Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens
Herausgeber: Association suisse des électriciens
Band: 59 (1968)
Heft: 2

Artikel: Informationsübertragung über Mikrowellen
Autor: Eggimann, F.
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1057378

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: 22.08.2025

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

$$F_2 = \frac{\begin{bmatrix} u' & -u'' \\ u'' & u' \end{bmatrix} \cdot \left\{ F_1 - \frac{\Delta}{3\,U_{10}^2} \cdot \begin{bmatrix} (R + p\,X) & X \\ X & -(R + p\,X) \end{bmatrix} \right\} \cdot \begin{bmatrix} u' & -u'' \\ u'' & u' \end{bmatrix}}{1 + \frac{1}{3\,U_{10}^2}\,[(R + p\,X)(G_{Pu} - p\,G_{Qf}) + X\,(G_{Qu} + p\,G_{Pf})] - \frac{\Delta}{9\,U_{10}^4}\,[R^2 + (1 + p^2)\,X^2 + 2\,p\,R\,X]} \qquad \text{(A 98)}$$

worin:

$$\Delta = \mathrm{Det}\,F_1 = p \cdot \mathrm{Det}\,G_1 - P_1\,(G_{Pu} + p\,G_{Qf1}) - Q_1\,(G_{Qu1} - p\,G_{Qu1} - p\,G_{Pf1}) + P_1^2 + Q_1^2 \qquad \text{(A 99)}$$

Literatur

[1] *O. Hess:* Choix des constantes des machines synchrones. Rapport CIGRE No. 135(1952).

[2a] *T. Stein:* Drehzahlregelung der Wasserturbinen. Schweiz. Bauztg. 65(1947)39, S. 531...535, No. 40, S. 543...547 und No. 41, S. 564...568.

[2b] *T. Stein:* Die optimale Regelung von Wasserturbinen. Schweiz. Bauztg. 70(1952)20, S. 287...292.

[2c] *T. Stein:* Einfluss der Selbstregelung auf die Stabilität von Wasserkraftanlagen, Schweiz. Bauztg. 71(1953)10, S. 140...143.

[3a] *E. Gerecke:* Graphische Symbole der Automatik. Neue Technik 2(1960)9, S. 11...35.

[3b] *E. Gerecke:* 8 Anwendungsbeispiele für die graphischen Symbole der Automatik. Neue Technik 3(1961)4, S. 197...225.

[4a] *D. Gaden:* Essai d'un procédé pour caractériser la clientèle d'un réseau selon la variabilité de sa consommation. Bull. SEV 46(1955)2, S. 45...56.

[4b] *D. Gaden:* Rapport existant entre les variations de la charge consommée par la clientèle d'un réseau et les variations de fréquence qui en résultent. Bull. SEV 49(1958)10, S. 439...448.

[4c] *D. Gaden:* Nouveaux résultats d'essais concernant le rapport existant entre les variations de la chargé consommée par la clientèle d'un réseau et les variations de fréquence qui en résultent. Bull. SEV 54(1963)2, S. 37...42.

[4d] *H. Bühler:* Statistische Untersuchung der Netzspannungsschwankungen. Bull. SEV 55(1964)21, S. 1065...1069.

[5] *E. Juillard:* Influence des variations de tension et de fréquence sur la charge absorbée par les consommateurs. Bull. SEV 49(1958)13, S. 570...576.

[6] *T. Laible:* Das Verhalten der Synchronmaschinen, Induktionsmaschinen und Netze bei periodisch schwankender Spannung und Frequenz. Scientia electr. 1(1954)4, S. 129...151.

[7a] *K. Alström* et *A. Garde:* La régulation électro-hydraulique des turbines hydrauliques. Part III: Etude du réseau suédois par analyse de fréquence. Rapport CIGRE No. 315(1950).

[7b] *F. Cahen, B. Favez* et *R. Robert:* La détermination expérimentale du temps de lancer d'un réseau de production et de distribution d'énergie électrique. Rev. gén. Electr. 65(1956)10, S. 571...596.

[8] *G. Kron:* Tensorial Analysis of Integrated Transmission Systems. Part I: The Six Basic Reference Frames. Trans. AIEE 70/II(1951)-, S. 1239...1248.

[9] *T. Laible:* Moderne Methoden zur Behandlung nichtstationärer Vorgänge in elektrischen Maschinen. Bull. SEV 41(1950)14, S. 525...536.

Adresse des Autors:

Th. Laible, Dipl. Ingenieur, Katzenbachstrasse 228, 8052 Zürich.

Informationsübertragung über Mikrowellen

Vortrag, gehalten an der Diskussionsversammlung des SEV vom 20. September 1967 in Zürich,

von *F. Eggimann,* Baden

65.011.56:621.39:621.31

Die Mikrowellen-Richtstrahlübertragung wird kurz mit der Übertragung auf Hochspannungsleitungen verglichen. Der Aufbau eines Gerätes im Blockschema und seine konstruktive Ausführung werden dargestellt; anschliessend wird gezeigt, in welcher Weise die Geräte zu einer Verbindung zusammengeschaltet werden können. Im weiteren werden die Planung einer Richtfunkstrecke und die Eigenschaften des Richtfunkkanals behandelt. Die Zusammenhänge der wichtigsten Parameter auf der Geräteseite (Antenne, Systemwert) und der Ausbreitungsseite (Streckendämpfung, Zusatzdämpfungen, k-Wert, Fresnel-Zone) werden dargestellt. Es wird gezeigt, das sich der Geräuschabstand einer Richtfunkverbindung mit vorgegebener Wahrscheinlichkeit über einem vorgegebenen Wert halten lässt; die kurzen und seltenen Fadingeinbrüche sind auf Änderungen der Ausbreitungsbedingungen in der Troposphäre zurückzuführen. Einige Gedanken zur Sicherstellung der Verbindung bei Geräteausfall werden dargelegt.

Zuletzt zeigen ausgewählte Beispiele, wo der Einsatz von Mikrowellenverbindungen für die Elektrizitätswirtschaft sinnvoll und lohnend sein kann.

La transmission par micro-ondes et faisceau dirigé est rapidement comparée à la transmission sur lignes à haute tension. On représente le montage d'un appareil par un schéma-bloc, ainsi que son exécution constructive, puis on démontre de quelle manière ces appareils peuvent être reliés pour former une connexion. L'auteur relate en outre le projet d'une ligne hertzienne et les propriétés d'un canal de ligne hertzienne. On décrit les paramètres essentiels, d'une part relatifs à l'appareil (antenne, valeur du système), et d'autre part relatifs à la propagation (amortissement sur la ligne, amortissements supplémentaires, valeur-k, zone de Fresnel). On démontre que le rapport signal-bruit d'une liaison hertzienne peut être maintenu avec une probabilité prédéterminée au-dessus d'une valeur prescrite; les brèves et rares apparitions de fading sont imputables à des modifications des conditions de propagation dans la troposphère. Quelques réflexions en vue d'assurer les communications en cas de défection de l'appareil sont également exposées.

Quelques exemples choisis illustrent pour terminer les domaines d'application des transmissions par micro-ondes les mieux appropriés et les plus profitables pour l'économie électrique.

