

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

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 73 (1982)

Heft: 17

Artikel: Vergleichsmessungen der Ausbreitung von FM- und Deltamodulationssignalen

Autor: Zeller, W.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-905006>

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: 26.01.2026

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

Vergleichsmessungen der Ausbreitung von FM- und Deltamodulationssignalen

W. Zeller

621.376:621.39.037.37;

Dank der einfachen Verarbeitung digitaler Signale, insbesondere im Hinblick auf eine sichere Verschlüsselung, wird im militärischen Bereich der Digitalfunk vermehrt eingesetzt. Die Forderung nach einer effizienten Ausnutzung der Bandbreite vor allem im stark belegten VHF-Bereich bedingt allerdings möglichst niedrige Übertragungsraten bzw. schmalbandige Modulationsverfahren. Dabei stellt sich das Problem der Systembeeinflussung durch Mehrwegempfang, das für den Fall von Deltamodulation aufgrund umfangreicher Messungen dargelegt wird.

La simplicité de traitement des signaux numériques et la sûreté de leur codage font que la radiotéléphonie numérique est de plus en plus souvent adoptée par l'armée. Pour une utilisation efficace de la largeur de bande, surtout dans le domaine chargé des hautes fréquences, il faut toutefois des taux de transmission aussi faibles que possible resp. un procédé de modulation en bande étroite. Ceci pose le problème de l'influence du système par la réception multivoies et est discuté pour le cas de la modulation delta sur la base de nombreuses mesures.

1. Einleitung

Heute werden im mobilen Funk für zivile und militärische Systeme vorwiegend Geräte mit Frequenzmodulation oder verwandten Modulationsarten, wie Phasenmodulation, verwendet. Die Ausbreitungseigenschaften dieser Geräte sind gut bekannt und durch verschiedene Messungen sowie im praktischen Einsatz erhärtet. Mit der zunehmenden Dichte der Frequenzbelegungen, vor allem im VHF-Bereich, stellte man immer höhere Anforderungen an diese Geräte bezüglich eines engen Kanalarasters und gegenseitiger Beeinflussung. Die Technologie der Geräte konnte im Laufe der Jahre verbessert und verfeinert werden. Heute sind FM-Geräte mit 12,5-kHz-Kanalaraster mit sehr guten Übertragungseigenschaften im Handel. Sie haben sich im eichreichen Gebiet der Schweiz sehr gut bewährt.

Von verschiedenen Stellen (Militär, Polizei, PTT) werden zum Schutz der frei zugänglichen Funkverbindungen geeignete Tarnverfahren verlangt. Es liegt nahe, die vorhandenen FM-Geräte mit verschiedenen Verfahren wie Zeitelementvertauscher, Frequenzzeitvertauscher auszurüsten. Diese Verschleierungsverfahren genügen aber nicht allen Anforderungen. Die Forderung nach einem sicheren Verschlüsselungsverfahren wird vor allem von militärischer Seite erhoben. Verschlüsselungsverfahren können aber wegen der fehlenden Bandbreite nicht auf konventionelle FM-Systeme übertragen werden. Zwangsläufig drängen sich digitale Übertragungsverfahren mit grösserer Übertragungsbandbreite auf. Wie sich solche Funksysteme im Schweizer Gelände verhalten, wurde in ausgedehnten Messungen untersucht.

Für den taktischen Sprechfunkverkehr werden im Ausland häufig Funkgeräte mit 16-kBit/s-Deltamodulation angewendet. Da im schweizerischen Mittelland Mehrwegausbreitungen mit Laufzeiten von bis zu 130 µs gemessen wurden, kam die Meinung auf, dass diese digitalen Übertragungsverfahren für den mobilen Einsatz in der Schweiz nicht unbedingt geeignet seien. Dies sollte mit den Messungen entweder bestätigt oder eindeutig widerlegt werden.

2. Messverfahren zur Bestimmung der Restverständlichkeit

Für den militärischen Sprechfunkverkehr sind folgende Angaben von primärem Interesse: Einerseits die übertragene Sprachqualität bei 3, 6 und 12 km Übertragungsdistanz und fester Sendeleistung, andererseits der Einfluss des Geländes auf die Sprachqualität bei festen Übertragungsdistanzen und fester Sendeleistung.

