Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 51 (1960)

Heft: 24

Rubrik: Mitteilungen SEV

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: 14.07.2025

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

Ein Analogie-Rechengerät für die Bestimmung der Erzeugungs- und Verteilungskosten bei veränderlicher Belastung in einem elektrischen Netz

681.14.001.57 : 621.311.161.017

[Nach *K. W. Wardrop:* An Analogue Computer to evaluate the Cost of Changes in Power on a Power System. Proc. IEE, Part A, Power Engineering, Bd. 106(1959), Nr. 28, S. 285...289]

1. *Einleitung*

In einem elektrischen Netz mit vermaschten Übertragungsleitungen und mehreren einspeisenden Kraftwerken ist es wichtig, die Belastungsverteilung auf die verschiedenen Netzteile zu kennen und vor allem so steuern zu können, dass:

a) der Ausfall an Energieerzeugung möglichst verringert wird,

b) keine Anlageteile überlastet werden,

c) die Spannung in allen Teilen des Netzes in den vorgeschriebenen Grenzen gehalten wird,

d) die Gesamtkosten für die Erzeugung und Verteilung der Energie auf ein Minimum reduziert werden.

Die Aufgabe d) und weitere (siehe Abschnitt 4, Anwendungsmöglichkeiten des Gerätes) können mit dem hier beschriebenen Analogie-Rechengerät leicht gelöst werden.

2. *Aufbau des Gerätes (Netzmodell)*

Das wirkliche Netz wird im Netzmodell folgendermassen abgebildet (Fig. 1a):

Die Übertragungsleitungen werden je durch drei Teilwiderstände dargestellt, deren Summe proportional zur Impedanz (Z_n) der Leitung ist. In den Punkten, welche den wirklichen Einspeisestellen (Kraftwerke) und Abgabestellen (Verbraucher) entsprechen, werden dem Netzmodell Wechselströme zugeführt bzw. entzogen und deren Wert, proportional zu der wirklichen Leistung, mit den variablen Widerständen R eingestellt.

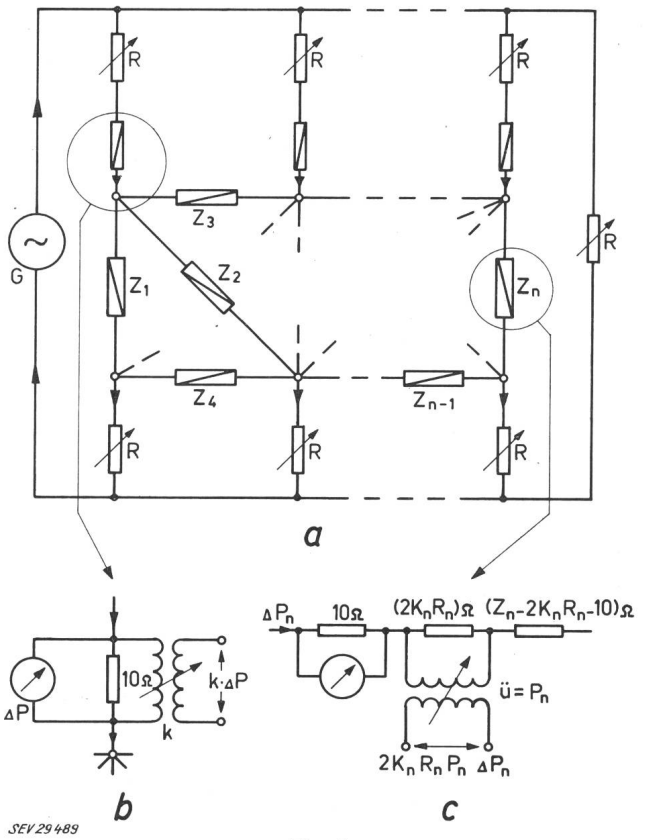

Fig. 1
Netzmodell

a Netzwerk
G Speisung des Netzmodelles; R variable Widerstände für die Einstellung der Belastung der Einspeise- bzw. Abgabestellen; $Z_1 ... Z_n$ Leitungsimpedanzen nach Detailskizze Fig. 1c

b Element des Netzmodelles zur Bestimmung der Erzeugungskosten (Erläuterung im Text)

c Darstelung einer Leitung im Netzmodell (Erläuterung im Text)