1. Einleitung

Charakteristisches äusseres Merkmal einer Mikrowellenverbindung sind die Antennenspiegel (Fig. 1). Parabolische Reflektoren mit einem Durchmesser von etwa 0,5 bis zu mehreren Metern — bei Satellitenbodenstationen sind Durchmesser von mehr als 25 m üblich — kennzeichnen die Stationen. Sie stehen meist auf Türmen oder anderen exponierten Geländepunkten. Mit diesen Antennengebilden, deren lineare Ausdehnung ein Vielfaches der verwendeten Wellenlänge ist, erzeugt man eine starke Bündelung der ausgestrahlten Energie, liegen doch die Frequenzen im Gebiet über 1 GHz, also bei Wellenlängen unter 30 cm. Aus verschiedenen Gründen, auf die hier nicht eingetreten sei, liegt ein Schwerpunkt heute im Gebiet von 6...8 GHz, entsprechend einer Wellenlänge von rund 4 cm. Die neue Halbleitertechnik ermöglicht in diesem Frequenzgebiet Sende-Empfangsgeräte für Kleinkanalübertragungen (bis 24 Tf-Kanäle) mit einem relativ kleinen Abstand von 1 MHz zwischen den Sende- bzw. Empfangsfrequenzen. Dies erleichtert die Frequenzplanung und auch die behördliche Zuteilung von Betriebsfrequenzen.

2. Vergleich der Eigenschaften von Nachrichtenverbindungen über Hochspannungsleitungen und Mikrowellen

In Tabelle I sind die charakteristischen Unterschiede von Verbindungen über Hochspannungsleitungen und Mikrowellen dargestellt. Die spezifischen Eigenschaften einer Richtfunkverbindung lassen sich etwa folgendermassen zusammenfassen:

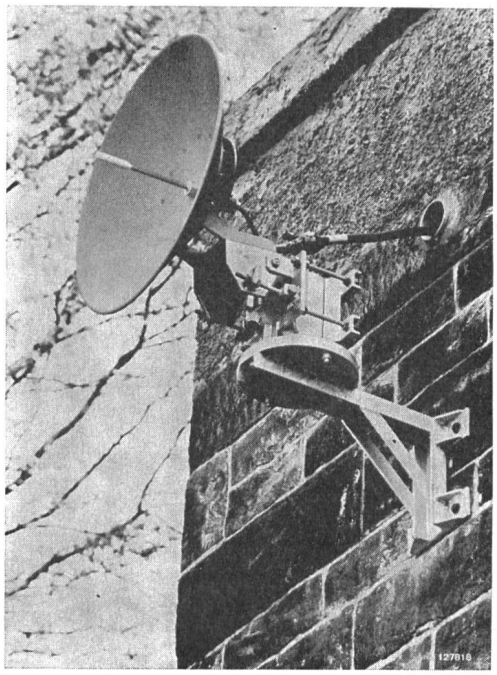


Fig. 1
Mikrowellen-Sendeempfänger mit Antenne
Der parabolische Reflektor ist für eine Frequenz von rund 7 GHz ausgelegt

Die Verbindung ist inhärent breitbandig und erlaubt sehr kurze Laufzeiten, die von der Verbindungslänge nur im Gebiet der Mikrosekunden abhängig sind. Die Streckendämpfung wächst wohl mit grösser werdender Frequenz; dank der bei Mikrowellen mit relativ kleinen Parabolspiegeln erzielbaren grossen Antennengewinne genügen jedoch trotzdem relativ kleine Sendeleistungen. Änderungen der Ausbreitungsbedingungen beruhen hauptsächlich auf Schwankungen der Eigenschaften der Troposphäre und sind von der übertragenen Nachricht völlig unabhängig. Die Qualität einer Verbindung wird von andern, technisch erzeugten Störgeräuschen wie Schaltvorgängen und Zündstörungen praktisch nicht beeinflusst.

3. Aufbau eines Mikrowellensendeempfängers

Fig. 2 zeigt das Blockschema eines modernen Kleinkanalgerätes mit vollständiger Halbleiterbestückung, wie es heute hergestellt und seit einiger Zeit erfolgreich eingesetzt wird [1] [1]).

Das niederfrequente Signal (NF) wird dem Sender im Band von 0,3...108 kHz zugeführt. Die Erzeugung der Sendefrequenz beginnt bei einer Quarzfrequenz von etwa 15 MHz. Das Oszillatorsignal durchläuft den Phasenmodulator, wird verstärkt, in der Frequenz versechsfacht, nochmals verstärkt, in der Frequenz vervierfacht und gelangt dann über einen zweistufigen Mikrowellen-Vervielfacher und ein dreikreisiges Bandfilter zur Antenne. Die erste Stufe des Mikrowellenerzeugers ist ein Verfünffacher mit einer Ausgangsfrequenz von 1,5...2 GHz, die zweite ein Vervierfacher für den Fre-

[1]) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

Vergleich der Nachrichtenübertragung auf Hochspannungsleitungen und Mikrowellen — Tabelle I

Eigenschaft	Hochspannungsleitung	Mikrowellenverbindung
Frequenzband	36 kHz bis $\leqq$ 500 kHz	$>$ 1 GHz
Wellenlänge	8 km bis $\geqq$ 600 m	$<$ 30 cm
HF-Bandbreite	4 kHz	1 MHz
Ausbreitungsgeschwindigkeit	(280...300) · 10^6 m/s Leitung 150 · 10^6 m/s Kabel	300 · 10^6 m/s
Typische Filterlaufzeiten	ms	µs
Modulationsart	ESB — AM	FM, IM
Ursache von Dämpfungsschwankungen	Änderung der Leitungsdaten (Schnee, Eis, Schaltzustand, Kurz- und Erdschlüsse, Zerstörung der Leitung)	Änderung der Ausbreitungsbedingungen in der Troposphäre (variabler Berechnungsindex: Luftfeuchtigkeit, Regen, Temperaturgradient)
Einwirkung auf andere Kommunikationsmittel	möglich, da Leitung als Antenne wirkt	unwahrscheinlich durch starke Bündelung, Beschränkung auf ungefähr Sichtweite
Störungen durch äussere Einwirkungen	möglich, da Leitung als Antenne wirkt; besonders aber durch Vorgänge auf der Hochspannungsseite (Koronageräusch, Trenner, Schalter, Blitz, parallele Leitung)	unwahrscheinlich, da die Energie der Schaltvorgänge im Mikrowellenbereich verschwindend klein ist
Charakteristische Störungen	Schaltvorgänge auf der Leitung (oft in kritischen Augenblicken); Koronageräusch	Zusammenbrüche der Empfangsfeldstärke durch Auslöschungen infolge Änderung der Ausbreitungsbedingungen (unabhängig von der Information)
Erhöhung der Übertragungssicherheit	Hochspannungsleitung an sich mechanisch stabil; Beizug verschiedener 3-Phasensysteme (auf gleichem Mast/getrennte Masten/Netzvermaschung)	Ausnützung geeigneter Diversity-Verfahren (Raum-/Frequenz-Diversity)
Besonderheiten	relativ hohe Sendeleistungen (10...100 W); lange Verbindungen ohne Zwischenverstärker (bis ca. 500 km) möglich; Verbindungsmedium besteht; schnelle Impulsübertragung schwierig	kleine Sendeleistungen (100 mW); Relaisstationen (im Abstand von 50...100 km) notwendig; Verbindung ist gesondert aufzubauen; geeignet zur Übertragung kurzer Impulse (PCM)

