

Zeitschrift: Technische Mitteilungen / Schweizerische Post-, Telefon- und Telegrafienbetriebe = Bulletin technique / Entreprise des postes, téléphones et télégraphes suisses = Bollettino tecnico / Azienda delle poste, dei telefoni e dei telegrafi svizzeri

Herausgeber: Schweizerische Post-, Telefon- und Telegrafienbetriebe

Band: 30 (1952)

Heft: 11

Artikel: Probleme der drahtlosen Übertragung bei mobilen Telephonanschlüssen

Autor: Klein, W.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-876131>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

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. [Voir Informations légales.](#)

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. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 29.03.2025

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

TECHNISCHE MITTEILUNGEN

BULLETIN TECHNIQUE

PTT

BOLLETTINO TECNICO

Herausgegeben von der Schweizerischen Post-, Telegraphen- und Telephonverwaltung. Publié par l'administration des postes, télégraphes et téléphones suisses. Pubblicato dall'amministrazione delle poste, dei telegrafi e dei telefoni svizzeri

Probleme der drahtlosen Übertragung bei mobilen Telephonanschlüssen *

Von W. Klein, Bern

621.396.931

Zusammenfassung. Die Benützung ultrakurzer Wellen erlaubt es heute, auch nicht unbedingt lebenswichtige Dienste, wie Telephonverbindungen mit Landfahrzeugen, einzurichten, wenn nach einer geeigneten Frequenzplanung vorgegangen wird. Für die Beurteilung der technischen Möglichkeiten dieser mobilen Dienste sind drei Hauptfaktoren zu berücksichtigen, die näher erläutert werden: Die Besonderheiten der Wellenausbreitung, die Eigenschaften des Übertragungssystems im Zusammenhang mit dem Stand der Apparatechnik und die systemfremden äusseren Störeinflüsse. Im gesamten ist heute eine Übertragungsqualität erreicht, die auch die Zusammenschaltung mit dem öffentlichen Telephonnetz gestattet. Die Reichweite eines Senders ist je nach Aufstellung und Topographie stark verschieden, 10...25 km, aber auch 50 und mehr Kilometer bei Verwendung geeigneter Höhenstandorte, wie anhand von experimentell aufgenommenen Feldstärkeplänen ersichtlich ist. Der Bereich kann mit Hilfe von Relaisendern ausgedehnt werden. Die heute in Zürich im Betrieb stehenden mobilen Teilnehmersysteme über das öffentliche Telephonnetz benützen einen Senderstandort in der Stadt, wodurch der Nutzbereich im wesentlichen auf die Stadt beschränkt wird.

Weitere Anwendungsmöglichkeiten für drahtlose Teilnehmerverbindungen in der Schweiz, wie der Sprechverkehr mit Schnellzügen der Schweizerischen Bundesbahnen sowie ein besonderes, für schweizerische Verhältnisse interessantes Übertragungssystem, der einseitige Anruf mobiler Stationen, werden besprochen.

Die Nachrichtenübermittlung mit Fahrzeugen aller Art war von jeher eine besondere Aufgabe der drahtlosen Technik. Aber erst dank der zunehmenden Beherrschung der ultrakurzen, sogenannten quasi-optischen Wellen können heute auch nicht unbedingt lebenswichtige Dienste, wie Telephonverbindungen mit Landfahrzeugen, für den öffentlichen Verkehr eingerichtet werden, indem nun im Wellenspektrum zwischen 1 und 10 m Wellenlänge genügend hierfür geeignete Übertragungskanäle zur Verfügung stehen (Fig. 1). In den Vereinigten Staaten von Amerika zum Beispiel haben diese mobilen Telephondienste

bereits einen beträchtlichen Umfang angenommen, wie aus dem Frequenzverteilungsplan vom Jahre 1949 hervorgeht. Es lassen sich in der Verwendung vier Kategorien feststellen:

1. Öffentliche Dienste zur Benützung durch Drittpersonen (Telephonteilnehmer, Presse, Marktinformationen);
2. öffentliche Sicherheit (Polizei, Feuerwehr, Überlandstrassendienst, Ärzte);
3. industrielle Dienste (Kraftwerke, Petrolgesellschaften, Holzindustrie, Film, Presse);
4. Transportunternehmungen (Taxi, Lieferwagen, Automobilnotdienst, Eisenbahnen, Schiffsverkehr im Hafenbereich).

Das ausgedehnte Netz für Zivilluftfahrt benützt heute auch weitgehend Wellenlängen unter 10 m, doch stehen hierfür besondere Wellenbänder zur Verfügung.

Um bei dieser dichten Belegung gegenseitige Störungen zu vermeiden, werden die Wellenlängen für die verschiedenen Dienste und Gegenden nach einem sorgfältig überlegten Plane zugeteilt. Die Anforderungen an die Qualität der Geräte bezüglich Aufnahme und Ausstrahlung unerwünschter Signale sind erheblich.

Selbstverständlich kann man die europäischen und vor allem unsere schweizerischen Verhältnisse bezüglich Bedarf an mobilen Verbindungen nicht ohne weiteres mit Amerika vergleichen. Die zunehmende Belegung der Ultrakurzwellenbänder durch mobile und fixe Dienste aller Art, zivile und militärische, lässt heute aber auch bei uns eine genaue Regelung der Frequenzuteilung und eine wirksame Begrenzung der Störstrahlung von Sende- und Empfangsanlagen im UKW-Bereich als äusserst dringlich erscheinen, wenn in Zukunft ein Chaos vermieden wer-

* Vortrag, gehalten an der 10. Schweizerischen Tagung für elektrische Nachrichtentechnik in Solothurn, vom 22. Juni 1951.

den soll. Verschiedene Erfahrungen aus jüngster Zeit bestätigen diese Auffassung.

Nach der internationalen Konvention von Atlantic City stehen den europäischen Ländern in dem uns hier interessierenden Bereiche die folgenden Frequenzbänder unter anderem auch für mobile Dienste zur Verfügung:

31,7... 41,0 MHz
70,0... 72,8 MHz
75,2... 78,0 MHz
80,0... 83,0 MHz
85,0... 87,5 MHz
100,0...108,0 MHz
156,0...174,0 MHz
235,0...328,6 MHz
335,4...420,0 MHz
460,0...470,0 MHz

Es ist Sache der verantwortlichen Behörden jedes Landes, im Rahmen dieser internationalen Vereinbarung weitergehende Bestimmungen zu treffen, die notwendig und geeignet sind, um in diesen Frequenzbändern einen ungestörten Betrieb der verschiedenen Dienste im eigenen Lande sowie in den Grenz-zonen der Nachbarstaaten zu gewährleisten.

In der Schweiz sind heute vom Radiodienst der PTT folgende Frequenzbänder für *mobile Telephonverbindungen* vorgesehen:

Frequenzband	Verwendung
(31,7... 41,0 MHz)	nur noch für besonders begründete Ausnahmefälle
75,2... 76,7 MHz	Teilnehmer am öffentlichen Telephonnetz, Übertragungsrichtung mobil-fix
160,0...163,0 MHz	
76,7... 78,0 MHz	
158,0...159,0 MHz	
80,0... 81,0 MHz	Sprechverbindungen ohne Anschluss an das öffentliche Telephonnetz, Übertragungsrichtung mobil-fix
159,0...160,0 MHz	
85,0... 86,5 MHz	Teilnehmer am öffentlichen Telephonnetz, Übertragungsrichtung fix-mobil
170,0...172,0 MHz	
173,0...174,0 MHz	
86,5... 87,5 MHz	Sprechverbindungen ohne Anschluss an das öffentliche Telephonnetz, Übertragungsrichtung fix-mobil
169,0...170,0 MHz	
460,0...470,0 MHz	Einseitiger oder Wechselverkehr für mobile und fixe Dienste

Mit Ausnahme der speziellen Dienste handelt es sich ausschliesslich um Sprechkanäle.

Für eine Sprechverbindung stehen je Übertragungsrichtung 40 kHz hochfrequente Bandbreite zur Verfügung. Trägerfrequenzen und Kanalabstände sind ganzzahlige Vielfache von 50 kHz.

Das Band 31,7...41,0 MHz ist bereits stark belegt. Zudem kann es nur bedingt unter die sogenannten quasioptischen Wellen eingereiht werden, treten doch im Sommer unter bestimmten Voraussetzungen zeitweilig noch ionosphärische Fernwirkungen und damit Interferenzstörungen über beträcht-

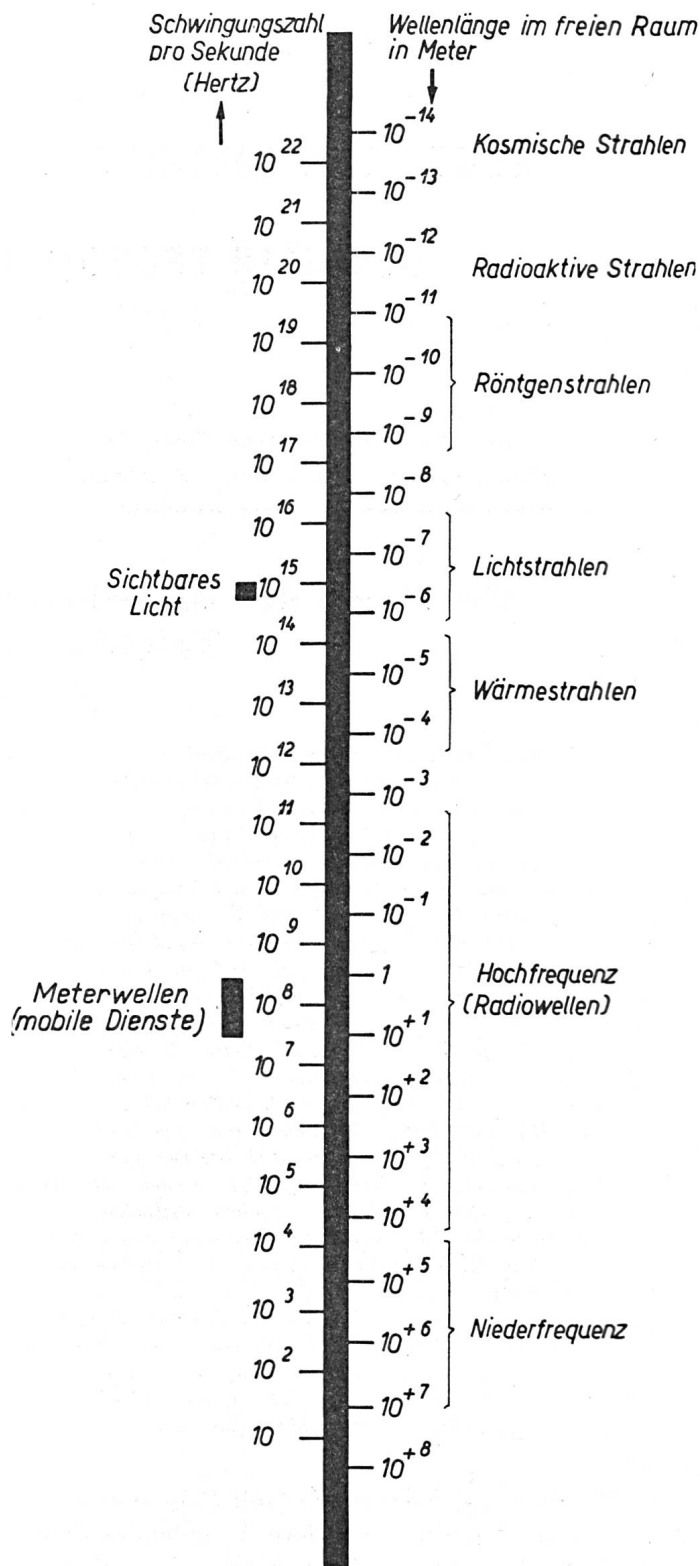


Fig. 1. Spektrum der elektromagnetischen Wellen

liche Distanzen auf, ähnlich wie dies bei den Kurzwellen dauernd der Fall ist. Es kommt für Neuanlagen praktisch nicht mehr in Betracht.

Die Hauptfrequenzbänder für mobile Telephonverbindungen liegen heute im 80- und 160-MHz-Bereich. Die höheren Frequenzen werden vorwiegend für lokale, die niedrigeren mit Vorteil für regionale Dienste mit grösserer Reichweite verwendet, wie später näher erläutert wird.

Das ebenfalls verfügbare 460-MHz-Band ist infolge der geringen relativen Bandbreite für normalen Gegensprechverkehr wenig geeignet; ausserdem liegen heute noch keine geeigneten Gerätekonstruktionen und entsprechende Ansprüche vor. Es haftet diesem Frequenzbereich auch der Nachteil an, dass er für die heutige Technik immer noch eine Art Übergangsgebiet darstellt.

Für die Beurteilung der technischen Anwendungsbereiche mobiler Telephonverbindungen sind, wie bei der drahtlosen Übermittlung allgemein, drei Hauptfaktoren zu berücksichtigen:

- Die Besonderheiten der Wellenausbreitung;
- die Eigenschaften des Übertragungssystems (Apparatetechnik);
- die systemfremden, äusseren Störeinflüsse.

1. Die Wellenausbreitung

Alle drahtlosen elektromagnetischen Wellen breiten sich im freien, ungestörten Raume geradlinig und unabhängig von der Wellenlänge aus. Das Vorhandensein elektrischer Inhomogenitäten, zum Beispiel der Erdoberfläche oder der Ionosphäre mit all ihren örtlichen und zeitlichen Unregelmässigkeiten, bedingt jedoch besondere Ausbreitungseffekte, die grundsätzlich um so stärker in Erscheinung treten, je grösser die Ausdehnung eines einzeln betrachteten, inhomogenen

schicht verantwortlich ist. Mit weiter abnehmender Wellenlänge nähern sich dann die Ausbreitungseigenschaften *in ihrer praktischen Auswirkung* immer mehr denen des Lichtes, obwohl natürlich auch bei den Zentimeterwellen der Längenunterschied gegenüber den Lichtwellen immer noch 5 Grössenordnungen beträgt (Fig. 1).