2.1 Verfahren zur Messung der Restverständlichkeit

Verschiedene bekannte Messverfahren standen zur Diskussion:

- Silbenverständlichkeit (mit Versuchsperson)
- Logatom (mit Versuchspersonen)
- Subjektive Beurteilung durch Testpersonen
- Sinad-Messung
- Messen der Bit-Fehlerrate

Die zwei ersten Messverfahren ergeben gute und verlässliche Werte der übertragenen Sprachqualität. Sie mussten aber wegen des sehr grossen Zeitaufwandes der Messung (etwa 20–30 min pro Kanal und Verbindung) ausscheiden. Zudem sind sie vor allem für sehr gute Übertragungsmedien, wie Drahtverbindungen, geeignet, wo insbesondere der Bereich bester Sprachqualität (90–100%) von Interesse ist. Funkverbindungen sind aber sehr selten so gut und liegen eher im Bereich von 30–90% Sprachqualität.

Die subjektive Messmethode kann wohl für Stichproben angewendet werden, ist aber für grosse Messreihen zu stark vom «Zustand» der entsprechenden Versuchsperson abhängig. Die Messreihen sind selten reproduzierbar.

Der Sinad-Wert (Verhältnis des Signals von 1-kHz-Sinus zum Rauschen des übertragenen Bandes) stellt wohl bei FM-Geräten eine messbare Grösse dar, gibt aber nur bedingt Auskunft über die Güte des Übertragungskanals bezüglich Sprache (Restverständlichkeit). Bei digitalen Übertragungsverfahren versagt diese Methode.

Bei verschiedenen Messungen im Ausland wurde die Bit-Fehlerrate (BER) als entscheidender Parameter gemessen. Leider ist der Zusammenhang zwischen BER und Restverständlichkeit von vielen nicht kontrollierbaren Parametern abhängig. Auch dieses Messverfahren kann nicht allein für die Messung der Restverständlichkeit verwendet werden.

2.2 Die Methode des Artikulations-Indexes

French und Steinberg publizierten im Jahre 1947 eine Methode zur Bestimmung der Restverständlichkeit, in der die Sprache in ihre physikalischen Parameter zerlegt wird. Es wurde vorgeschlagen, einen Artikulations-Index AI zu bestimmen. 1962 entwickelte Kryter eine mathematische Lösungstabelle zu dieser Methode. Die Bestimmung des AI geschieht im wesentlichen in drei Schritten:

1. Das effektive Verhältnis Signal zu Rauschen wird in bestimmten Frequenzbändern gemessen. Für jedes Band werden der Signal- und der Rauschpegel bestimmt. Die Gewichtung der verschiedenen Bänder berücksichtigt die Empfindlichkeitskurve des menschlichen Ohres. French und Steinberg basierten ihre Berech-

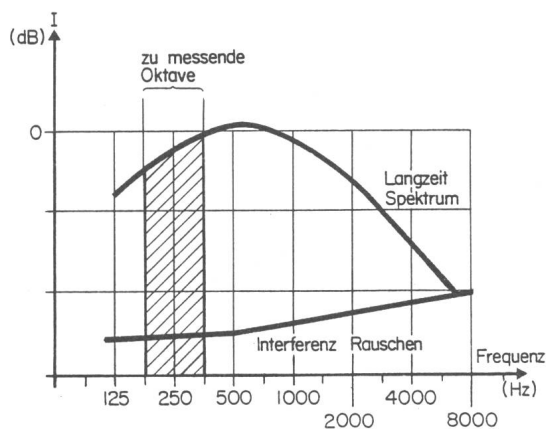


Fig. 1 Langzeit Sprachspektrum

nungen auf 20 gleichbreiten Bändern zwischen 250 und 7000 Hz. Später stellte man fest, dass eine wesentlich kleinere Anzahl Bänder genügt.

2. Es folgt eine lineare Transformation des effektiven Verhältnisses Signal zu Rauschen auf eine oktavbandspezifische Verteilung des AI (von 1 bis 0). Für jedes Band gilt:

Maximum: Signal zu Rauschen = + 18 dB entspricht 1

Minimum: Signal zu Rauschen = - 12 dB entspricht 0

3. Dann werden die gewichteten Mittel aus den relevanten Oktavbändern berechnet.

Die *French-und-Steinberg-Methode* berücksichtigt wohl Veränderungen im Frequenzbereich und in der Bandbegrenzung, misst aber nicht-lineare Verzerrungen, wie «peak clipping» oder Mehrwegempfang, nur unvollständig. Bei nicht-linearen Verzerrungen ergeben sie nicht repräsentative Messungen.