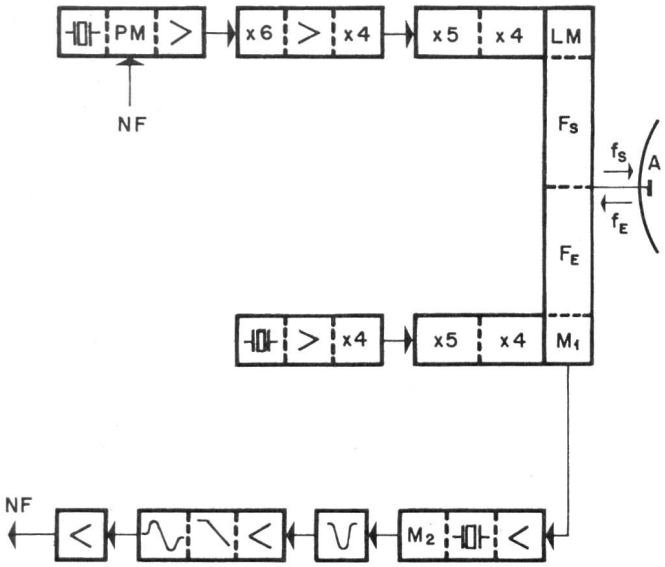


Fig. 2
Blockschema eines Mikrowellen-Sendeempfängers
Die Multiplikationsfaktoren bezeichnen die Frequenzvervielfachung, die im Mikrowellenteil mit Varactordioden bei relativ hohem Wirkungsgrad (50...70 %) vorgenommen wird
NF Niederfrequentes Signal im Band 0,3...108 kHz; *PM* Phasenmodulator; *LM* Leistungsmonitor; F_S Sendefilter; f_s Sendefrequenz; f_E Empfangsfrequenz; F_E Empfangsfilter; M_1, M_2 Mischstufen; *A* Sende-/Empfangsantenne

quenzbereich von 6...8 GHz. Die totale Vervielfachungszahl beträgt somit 480. Auf der Mikrowellenseite ermöglichen sog. Varactordioden mit spannungsabhängiger Kapazitätscharakteristik die Frequenzvervielfachung mit relativ hohem Wirkungsgrad (50...70 %).

Das Empfangssignal gelangt von der Antenne über ein Bandfilter in eine erste Mischstufe, wird dort auf 70 MHz transponiert, verstärkt und in einer zweiten Mischung auf 10,7 MHz umgesetzt. Anschliessend folgt der eigentliche Zwischenfrequenz- und Niederfrequenz-Kanal mit ZF-Bandfilter, Verstärker, Begrenzer, Diskriminator und NF-Verstärker. Der Mikrowellen-Überlagerer-Vervielfacher ist im Prinzip gleich aufgebaut wie der entsprechende Teil im Sender, wobei sich der Quarzoszillator anstelle des Versechsfachers befindet.

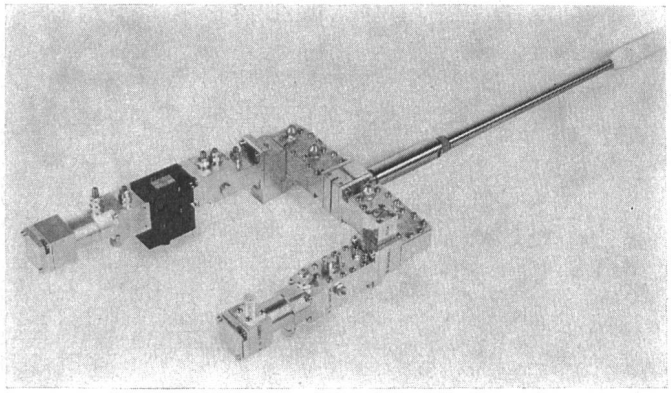


Fig. 3
Konstruktive Ausführung des Mikrowellenteils
Im Sendezweig (*oben*) sind von links nach rechts erkennbar: Verfünffacher, Isolator (schwarz); Vervierfacher, Leistungsmonitor; Sendefilter, Antennenstab.
Die entsprechenden Elemente des Empfangszweiges (*unten*) sind ähnlich ausgebildet

Wichtigste technische Daten eines Mikrowellen-Sendeempfangsgerätes Tabelle II

Frequenzbereich durchstimmbar . . .	6,4...7,4 GHz
Antennenleistung	> 50 mW
Frequenzdrift (—30...+60 °C)	≦ 10^{-5}
Modulationsart	FM
NF-Band	0,3...108 kHz
HF-Kanalabstand	
Parallelkanäle	≧ 1 MHz
Duplexkanäle	≧ 150 MHz
Rauschzahl des Empfängers	≦ 12 dB
Systemwert für 12 Tf-Kanäle	≧ 144 dB
Speiseleistung	
Sendeempfänger allein	< 8 W
mit Speiseteil und Bedienungsteil	< 12 W

Die wichtigsten technischen Daten eines solchen Gerätes sind in Tabelle II festgehalten.

Auffällig ist die geringe Speiseleistung von weniger als 12 W. Die Leistungsaufnahme eines vergleichbaren Gerätes in konventioneller Bauweise mit Klystron-Sender und -Überlagerer ist mit 150...200 W rund 15mal grösser. Das Speise-

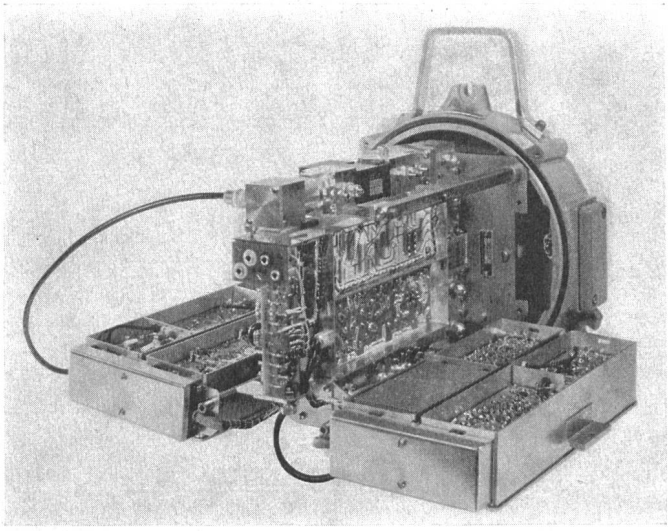


Fig. 4
Aufbau des vollständigen Sendeempfängers

gerät wird deshalb von Fall zu Fall den besonderen Verhältnissen angepasst, da wegen des kleinen Leistungsbedarfes ausser der üblichen Netzspeisung auch andere Stromquellen wie Sonnenzellen, Windgeneratoren, thermoelektrische Generatoren, Brennstoffzellen verwendet werden können.