Oft bezeichnet man die uns hier interessierende Ausbreitung der Meterwellen schon als quasi-optisch. Wenn man dabei an die geometrische Strahlenoptik denkt, ist dieser Vergleich unzutreffend, mindestens sehr grob. Anders verhält es sich mit der Interferenzoptik, indem man sich hier auch mit Feldstörungen zu befassen hat, die durch Objekte oder deren Teile verursacht werden, die vergleichbar sind mit der Wellenlänge der Strahlung. So lässt sich etwa die Feldstörung eines sehr feinen Haares bei Lichtwellen vergleichen mit jener eines hohen Baumes im Ultrakurzwellenfeld, wenn man der Betrachtung denselben relativen Maßstab zugrunde legt, das heisst in Wellenlängen misst. Bei den Zentimeterwellen darf man sich schon eher mit den Anschauungen der geometrischen Strahlenoptik behelfen (Reichweite $\propto$ theoretische Sichtweite).

Die zwei wichtigsten Teilerscheinungen im Nutzbereich eines Ultrakurzwellensenders sind die Wellenbeugung und die Interferenz infolge Reflexionen an der Erdoberfläche (Fig. 2).

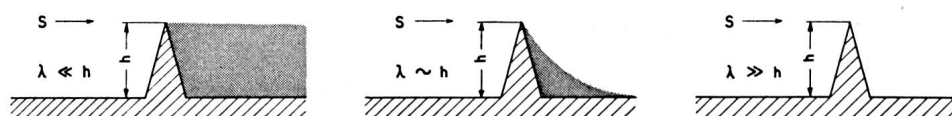


Fig. 2a. Qualitatives Bild der Wellenbeugung

λ Wellenlänge S Einfallrichtung der eben angenommenen Welle ■ Schatten (kein Empfang)

Bezirk im Vergleich zur Wellenlänge ist. Dabei spielen natürlich auch die Gestalt und räumliche Lage gegenüber der Ausbreitungsrichtung, die Oberflächenrauigkeit und die elektrischen Eigenschaften eines solchen Bezirkes eine wesentliche Rolle (teilweise selbst wieder von der Wellenlänge abhängig). Hieraus ergeben sich die tatsächlich beobachteten grossen Unterschiede der Ausbreitung mit der Wellenlänge und die Unmöglichkeit einer zuverlässigen Berechnung der Feldstärkeverteilung eines Ultrakurzwellensenders in stark unregelmässigem Gelände.

Kilometer- und Hektometerwellen folgen ausbreitungsmässig noch einigermassen der Krümmung der Erdoberfläche. Dekameterwellen haben bereits eine geringe Reichweite der Bodenwelle, gestatten aber infolge Reflexion der Raumwelle an der Ionosphäre Verbindungen über grösste Entfernungen, leider auch Störwirkungen.

Meterwellen werden in der Regel von der Ionosphäre nicht mehr reflektiert, so dass die entsprechenden Fernwirkungen wegfallen – wofür in diesem speziellen Falle allerdings gerade nicht die Ausdehnung, sondern das besondere elektrische Verhalten dieser Höhen-

Bei der *Wellenbeugung* (Fig. 2 a) lässt sich der Einfluss des Grössenverhältnisses zwischen Wellenlänge λ und Abmessungen des beugenden Objektes, zum Beispiel am klassischen Bild einer idealen Beugungskante von der Höhe h , besonders deutlich erkennen. Ist λ/h sehr klein, dann wirft das beugende Objekt in der Ausbreitungsrichtung einen ausgesprochenen Schlagschatten, das heisst, die Feldstärke nimmt hinter dem Hindernis sehr rasch ab. Praktisch nahe an diesen Fall kommt die Ausbreitung der Zentimeterwellen. Ist umgekehrt λ/h sehr gross, so kann die Welle das Hindernis überhaupt nicht «sehen» und die Feldstärke im geometrischen Schatten nimmt nicht merklich ab. Dieser Fall ist typisch für die Bodenausbreitung von Langwellen im hügeligen Gelände. Zwischen diesen Grenzfällen findet ein allmählicher Übergang statt.

Man kann hieraus ableiten, dass Berge für Meterwellen bereits schlagartige Schatten werfen müssen, wenigstens wenn man sich auf ein Bild im Maßstabe des Berges bezieht. Hügel und Häuser sind dagegen für Meterwellen zur Übergangszone zu rechnen, wobei naturgemäss die längeren Meterwellen einen aus-

geprägteren Beugungseffekt ergeben, also noch «etwas weiter um die Ecken herum» reichen als die kürzeren. Auf geringe Entfernung vom Sender, wo die Feldstärke im Sichtbereich verhältnismässig gross ist, können dadurch vielfach noch Verbindungen über beträchtliche Sichthindernisse hinweg hergestellt werden. Es ist in einfacheren praktischen Fällen möglich, den Feldstärkeverlauf hinter einem im Vergleich zur Wellenlänge kantigen Ausbreitungshindernis nach der Beugungstheorie von *Fresnel* mit einiger Zuverlässigkeit abzuschätzen.

eine kräftige Feldstörung bzw. Reflexion zu verursachen.

Die Bodenreflexion beeinflusst praktisch das ganze Feldstärkebild eines UKW-Senders, besonders in bezug auf den Mittelwert. Sie bewirkt unter anderem, dass die Feldstärke im Sichtbereich merklich rascher abnimmt, als es der Raumwellenausbreitung entsprechen würde.

Andererseits gibt es auf der Erdoberfläche sehr viele natürliche und künstliche Erhebungen, die infolge ihrer Rauhgigkeit oder relativ begrenzten Ausdehnung

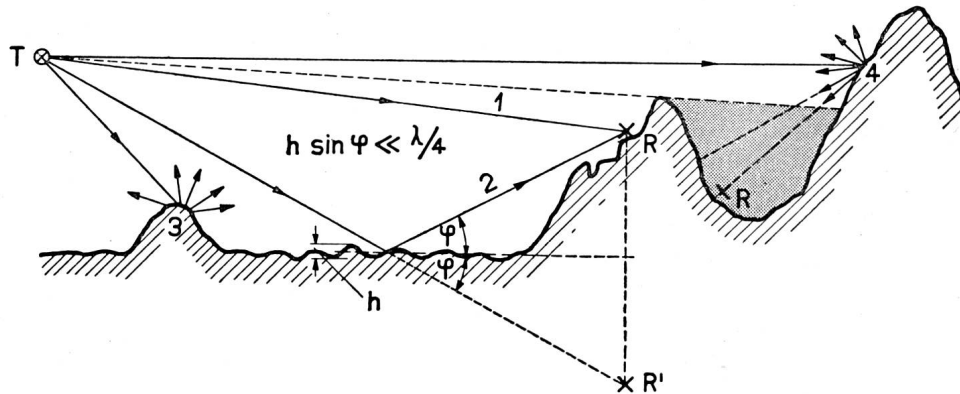


Fig. 2b. Qualitatives Bild der Wellenreflexion

T Sender R Empfänger

- 1 Raumwelle
- 2 gerichtete Bodenreflexion (Spiegelung) an relativ ebener und ausgedehnter Erde, wirksam über grosse Entfernungen
- 3 diffuse Reflexion (Streustrahler, Sekundärstrahler) an relativ kleiner, stark gekrümmter oder rauher Grenzfläche;

Feldstörung im primären Senderfeld nur lokal wirksam (stehende Wellen)

- 4 diffuse Reflexion am Gebirge (relativ grosse, aber stark gekrümmte oder rauhe Grenzflächen); Feldstörung in Schattenzonen unter bestimmten Voraussetzungen auf grössere Entfernung wirksam (indirekte Beleuchtung der Alpentäler)

Eine für den Betrieb sehr wichtige Ausbreitungsercheinung ist sodann die Wellenreflexion an irgendwelchen elektrisch inhomogenen Grenzflächen in der Nähe des Übertragungsweges, vor allem an der Erdoberfläche. Ist eine solche Grenzfläche im Vergleich zur Wellenlänge genügend eben und ausgedehnt, so kann eine regelrechte Spiegelung oder Totalreflexion der vom Sender einfallenden Welle eintreten. Der praktische Idealfall einer solchen Spiegelung ist eine ruhende Wasserfläche. Annähernd Totalreflexion tritt aber bei Ultrakurzwellen auch ein am Erdboden, soweit die erwähnten Bedingungen erfüllt sind (Fig. 2b). Ob eine Grenzfläche als eben betrachtet werden kann oder nicht, lässt sich am besten anhand des Rauigkeitskriteriums von *Raleigh* entscheiden, das sowohl Wellenlänge als auch Einfallswinkel berücksichtigt. Es zeigt sich, dass mit Meter- und sogar Zentimeterwellen bei flachem Einfallswinkel noch bei recht grossen Bodenunebenheiten Totalreflexion eintreten kann. Auf diese Weise kommt ja auch die Lichtspiegelung einer Asphaltstrasse bei sehr flachem Gesichtswinkel zustande, obwohl die vertikal gemessenen Unebenheiten hier sicher viel grösser sind als die Lichtwellenlänge. Ähnlich kann man anhand der Projektion der Fresnelzonen auf die reflektierende Grenzfläche abschätzen, ob deren Ausdehnung im Vergleich zur Wellenlänge genügend gross ist, um

diffus reflektieren, das heisst, die einfallende Energie in verschiedene Richtungen zerstreuen und teilweise auch absorbieren. Dabei spielt ausser dem Einfallswinkel auch die Polarisationsrichtung eine wesentliche Rolle. Die dadurch verursachten Feldstörungen haben, im Gegensatz zur Bodenreflexion im allgemeinen, eine örtlich begrenzte Reichweite, bestimmen aber die Feinstruktur des Feldes in ausschlaggebender Weise (Fig. 2b₃). Grosse Streustrahler, wie sie unsere Berge darstellen, können allerdings unter gewissen Voraussetzungen doch die Feldstärke über beträchtliche Entfernungen massgeblich bestimmen, indem sie beispielsweise ein im Senderschatten liegendes Alpental, wo die Wellenbeugung nicht mehr hinreicht, durch «indirekte Beleuchtung» von der Seite oder hinten aufhellen (Fig. 2b₄). Derartige Sekundärstrahlungsfelder wurden in verschiedenen Gegenden der Schweiz näher untersucht; oft können mit deren Hilfe Ultrakurzwellenverbindungen über scheinbar unüberwindliche Ausbreitungshindernisse hinweg hergestellt werden, die sich durch eine bemerkenswerte Stabilität auszeichnen, vielfach aber auch mit eigentümlichen Verzerrungen behaftet sind (Laufzeitverzerrungen durch Interferenz von Feldkomponenten mit stark verschieden langen Übertragungswegen). Für blosse Sprechverbindungen sind derartige Verzerrungen weniger bedeutungsvoll als für Musik- oder

gar Fernsehübertragung mit ihrer viel grösseren Bandbreite (Fig. 2c).

Die Überlagerung einer einfallenden mit einer reflektierten Schwingungskomponente ergibt bekanntlich im Raume stehende Wellen. Es treten dann in Funktion des Ortes Feldstärke-Maxima und -Minima auf, die sich in Abständen von $\frac{1}{4}$ Wellenlänge oder mehr folgen, je nach Reflexionsrichtung.

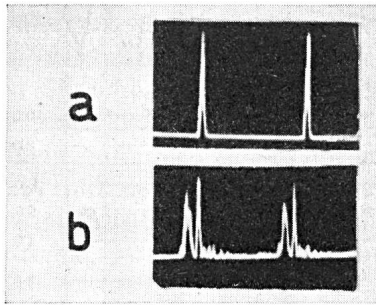


Fig. 2c. Empfangsbeispiel aus einem indirekt bestrahlten Alpen-tal, Sender mit Impulsen von je $\frac{1}{3000}$ Sek. Abstand, entsprechend einer Weglänge von 100 km moduliert
a Sendersignal
b Empfangssignal, zusammengesetzt aus Reflexionsanteilen mit Weglängenunterschieden bis zu 50 km

In einem rasch fahrenden Stationswagen kann sich daher das An- und Abschwollen der hochfrequenten Signalspannung bis zu zwanzigmal oder mehr in der Sekunde wiederholen. Der gleiche Effekt zeigt sich bei stillstehendem Stationswagen, wenn ein genügend wirksamer Wellenreflektor, zum Beispiel ein anderes Fahrzeug, sich in der Nähe vorbeibewegt. Relativ weit reichen verständlicherweise Reflexionsstörungen von Flugzeugen, bekannt zum Beispiel aus Helligkeitsschwankungen beim Fernsehbildempfang in gewissen Empfangszonen. Reguliert der Empfänger diese raschen Schwankungen trägeheitslos aus, so ist im Telefon nichts Besonderes zu bemerken, es sei

denn ein rhythmisch an- und abschwellendes Grundgeräusch (Fluttern), wenn das Empfangssignal in Zonen geringer Feldstärke bis in die Gegend des Rauschpegels absinkt.

Diese lokalen Schwankungen des Feldes betragen oft 1:3 bis 1:10 und überlagern sich den langsamen, in der Regel erst bei grösseren Entfernungen wirkenden Veränderungen der Feldstärke durch Wellenbeugung und eigentliche Erdbodenreflexion. Glücklicherweise sind die Minima örtlich um so kürzer, die Maxima um so ausgedehnter, je grösser die Feldschwankung ist. Anders ausgedrückt: Der örtliche Feldstärkemittelwert liegt stets nahe am Maximum.