3. *Wirkungsweise des Rechengerätes*

a) Bestimmung der Erzeugungskosten

Die Produktionskosten pro Leistungseinheit $k = f(P)$ sind von der Belastung für thermische Kraftwerke stark und für hydraulische praktisch nicht abhängig. Nimmt die Erzeugung eines Kraftwerkes um ΔP zu, so erhöhen sich auch die Erzeugungskosten um $k \cdot \Delta P$. Das Produkt $k \cdot \Delta P$ erhält man im Rechengerät als Ausgangsspannung eines Transformators mit einstellbarer Übersetzung k, wenn deren Primärspannung ΔP beträgt (Fig. 1b).

b) Bestimmung der Übertragungskosten

Bei Änderung der Belastung der Einspeise- bzw. Abgabestellen erfolgt eine Änderung der Lastverteilung auf den Übertragungsleitungen und damit eine Variation der Verlustleistung.

Um die grundlegende Funktion zu erklären, betrachte man nur die Leitung n. Die Verlustleistung P_{vn} bei Belastung P_n beträgt:

$$P_{vn} = K_n P_n^2 R_n = \frac{P_n^2}{U^2} \cdot \frac{R_n}{\cos^2\varphi}$$

Hierin bedeuten:

R_n der Ohmsche Widerstand pro Phase der Leitung n;

$K_n = \dfrac{1}{U^2 \cos^2\varphi}$ ein von Spannung und Leistungsfaktor abhängiger Faktor.

Die Belastung P_n variierte um ΔP_n. Somit ist die Variation der Verlustleistung:

$$\Delta P_{vn} = K_n R_n [(P_n + \Delta P_n)^2 - P_n^2] = \\ = K_n R_n [2P_n \cdot \Delta P_n + (\Delta P_n)^2]$$

Wenn ΔP_n relativ klein ist, kann $(\Delta P_n)^2$ vernachlässigt werden.

$$\Delta P_{vn} = 2K_n R_n P_n \cdot \Delta P_n$$

Die Impedanz Z_n der Leitung im Netzmodell besteht aus drei in Serie geschalteten Widerständen (Fig. 1c). Am ersten Widerstand, z. B. 10 Ω, kann der Strom ΔP_n durch Messung des entstehenden Spannungsabfalles ermittelt werden. Über den zweiten Widerstand, (2 $K_n R_n$) Ω, ist ein Transformator mit einstellbarem Übersetzungsverhältnis ge-

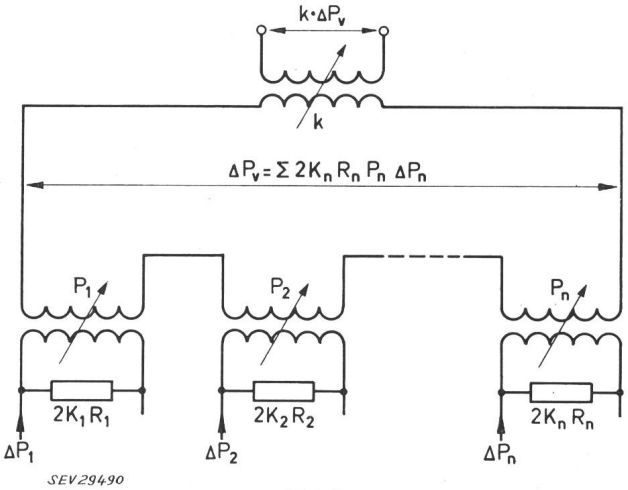

Fig. 2
Schaltung für die Ermittlung der Änderung der Übertragungskosten
Erläuterung im Text

schaltet. Fliesst ein Strom ΔP_n durch die Widerstände und wird die Übersetzung des Transformators gleich P_n eingestellt, so erhält man an der Sekundärseite desselben eine Spannung, welche die Zunahme der Verlustleistung auf der Leitung n darstellt.