1976 begannen *Steeneken und Houtgast*, in Weiterentwicklung der AI-Methode, eine verfeinerte Messeinrichtung zu bauen. Beim Bundesamt für Übermittlungstruppen wurde zur selben Zeit eine ähnliche Idee auf dem Rechner verifiziert. Die Resultate waren sehr gut, doch die Methode wies einen gewichtigen Nachteil auf: Die digitalen Filter arbeiteten zu langsam. Deshalb wurde in Zusammenarbeit mit dem Institut TNO in Soesterberg die holländische Hardware-Methode, das *Normohr* oder *Stidas*, realisiert.

3. Messprinzip und Blockscheema der Normohr-Methode

Ausgehend von der AI-Methode wurde eine transportable Messeinrichtung gebaut, die mit den folgenden drei Elementen beschrieben werden kann:

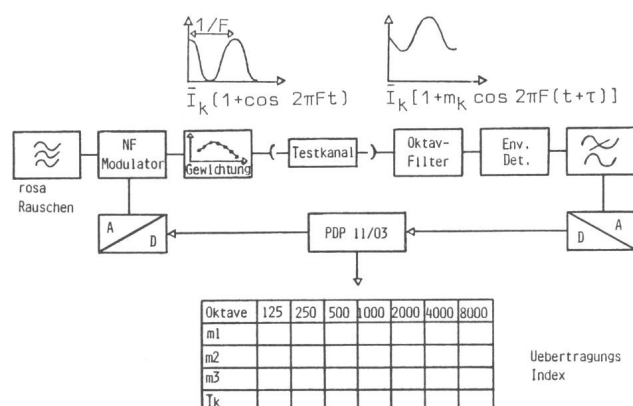


Fig. 3 Blockscheema der Messeinrichtung Normohr

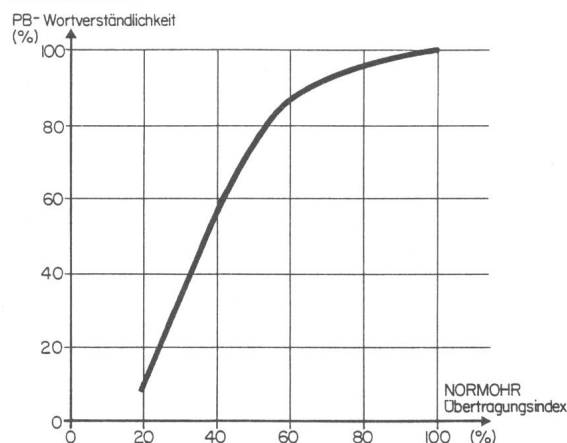


Fig. 2 Verhältnis zwischen PB-Wortverständlichkeit und Übertragungsindex

1. Der zu messende Kanal wird als «Blackbox» betrachtet. Das Verhältnis Signal zu Rauschen pro Oktave wird mit einem speziellen Testsignal gemessen, indem der Modulationsindex bestimmt wird.

2. Die spezifische Zusammensetzung des Testsignals, das die Sprache simuliert, erlaubt, nicht-lineare Verzerrungen zu berücksichtigen.

3. Ein neues Element, die Fluktuation der Sprache, erlaubt eine korrekte Messung der Verzerrungen in der Zeitebene.

3.1 Das Messprinzip

Das Langzeitspektrum der Sprache wurde untersucht und wie folgt nachgebildet:

Das Spektrum (Fig. 1) wird in sieben Oktaven aufgeteilt. Jede Oktave wird dargestellt, indem rosa Rauschen mit 3 Frequenzen moduliert wird (Nachbildung der Fluktuation der Sprache). Die Modulationstiefe beträgt 100% ($m = 1$). Dieses Signal wird dann auf den Testkanal geschickt.

Lineare Verzerrungen können gemessen werden, indem die Phasenlage der Niederfrequenzmodulation gemessen wird. Das Verhältnis Signal zu Rauschen wird mit der Messung der Modulationstiefe bestimmt.

Das gesendete Signal pro Oktave kann wie folgt definiert werden

$$I_k(t) = \bar{I}_k (1 + \cos 2\pi Ft)$$

$m = 1$, \bar{I}_k = gemittelte Intensität pro Oktave, F = niederfrequente Modulation (3 Frequenzen pro Oktave).