Aus dem Zusammenwirken der zahlreichen Reflexionen ergibt sich vor allem in stark überbauten Gegenden eine sehr komplizierte räumliche Feldverteilung (Feinstruktur), weshalb man in der Regel bei der Aufnahme von Feldstärkeplänen die raschen Schwankungen schon bei der Messung im bewegten Fahrzeug durch zeitliche Integration ausschaltet, das heisst nur die Grobstruktur des Feldes aufzeichnet (Fig. 3 und 4). Bildet man aus diesem Grobverlauf des Feldes nochmals Mittelwerte über geeignete Teilstrecken, zum Beispiel 100...500 m, und reiht diese in mehr oder weniger grob abgestufte Feldstärkebereiche ein, gekennzeichnet beispielsweise durch Farbstufen, so kommt man schliesslich zu dem, was auf einem Feldstärkeplan noch ersichtlich bleibt und was für eine überblicksweise Betrachtung nützlich ist. Die Interpretation eines UKW-Feldstärkeplanes ist daher erheblich schwieriger als bei Mittelwellen, besonders wenn dann für gewisse Anwendungen noch die Abhängigkeit der Feldstärke von der Messhöhe über Boden berücksichtigt werden muss. Für die mobilen Verbindungen fällt diese Höhenabhängigkeit glücklicherweise nicht ins Gewicht, da man ja annähernd unter Betriebsbedingungen messen kann.

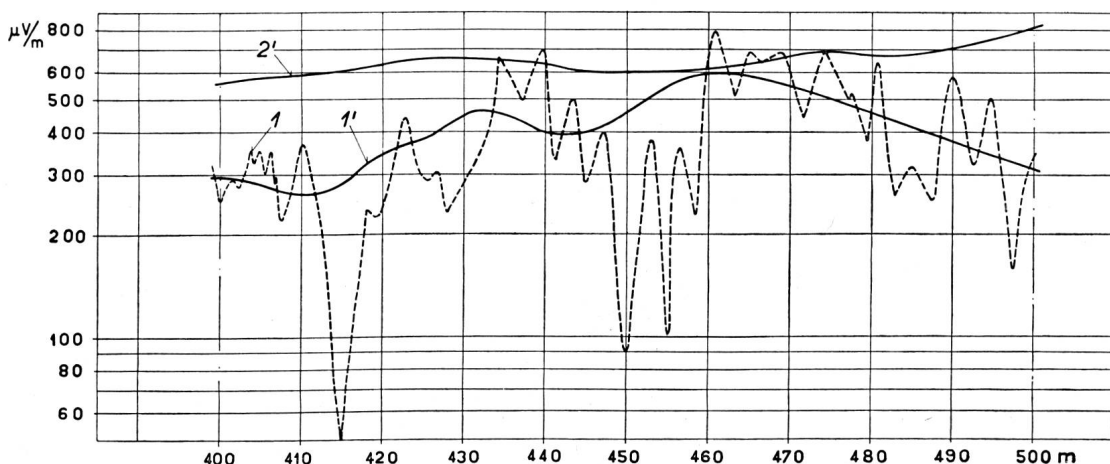


Fig. 3. Feldstärkeregistrierung mit 36,5 MHz in Zürich (Leonardstrasse)

- 1 Feinstruktur des Feldes in Fahrtrichtung A
1' Grobstruktur des Feldes in Fahrtrichtung A (Normalregistrierung mit ca. 2 Sek. Zeitkonstante)

- 2' Grobstruktur in Fahrtrichtung B, d. h. auf der gegenüber dem Sender weniger stark abgeschatteten Strassenseite: Der mittlere Beugungsverlust ist hier kleiner, der Reflexionseinfluss etwas geringer

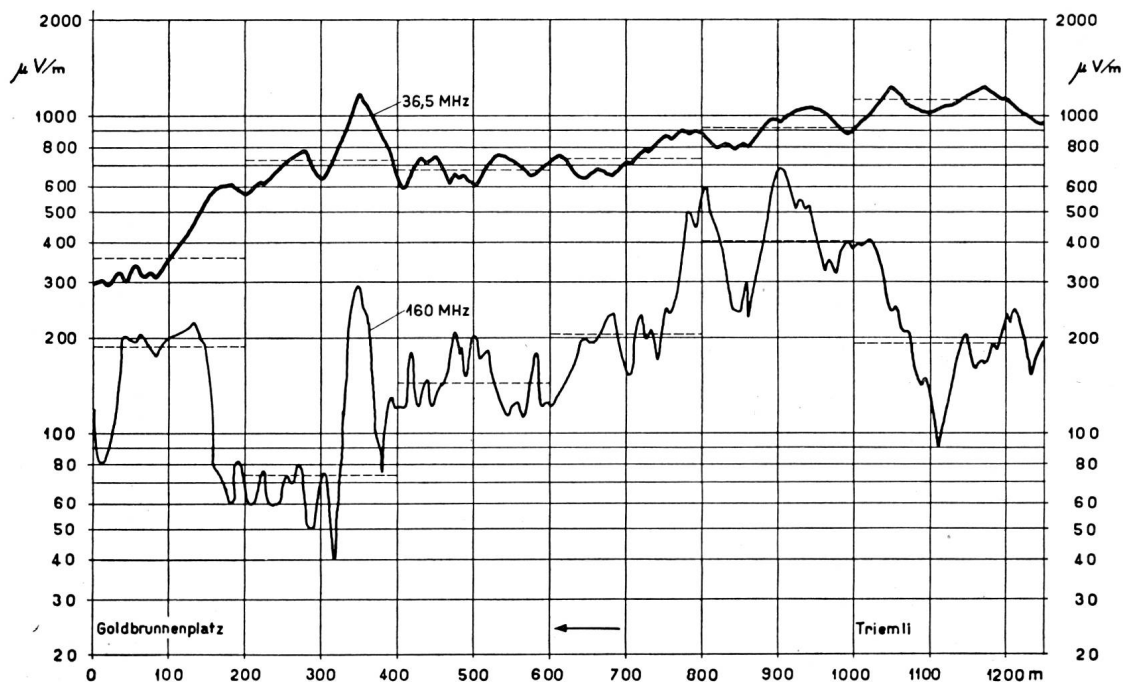


Fig. 4. Feldstärkeregistrierung mit 35,6/160 MHz in Zürich (Triemli), Strasse annähernd quer zur Ausbreitungsrichtung, Normalregistrierung

Sendeleistung und Fahrtrichtung sind in beiden Fällen dieselbe. Der Feldstärkeunterschied zwischen den beiden Messfrequenzen ist typisch für die Verhältnisse

in den Strassen einer Stadt, wenn auch in diesem Beispiel besonders ausgeprägt: Bei der höheren Frequenz ist die Beugung schwächer, der Reflexionseinfluss um so stärker

2. Übertragungssystem

Die Benützung ultrakurzer Wellen für mobile Telefonverbindungen hätte allein noch nicht genügt, um solche Verbindungen auch weitgehend kommerziell anwenden zu können, wäre nicht gleichzeitig in den letzten Jahren die Apparatechnik einen wesentlichen Schritt vorwärts gekommen, besonders durch den Bau von besseren Röhren und stabileren Schwingkreiselementen für ultrakurze Wellen, und durch die Entwicklung besonderer Modulationsverfahren. Die lange Zeit etwas umstrittene Frage, ob im Ultrakurzwellenbereich für Musik- und Sprachübermittlung Amplituden- oder Frequenzmodulation vorzuziehen sei, darf heute für Dienste mit einer

gewissen Qualitätsanforderung als eindeutig entschieden gelten zugunsten der Frequenzmodulation, wozu auch die Phasenmodulation als Abart zu zählen ist.

Für die mit dem öffentlichen Telephonnetz in Verbindung stehenden Anlagen wird heute Phasenmodulation vorgeschrieben, mit einem maximalen Frequenzhub von ± 15 kHz. Dieses Verfahren ergibt bei der Sprachübermittlung eine gute Ausnützung der Übertragungskapazität des Hochfrequenzkanals, weil es der statistischen Energieverteilung der Sprache im übertragenen Frequenzband von 300... 3400 Hz besser angepasst ist als die reine Frequenzmodulation (Fig. 5). Die spezifische Energie der

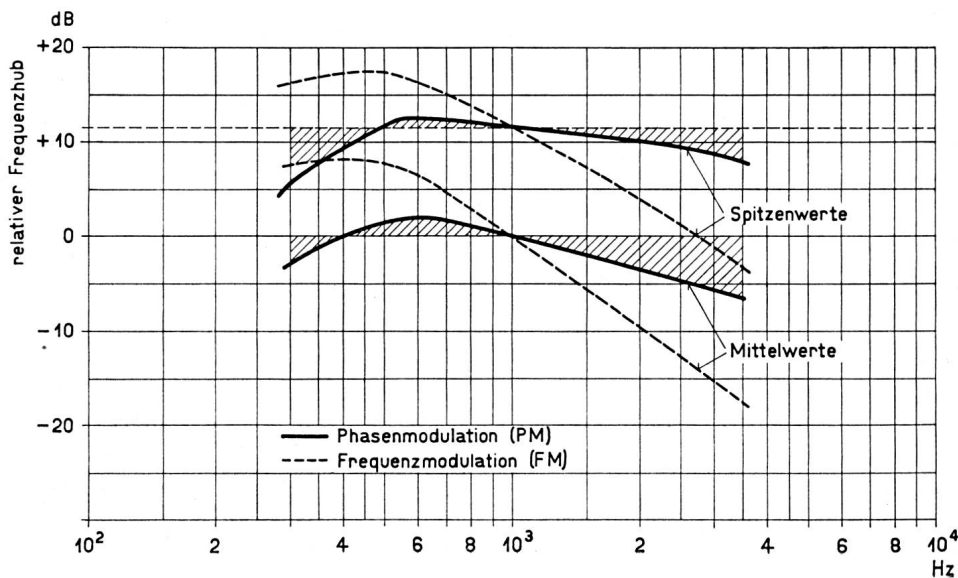


Fig. 5.

Mittlere Frequenzhubamplituden in Abhängigkeit von der Modulationsfrequenz in einem Sprechkanal bei Frequenzmodulation (FM) und bei Phasenmodulation (PM), nach Angaben von Fletcher berechnet

Der Frequenzgang des Mikrophons ist hierbei als ideal oder entsprechend kompensiert vorausgesetzt

menschlichen Sprache ist nach den statistischen Untersuchungen *Fletchers* im Frequenzband etwa bei 400 Hz maximal und nimmt mit zunehmender Frequenz dauernd ab. Bei 3000 Hz beträgt der Abfall bereits 24 dB. Die für die Verständlichkeit besonders wichtigen hohen Frequenzen laufen dadurch Gefahr, früher im Geräusch unterzugehen als die niedrigen. Die Phasenmodulation ergibt nun einen mit der Modulationsfrequenz linear ansteigenden Frequenzhub, also zwischen 400 und 3000 Hz eine Zunahme um 17,5 dB. Man erreicht damit, dass der verfügbare Frequenzhub des Übertragungskanal im Mittel durch alle im Sprachband vorkommenden Frequenzen einigermaßen gleich gut ausgenutzt wird*). Dies kommt in einem entsprechenden Gewinn im Signal-zu-Geräusch-Verhältnis gegenüber reiner Frequenzmodulation zum Ausdruck. Der Gewinn an ungewogenem Rauschabstand liegt in der Grössenordnung von 6 dB.

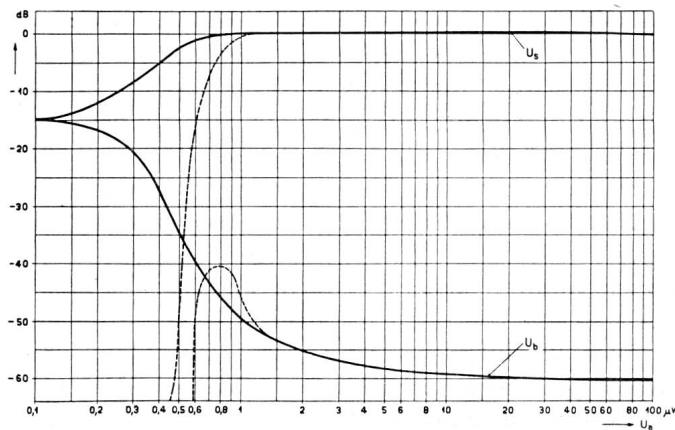


Fig. 6. Signal- (U_s) und Rauschspannung (U_b) eines guten PM-Empfängers in Abhängigkeit von der Antennenspannung (U_a)
 — ohne aut. Geräuschunterdrückung
 - - - mit aut. Geräuschunterdrückung

Die Anwendung der Phasenmodulation ergibt zudem sendeseitig auf einfache Art die erforderliche hohe Konstanz der mittleren Sendefrequenz, indem die direkte Modulation einer Quarzschwingung mit einem bescheidenen Aufwand an Frequenzvervielfachung möglich ist. Die verlangte absolute Frequenzgenauigkeit einschliesslich Temperaturschwankungen von -20° bis $+60^\circ$ C beträgt 5000 Hz, was bei einer Grundfrequenz von 160 MHz einer Relativgenauigkeit von $3 \cdot 10^{-5}$ entspricht. Diese hohen Anforderungen müssen gestellt werden, sowohl mit Rücksicht auf eine dauernd gute Übertragungsqualität, als auch auf eine wirtschaftliche Ausnutzung des verfügbaren Frequenzbandes. Um der Toleranz der Sendefrequenz und des Überlagerungsoszillators einigermaßen Rechnung zu tragen, besitzt der Empfänger eine absolute Bandbreite von 40 kHz.

Der phasenmodulierte Sender (Fig. 7) benötigt nur

*) Der Idealfall läge bekanntlich dann vor, wenn dies nicht bloss im Mittel, sondern in jedem beliebigen Zeitpunkt der Übertragung zutreffen würde (Rauschspektrum).