Die konstruktive Ausführung des zugehörigen Mikrowellenteils zeigt Fig. 3, wobei die Anordnung der Bauelemente längs dem u-förmigen Teil dem Blockschema weitgehend entspricht.

Innerhalb des Mikrowellenteils sind leicht zugänglich die anderen Gerätebausteine untergebracht, so dass eine kompakte, kleine, zuverlässige Einheit entsteht (Fig. 4), welche im Normalfall sehr einfach hinter dem Antennenreflektor montiert werden kann (Fig. 5).

Fig. 5
Vollständiger Mikrowellen-Sendeempfänger mit direkt aufgesetztem Antennenreflektor
Die Montagevorrichtung erlaubt Einstellung der Antennenspiegelachse in jeder Richtung

Selbstverständlich ist die Trennung von Gerät und Antenne möglich, wenn aus betrieblichen Gründen eine leichter zugängliche Anordnung des Sende-Empfangsgerätes erwünscht ist und die Zusatzverluste in der Antennenzuleitung in Kauf genommen werden können.

Neben den technischen Daten interessiert besonders das Verhalten des Gerätes im praktischen Einsatz. Fig. 6 zeigt den Geräuschabstand im niederfrequenten 3,4-kHz-Kanal in Funktion der Übertragungsstrecke bei verschiedenen Kanalzahlen. Bezogen auf eine Übertragungsdistanz von z. B. 50 km (Streckendämpfung 143 dB) und 50 mW Antennenleistung beträgt die Dämpfungsreserve gegenüber der FM-Schwelle unabhängig von der Kanalzahl etwa 25 dB. Diese Dämpfungs- oder Fadingreserve gilt für Antennenspiegel von 70 cm Durchmesser und 7 GHz Sendefrequenz. Bei z. B. doppeltem Antennendurchmesser beidseits steigt die Reserve um 12 dB.

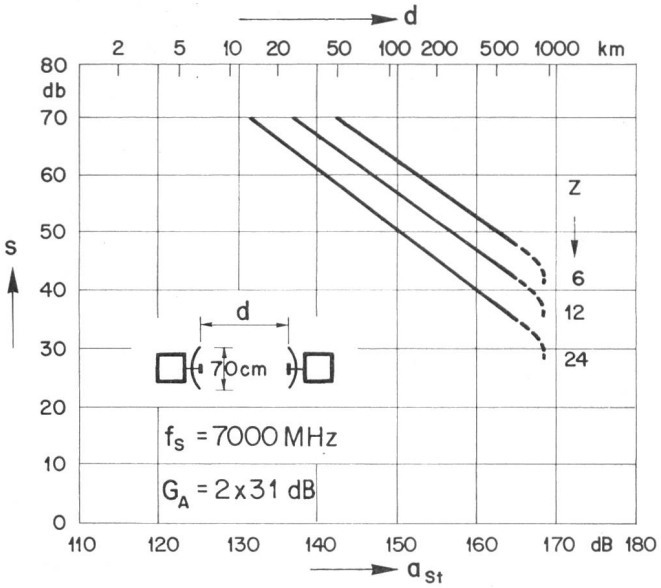


Fig. 6
Geräuschabstand in Funktion der Übertragungsstrecke
s Geräuschabstand im niederfrequenten 3,4-kHz-Kanal; d Übertragungsstrecke; a_{St} Streckendämpfung; Z Kanalzahl; f_S Sendefrequenz; G_A Antennengewinn

4. Aufbau einer Richtstrahlverbindung

Mit den geschilderten Geräten lässt sich auf vielfache Weise eine Verbindung aufbauen. Die Telephoniekanäle werden bei Analogübertragung im Frequenzmultiplex in das Band von 0,3...108 kHz umgesetzt und den Endstellen zugeführt. Im einfachsten Fall genügt je ein Sendeempfangs-Gerät an diesen Endstellen. In den meisten Fällen werden jedoch Relaisstationen benötigt (Fig. 7).

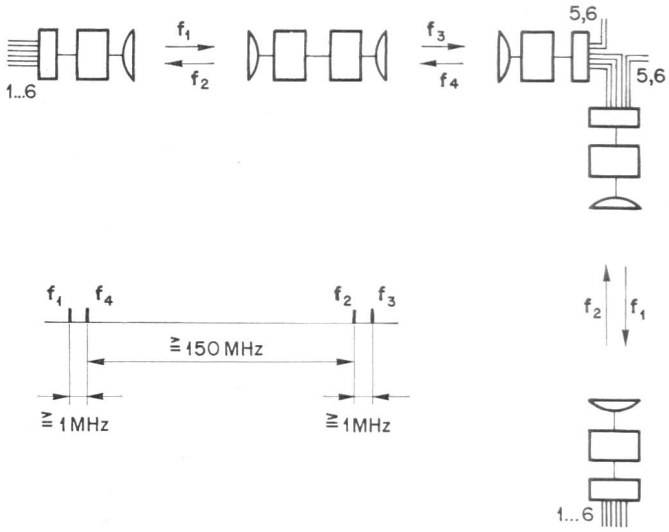


Fig. 7
Aufbau einer Relaisverbindung
Relaisstationen, bestehend aus zwei Sendeempfangs-Geräten, verlängern die Übertragungsstrecke und erlauben die Überwindung topographischer Hindernisse. Bei Bedarf lassen sich bei Relaisstationen einzelne Telephoniekanäle (5,6) abzweigen
$f_1 ... f_4$ minimal erforderliche Frequenzpaare im angegebenen minimalen Frequenzabstand

Für eine Relaisverbindung werden zwei oder mehrere Teilstrecken in Serie geschaltet, indem das demodulierte Empfangssignal den Sender der nachfolgenden Teilstrecke moduliert. Durch eine zwischengeschaltete Mehrkanal-Trägerapparatur können bei Bedarf auch einzelne Telephoniekanäle ein- und ausgeschlauft werden. Für eine Relaiskette sind mindestens zwei Frequenzpaare erforderlich. Die Geräuschleistungen der Teilstrecken addieren sich linear, ähnliches gilt angenähert von den Klirrleistungen. Für drei gleiche Teilstrecken mit einem Geräuschabstand von 50 dB und einem Klirrfaktor von 1 % ergeben sich Werte von 45 dB und 1,7 % für die Gesamtstrecke. Seltener wird es möglich sein, mit passiven Reflektoren auszukommen (Fig. 8).

Als Sonderfall, bei einer sehr kurzen Teilstrecke, ist eine Umlenkung mit zwei Antennenspiegeln möglich, wenn die örtlichen Verhältnisse eine einfache Reflexion nicht zulassen [2].