Untersucht man nun ein bestimmtes Netz, so bekommt man die von der Belastungsänderung an den Einspeise- bzw. Abgabestellen hervorgerufene totale Änderung der Übertragungsverlustkosten als Ausgangsspannung eines Transformators mit einstellbarer Übersetzung k, wenn die Eingangsspannung gleich der Summe der Spannungen $2 K_n R_n P_n \cdot \Delta P_n$ ist (Fig. 2):

$$k \cdot \Delta P_v = k \left(\sum 2 K_n R_n P_n \cdot \Delta P_n\right)$$

4. Anwendungsmöglichkeiten des Rechengerätes

Durch passende Einstellung und Zusammenschaltung der Rechengeräteelemente können folgende Aufgaben gelöst werden:

— Ermittlung der Veränderungen der gesamten Erzeugungs- und Verteilungskosten, welche durch einen Erzeugungs- oder Belastungsortwechsel bzw. eine Erzeugungs- oder Belastungsänderung hervorgerufen werden.

— Bestimmung der Energiekosten an jedem Standort des Netzes, sofern dieselben an einem bestimmten Ort bekannt sind.

— Bestimmung der Belastungsverteilung auf dem Netz für jede gegebene Belastung der Einspeise- und Abgabestellen oder unmittelbar nach der Zu- oder Abschaltung einer Leitung.

— Bestimmung der Übertragungsverluste für jeden Belastungszustand des Netzes.

— Bestimmung des von $(\Delta P_n)^2$ abhängigen Gliedes der Übertragungsverluste (siehe Abschnitt 3b, Bestimmung der Übertragungskosten).

Bemerkung des Referenten:

Die Messgenauigkeit des beschriebenen Netzmodells verringert sich, wenn das Verhältnis Wirkwiderstand durch Blindwiderstand für die abgebildeten Leitungen verschieden ist.

F. Piffaretti

Kurznachrichten über die Atomenergie

621.039.4

[Nach: Atomwirtschaft Bd. 5(1960), Nr. 10 und Pressemitteilung der IAEO]

Nach einer Schätzung werden in den USA bis 1970 etwa 7700 MW in Atomkraftwerken installiert. Diese Zahl soll bis 1980 auf 38 900 MW erhöht werden. In diesem Zusammenhang sei erwähnt, dass die gesamte Energieerzeugung der USA aus Kernspaltung bis Ende 1959 etwa 0,46 TWh [1]) betrug. Die installierte Leistung von 70 MW Ende 1959 wurde 1960 auf etwa 360 MW erhöht.

Die Mitgliedstaaten der Internationalen Atomenergieorganisation (IAEO) verpflichteten sich freiwillig zur Zahlung von Beiträgen in einer Höhe von total 1 000 000 Dollar.

Es wurden u. a. folgende Beiträge zugesichert:

USA	750 000 Dollar
Grossbritannien	140 000 Dollar
Canada	52 020 Dollar
Bundesrepublik Deutschland	50 000 Dollar
Brasilien	30 000 Dollar
Italien	30 000 Dollar
Japan	25 000 Dollar
Indien	25 000 Dollar
Australien	20 000 Dollar
Schweden	20 000 Dollar
Niederlande	15 000 Dollar
Südafrikanische Union	15 000 Dollar
Schweiz	11 628 Dollar
Dänemark	10 080 Dollar
Mexiko	7 500 Dollar
Finnland	6 000 Dollar
Pakistan	6 000 Dollar
China	5 000 Dollar
Jugoslawien	5 000 Dollar
Österreich	5 000 Dollar
Portugal	3 500 Dollar
Irak	3 000 Dollar
Korea	3 000 Dollar
Philippinen	3 000 Dollar
Griechenland	2 500 Dollar
Israel	2 222 Dollar
Ceylon	2 100 Dollar
Monaco	2 000 Dollar
Vereinigte Arabische Republik	5 000 ägyptische Pfund

[1]) 1 TWh (Terawattstunde) = 10^{12} Wh = 10^6 MWh.