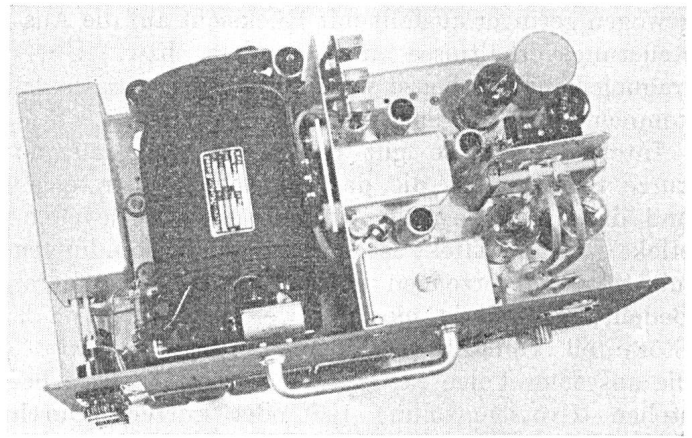


Fig. 7. PM-Sender für mobile Telephondienste im 160-MHz-Frequenzband, Antennenleistung 25 W (Fabrikat Autophon AG., Solothurn)

eine sehr geringe Modulatorleistung und arbeitet bei den Leistungsröhren durchwegs mit C-Verstärkung, was einen guten Wirkungsgrad ermöglicht. Der Stromverbrauch der Geräte ist daher verhältnismässig bescheiden, und es können unter Verwendung normaler Autobatterien bei der mobilen Station Nutzleistungen von 20 bis 30 Watt leicht erreicht werden. In zahlreichen Fällen genügen aber niedrigere Sendeleistungen. Ein geringer Leistungsverbrauch erhöht praktisch auch die Betriebssicherheit mit Rücksicht auf die Erschöpfungsmöglichkeit der Batterie.

Der Empfänger (Fig. 8) ist ein gewöhnlicher frequenzmodulierter Empfänger mit einem momentan wirkenden Hochfrequenz-Amplitudenbegrenzer und nachfolgendem Frequenzdiskriminator. Da hierbei eine frequenzhubproportionale Demodulation erfolgt, wird die Phasenproportionalität durch eine gleichmässig mit der Frequenz steigende Dämpfung im Niederfrequenzkanal wiederhergestellt. Die äquivalente Rauschbandbreite des Sprechkanals wird durch diese Massnahme praktisch im Verhältnis von etwa 10:1 herabgesetzt; dies ist nicht zu verwechseln mit der

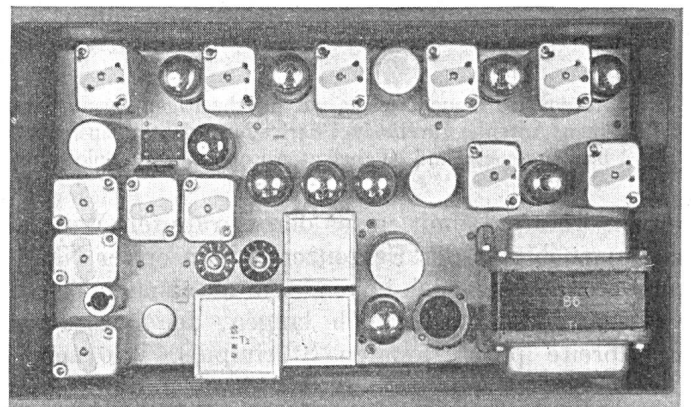


Fig. 8. PM-Empfänger für mobile Telephondienste im 80-MHz-Frequenzband (Fabrikat Brown, Boveri & Cie., Baden)

Verbesserung des Signal/Rausch-Abstandes, die ungewogen geringer ausfällt mit Rücksicht auf die Aussteuerungsverhältnisse des Senders bzw. Übertragungskanals. Ebenso werden dadurch von aussen kommende Störungen wirksamer unterdrückt.

Interessanterweise gilt das auch für genügend kurze Störimpulse, die das Nutzsignal übersteigen und daher jeweils völlig unterdrücken (Schwelleneffekt). Dieser Effekt ist für Telefonverbindungen mit Strassenfahrzeugen in Städten von besonderer Bedeutung, weil ja hier der weitaus überwiegende Störanteil von Automobilzündstörungen herrührt, die aus einer Folge extrem kurzer Einzelknacke bestehen (Grössenordnung 10^{-9} oder kürzer). Durch diese Knacke wird die Eigenresonanz der Empfänger-schwingkreise angestossen und an den Eingangsklemmen des Amplitudenbegrenzers entstehen Störschwingungen, deren Envelope im wesentlichen durch die Bandfilter des Empfängers bestimmt ist (Amplitude $\propto$ Bandbreite, Impulsdauer $\propto 1/\text{Bandbreite}$). Die Dauer der Unterdrückung des Nutzsignals bei einem derartigen Störimpuls ist damit sehr kurz und etwa gleich der reziproken Bandbreite, wobei es in erster Näherung gleichgültig ist, wieviel der Störimpuls vor dem Begrenzer die Signalamplitude übersteigt, vorausgesetzt, dass der Empfänger richtig dimensioniert wurde. Wichtig ist vor allem eine genügend kurze Begrenzerzeitkonstante, verglichen mit der Einschwingzeit der Zwischenfrequenz-Bandfilter und eine ausreichende verlängerte Amplitudentreue («linéarité prolongée») des Empfangsverstärkers vor der Demodulation.

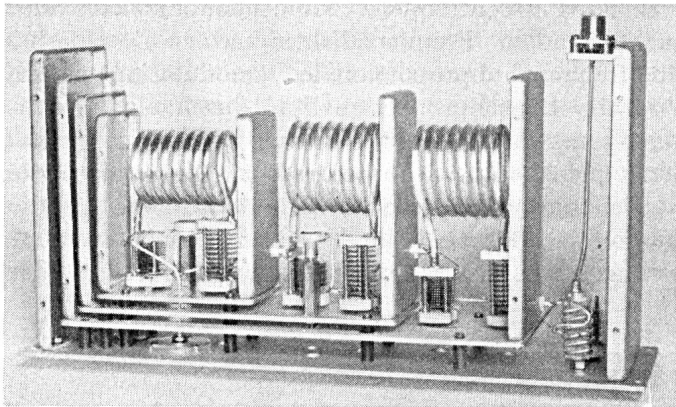


Fig. 9. Antennen-Frequenzweiche zur gleichzeitigen Ausnutzung einer Antenne für beide Übertragungsrichtungen im selben Frequenzband (Fabrikat Autophon AG., Solothurn)

Wir erhalten somit unter den erwähnten Voraussetzungen hinter der Begrenzerstufe in erster Näherung stets einen gleich hohen, dem maximalen Signal entsprechenden und gleich langen, der reziproken Bandbreite proportionalen Störimpuls. Wie schon Crosby gezeigt hat, verhält sich der FM-Empfänger unterhalb der Empfangsschwelle, das heisst während der Unterdrückungszeit des Nutzsignals, ähnlich wie ein AM-Empfänger, und die Amplitude des Stör-

impulses wird im nachfolgenden Niederfrequenzkanal proportional zur Bandbreitenverengung kleiner. Im Sprechkanal ist daher entsprechend diesem Faktor stets ein minimaler Störgeräuschabstand vorhanden, trotz der kurzzeitig totalen Unterdrückung des Nutzsignals. Dieser minimale Störabstand hängt beim vorliegenden PM-Empfänger noch etwas vom tatsächlichen Frequenzgang des Niederfrequenzteils an der unteren Bandgrenze ab und liegt ungewogen in der Grössenordnung von 30 dB bezüglich maximalem Hub. Der psophometrische Geräuschabstand ist aber grösser, weil die Störimpulse infolge der besonderen Frequenzdurchlasskurve (frequenzproportionale Dämpfung) im Sprechkanal vorwiegend langsame Schwingungen von etlichen 100 Hz enthalten, für die das Ohr verhältnismässig wenig empfindlich ist. Auch liegen die Impulswiederholungsfrequenzen der Autozündstörungen zur Hauptsache niedriger als etwa 200/s.

Die praktische Folge davon ist, dass mobile Telefonverbindungen von befriedigender Qualität noch mit Nutzfeldstärken möglich sind, die nur einen Bruchteil der Autozündstörspitzen betragen. Wie weit diese Unterdrückung der Störung bei wachsendem Störimpuls/Nutzsignal-Verhältnis erhalten bleibt, ist weitgehend eine Frage zweckmässiger Konstruktion des Empfängers. Die schweizerische Industrie hat im Bau derartiger Geräte in den letzten Jahren bemerkenswerte Fortschritte erzielt.

Abgesehen von der Unterdrückung von Störsignalen aller Art, lohnt sich eine gute Amplitudenbegrenzung aber auch mit Rücksicht auf die äusserst wirksame Konstanthaltung des Sprechpegels bei sehr grossen und raschen Schwankungen der hochfrequenten Empfangsspannung, wie sie für mobile Dienste kennzeichnend sind. Gute Empfänger ergeben Sprechpegelschwankungen von weniger als 2 dB bei hochfrequenten Spannungsschwankungen von 100 dB, wobei allerdings, ausser der momentan wirkenden Amplitudenbegrenzung, noch eine langsamer wirkende Verstärkungsgradregelung zu Hilfe genommen wird (Fig. 6).

Die Empfindlichkeit eines guten PM-Empfängers ist heute so gross, dass, in Abwesenheit äusserer Störungen, mit einer hochfrequenten Klemmenspannung von $1 \mu\text{V}$ an 50Ω noch eine brauchbare Qualität der Übertragung gewährleistet ist, vorausgesetzt, dass der Sender einigermaßen richtig ausmoduliert wird. Das Eigenrauschen des Empfängers, bezogen auf dessen Eingangsklemmen, darf hierbei nur 7...8 dB über dem theoretischen Wärmerauschen liegen (etwa $0,2 \mu\text{V}$ effektiv an 50Ω bei 40 kHz äquivalenter Rauschbandbreite) und erreicht damit annähernd die Grenze dessen, was praktisch verlangt werden darf.

Bei Klemmenspannungen unter $1 \mu\text{V}$ steigt das Empfängerrauschen stark an (Schwelle) und deckt schliesslich das Nutzsignal zu (Fig. 6). Derselbe Effekt kann natürlich auch bei höheren Klemmenspannungen auftreten, wenn ein entsprechend starker äusserer

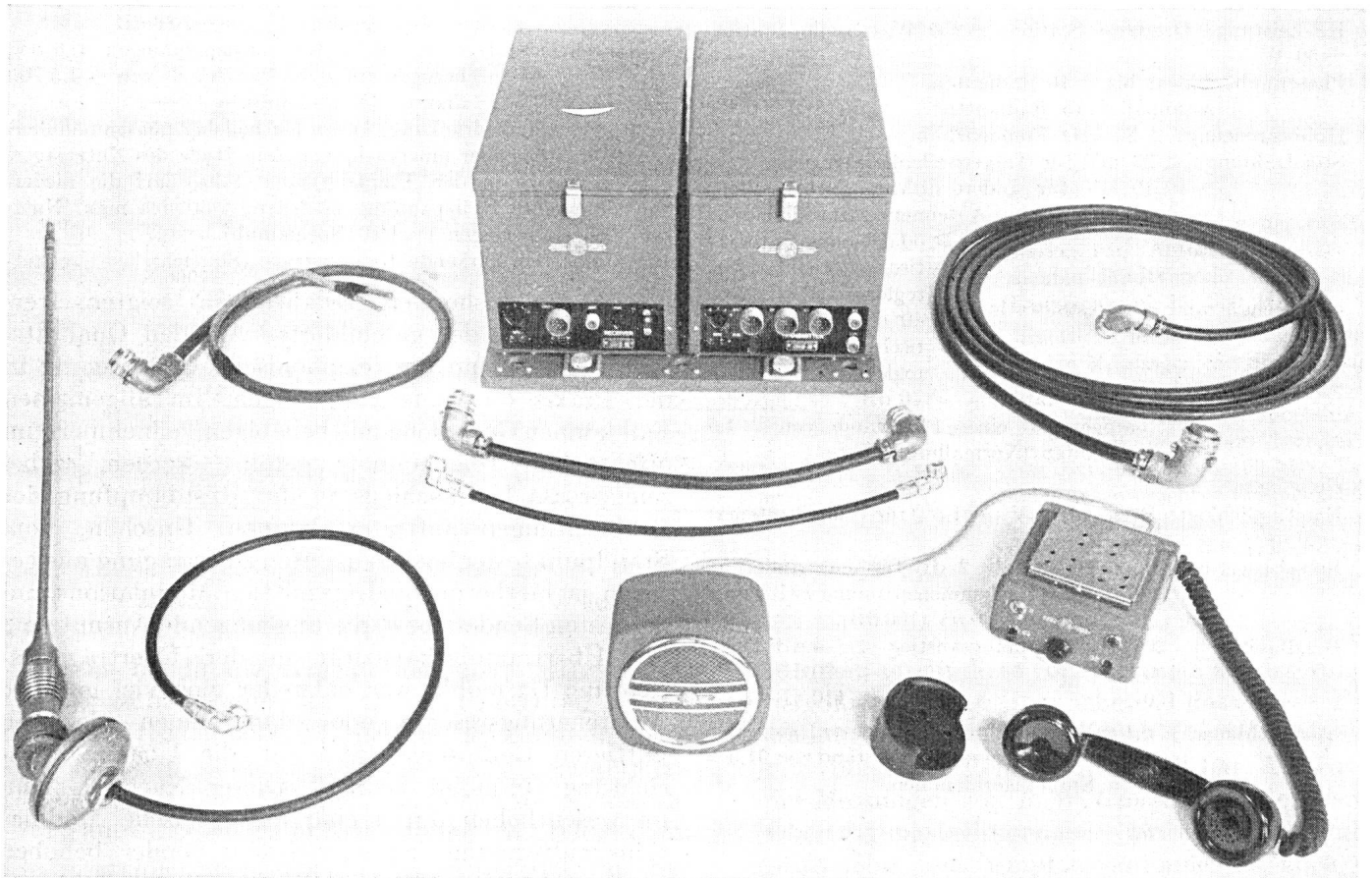


Fig. 10. Gesamtansicht einer mobilen Teilnehmerstation ohne Batterie (Fabrikat Brown, Boveri & Cie., Baden)

Störpegel von rauschähnlichem Charakter vorhanden ist. Bevor jedoch in solchen Fällen, wie sie in Zonen geringer mittlerer Feldstärke auftreten können, der Geräuschpegel unangenehm hoch steigt, wird der betroffene Empfangskanal durch eine automatisch wirkende, einstellbare Rauschsperrre («Squelch») undurchlässig gemacht.