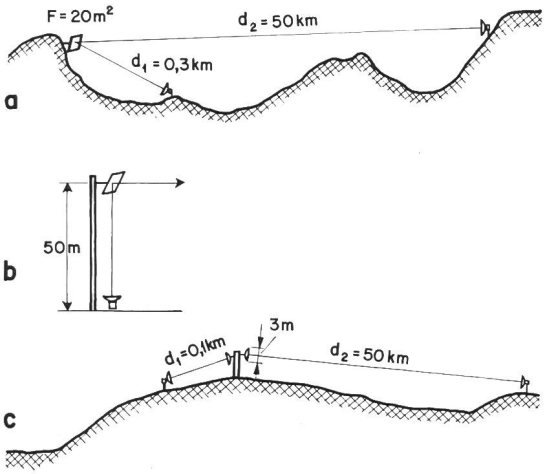


Fig. 8
Passive Reflektoren
Wenn Sichtverbindung zwischen den Endstellen nicht gewährleistet ist, können für kurze Teilstrecken Reflektoren zur Umlenkung des Richtstrahls eingesetzt werden
a Umlenkspiegel im Gelände; *b* Umlenkung mit Reflektor ersetzt die Antennenzuleitung, wenn das Gerät am Antennenfuss untergebracht werden muss; *c* bei sehr kurzer Teilstrecke ist Umlenkung des Strahls mit zwei Antennenspiegeln möglich. Der Dämpfungsverlust auf der Strecke d_1 muss durch den Gewinn der beiden Antennen kompensiert werden

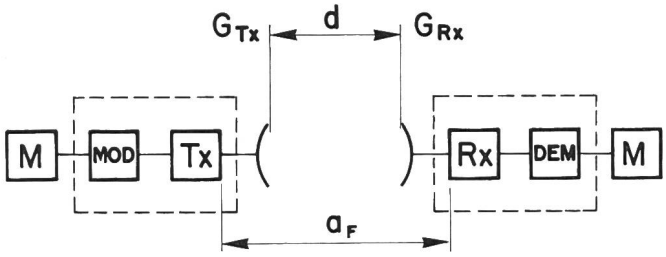
5. Planung einer Richtfunkstrecke

In jedem Fall wird eine sehr sorgfältige und systematische Prüfung verschiedener Streckenvorschläge nötig sein. Die folgenden Ausführungen sollen kurz zeigen, welche Gesichtspunkte bei der Planung einer bestimmten Strecke zu berücksichtigen sind.

5.1 Systemwert

Der grundsätzliche Aufbau einer Richtfunkstrecke und einige wichtige Definitionen sind in den Fig. 9 und 10 dargestellt.

Die Gleichungen der Fig. 9 zeigen den Zusammenhang zwischen Streckendämpfung (hängt nur vom Verhältnis Streckenlänge zu Wellenlänge ab), Funkfelddämpfung (berücksichtigt die Antennengewinne) und resultierender Empfangsleistung. In Fig. 10 ist der Rauschabstand s in einem



$$a_{St} = \left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right)^2 \quad \text{Streckendämpfung}$$

$$a_F = \frac{a_{St}}{G_{Tx}\, G_{Rx}} \quad \text{Funkfelddämpfung}$$

$$P_{Rx} = \frac{P_{Tx}}{a_F} \quad \text{Empfangsleistung}$$

Fig. 9
Aufbau einer Richtfunkstrecke und wichtige Definitionen
M Mehrkanalapparatur; *MOD* Modulator; *Tx* Sender; G_{Tx} Gewinn der Sendeantenne; G_{Rx} Gewinn der Empfangsantenne; *Rx* Empfänger; *DEM* Demodulator; *d* Streckenlänge; λ Wellenlänge; P_{Tx} Sendeleistung; P_{Rx} Empfangsleistung

Telephoniekanal als Funktion der Funkfelddämpfung a_F aufgetragen. Im häufigsten Arbeitsbereich ergibt sich zwischen diesen beiden wichtigen Grössen die einfache Beziehung

$$s = \frac{S}{a_F}$$

welche durch den sog. Systemwert S charakterisiert wird. Im Systemwert, wie er in Fig. 10 definiert ist, werden alle Eigenschaften des eigentlichen Übertragungssystems zusammengefasst, während die Funkfelddämpfung a_F die Daten der Strecke und der Antennen berücksichtigt. Im Gültigkeitsbereich dieser Gleichung sind zulässige Funkfelddämpfung und Rauschabstand — in dB ausgedrückt — gleichwertig gegeneinander austauschbar. Der Rauschabstand wird jedoch einerseits für kleine Werte der Dämpfung nicht gegen den Systemwert streben, sondern — bedingt durch das unvermeidliche Grundgeräusch der Anlage — einen konstanten Wert annehmen, anderseits auch bei hohen Dämpfungen, oberhalb der sog. FM-Schwelle, rascher abfallen.

Um die Funkfelddämpfung möglichst gering zu halten, werden an die Genauigkeit und Stabilität der Reflektorfläche

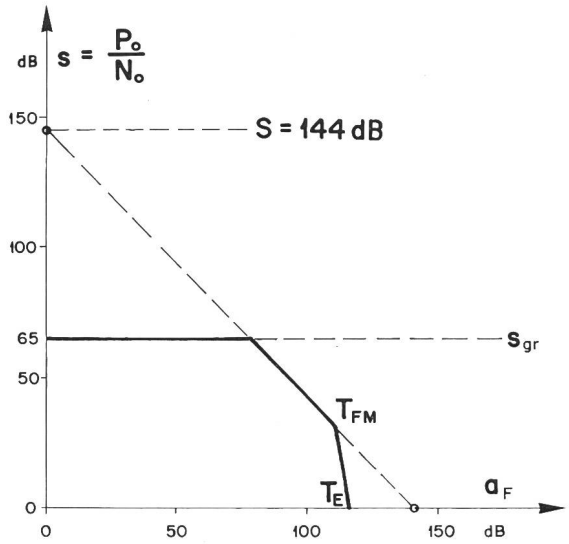


Fig. 10
Systemwert und Rauschabstand

$$\frac{P_0}{N_0} = \frac{P_{Tx}\, G_{Tx}\, G_{Rx}\, v_E^2}{F\, k\, T\, B_0\, a_{St}} = \frac{S}{a_F} = s$$

$$S = \frac{P_{Tx}\, v_E^2}{F\, k\, T\, B_0}$$

Die angegebenen Werte gelten bei der Auslegung für 12 Telephoniekanäle
S Systemwert; s Rauschabstand im Telephoniekanal; P_0 Nutzleistung im Telephoniekanal; N_0 Rauschleistung im Telephoniekanal; B_0 Bandbreite im Telephoniekanal; F Rauschzahl des Empfängers; T Rauschtemperatur des Empfängers; v_E Verbesserungsfaktor des Modulations-/Demodulationssystems; s_{gr} Grundgeräusch; T_{FM} FM-Schwelle; T_E Empfangsschwelle; k Boltzmannsche Konstante ($k = 1{,}38 \cdot 10^{-23}$ Ws/°K)

und der Ausrichtung der Antenne erhebliche Anforderungen gestellt. Besitzt beispielsweise die Reflektorfläche eine Rauhigkeit mit einem statistischen Mittelwert δ der kleinen Abweichungen vom theoretischen Paraboloid, so reduziert sich der Antennengewinn um den Faktor $g = \exp\,(4\,\pi\,\delta/\lambda)^2$. Die Reduktion beträgt ungefähr 1 dB für $\delta = 1{,}7$ mm. Ebenfalls