Mali und Senegal wurden als Mitgliedstaaten in die IAEO aufgenommen.

Auf Anregung Polens sollte die IAEO eine Resolution über die Einstellung von Kernwaffenversuchen fassen. Die IAEO hat nun nach eingehender Debatte die Resolution nicht angenommen, da dieses Problem «vor anderen und geeigneteren Fora» behandelt wird.

An einem von der IAEO in Prag veranstalteten Symposium auf dem Gebiet der heissen Chemie (Chemie hochangeregter Atome) nahmen mehr als 170 Fachleute aus 25 Ländern teil. Es wurden 90 wissenschaftliche Arbeiten erörtert. Aus diesen ergab sich, dass die heisse Chemie bei der industriellen Erzeugung von Radioisotopen mit hoher spezifischer Aktivität, sowie als Verfahren zur Markierung von Verbindungen in der Öl-, Brennstoff- und Lebensmitteltechnik nützliche Dienste zu leisten vermag.

Schi.

Die Aufdeckung von Kernexplosionen

623.454.92

[Nach *J. Carson Mark:* The Detection of Nuclear Explosions. Nucleonics Bd. 17(1959), Nr. 8, S. 64...73]

Eine internationale Konferenz in Genf befasste sich bekanntlich mit dem Problem der Aufdeckung von Kernexplosionen im Zusammenhang mit der Kontrolle der Atomwaffen. In ihrem Schlussbericht empfiehlt sie die Aufstellung von 160...170 Überwachungsstationen auf Festland und Inseln und von 10 Schiffstationen. Die mittlere Entfernung zwischen Überwachungsstellen sollte etwa 1700 km auf Kontinenten betragen, 1000 km in erdbebenreichen Gegenden und 2500...3000 km auf den Ozeanen. Damit dürften Kernexplosionen bis 1 kt herunter mit einer guten Wahrscheinlichkeit aufdeckbar sein.

Der Verfasser ist jedoch nicht so optimistisch. Im folgenden wird die Durchführbarkeit und wahrscheinliche Zuverlässigkeit der verschiedenen vorgeschlagenen oder denkbaren Aufdeckungsmethoden untersucht, und zwar mit Berücksichtigung des Explosionsortes: (unterirdisch, unter Wasser, auf oder wenig über der Erdoberfläche, in der oberen Atmosphäre oder im Weltraum).

Tabelle I gibt einen Überblick über die in Frage kommenden Eigenschaften einer Kernexplosion und, soweit heute bekannt, ihre Nutzbarkeit für Aufdeckungszwecke.

Kernexplosionen in einem Umkreis von 400 km können gehört und gesehen werden, so dass ihre Feststellung kein Problem stellt. Die Ausarbeitung von Methoden, die Kernexplosionen aus grosser Entfernung nicht nur zuverlässig melden, sondern diese auch von Nicht-Kernexplosionen oder Naturerscheinungen eindeutig unterscheiden, stösst aber auf grosse Schwierigkeiten.

Das Hauptmerkmal einer Kernexplosion ist die ungeheure, in einer höchst kurzen Zeit freiwerdende Energiemenge, welche die umgebenden Materialien auf eine sehr hohe Anfangstemperatur bringt. Der Hauptvorgang vollzieht sich innerhalb 10^{-7} s mit Temperaturen von einigen Hunderten bis einigen Tausenden eV (1 eV = 11 600 K°). Die Gamma-Strahlen entstehen weniger beim eigentlichen Fissionsvorgang, da diese vom Fissionsmaterial meist absorbiert werden, als durch die Nachwirkung des Neutronenstromes im umgebenden Material und die Verschleuderung radioaktiver Teilchen in die äusseren Schichten. Die Menge dieser Neutronen und Gamma-Strahlen hängt natürlich von der Grösse und Bauart der Bombe und der umgebenden Materialien ab und ändert sich innerhalb weiter Grenzen.