Einer kleinst-zulässigen hochfrequenten Empfangsspannung von $1 \mu\text{V}$ an 50Ω entspricht eine Leistung von

$$P_{E \min.} = 2 \cdot 10^{-14} \text{ W}$$

Andererseits schreibt sich P_E für einen angepassten Dipol als Empfangsantenne mit Hilfe der Energiedichte S einer ebenen Welle und der Absorptionsfläche F_D des Dipols in seiner Hauptebene zu

$$P_E = S \cdot F_D = \frac{E^2}{120 \pi} \cdot \frac{3 \cdot \lambda^2}{\pi \cdot 8} \cong \frac{E^2 \lambda^2}{3200}$$

Darin bedeutet E die Feldstärke, λ die Wellenlänge. Durch Gleichsetzen der beiden Ausdrücke ergibt sich die kleinste nutzbare Grenzfeldstärke

$$E_{\min.} = \frac{8 \cdot 10^{-6}}{\lambda} \left[\frac{\text{V}}{\text{m}} \right]$$

Die Grenzfeldstärke liegt somit um so höher, je kürzer die Wellenlänge, im vorliegenden Falle bei $1 \mu\text{V/m}$ mit 8 m (40-MHz-Band) und bei $4 \mu\text{V/m}$ mit 2 m Wellenlänge (160-MHz-Band).

Mit den bei den mobilen Stationen praktisch verwendeten $\lambda/4$ -Stabantennen liegen die Verhältnisse ähnlich, wenn auch die Absolutwerte um wenig grösser sind. Diese Feststellung ist im Zusammenhang mit der Wellenausbreitung von einiger Bedeutung für Dienste, die grössere Entfernungen überbrücken müssen und bei denen der äussere Störpegel die Ausnützung der maximalen Empfängerempfindlichkeit in der Regel gestattet (ländliche Bezirke). Besteht somit die mobile Antenne, wie üblich, aus einem einfachen Dipolelement (Fig. 10), so gibt die Empfindlichkeitsgrenze des Empfängers, ausser dem günstigeren Beugungseffekt, ein weiteres Argument für die bevorzugte Benützung der längeren Wellenbänder bei regionalen Diensten.

Zusammenstellung der wichtigsten Anforderungen an die Geräte

a) Allgemeines

Übertragungskanäle: Normalerweise im 80-MHz- und 160-MHz-Band (siehe Frequenzplan), Bandbreite 40 kHz pro Kanal und Übertragungsrichtung.

Absolute Frequenzhaltung: $\pm 5000 \text{ Hz}$ bei Umgebungstemperaturen zwischen -20° und $+60^\circ \text{ C}$.

Übertragenes Sprachband: 300...3400 Hz.

Modulationsart: Phasenmodulation (PM).

Gemeinsame Send/Empfangs-Antenne bei einem Frequenzunterschied von wenigstens 5 %.

HF-Anpassung: $51,5 \Omega$ asymmetrisch.

b) *Sender*

HF-Leistung: Ortsfeste Station ≤ 250 W, mobile Station ≤ 50 W.

Phasenhub: Linear bis ± 10 Radianen,
maximal ± 15 Radianen

Hubbegrenzung: ± 20 kHz Frequenzhub.

Störstrahlung: < 20 mV für Trägerwellenharmonische,
 < 10 mV für andere diskrete Nebenwellen,
gemessen am 51- Ω -Antennenersatzwiderstand.

Geräuschabstand: Ortsfeste Station $\left\{ \begin{array}{l} \geq 50 \text{ dB ohne automa-} \\ \text{tischen Modulations-} \\ \text{regler} \\ \geq 40 \text{ dB mit automa-} \\ \text{tischem Modulations-} \\ \text{regler} \end{array} \right.$
Mobile Station ≥ 40 dB
bezogen auf einen Phasenhub von $\pm 4,5$ Radianen (Normalhub).

c) *Empfänger*

Empfindlichkeit: Besser als $1 \mu\text{V}$ an 51,5 Ω für vollausgesteuerten Begrenzer.

Sprechpegel-Konstanz: Besser als 2 dB für eine Änderung der HF-Klemmenspannung zwischen 1 und 100 000 μV (100 dB).

Bandbreite: ± 20 kHz Dämpfungsanstieg < 4 dB
 ± 100 » » < 80 dB
 ± 150 » » < 110 dB

Störstrahlung: $< 0,1$ mV für diskrete Frequenzen, gemessen an einem Antennenersatzwiderstand von 51,5 Ω an den Empfängerklennen.

Nebenwellen-Dämpfung: Spiegelfrequenz < 70 dB
andere < 80 dB

Rauschabstand: ≤ 46 dB für Klemmenspannungen $\leq 5 \mu\text{V}$,
bezogen auf einen Phasenhub von $\pm 4,5$ Radianen (Normalhub).

Störsignalunterdrückung: Wenn ein beliebig phasenmodulierter Störsender mit der halben Amplitude des Nutzträgers irgendwo in den Empfangskanal fällt, darf die niederfrequente Störspannung höchstens $1/30$ des max. Nutzpegels betragen ($\sim 1/10$ Normalhub).

Automatisch wirkende Rauschsperr (Squelch).

Wie die bisherigen Erfahrungen zeigten, vermögen Geräte der geschilderten Art den Qualitätsanforderungen an die telephonische Übertragung in der Praxis durchaus zu genügen. Im allgemeinen Fall können Gespräche mit beliebigen Teilnehmern im öffentlichen Telephonnetz geführt werden, wobei sehr grosse Unterschiede in der Restdämpfung der Drahtleitungen auftreten können. Unschön, vom Standpunkte der hochfrequenten Übertragung aus gesehen, ist hierbei der niedrige mittlere Modulationsgrad des festen Senders bzw. die ungenügende Ausnützung der Übertragungskapazität in der Übertragungsrichtung fix-mobil, was entweder eine viel grössere Aussteuerungsreserve oder dann einen kleineren mittleren Geräuschabstand für die Übertragungsrichtung fix-mobil bedingt. Dieser Nachteil kann im wesentlichen durch eine automatische Modulationsgradregelung beim ortsfesten Sender behoben werden, ohne dass hierdurch die in grösserer Zahl vorhandenen mobilen Stationen aufwandmässig mehr belastet würden. Eine gewisse Erschwerung liegt in der niedrigen akustischen Dämpfung zwischen Hörer und Mikrophon des mobilen Teilnehmers und der hieraus entstehenden Rückkopplungsgefahr, der aber mit entsprechenden Massnahmen begegnet werden kann. Hierin liegt eine nicht unbeträchtliche Verbesserungsmöglichkeit für die Weiterentwicklung der Geräte.

3. *Äussere Störeinflüsse*

Wir wollen hier von selektiven Störungen absehen, wie sie durch unerwünschte Sender, zum Beispiel Industriegeneratoren oder Hochfrequenzheilgeräte auf der gleichen Frequenz und in der gleichen Gegend oder durch Harmonische von solchen, verursacht werden können. Deren Auswirkungen sind oft sehr unangenehm. Sie müssen durch eine vernünftige Frequenzplanung und Überwachung verhindert oder beseitigt werden.

Die Erfassung nichtselektiver Störungen, verursacht durch elektrische Schaltvorgänge oder Entladungen irgendwelcher Art, ist vor allem ein statistisches Problem. Als Hauptstörer dieser Art tritt im Meterwellenbereich die Zündvorrichtung von Benzinmotoren in Erscheinung. Dies gilt ganz besonders für Telephonverbindungen mit Strassenfahrzeugen im Stadtverkehr. Wie schon erwähnt, lassen sich solche Störungen charakterisieren als eine Folge extrem kurzer Einzelknacke, die ein sehr breites, kontinuierliches Störspektrum erzeugen, das min-

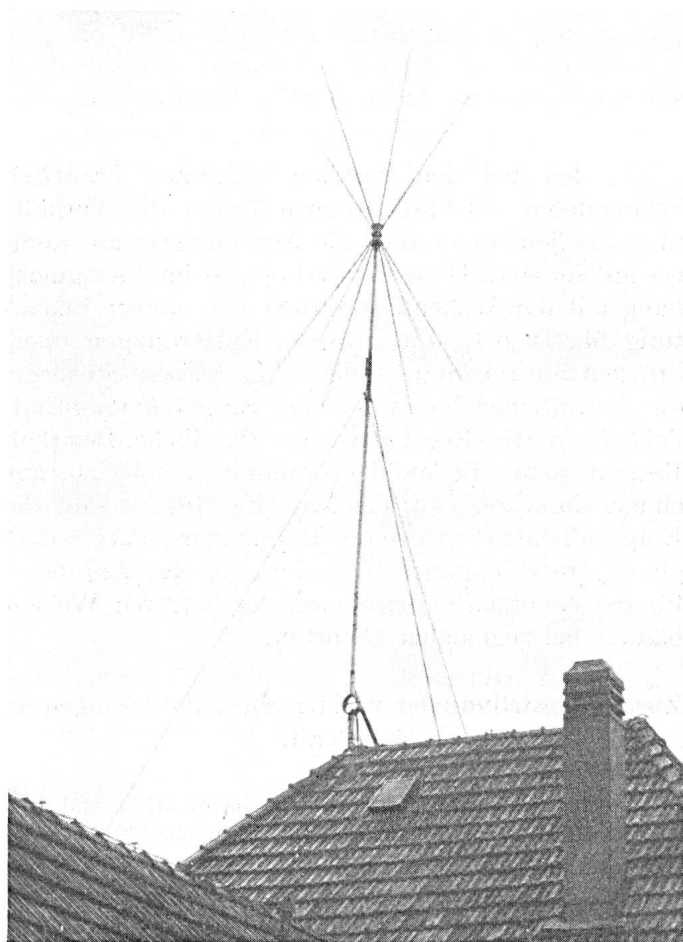


Fig. 11. Doppelkonus-Breitbandantenne auf der Telephonzentrale Riedtli zum gleichzeitigen Betrieb mehrerer Verbindungen mittels Frequenzweichen (Fabrikat Autophon AG., Solothurn)

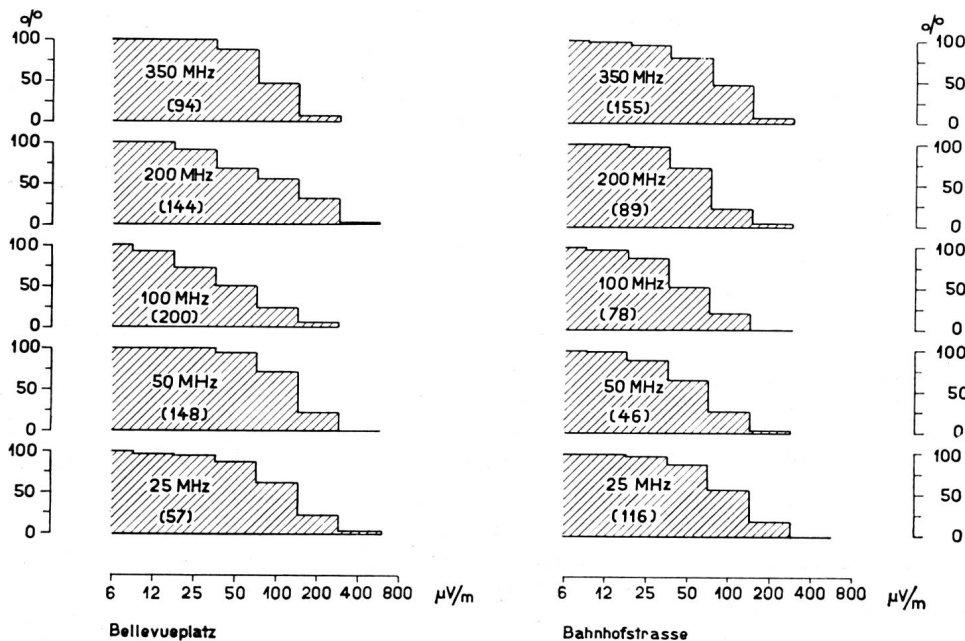


Fig. 12.

Statistische Verteilung der Störfeldstärke von Autozündstörungen im dichten Stadtverkehr in Zürich im Frequenzband 25...350 MHz

Minütliche Mittelwerte aus registrierenden Messungen mit dem Stoddart-Messplatz NMA-5 (Bewertung mit einer Lade-/Entlade-Zeitkonstante von ca. 2/620 Millisekunden), bezogen auf eine Bandbreite von 100 kHz. Es ist keine ausgesprochene Frequenzabhängigkeit festzustellen. Die Gesamtbeobachtungsdauer für jede Frequenz liegt zwischen 1...3 Stunden

destens bis in die Gegend von 1000 MHz reicht. *Nethercot* hat festgestellt, dass das Potential an den Zündelektroden bei der Einleitung des Zündvorganges jedenfalls in kürzerer Zeit als $4 \cdot 10^{-9}$ s zusammenbricht. In welchen Frequenzbereichen die Störstrahlung am wirksamsten in Erscheinung tritt, hängt dann hauptsächlich von den Eigenschaften der mit der Störquelle gekoppelten resonanzfähigen Leitergebilde ab. Leider fallen gerade die Meterwellen, und zwar in ihrem ganzen Umfang, in diese Frequenzzone, was mit Rücksicht auf die Dimensionen eines Automobilmotors einigermassen verständlich erscheint.

In Anbetracht der Bedeutung der Autozündstörungen wurden diese unter praktischen Verhältnissen, wie sie bei mobilen Verbindungen im dichten Stadtverkehr vorliegen, nach verschiedenen Richtungen hin statistisch näher untersucht (Fig. 12...14).