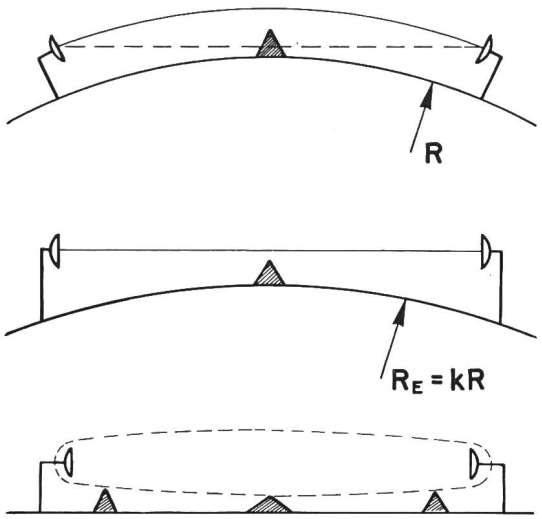


Fig. 11
Strahlkrümmung in der Troposphäre

$p = 1$	10	50	90	99	99,9 %
$k = 2{,}25$	1,6	1,33	1,20	1,05	0,9

Der Brechungsindex der Troposphäre nimmt in der Regel mit der Höhe ab, wodurch der Mikrowellenstrahl zur Erde hin gekrümmt wird. Die Annahme des fiktiven Erdradius $R_E = kR$ erlaubt Rechnung mit geradliniger Ausbreitung. Im *unteren* Teil der Figur ebenfalls angedeutet ist die hindernisfreie erste Fresnelzone
k Korrekturfaktor; $p(k)$ Wahrscheinlichkeit des Auftretens bestimmter minimaler k-Werte

um 1 dB reduziert sich der Antennengewinn, wenn eine Antenne von 1 m Durchmesser um 0,7° falsch gerichtet ist.

5.2 Einflüsse der Übertragungsstrecke

In der Regel fordert man Sichtverbindung zwischen Sende- und Empfangsantennen, obwohl auch Verbindungen ohne sie möglich sein können. Diese Erscheinung, die mit der Schichtung der Troposphäre zusammenhängt, sei anhand von Fig. 11 erklärt.

Mit zunehmender Höhe über dem Erdboden nimmt die Dielektrizitätskonstante und damit der Brechungsindex $n = \sqrt{\varepsilon_r}$ im allgemeinen ab, wodurch der Mikrowellenstrahl zur Erde hin gekrümmt wird. Hindernisse werden also gleichsam übersprungen. Um trotzdem mit geradliniger Ausbreitung rechnen zu können, berücksichtigt man die Strahlkrümmung bei der Konstruktion des Streckenprofils durch einen fiktiven Erdradius $R_E = kR$, der bei $k > 1$ den Einfluss von Hindernissen abschwächt. Die Brechungseigenschaften der Troposphäre sind aber nicht konstant, weshalb bestimmte k-Werte nur mit bestimmter Wahrscheinlichkeit erwartet werden dürfen. Die Verteilung der Werte zeigt, dass k sogar kleiner als 1 angenommen werden muss, wenn der Wert für mindestens 99,9 % der Zeit überschritten werden soll. Sehr grosse k-Werte trifft man über ruhigen Meeresoberflächen, auf denen bei Windstille eine Feuchtluftmasse lagert, wogegen über Wüstengebieten Luftschichtinversionen mit einer Strahlkrümmung nach oben ($k < 1$) nicht selten sind. In der Regel kann der Einfluss des wechselnden k-Wertes durch eine Zusatzdämpfung, welche die Abschattung durch Hindernisse berücksichtigt, vermindert werden. Praktische Messungen und theoretische Studien zeigen deutlich, dass Schwankungen der Dielektrizitätskonstanten im Ausbreitungsmedium bei Strecken unter 40 km zu einer Mehrwegausbreitung innerhalb der Troposphäre mit starken Interferenzfadings im Empfänger führen können. Auch diese Vorgänge sind nur statistisch erfassbar und können durch Annahme von Zusatzdämpfungen weitgehend unwirksam gemacht werden. In ähnlicher Weise sind Regen und Nebel zu berücksichtigen.

Neben dem Einfluss der Troposphäre oder eines direkten Hindernisses sind auch Reflexionen an der Erdoberfläche möglich. Man wird deshalb dafür sorgen, dass keine reflektierenden Hindernisse in der ersten Fresnelzone liegen. Diese Zone, ein Rotationsellipsoid, ist begrenzt durch den geometrischen Ort aller Reflexionspunkte, welche zwischen Sender und Empfänger einen Wegunterschied von einer halben Wellenlänge zum direkten Strahl erzeugen. Reflexionen innerhalb dieser Zone ergeben bei angenähert gleicher Amplitude wie der direkte Strahl je nach Phasendrehung im Reflexionspunkt unter Umständen eine starke Schwächung der Empfangsfeldstärke.

Eine sorgfältige Planung wird alle diese Gesichtspunkte berücksichtigen, wobei zusammenfassende Diagramme, wie sie Fig. 12 zeigt, als Unterlage dienen können.

5.3 Kanalkapazität und Fehlerwahrscheinlichkeit

Die vorangehend kurz skizzierten Planungsgrundsätze und Unterlagen gestatten, eine Richtfunkstrecke so zu konzipieren,

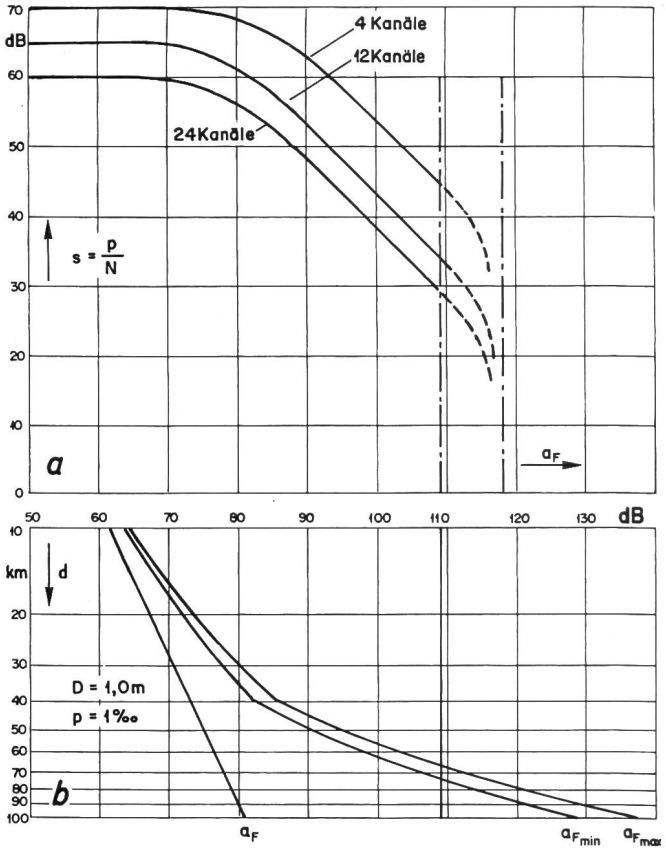


Fig. 12
Planungsgrundlagen für einfache Richtfunkstrecken
a Geräuschabstand *s* im Telephoniekanal in Funktion der Funkfelddämpfung a_F für verschiedene Kanalzahlen; *b* reine Funkfelddämpfung a_F als Funktion der Streckenlänge und Toleranzband zwischen $a_{F\min}$ und $a_{F\max}$ unter Einschluss aller Zusatzdämpfungen
Die im Beispiel gezeichneten Diagramme gelten für 99,9 % der Zeit und Antennendurchmesser von 1 m; ähnliche Kurven bestehen für strengere oder weniger strenge Anforderungen