Die zerstreuten Teilchen bleiben lange radioaktiv und liefern einen sicheren Nachweis der Explosion, soweit sie erhältlich und nicht zu sehr aufgeteilt oder mit radioaktiven Stoffen aus anderen Quellen vermischt sind (10^{-12} des Gesamt-

Verfügbare Methoden zur Aufdeckung von Kernexplosionen

Tabelle I

Explosionsort	Radioaktive Abfälle	Luftakustik	Hydroakustik	Seismisch	E-M-Wellen	Sichtbares Licht	Röntgenstrahlen	Neutronen γ-Strahlen
Unterirdisch	×			×				
Unter Wasser	×		×	×				
Erdoberfläche	×	×		?	×	?	?	
niedere Atmosphäre								
obere Atmosphäre (> 17 000 m)	?	?			×	×	×	×
Weltraum					?	?	×	×
Nützlichkeitsbegrenzungen	wenn unterirdisch, Prüfung an Ort und Stelle notwendig	periodische Windstürme	Erdbebenhintergrund	Schwere natürliche Hintergrundstörungen		Periodische Wolkendecke; Dämpfung in der Luft (wenn niedrig)	können abgeschirmt werden	flauen in der Zeit ab (niedrige Intensität)

gewichtes genügt). Thermonukleare Explosionen erzeugen auch radioaktive Abfälle; sogar die sog. «saubere» Bombe erhält 5 % ihrer Gesamtenergie aus Fission.

Weitere Erscheinungen in der Umgebung einer Kernexplosion sind die hohen Drücke und die grossen Materialgeschwindigkeiten, die eine Welle im umgebenden Medium, sei es Erde, Wasser oder Luft, auslösen, welche zunächst als Stosswelle wandert und schliesslich in eine Tonwelle übergeht und sich weiter fortpflanzt. All diese Erscheinungen können prinzipiell zur Aufdeckung der Explosionen verwendet werden.

Bei Untergrundexplosionen bestehen radioaktive Abfälle eine sehr lange Zeit als Nachweis, aber nur an Ort und Stelle in einem Umkreis von einigen zehn Metern. Bei Tiefwasserexplosionen erscheinen radioaktive Abfälle bald auf der Oberfläche. Diese werden aber durch die Strömungen zerstreut, so dass ihre Verwendung zur Aufdeckung der Explosion höchstens in den folgenden 10 Tagen möglich ist. Bei Explosionen auf und wenig über der Erdoberfläche bleiben die Wirkungen eindeutig und sehr lange feststellbar und die entstehende radioaktive Wolke kann von 3000...5000 km wandern und nach 5...6 Tagen noch festgestellt werden. Bei Explosionen über 10 000 m Höhe ist die Aufdeckung durch radioaktive Abfälle vorläufig noch fraglich, denn es ist heute immer noch nicht bekannt, inwieweit Materieaustausch zwischen Luftschichten auf dieser Höhe stattfindet.

Akustische Signale sind brauchbar bei Explosionen zwischen Erdoberfläche und 50 km Höhe in einer Entfernung von 500 km gegen den Wind und 2000...3000 km in der Richtung der Höhenwinde und gestatten ausserdem die Feststellung des Explosionsortes mit einer Genauigkeit von 100 km mit den Angaben von 3 Beobachtungsstellen.

Bei hydroakustischen und seismischen Methoden liegt die Schwierigkeit weniger in der Aufnahme der Signale als in deren Identifizierung und Unterscheidung von natürlichen Erdbeben.