Einerseits wurden mit dem Messplatz NMA-5 der Firma *Stoddart Aircraft Radio Co.*, der u. a. eine der CISPR-Norm ziemlich entsprechende Geräuschbewertung gestattet, in einem Wellenbereich von 0,8...20 m die Störfeldstärken während längere Zeit registriert. Die Bandbreite ist aber wesentlich grösser als beim CISPR-Messplatz für Mittel- und Kurzwellen, nämlich 150 kHz bei den längeren und 210 kHz bei den kürzeren Wellen.

Andererseits wurde gleichzeitig die Störwirkung bei verschieden hohem Nutzsignal auf zwei kommerziellen PM-Empfängern beobachtet und registriert.

Hieraus ergab sich im wesentlichen folgendes:

a) Frequenzabhängigkeit: Die unter praktischen Betriebsbedingungen im Stadtverkehr ermittelten Störfeldstärken zeigen keine systematische Abhängigkeit von der Frequenz im untersuchten Intervall zwischen 25 und 350 MHz (Fig. 12). Man hat somit im ganzen interessierenden Frequenzbereich mit denselben Störfeldstärken zu

rechnen, soweit diese von Automobilzündstörungen herrühren. Es ist anzunehmen, dass diese Feststellung im wesentlichen auch für den Empfang mit Hausdachantennen Gültigkeit hat. Auf Grund der Messungen von *R. W. George* unter definierten Übertragungsbedingungen zwischen störendem Automobil und Empfangsantenne ist auch ein ähnliches statistisches Ergebnis zu erwarten, indem sich die wechselnden Einflüsse der Bodenreflexion, die eine Frequenzabhängigkeit bei fester Übertragungsstrecke verursachen können, ausmitteln.

Dieses Ergebnis könnte als im Widerspruch stehend erscheinen zu der vielfach geäußerten Auffassung, dass die Störanfälligkeit der kürzeren Meterwellen bezüglich Autozündstörungen erheblich geringer sei. Hier wäre zu sagen, dass einmal die Vergleichsbasis definiert sein muss (die Störspannung an einem einfachen Empfangsdipol nimmt natürlich ab, proportional zur Wellenlänge, wie die effektive Höhe einer solchen Antenne) und dass praktisch noch weitere Faktoren mitspielen können, wie die Wellenausbreitung, die sende- und empfangsseitige Energiebündelung. Die obige Feststellung bezieht sich lediglich auf die Störfeldstärke.

b) Polarisationsabhängigkeit: Die Messungen zur Feststellung der Frequenzabhängigkeit der Störfeldstärke wurden vorwiegend mit vertikaler Polarisation durchgeführt. Vergleichsmessungen mit horizontaler Polarisation bei einigen Frequenzen zeigten keinen merklichen Unterschied (Fig 13). Der Antennenmesskreis war erdsymmetrisch aufgebaut. Frühere, sehr ausgedehnte Untersuchungen mit Hausdachantennen (einfacher Dipol), bei einer Frequenz von 50 MHz in der Stadt Bern, ergaben für horizontale Polarisation eine um 1,5 dB niedrigere mittlere Störfeldstärke, ein ge-

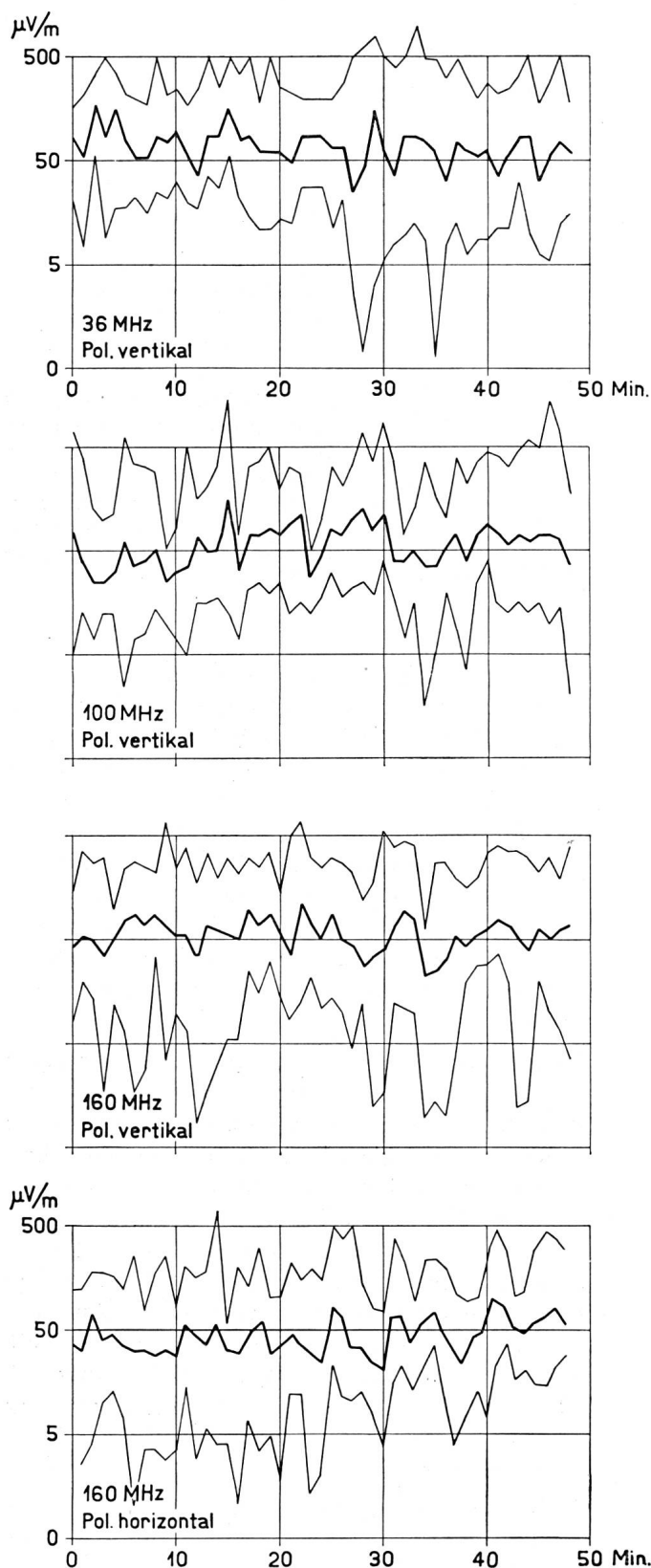


Fig. 13. Zeitlicher Verlauf minutlicher Mittelwerte, Maxima und Minima der Störfeldstärke von Autozündstörungen im dichten Stadtverkehr in Bern, bezogen auf eine Bandbreite von 100 kHz, wie in Fig. 12.

Der Minima-Verlauf ist zeitweise durch anderweitige Störquellen beeinflusst. Der Mittelwert liegt hier niedriger als in Zürich, zurückzuführen offenbar auf die geringere Dichte und Schnelligkeit des Verkehrs am Meßstandort in Bern (Bahnhofplatz).

Eine ausgesprochene Frequenz- oder Polarisationsabhängigkeit ist auch hier nicht zu erkennen

ringer Unterschied, der sich auch mit der Richtungswirkung des Empfangsdipols erklären lässt. Allerdings waren darin sämtliche nichtselektiven Störquellen miteingeschlossen (Autozündstörungen etwa 60 %).

Autozündstörungen zeigen somit statistisch keine ausgeprägte Polarisationsabhängigkeit.

- c) Mittlere Störfeldstärken: Die mittlere Störfeldstärke im dichten Stadtverkehr, bezogen auf eine effektive Bandbreite von 40 kHz, ergab sich aus den Messungen mit dem Stoddart-Messplatz (Meßstellung «Quasi-Peak») zu 20...40 $\mu\text{V}/\text{m}$. In Bern lagen die Werte eher an der unteren, in Zürich näher der oberen Grenze. Hierbei treten noch sehr häufig Spitzenwerte vom 10fachen Betrage auf, die für die Hörbarkeit der Störungen massgebend sind. Die Eigenart des Empfängers von phasenmodulierten Signalen bringt es mit sich, dass die Störimpulse zwar bereits mit Nutzfeldstärken von 200...400 $\mu\text{V}/\text{m}$, vereinzelt sogar noch höher, sehr schwach hörbar werden, jedoch mit weiter absinkender Nutzfeldstärke zunächst kaum merklich lauter, um dann in der Gegend von 10...20 $\mu\text{V}/\text{m}$, infolge Übersteuerungseffekt oder Anwachsens des Grundgeräusches, rasch an Belästigung zuzunehmen und schliesslich das Nutzsignal zu überdecken (Fig. 14). Die Beurteilung nach dem Gehör ist in folgender Tabelle zusammengestellt:

Nutz-Feldstärke $\mu\text{V}/\text{m}$	Störung	Übermittlungsqualität bei Normalpegel
1000	praktisch unhörbar	ausgezeichnet
300		
100	unauffällig schwach	gut
30	gut hörbar	brauchbar Verständigung einwandfrei
10	stark	Verständigung mühsam
3		
1	überwiegend	unbrauchbar

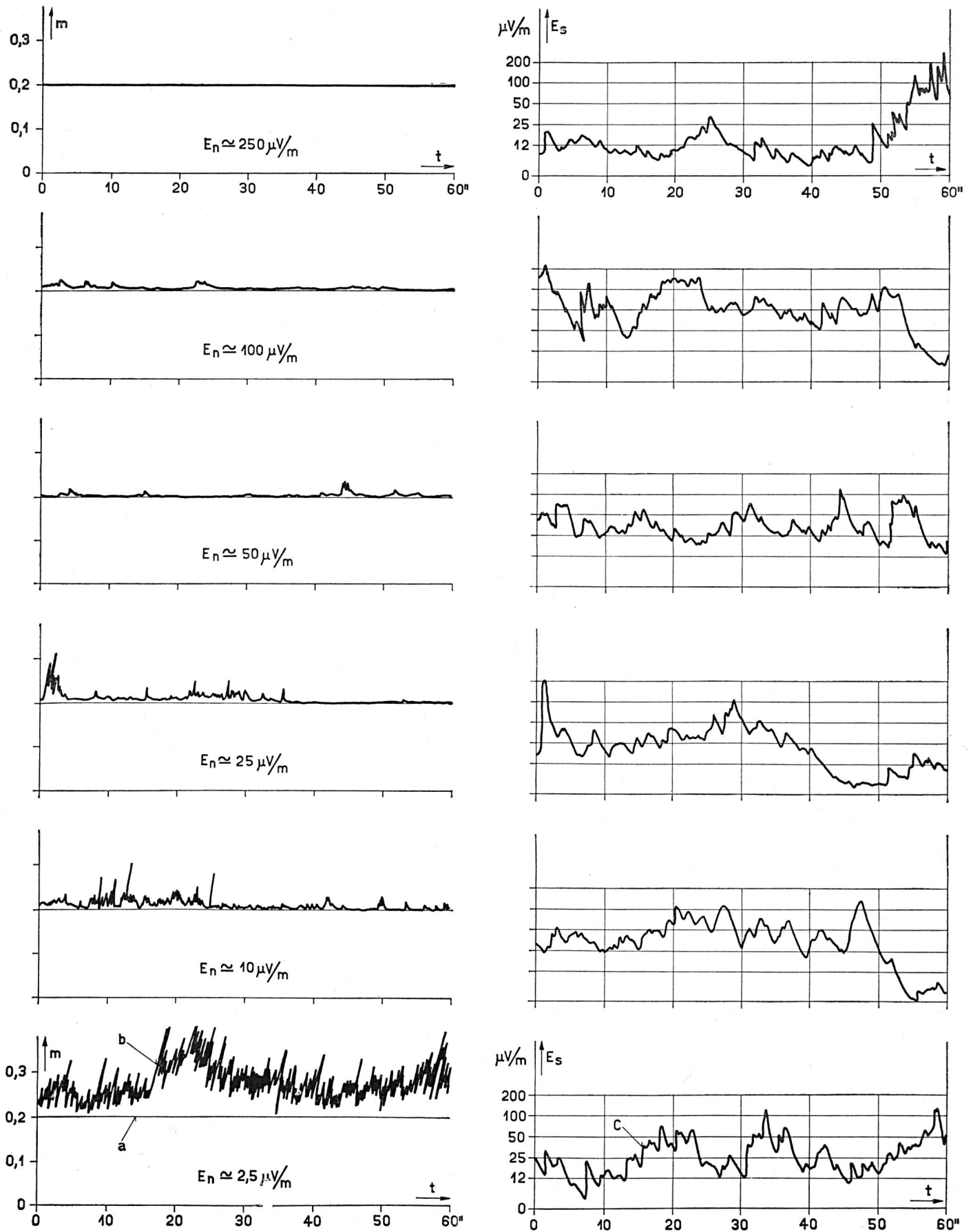


Fig. 14. Störfeldstärkeverlauf von Autozündstörungen bei 160 MHz im Stadtverkehr und ihre Wirkung auf das Nutzsignal eines PM-Empfängers in Abhängigkeit von der hochfrequenten Trägerfeldstärke.

- a ungestörtes Nutzsignal bei 20 % Modulationstiefe
- b gestörtes Nutzsignal
- c Störfeldstärke (Quasimaxima)

Die Störfeldstärke wurde mit einer Bandbreite von 200 kHz gemessen und auf die Bandbreite des PM-Empfängers umgerechnet. Störmessgerät und Empfänger be-

Damit ergibt sich für die Qualität der Telefonverbindung im dichten Stadtverkehr, unter Einbezug der Feldstärkeschwankungen, im Mittel etwa folgendes Bild:

Mittlere Nutzfeldstärke 1 mV/m: praktisch störfrei;
mittlere Nutzfeldstärke 100 μ V/m: Störung schwach hörbar, Verbindung einwandfrei;
mittlere Nutzfeldstärke 10 μ V/m: Störung stark, Verbindung praktisch unbrauchbar.