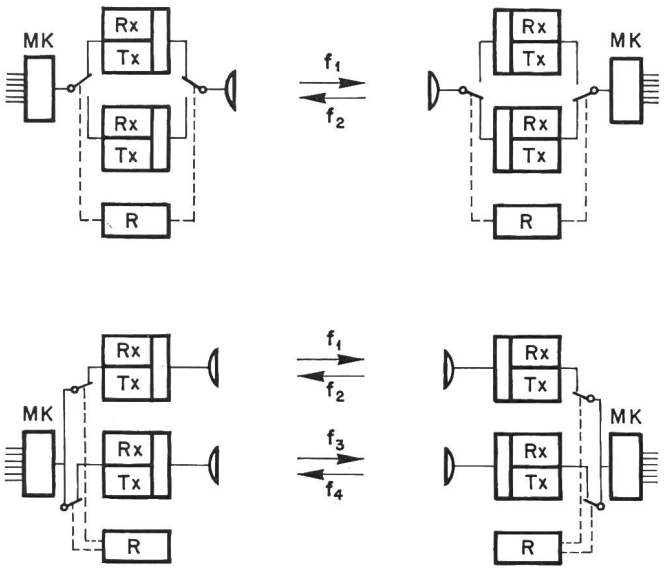


Fig. 13
Sicherstellung der Verbindung bei Geräteausfall
Die Zuverlässigkeit einer Verbindung wird grundsätzlich durch Mehrfachausrüstung der wichtigsten Einheiten erhöht. In einfacheren Fällen und wenn ein kurzer Verbindungsunterbruch tragbar ist, schaltet die Überwachungseinrichtung im Störungsfall automatisch auf die Reserveeinheit um. Für erhöhte Ansprüche wird die Verbindung durch ständigen Parallelbetrieb auf zwei Frequenzpaaren gesichert. Bei Störungen eliminiert die Überwachung automatisch und unterbruchsfrei die gestörte Strecke.
MK Mehrkanalträgerfrequenzapparatur; *Rx* Empfänger; *Tx* Sender; *R* Überwachungs- und Umschalteinrichtung

dass ein bestimmter Geräuschabstand, z. B. 40 dB, während höchstens 1 % oder 1 ‰ der Zeit oder seltener unterschritten wird.

Berechnet man im Niederfrequenzkanal die informationstheoretische Kanalkapazität für eine Bandbreite von 3 kHz und einen Rauschabstand von 40 dB, erhält man einen Wert von ungefähr 40000 Bit/s, welche im Grenzfall idealer Codierung mit unendlicher Verzögerung fehlerfrei übertragbar sind. Liesse sich die Störleistung durch normal verteiltes, weisses Rauschen vollständig beschreiben, erhielte man bei binärer Übertragung mit 6000 Bit/s eine Fehlerwahrscheinlichkeit von weit unter 10^{-20}.

Aus diesen Überlegungen folgt, dass die Fehlerwahrscheinlichkeit bei der Übertragung digitaler Daten praktisch ausschliesslich durch die Fadingeinbrüche bestimmt ist. Gleichzeitig sieht man, dass eine Erhöhung der Übertragungsgeschwindigkeit im Niederfrequenzkanal nur durch die Verwendung von Signalalphabeten höherer Ordnung möglich ist und für die ungestörte Zeit auch sinnvoll sein kann, dass aber unter Ausnützung der auf der Mikrowellenseite zur Verfügung stehenden Bandbreite (> 1 MHz) ohne Schwierigkeiten Übertragungsgeschwindigkeiten von einem Mbit/s und mehr erreichbar sind.

Wenn Übertragungsfehler und Ausfälle auch in kleinen Bruchteilen der Zeit nicht zulässig sind, kann die Übertragung durch zusätzliche Massnahmen gesichert werden. Die Schaffung paralleler, jedoch voneinander unabhängiger Übertragungswege durch Raum- oder Frequenz-Diversity ist ohne weiteres möglich. Genauere Analysen zeigen, dass räumliche Antennenabstände von etwa fünfzig Wellenlängen genügen, während Frequenzabstände von einigen hundert Megahertz nötig sind, um genügende Unabhängigkeit der beiden Ausbreitungswege zu erhalten.

Daneben finden natürlich die gleichen Codierungsprinzipien wie bei der Übertragung auf Hochspannungsleitungen Anwendung, jedoch angepasst an den Störcharakter der Schwundeinbrüche: Das Nutzsignal wird nicht wie bei Schaltvorgängen auf der Hochspannungsleitung durch Störspannungen, die um viele Grössenordnungen über dem Signalpegel liegen, erdrückt, sondern verschwindet einfach mehr oder weniger schnell, während an seine Stelle Rauschen tritt. Die Büschelstruktur der Übertragungsfehler ist nicht so ausgeprägt wie bei TFH-Verbindungen.

5.4 Sicherstellung der Verbindung bei Geräteausfall

Die Bestimmung der Massnahmen zur Sicherstellung der Verbindung erfordert besonders sorgfältige Prüfung und Abklärung der Bedürfnisse. In Fig. 13 sind einige Mittel und Wege zur Lösung dieses Problems angedeutet. Doppelte Ausrüstungen sind in der Regel nicht zu umgehen. Die richtige Auswahl der überwachten Kriterien ist entscheidend für den Erfolg der Sicherungsmassnahmen.

6. Richtstrahlverbindungen für die Elektrizitätswirtschaft

Die Produktion und Verteilung von elektrischer Energie ist heute ohne ein dichtes Netz von Verbindungen zwischen Kraftwerken, Unterwerken und Verteilerstellen undenkbar. Die Nachrichtenkanäle über Hochspannungsleitungen sind teilweise voll ausgenützt, teilweise genügen sie bestimmten Anforderungen, vor allem in bezug auf Übertragungsgeschwindigkeit, grundsätzlich nicht. In manchen Fällen kann vielleicht eine Richtfunkverbindung die Lösung dieser Probleme bringen [3].