Kernexplosionen verursachen auch starke elektromagnetische Wellen, die in einer Entfernung von Tausenden von km immer noch Feldstärken von einigen Hundertsteln V/m aufweisen. Wie sie entstehen, ist heute noch nicht eindeutig abgeklärt. Es gibt aber viele andere «atmosphärische» Radiostörungen, die die Unterscheidung erschweren. Als Bestätigung und Ergänzung anderer Methoden dürfte jedoch der Empfang dieser elektromagnetischen Signale gute Dienste leisten.

Aus dem sichtbaren Licht der Explosionen, den thermischen Röntgenstrahlen, den Gammastrahlen, dem Neutronenfluss und vielleicht noch aus anderen Erscheinungen lassen sich prinzipiell auch Aufdeckungsmethoden entwickeln.

P. H. Matthey

Nachrichten- und Hochfrequenztechnik — Télécommunications et haute fréquence

Zum Problem der optimalen Gestaltung der Nyquistflanke beim Fernsehen

621.397.018.782.4

[Nach *K. Bernath:* Ein systemtheoretischer Beitrag zum Problem der optimalen Gestaltung der Nyquistflanke beim Fernsehen. Techn. Mitt. PTT Bd. 38(1960), Nr. 4, S. 113...117]

Das beim Fernsehen zwecks Frequenzbandeinsparung angewandte Restseitenband-Übertragungsverfahren nach *Nyquist* weist gegenüber der gewöhnlichen Amplitudenmodulationsübertragung einige Nachteile auf. Neben den systembedingten Modulationsverzerrungen, auf die hier nicht näher eingegangen wird, sind es vor allem die apparativ bedingten Gruppenlaufzeitverzerrungen, welche die Bildgüte beeinträchtigen können. Diese hängen stark von den Selektionseigenschaften des Empfängers ab. Normale Heimgeräte weisen im Zwischenfrequenzteil meist eine annähernd allpassfreie Netzwerkstruktur auf. Es ist daher nach der Theorie von *Bode* gemäss der Beziehung

$$b(u) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \left[\frac{da(u)}{du} \ln \operatorname{ctg} \frac{|u|}{2} \right] du$$

worin u die normierte Frequenz (logarithmische Einheit),
$a(u)$ der Dämpfungsverlauf [N] und
$b(u)$ der Phasenverlauf [Bogengrade] bedeuten

möglich, zu den systemgegebenen Empfängerdämpfungskurven korrespondierende Phasen- oder auch Gruppenlaufzeitkurven zu berechnen. Von besonderer Bedeutung sind die Laufzeitfehler im Bereich der tiefen bis mittleren Modulationsfrequenzen, die hauptsächlich von der Steilheit der Nyquistflanke und von der Übertragungsbandbreite abhängen. Für Systemvergleiche können die tatsächlichen Dämpfungskurven unbedenklich durch mehrteilige Streckenzüge, die der Rechnung leichter zugänglich sind, ersetzt werden. Die Untersuchungen erstreckten sich über die unten aufgeführten 6 Fernsehsysteme. Die der Rechnung zugrunde gelegten Sperrdämpfungen betrugen Nyquistflankenseitig 40 db, tonträgerseitig 34 db.

Ergebnisse

Eine wichtige Grösse für das Ausmass der Verzerrungen bildet der maximale Gruppenlaufzeitunterschied τ_{max} zwi-

Vergleich verschiedener Fernsehsysteme

Tabelle I

System	Nähere Bezeichnung	Videobandbreite MHz	Nyquistflankenbereich MHz	τ_{max} absolut ns	τ_{max} in Bildpunkteinheiten
A	CCIR-625 Z.-Norm	5	± 0,75	175	1,75
B		5	± 1,125	100	1,0
C		5	± 1,5	30	0,3
D	OIR-Norm	6	± 0,75	194	2,3
E	FCC-Norm (USA)	4	± 0,75	142	1,2
F	Englische Norm	3	± 0,75	90	0,54

schen mittleren und tiefen Modulationsfrequenzen, dessen Wert für die verschiedenen Systeme aus Tabelle I hervorgeht.