Selbstverständlich verschiebt sich diese Skala in verkehrsarmen Stadtgebieten oder in Landbezirken nach kleineren Feldstärken, und es lässt sich hier unter Umständen die volle Empfindlichkeit des Empfängers ausnützen (etwa 1 μ V/m bei 40 MHz, 4 μ V/m bei 160 MHz), vorausgesetzt, dass der Stationswagen selbst genügend entört ist. Immerhin muss man dann bei derart geringen Nutzfeldstärken vermehrt mit anderen Störquellen rechnen, beispielsweise Kollektormotoren, elektrischen Buchhaltungsmaschinen, medizinischen Heilgeräten usw., die aber in ihrer Auswirkung lokal ziemlich begrenzt sind.

Würdigung der Möglichkeiten drahtloser Teilnehmeranschlüsse in der Schweiz

Mit diesen Ergebnissen ist es nun möglich, die Übertragungsverhältnisse in verschiedenen Empfangszonen auf Grund eines experimentell aufgenommenen Feldstärkeplanes der ortsfesten Station mindestens qualitativ zu beurteilen.

Im Zusammenhang mit verschiedenen Belangen wurden bis heute die UKW-Ausbreitungsverhältnisse in zahlreichen Gegenden der Schweiz näher untersucht, einerseits mit betrieblich günstiger gelegenen Senderstandorten in den Niederungen, andererseits mit zweckmässig ausgesuchten Höhenstandorten (Fig. 15–18).*

Allgemein zeigt sich, dass das auf Messhöhe (2...3 m über Boden) bezogene Feldstärkebild mit vertikaler Polarisierung bei direkter Sicht mit dem Sender in dem betrachteten Frequenzintervall von 35...160 MHz nicht wesentlich ändert. Bei grösserer Antennenhöhe über Boden kann hier in gewissen Fällen die höhere Frequenz sogar etwas bessere Resultate ergeben, mit Rücksicht auf eine günstigere Phase der Bodenreflexion. In optischen Schattenzonen zeigt sich aber oft deutlich die stärker ausgeprägte Beugung der längeren Meterwellen. Auch in den Häuserschluchten der Stadt, wo ausser der Beugung auch die Reflexion an den Hauswänden

eine beträchtliche Rolle spielt, ergeben offensichtlich die längeren Wellen höhere mittlere Feldstärken. Dies berechtigt zum Schlusse, dass die längeren Meterwellen, rein ausbreitungsmässig gesehen, für mobile Dienste an sich besser geeignet wären.

Die Abschirmwirkung der Häuser in dicht überbauten Gebieten ist beträchtlich und ergibt für unsere Verhältnisse um etwa eine Grössenordnung geringere mittlere Feldstärken als im offenen Gelände. Strassenzüge in Ausbreitungsrichtung sind in der Regel etwa 10 dB günstiger als quer dazu (vgl. Fig. 15 und 16).

Da auch die Empfindlichkeit des Empfängers unter der Voraussetzung einer einfachen Stabantenne bei längeren Wellen grösser ist, ergibt sich die Forderung, mobile Dienste von lokalem Charakter in das 160-MHz-Band zu verlegen und die längeren Wellen soweit möglich regionalen Diensten vorzubehalten, die auf grössere Reichweiten angewiesen sind und die maximale Empfängerempfindlichkeit infolge geringerer äusserer Störungen besser ausnützen können.

Horizontale Wellenpolarisation lässt in 10 m Höhe über Boden nach früheren Untersuchungen im Sichtbereich eines UKW-Senders im Mittel merklich höhere Feldstärken erwarten als vertikale Polarisierung. Der Vorteil nimmt jedoch mit der Bezugshöhe über Boden ab und kehrt sogar ins Gegenteil um. Der Umkehrpunkt hängt von verschiedenen Faktoren, wie Wellenlänge, Senderentfernung und Überhöhung, Geländewinkel usw., ab. Vergleichsmessungen unter Verhältnissen, wie sie bei den mobilen Stationen vorliegen, wurden nicht durchgeführt, da eine horizontal polarisierte fahrbare Antenne ohnehin eine recht unerwünschte Komplikation darstellt, die sich nur mit einem gewichtigen Vorteil rechtfertigen liesse.

Die nützliche Reichweite eines Ultrakurzwellensenders für mobile Telefonteilnehmer hängt bei festliegender Apparatetechnik und Strahlungsleistung in erster Linie ab von der mittleren Höhe der Antenne über dem umgebenden Land und von der Geländegestalt (Sichtbeziehung), im einzelnen aber auch noch sehr erheblich von den lokalen Störpegelverhältnissen und vom benützten Frequenzbereich (Wellenbeugung). Der Wirkungsradius kann demnach etwa in den Grenzen zwischen 5 km und 50 km oder mehr liegen und für dieselbe Station, je nach der Richtung, stark verschieden sein. Der Vergleich der Feldstärkepläne der Sender Zürich-Riedtli und Uetliberg (Fig. 15 und 17) zeigt, vom Standpunkt der Ausbreitung gesehen, deutlich den Vorteil des Höhenstandortes: Höhere mittlere Feldstärken und viel gleichmässigerer Verteilung über das ganze Stadtbild, wesentlich grössere Gesamtreichweite.

* Die Feldstärkepläne Fig. 15...18 folgen in der französischen Übersetzung in einer nächsten Nummer des Jahrganges 1953.

nützten verschiedene Antennen, etwa zwei Wellenlängen voneinander entfernt, so dass keine genaue zeitliche Koinzidenz besteht.

Der Maßstab für die Störfeldstärke ist logarithmisch, für die Signalspannung jedoch linear, was beim Vergleich zu berücksichtigen ist. Auch sind die Störspitzen erheblich grösser als der registrierte Verlauf der Quasimaxima.

Es ist deutlich zu sehen, dass die Störimpulse das Nutzfeld weit übersteigen müssen, bevor die Störmodulation am Empfängeranfang eine bestimmte Modulationstiefe, etwa 3...5%, überschreitet. Bei geringem Nutzfeld ($\leq 25 \mu$ V/m) zeigt sich indessen bereits ein gewisser Übersteuerungseffekt. Bei 2,5 μ V/m ist auch die Rauschschwelle unterschritten und das Nutzsignal praktisch unkenntlich.

Noch deutlicher zeigt sich die Vergrößerung des Wirkungsradius im Falle der Höhenstation Chasseral (Fig. 18).

Es ist also ohne weiteres möglich, bei geeigneter Aufstellung der Fixstation mit Ultrakurzwellen grössere Landesteile in den mobilen Telephonverkehr einzubeziehen, sofern hierfür ein Bedarf besteht. Die Polizei macht von dieser Möglichkeit bereits für ihre Zwecke Gebrauch. Zur Überdeckung grösserer Gebiete können auch Relaisstationen eingesetzt werden, allerdings unter Inkaufnahme einer kleineren Komplikation, indem bei der heutigen Technik mindestens die Fixstationen, die sich überdecken sollen, mit verschiedenen Wellenlängen arbeiten müssen. Eine möglichst grosse Reichweite ist allerdings gar nicht immer erwünscht oder notwendig, indem dadurch auch die Interferenzmöglichkeiten mit anderen UKW-Diensten wachsen. Auch werden aus betrieblichen Gründen in den Bevölkerungszentren gelegene Stationsstandorte bevorzugt. Es ist von diesem Standpunkte aus gesehen sicher ein gesundes Prinzip, die ortsfeste Station im allgemeinen nicht höher aufzustellen, als dies ein einwandfreier Betrieb im gewünschten Ausmasse erfordert, solange dadurch nicht eine wesentlich höhere Sendeleistung bedingt wird. Es wäre andererseits unzweckmässig, ein grösseres Gebiet mit einem System niedrig gelegener, ortsfester Stationen zu versorgen, wenn das Problem beispielsweise mit einer einzigen, günstig gelegenen Höhenstation gelöst werden könnte, und zwar sowohl mit Rücksicht auf den Betrieb als auch die Frequenzbandbelegung. Dies gilt um so mehr, als die jüngsten Erfahrungen darauf hinweisen, dass die troposphärischen Fernwirkungen, wie sie bei gewissen meteorologischen Bedingungen auftreten, durch die niedrige Aufstellung der Stationen nicht verhindert werden können.

Die Erfahrungen mit den seit 1950/51 in Zürich in Betrieb stehenden mobilen Teilnehmergruppen sind in bezug auf die durch Wellenausbreitung und Störpegel gegebenen Übertragungsverhältnisse gut (siehe Feldstärkeplan 36,5 MHz, Fig. 15). Es wurde festgestellt, dass bei stillstehenden Wagen in gewissen Aussenquartieren mit niedrigen mittleren Feldstärken gelegentlich die Verbindung nicht aufgenommen werden kann. Eine kleine örtliche Verschiebung genügt dann aber, um die Verbindung wieder herzustellen. Diese Feldstärkelöcher sind in der Regel lokal sehr eng begrenzt und treten während der Fahrt weniger in Erscheinung. Eine Ausnahme bildet der Strassentunnel in Zürich-Enge, der mit der heutigen Anlage schlecht oder gar nicht bedient werden kann. Wie man sich bei einer Fahrt durch die Stadt leicht überzeugt, tritt der Zündstörpegel manchmal hörbar in Erscheinung, doch ist der Grad der Störung so gering, dass man ohne besondere Aufmerksamkeit dessen kaum gewahr wird. Obwohl die Feldstärke in gewissen Stadtteilen bei dem heutigen Aufstellungsort der Fixstation eher schon

an der unteren Grenze liegt, können in ausbreitungsmässig bevorzugten Richtungen Verbindungen mit relativ weit entfernten Gegenden hergestellt werden, wie beispielsweise mit dem Bürgenstock oder mit dem Etzel, wo natürlich auch der örtliche Störpegel für die mobile Station wesentlich niedriger liegt. Dies sind Launen oder vielmehr Gegebenheiten der Ultrakurzwellenausbreitung, die für ein gebirgiges Land charakteristisch sind.

Es war in der letzten Zeit auch gelegentlich die Rede von der Möglichkeit eines öffentlichen Telephonverkehrs mit gewissen Schnellzügen auf den grossen Mittellandstrecken der Schweizerischen Bundesbahnen. Mit Rücksicht auf die verhältnismässig kurzen Fahrzeiten ist aber bei uns das praktische Bedürfnis an einer solchen Einrichtung nicht sehr gross, und es stellt sich die Frage, ob sich der erforderliche Aufwand für die lückenlose Überdeckung einer längeren Strecke lohnt. Man ist eher der Auffassung, diese Frage zu verneinen. Es wurden bisher von der PTT-Verwaltung einige Untersuchungen mit Ultra-

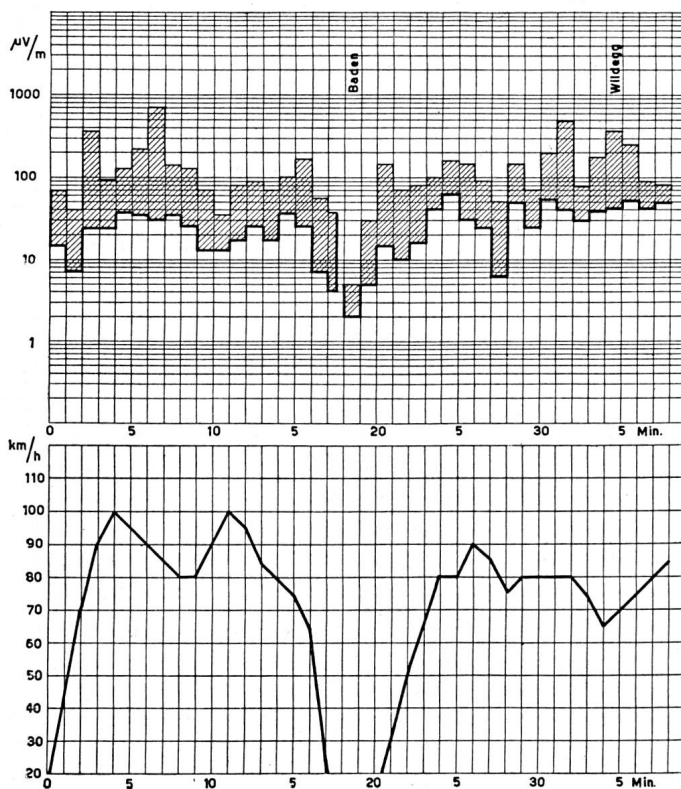


Fig. 19. Störspannungsregistrierung 200 MHz im fahrenden Zug zwischen Zürich und Olten; Messwagen mit Antenne direkt hinter der Lokomotive.

Bandbreite 200 kHz, Bewertung mit einer Lade-/Entlade-Zeitkonstanten von 2/620 Millisekunden (ähnlich CISPR)

— minütliche Mittelwerte — minütliche Spitzenwerte

Die Störungen haben nicht reinen Impulscharakter und sind daher an sich unangenehmer als Autozündstörungen. Als Störstrahler wirkt vorwiegend der Stromabnehmer der Lokomotive. Die Korrelation Störpegel-Fahrgeschwindigkeit ist offensichtlich, ebenso wie die Zunahme des Störpegels bei geringerem Fahrstrom (Bremsen). Qualitativ deckt sich dies mit den früheren Ergebnissen auf Mittelwellen

kurzwellen zwischen Bern und Zürich durchgeführt, teilweise in Verbindung mit der Firma *Autophon AG.* in Solothurn (siehe Fig. 19/20). Andererseits hat die Firma *Hasler AG.* in Bern Versuche mit Einseitenband-Fahrleitungstelephonie auf der Strecke Bern–Thun vorgenommen. Die bisherigen Ergebnisse lassen noch keine endgültigen Schlüsse zu. Es sind weitere Studien zur technischen Abklärung des Problems erforderlich, wobei beide Übertragungsmöglichkeiten berücksichtigt werden sollten.