Nach der Übertragung wird das Signal

$$I_k(t) = \bar{I}_k (1 + m_k \cos 2\pi F[t + \tau])$$

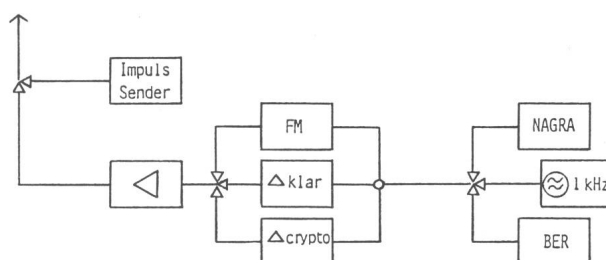


Fig. 4 Einrichtung der Sendestation

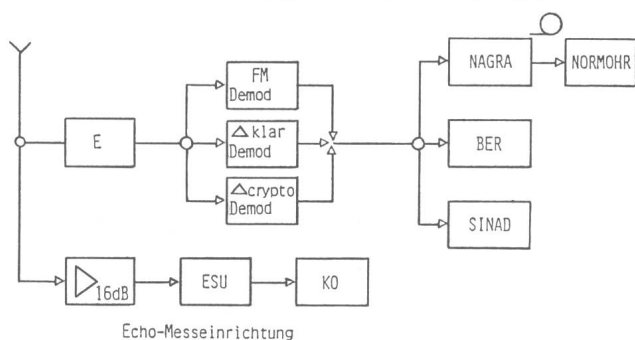


Fig. 5 Einrichtung der Empfangsstation

Das Verhältnis zwischen Testsignal und empfangenem Signal kann bestimmt werden durch

$$m_k = \frac{\bar{I}_{\text{Test}}}{\bar{I}_{\text{Test}} + \bar{I}_{\text{Rauschen}}}$$

Das Verhältnis Signal zu Rauschen wird dann

$$10 \log \frac{\bar{I}_{\text{Test}}}{\bar{I}_{\text{Rauschen}}} = 10 \log \frac{m_k}{1 - m_k} \quad [\text{dB}]$$

Dieses Prozedere wird für insgesamt 7 Oktaven durchgeführt.

Der zu messende Kanal kann nun durch die entsprechenden Werte des Verhältnisses Signal zu Rauschen charakterisiert werden (vgl. Fig. 3). Analog dem AI-Verfahren wird ein mittlerer Übertragungsindex bestimmt, nach dem die einzelnen Oktaven, entsprechend dem menschlichen Ohr, gewichtet werden. Dieser Index (0-100%) muss auf die Wort- oder Silbenverständlichkeit übertragen werden. In mehrjährigen Vergleichsmessungen untersuchten verschiedene Institute (TNO Soesterberg, CNET Lannion, FTZ Darmstadt) die Relation zwischen dem Übertragungsindex und der Wort- und Silbenverständlichkeit. In die Versuche wurden FM-Geräte, verschiedene Delta-Geräte und PCM-Systeme mit einbezogen. Das Verhältnis zwischen PB-Wortverständlichkeit und dem Übertragungsindex ist in Figur 2 dargestellt. Unterschiede zwischen verschiedenen Sprachen konnten auch nach Langzeitmessungen nicht festgestellt werden.

Das Blockschema der Messeinrichtung mittels der Normohr-Methode ist in Figur 3 dargestellt.

4. Konzept der Messungen

Der eigentliche Prüfling der gesamten Messreihe war das Schweizer Gelände. Zwischen Bodensee und Genfersee wurden 120 Standorte für die Messungen ausgewählt. Aus der grossen Palette von Parametern wurden einige festgelegt und für die Messungen vorbereitet:

Übertragungsfrequenzen	35 und 68 MHz
Übertragungsdistanz	3, 6 und 12 km
Abgestrahlte Sendeleistung	2 W
Betriebsarten	FM klar, Delta klar, Delta crypto
Erfasste Parameter	E-Feld (dB µV) Sinad Subjektive Sprachbeurteilung Normohr Echomessung (zeitweise) Bit-Fehlerrate BER