Bei gegebenen Sperrdämpfungen und konstanter Steilheit des Dämpfungsanstiegs am tonträgerseitigen Bandende des Zwischenfrequenzkanals lässt sich für jede Bandbreite eine optimale Steilheit der Nyquistflanke angeben, für welche der Laufzeitunterschied zwischen mittleren und tiefen Modulationsfrequenzen annähernd verschwindet. Bei 5 MHz Videobandbreite liegt diese bei etwa ± 1,75 MHz.

Die Ergebnisse experimenteller Untersuchungen stehen mit der Theorie in gutem Einklang. *Arf.*

Die Tunneldiode

621.382.2

[Nach *B. Sklar:* The Tunneldiode — Its Action and Properties. Electronics Bd. 32(1959), Nr. 45, S. 54...57]

Die vor kurzem erfundene Tunneldiode wird in Zukunft für verschiedene Anwendungen dem Transistor vorgezogen werden. Wesentliche Vorteile sind ihre Kleinheit, Zuverlässigkeit, Unempfindlichkeit gegen Strahlungen, grosser Temperaturbereich, hohe Grenzfrequenz und billiger Preis.

Um den Tunneldefekt zu verstehen, ist es nötig, das Energiebanddiagramm Fig. 1 eines Kristalls zu betrachten. Die Elektronen können nur bestimmte Energiezustände aufweisen. Elektrisch sind nur die beiden obersten zulässigen Energiebänder, die als Leitungs- und Valenzband bezeichnet werden, von Bedeutung. Diese Bänder sind von einer verbotenen Zone getrennt. Das Energieniveau, das mit 50 % Wahrscheinlichkeit von einem Elektron besetzt ist, wird E_F genannt (*Fermi*kante).

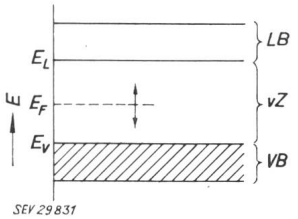

Fig. 1
E Elektronenenergie; *LB* Leitungsband; *vZ* verbotene Zone; *VB* Valenzband
Energiebanddiagramm eines Kristalls

Beim Isolator ist das Valenzband besetzt und das Leitungsband unbesetzt. Der Abstand der beiden Bänder beträgt mehrere Elektronenvolt. Um ein Elektron vom Valenz- in das Leitungsband zu bringen ist daher eine grosse Energie nötig. Die Fermikante liegt in der Mitte der verbotenen Zone.

Beim Leiter ist das Leitungsband teilweise gefüllt und die Fermikante liegt im Leitungsband. Eine sehr kleine Energie genügt zur Trennung eines Elektrons von seinem Atom.

Beim Halbleiter sind die Verhältnisse ähnlich wie beim Isolator, doch ist die verbotene Zone nur noch ca. 1 eV breit. Infolge der thermischen Energie der Elektronen können bereits bei Raumtemperatur einige Elektronen die verbotene

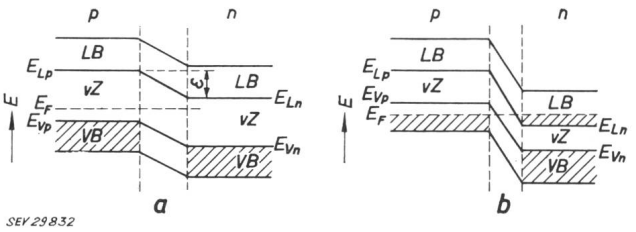

Fig. 2
Energiebanddiagramm eines p-n-Überganges
a leicht dotiert; *b* stark dotiert
ε Potentialschwelle
Weitere Bezeichnungen siehe Fig. 1

Zone überqueren. Man spricht dann von der Generation eines Elektron-Loch-Paares. Das Elektron im Leitungsband und das Loch im Valenzband beteiligen sich am Stromfluss und werden daher als Stromträger bezeichnet.