6.1 Anforderungen der konventionellen Leitungsschutztechnik

Die Stabilität eines Verbunbetriebes hängt weitgehend davon ab, ob bei Störungen im Hochspannungsnetz der be-

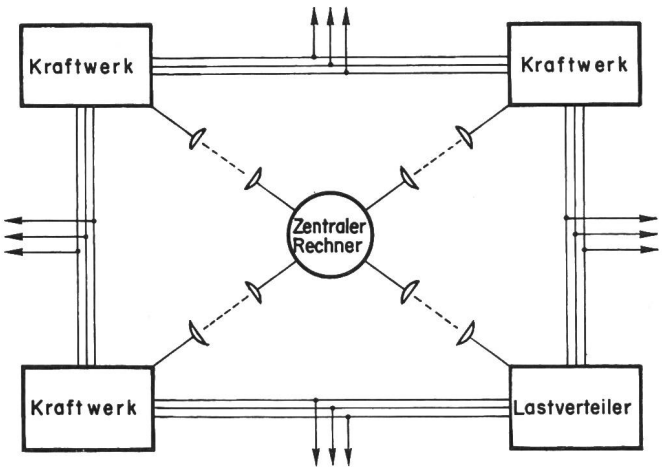


Fig. 14
Einsatz von Mikrowellenverbindungen im Verbundbetrieb
Ein zentraler Rechner, der über leistungsfähige Datenkanäle mit den wichtigsten Produktionszentren und Knotenpunkten verbunden ist, kann Aufgaben des integrierten Netzschutzes und der Optimierung des Verbundbetriebes übernehmen

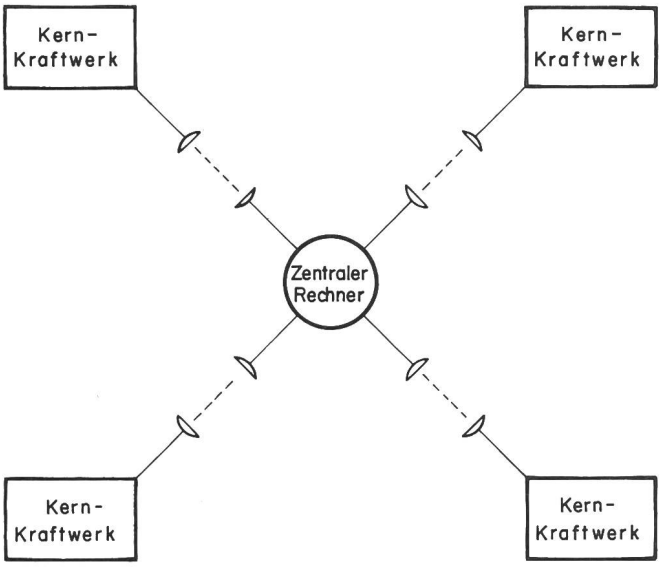


Fig. 15
Zentrale Echtzeitsteuerung mehrerer Prozesse
Richtstrahlverbindungen übertragen Messwerte und Steuerbefehle zwischen einem zentralen Rechner und mehreren gleichartigen Energieproduktionsstellen, z. B. Kernkraftwerken. Schnelle und sichere Datenübertragung und hohe Verfügbarkeit der Verbindungen sind entscheidend

treffende Leitungsabschnitt selektiv erfasst, kurzzeitig abgetrennt und nach Entionisation des Kurzschlusslichtbogens wieder eingeschaltet wird. Diese Schnellwiedereinschaltung verhindert in den meisten Fällen ein Auseinanderbrechen von Netzverbänden.

Eine Kupplung der Schutzrelais über einen schnellen Nachrichtenkanal, welcher das sofortige und möglichst gleichzeitige Öffnen der Schalter an beiden Leitungsenden sicherstellt, ist, im besonderen für Störungsfälle gegen die beiden Leitungsenden hin, ein obligatorischer Bestandteil der Schutzeinrichtungen. Obwohl die moderne TFH-Technik diesen Anforderungen in den meisten Fällen noch genügt, ermöglichen Mikrowellenkanäle oft eine wünschbare Entlastung, wenn die heutige starke Belegung des TFH-Spektrums eine weitere Bandausnützung nicht erlaubt.

6.2 Integrierter Netzschutz

Noch weit höhere Anforderungen an die Übertragungsgeschwindigkeit wird in Zukunft der Übergang auf die Technik eines integrierten Netzschutzes stellen. Hier überwacht in einer der möglichen Versionen ein zentraler Rechner den Belastungsgrad aller wichtigen Leitungen im ganzen Verbund. Tritt eine Überlast auf, so wird nicht örtlich selektiv sofort abgeschaltet, sondern eine Meldung an den Rechner übermittelt. Dieser beurteilt die Lage und belässt den Leitungsabschnitt (unter Umständen auch bei längerer Überlast!) im Netz, falls das Abschalten die Stabilität des Netzverbandes gefährden würde. Es leuchtet ein, dass Geschwindigkeit und Sicherheit der Nachrichtenübertragung dem zentralen Rechner adäquat sein müssen (Fig. 14).

6.3 Optimaler Verbundbetrieb

Der gleiche zentrale Rechner kann auch zur Optimierung des Verbundbetriebes eingesetzt werden. In diesem Fall berechnet er für jeden Lastzustand die optimale momentane Leistungsverteilung auf die einzelnen Kraftwerke, selbstverständlich unter Einhaltung vorgegebener Randbedingungen, wie vertraglich festgesetzter Übergabeleistungen oder vorgeschriebener Grundlasten.

Auch dieser Prozess ist nur durchführbar, wenn grosse Datenmengen schnell und sicher übertragen, rechtzeitig verarbeitet und ebenso schnell wieder als Steuerbefehle verteilt werden (Fig. 14).

6.4 Zentrale Prozess-Steuerung

Aus verschiedenen Gründen kann es vorteilhaft sein, Prozesse, wie sie bei der Steuerung und Regelung von grossen Kernkraftwerken auftreten, durch einen zentralen Rechner, der im Zeitmultiplex für mehrere Werke eingesetzt ist, zu steuern (Fig. 15). Messwerte aus verschiedenen Kernkraftwerken, z. T. aus über 100 km Entfernung, werden an den Rechner übertragen, dort verarbeitet, in Steuerbefehle umgesetzt und wieder an das Kraftwerk übermittelt. Dies muss in so kurzer Zeit geschehen, dass die Befehle noch aktuell und sinnvoll sind, wenn sie im Kraftwerk eintreffen. Zusätzlich lässt sich Speicheraufwand einsparen, wenn die Übertragungsgeschwindigkeit der Rechengeschwindigkeit angepasst ist.

6.5 Steuerung eines Unterwerkes

Mikrowellenverbindungen sind nicht nur für grosse Netzverbände wirtschaftlich, ihr Einsatz kann auch im kleineren Rahmen lohnend sein: Die vollautomatische Steuerung eines nahen Unterwerkes würde beispielsweise bei Anwendung der Leitungsübertragung eine kostbare, in einem grossen Umkreis nicht mehr verwendbare Trägerfrequenz belegen. In solchen Fällen ist die zuverlässige, einfach zu installierende Mikrowellenverbindung kleiner Kanalzahl der ideale Ersatz.

Literatur

[1] *A. Käch:* Mikrowellen-Nachrichtengeräte in Halbleitertechnik. Brown Boveri Mitt. 52(1965)5/6, S. 457...464.
[2] *H. Weiss:* Einsatz des Mikrowellen-Richtstrahlgerätes Typ MT-3. Brown Boveri Mitt. 52(1965)5/6, S. 465...469.
[3] *A. de Quervain:* Richtstrahlverbindungen für die Elektrizitätswirtschaft. Brown Boveri Mitt. 43(1956)9, S. 358...360.

Adresse des Autors:
Dr. *F. Eggimann,* Abteilungsassistent, AG Brown, Boveri & Cie., 5401 Baden.