Für Nebenbahnen mit beschränkter Netzausdehnung und verhältnismässig geringem Störpegel am Fahrdrat ist das Problem einfacher, und es wird hier bereits in vereinzelt Fällen für bahndienstliche Zwecke mit Erfolg von der Fahrleitungstelephonie Gebrauch gemacht. Ultrakurzwellen-Telephonieverbindungen für dienstliche Zwecke sind in der Schweiz auch bereits vereinzelt im Gebrauch im Schiffsver-

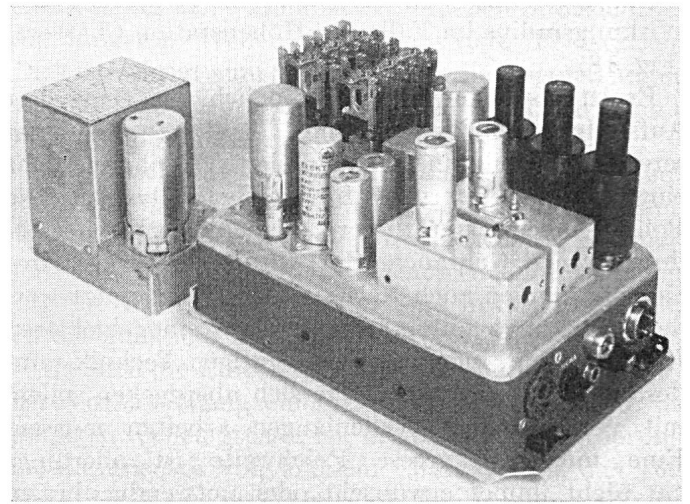


Fig. 21a. Auto-Anrufempfänger mit 3 tonselektiven Relais und spezieller Anrufverschlüsselung (Fabrikat Hasler AG., Bern)

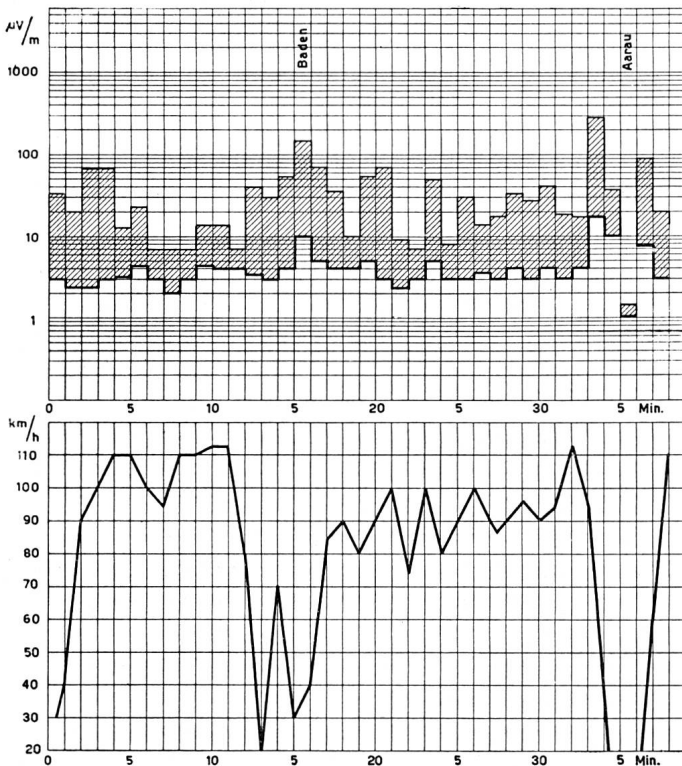


Fig. 20. Störspannungsregistrierung 200 MHz im fahrenden Zug zwischen Olten und Zürich; Messwagen mit Antenne am Zugsende.

Messdaten siehe Fig. 19.

Der Störpegel ist fast eine Grössenordnung niedriger als im früheren Fall, wo der Messwagen direkt an die Lokomotive gekuppelt war. Die Korrelation mit Fahrgeschwindigkeit und Fahrstrom fehlt vollkommen, d. h. die Störspannung klingt längs dem Fahrdrat sehr rasch ab und die Störbeeinflussung erfolgt bei UKW im Gegensatz zu Mittelwellen praktisch nur durch Strahlung. Die Ausbreitung längs des Zuges ist naturgemäss schlecht, so dass praktisch der gemessene Störpegel etwa dem Störpegel der Umgebung entspricht, einschliesslich sehr kurze Störspitzen durch kreuzende Züge und Fahrzeuggeräusche durch Bremsklötze usw.

Wird die mobile Station im Zug somit genügend weit von der Lokomotive aufgestellt, so ist die UKW-Bahntelephonie weniger ein Störpegel- als ein Ausbreitungsproblem

kehr (Vierwaldstättersee, Rheinhafen) und in Rangierbahnhöfen. Die Polizei betreibt ein recht ausgedehntes Ultrakurzwellennetz für ihre besonderen Zwecke.

Interessante Zukunftsaussichten, besonders für unsere schweizerischen Verhältnisse, bietet aller Voraussicht nach der sogenannte *drahtlose Autoanruf* (Fig. 21). Bei diesem System wird keine drahtlose Sprechverbindung hergestellt, sondern dem mobilen Teilnehmer auf drahtlosem Wege lediglich ein einfaches Signal, optisch oder akustisch erkennbar, übermittelt, um ihm zu bedeuten, dass er auf dem normalen Wege telefonische Verbindung mit einer vorher vereinbarten Stelle aufnehmen soll. Ein solches Signal ist das absolute Minimum einer Nachrichtenmenge, die denkbar ist, nämlich ein einzelner Zeiger, der ja oder nein sagt. Diese Informationsmenge ent-

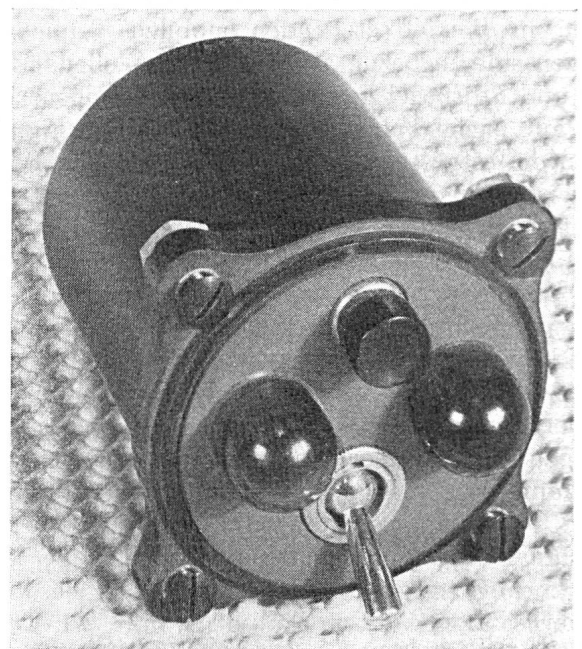


Fig. 21b. Bedienungsgerät zum Auto-Anrufempfänger der Fig. 21a

spricht der von Shannon definierten Einheit. Unter Verwendung tonselektiver Relais auf der Empfangsseite lässt sich die Bandbreite für die Übertragung der einzelnen Teilsignale, auch wenn deren verschiedene notwendig sind, mit Rücksicht auf selektive Teilnehmerwahl und Verschlüsselung, ohne Schwierigkeit auf wenige Hertz beschränken. Damit kann aber das erforderliche Signal noch unter Geräuschbedingungen übertragen werden, die eine Sprechverbindung längst verunmöglichen würden, das heisst mit Feldstärken, die beträchtlich unter $1 \mu\text{V/m}$ liegen. Der Nutzbereich eines festen Ultrakurzwellensenders wird dadurch stark erweitert. Es ist anzunehmen, dass man mit einem solchen System den mobilen Empfänger auch in Gebieten erreichen kann, die praktisch bloss noch durch Streustrahlung (Reflexion) an den Bergen Energie vom Sender empfangen. Dies ist beispielsweise der Fall für das Genferseeufer zwischen Lausanne und Aigle sowie für verschiedene Jura- und Alpentäler bezüglich der Senderbasis Chasseral (1610 m ü. M.), wie aus den Ausbreitungsuntersuchungen der Jahre 1945/46 hervorgeht. Man darf somit annehmen, dass beispielsweise das ganze auf dem Chasseral-Feldstärkeplan (Fig. 18) gemessene Gebiet für einen solchen Dienst überdeckt

werden könnte und wahrscheinlich noch einiges dazu. Für einen zuverlässigen Telefonverkehr sind solche Streufeldgebiete im allgemeinen nicht mehr brauchbar, sei es, dass die Feldstärke bereits nicht mehr ausreicht, oder dass bei an sich genügender Feldstärke die Ausbreitungsverzerrungen zu gross sind.

Es wäre damit technisch aller Voraussicht nach möglich, mit einem Hauptsender, beispielsweise auf dem Chasseral, und wenigen Nebensendern die ganze nördlich der Alpen gelegene Schweiz für den drahtlosen Autoanruf zu überdecken, wenn der mobile Empfänger genügend empfindlich gemacht wird. Dieser Anrufempfänger ist indessen ein Kompromissproblem, weil er andererseits aus leicht verständlichen Gründen sowohl billig als auch stromsparend sein soll. Die technischen Anforderungen, die an derartige Empfänger gestellt werden müssen, sind gegenwärtig noch nicht endgültig festgelegt; die damit zusammenhängenden Probleme werden noch studiert.

Der einseitige Fahrzeuganruf mittels Ultrakurzwellen über das öffentliche Telefonnetz bereichert die Möglichkeiten der telephonischen Nachrichtenübermittlung um ein neues interessantes Element, das eine bemerkenswerte zukünftige Entwicklung erwarten lässt.

Lichtoptische Methoden zur Berechnung von Beugungserscheinungen im Bereich der Zentimeterwellen *)

Von Hans Severin, Göttingen

538.566.029.64

Zusammenfassung. Während in der Lichtoptik die Entfernung des Beobachtungsortes vom beugenden Hindernis immer sehr gross gegen die Wellenlänge ist und dies meist auch für die Dimensionen des Hindernisses selbst zutrifft, kann man mit elektromagnetischen Zentimeterwellen das Feld auch in unmittelbarer Nähe eines beugenden Objektes untersuchen, dessen Abmessungen zudem von der Grössenordnung der Wellenlänge sein können. Die Kirchhoffsche Beugungstheorie ist ursprünglich zur Beschreibung lichtoptischer Beugungserscheinungen entwickelt worden. Da sich bei Lichtwellen die Beobachtung im allgemeinen nur auf kleine Beugungswinkel erstreckt – bei grösseren Winkeln wird die Intensität vernachlässigbar klein –, liefert die nur für skalare Wellenfunktionen geltende Kirchhoffsche Formel dennoch gute Übereinstimmung mit der Erfahrung. Unter den anderen physikalischen Voraussetzungen im Bereich der Zentimeterwellen benutzt man als Ausgangspunkt zur näherungsweise Berechnung von Beugungserscheinungen eine analoge Vektorformel, mittels welcher man das elektromagnetische Feld in einem Raumgebiet angeben kann, wenn die Tangentialkomponenten von $\mathcal{E}$ und $\mathcal{H}$ auf der Randfläche bekannt sind. Die zunächst strengen Ausdrücke führen bei ihrer Anwendung im Kirchhoffschen Sinn – abgesehen von der physikalischen Unzulänglichkeit der erforderlichen Annahmen – auf dieselben rein mathematischen Schwierigkeiten wie die skalare Kirchhoffsche Formel. Dort lassen sie sich nach der von Sommerfeld angegebenen Methode der Greenschen Funktion beheben. Erweitert man dieses Verfahren auf vektorielle Probleme, so kann man in ähnlicher Weise durch Verwendung Greenscher Tensoren Ausdrücke gewinnen, die die Berechnung des Feldes im Raum aus $\mathcal{E}_{\text{tang}}$ oder $\mathcal{H}_{\text{tang}}$ auf der Randfläche ermöglichen. Praktische Bedeutung haben diese

Résumé. Alors qu'en optique la distance du point d'observation à l'obstacle diffractant est toujours très grande par rapport à la longueur d'onde et qu'il en est généralement de même des dimensions de l'obstacle, il est possible, au moyen des ondes centimétriques, d'examiner le champ à proximité immédiate d'un objet diffractant dont les dimensions peuvent être de l'ordre de grandeur de l'onde. A l'origine, la théorie de la diffraction de Kirchhoff a été formulée pour la description de phénomènes de diffraction optiques. Etant donné que pour les ondes lumineuses l'observation ne porte en général que sur de petits angles de diffraction – avec des angles très ouverts l'intensité est négligeable – la formule de Kirchhoff, valable seulement pour des fonctions scalaires, donne cependant une bonne concordance avec les résultats de l'expérience. Parmi les autres bases physiques admises dans le domaine des ondes centimétriques, on utilise comme point de départ pour le calcul approché des phénomènes de diffraction une formule vectorielle analogue, au moyen de laquelle on peut déterminer le champ électromagnétique dans un espace donné si les composantes tangentielles de $\mathcal{E}$ et $\mathcal{H}$ sur la surface limite sont connues. Lorsque ces formules rigoureuses sont employées dans le sens de Kirchhoff – compte non tenu de l'insuffisance physique des hypothèses nécessaires –, elles conduisent aux mêmes difficultés purement mathématiques que la formule scalaire de Kirchhoff. On peut éliminer ces difficultés en employant la méthode de la fonction de Green, indiquée par Sommerfeld. Lorsqu'on étend ce procédé aux problèmes vectoriels, on peut de la même manière, par l'emploi de tenseurs de Green, obtenir des expressions permettant le calcul du champ dans l'espace à partir de $\mathcal{E}_{\text{tang}}$ ou de $\mathcal{H}_{\text{tang}}$ sur la surface limite. Ces formules scalaires et vectorielles n'ont cependant d'importance pratique que lors-

*) Vorgetragen beim Convegno internazionale di Ottica e Microonde in Mailand vom 9...11. Juni 1952. Der die Beugung von Schallwellen behandelnde Abschnitt wurde nachträglich angefügt.

Der Verfasser war zur Zeit des Kongresses als Gast an der Forschungs- und Versuchsanstalt der Schweizerischen PTT-Verwaltung, Sektion für Hochfrequenztechnik, tätig.