzwellendienst täglich halbstündige Sendungen in Arabisch ausstrahlt, dies sind einige wenige Kostproben aus diesem sorgfältig redigierten, übersichtlichen und ungefähr 200 Seiten umfassenden Teil.

Etwas weniger umfangreich wirkt der TV-Teil, doch können auch ihm erstaunlich viele Einzelheiten entnommen werden. Nebst einer übersichtlichen Zusammenstellung aller TV-Systeme der Erde sind hier Kanäle, Senderstärken, Adressen der Fernsehgesellschaften systematisch gegliedert zu finden. Dass beispielsweise eine Fernsehkonzession in Italien 12 000 Lire kostet und dass der Sender Izuhara (Japan) auf Kanal 5 mit einer Stärke von 300 W sendet, findet man ebenso leicht wie die Anzahl der Fernseh-Konzessionäre in der Schweiz.

Sehr wertvoll sind die zahlreich eingestreuten Tabellen, von welchen hier nur einige genannt werden können: Eine Zusammenstellung aller Kurzwellen-Stationen der Welt nach ihren Frequenzen geordnet, eine Liste von Adressen bekannter DX-Clubs, verschiedene geographische Karten, eine Weltzeit-Tabelle mit Karte sowie eine Übersicht über die günstigsten Empfangsverhältnisse verschiedener Regionen machen dieses Handbuch zu einer wahren Fundgrube für den Kurzwellen- und TV-Freund.

Der auf den ersten Blick als hoch erscheinende Preis (DM 19.50 bis zum Ablauf der Subskriptionsfrist, DM 23.50 bei Bestellungen nach dem 15. Februar) wird sich für den Radio- und Fernsehfreund im Laufe dieses Jahres gewiss bezahlt machen, vermag doch das World Radio-TV Handbook ein gerissenes und lehrreiches Hobby weit schöner und lebendiger auszugestalten.

Peter Herzog

Bezugsquelle: Fritz Büttner, Zeppelinstrasse 61, D-732 Göppingen (Deutschland).