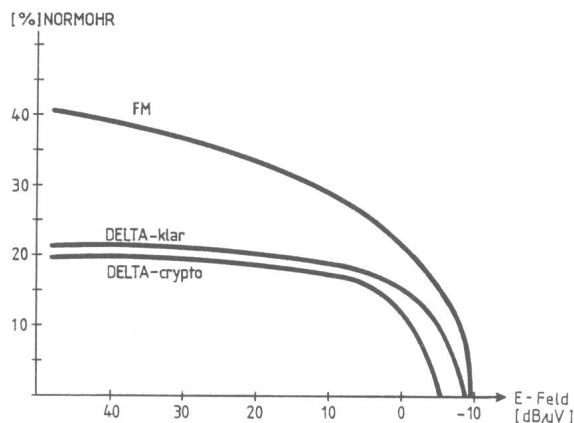


Fig. 6 Laborwerte mit der Sinad-Messung

Die gesamte Messreihe dauerte rund 1 Jahr. Die Witterungseinflüsse wurden wohl erfasst, konnten aber nur zum Teil ausgewertet werden. Aus den über 12 000 Messungen sollen im folgenden Kapitel einige Resultate diskutiert werden.

An jedem der 120 Standorte galt es, sämtliche Parameter für alle Betriebsarten zu messen. Um den Ablauf möglichst kontinuierlich gestalten zu können, wurden zwei Sende- und ein Empfangsfahrzeug ausgerüstet. Die Blockschemata der verwendeten Sende- bzw. Empfangsanlagen sind in den Figuren 4 und 5 dargestellt.

5. Einige Messresultate

Da die Güte der Sprachübertragungen von primärem Interesse war, sollen hier hauptsächlich die Resultate der Messung der Restverständlichkeit diskutiert werden.

5.1 Laboruntersuchungen

Die Laboruntersuchungen der drei Systeme (FM, Delta klar, Delta crypto) zeigten verschiedene überraschende Resultate. Der Sinad-Wert der Systeme wurde gemessen (Fig. 6). Erstaunlicherweise schnitten die Delta-Systeme wesentlich schlechter ab als das FM-System. Anschliessende Testmessungen im Feld, in denen die subjektive Beurteilung

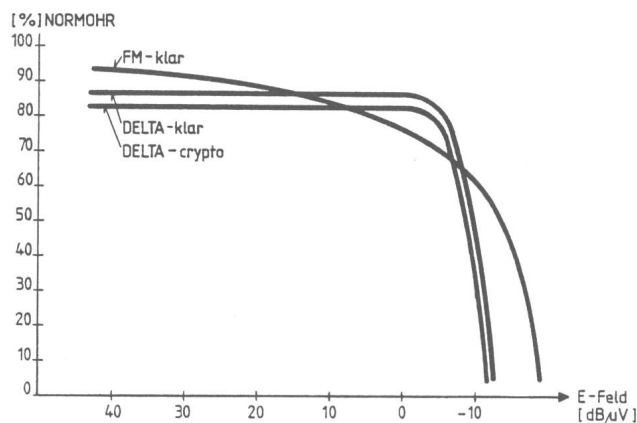


Fig. 7 Laborwerte mit der Normohr-Methode

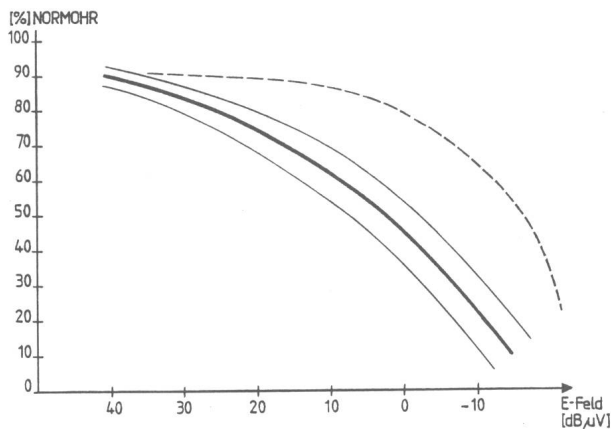


Fig. 8 Einfluss des Geländes auf FM-Systeme

des Kanals festgehalten wurde, zeigten eher gegenläufige Tendenz. Es wurde ferner festgestellt, dass sich das Ohr des Funkers zuerst an die Delta-Übertragung gewöhnen muss. Ist dies der Fall, werden Übertragungen über Delta-Systeme vor allem bei kleinen Feldstärken besser beurteilt. Diese Tendenz bestätigten dann die Labormessungen mit der Normohr-Methode (Fig. 7). Bei grossen Eingangspegeln (> 10 dB μ V) wurde eine bessere Übertragung bei FM gemessen. Bei Eingangspegeln um 0 dB μ V waren Delta-übertragene Signale besser als FM-übertragene Signale. Diese Tatsache stand im Widerspruch zur weitverbreiteten Meinung. Bei ganz kleinen Pegeln (< -10 dB μ V) wurde die Messeinrichtung zu ungenau. Zu viele Parameter spielten dort mit, so dass die Messresultate nicht aussagefähig sind.