Werden im Halbleiter Störstellen eingebaut, so erhält man bei Donatorenüberschuss Material des n-Typs, bei Akzeptorenüberschuss Material des p-Typs. Der Abstand zwischen Donatorenenergieband und Leitungsband, sowie zwischen Akzeptorenenergieband und Valenzband ist nur sehr gering. Für den Übertritt von einem Band ins andere sind daher sehr kleine Energiemengen ausreichend.

In Fig. 2a sind die Energiebänder einer pn-Grenzschicht dargestellt. Da die durchschnittliche Elektronenenergie im Gleichgewichtszustand im n- und im p-Material gleich sein muss, ist die Fermikante in beiden Schichten auf gleicher Höhe. In der Grenzschicht entsteht eine Potentialschwelle, welche einem Löcherstrom von links nach rechts und einem Elektronenstrom von rechts nach links entgegenwirkt.

Bei sehr starker Dotierung (für Silizium ca. 10^{20} Atome pro cm^3) degeneriert der Halbleiter. Die Fermikante ist für n-Material im Leitungsband und für p-Material im Valenzband. Für einen pn-Übergang erhält man die in Fig. 2b dargestellten Verhältnisse. Der Tunneleffekt entsteht dadurch, dass bei kleiner Vorspannung Elektronen der n-Schicht in der p-Schicht unbesetzte Energieniveaux gleichen Wertes vorfinden und in diesem Falle die Grenzschicht mit Lichtgeschwindigkeit durchqueren können.

Bei grösserer positiver Vorspannung sind die Leitungselektronen der n-Schicht gegenüber der verbotenen Zone der p-Schicht. Der Tunneleffekt tritt nicht auf und der Strom sinkt stark. Bei noch grösserer Vorspannung erhält man die gleichen Verhältnisse wie bei normalen Dioden.

In Fig. 3 sind vergleichsweise die Charakteristik einer normalen Diode und die einer Tunneldiode gegenübergestellt. Charakteristisch ist der bei der Tunneldiode auftretende Bereich mit negativem Widerstand. In Sperrichtung fliesst bereits bei kleinen Vorspannungen ein grosser Strom.

Das Ersatzschema der Tunneldiode ist im interessierenden Bereich ein negativer Widerstand, dem eine Kapazität parallelgeschaltet ist. In Serie dazu liegt der Zuleitungswiderstand.

Bekanntlich kann ein Element mit negativem Widerstand als Verstärker, Oszillator und vieles andere verwendet werden.

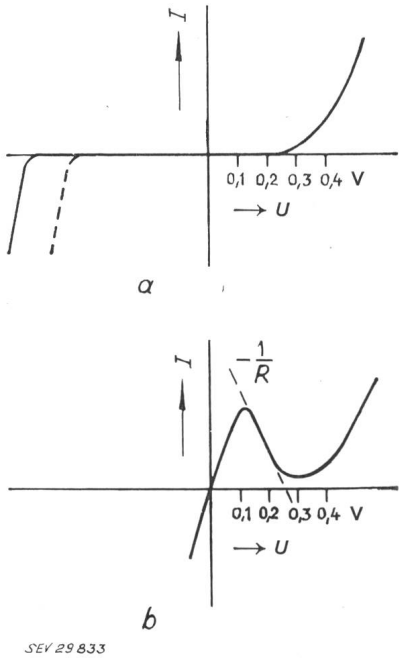

Fig. 3
Diodencharakteristik
a normale Germaniumdiode; *b* Tunneldiode
Die gestrichelte Linie zeigt das Sinken der Durchschlagsspannung bei steigender Störstellenkonzentration

Verstärker mit Tunneldioden haben einen kleinen Rauschfaktor und ein grosses Verstärkungsfaktor-Bandbreite-Produkt.

Zahlreiche Schaltungen wurden bereits mit Erfolg aufgebaut. *T. Brenig*