Schon nach Abschluss der Laboruntersuchungen konnte festgestellt werden, dass kein wesentlicher Unterschied zwischen dem FM-System und den Delta-Systemen besteht.

5.2 Feldmessungen

Bei den Feldmessungen ging es vor allem um den Einfluss des Geländes auf die Systeme.

Das im Labor festgestellte grundsätzliche Verhalten von FM-Systemen wurde durch die Feldmessungen bestätigt (Fig. 8). Überraschend jedoch war die grosse Streuung der Resultate. Bei unterschiedlichen Pegeln (bis 35 dB μ V) konnten annähernd gleiche Restverständlichkeiten gemessen werden. Dies wird von Nato-Messungen bestätigt (Messungen des Institutes TNO).

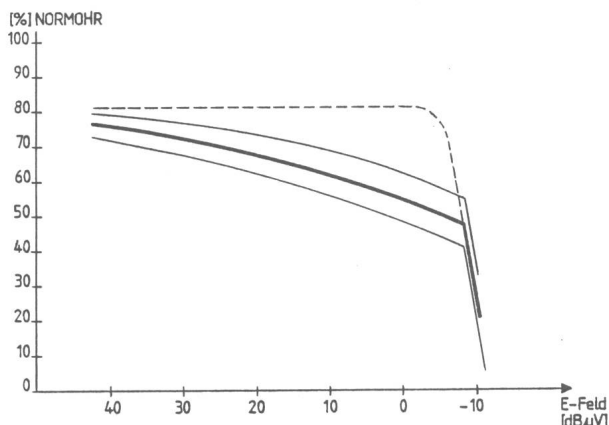


Fig. 9 Einfluss des Geländes auf das Delta-klar-System

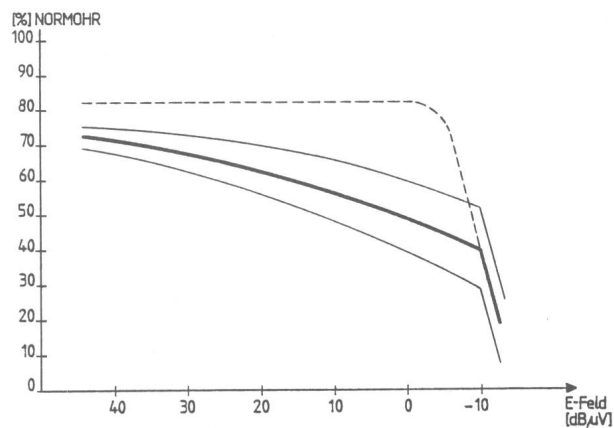


Fig. 10 Einfluss des Geländes auf das Delta-crypto-System

Die Delta-Systeme verhielten sich ähnlich (Fig. 9 und 10). Bei Eingangspegeln bis gegen 0 dB μ V bleiben digitale Systeme ziemlich konstant. Die Streuung des Geländes ist nicht so stark erkennbar. Bei Pegeln um -10 dB μ V brechen die digitalen Systeme rasch zusammen. Kurz vor dem Zusammenbruch ist die Restverständlichkeit jedoch immer noch recht hoch, höher als bei FM-Systemen.

5.3 Gegenüberstellung der Systeme

In der Gegenüberstellung (Fig. 11) zeigt sich, dass die verbreitete Meinung, digitale Systeme seien für das Schweizer Gelände nicht geeignet, unzutreffend ist. Wohl haben FM-Systeme bei grossen Eingangspegeln bessere Übertragungsqualitäten. In kritischen Bereichen (unter 5 dB μ V) weisen digitale Systeme jedoch bessere Übertragungseigenschaften auf.

Aufgrund dieser Messungen darf festgehalten werden, dass digitale Systeme im Schweizer Gelände ebensogut verwendet werden können wie FM-Systeme. Der Einführung von digitalen Übertragungssystemen für den taktischen Sprechfunkverkehr steht aus übertragungstechnischer Sicht nichts im Wege.

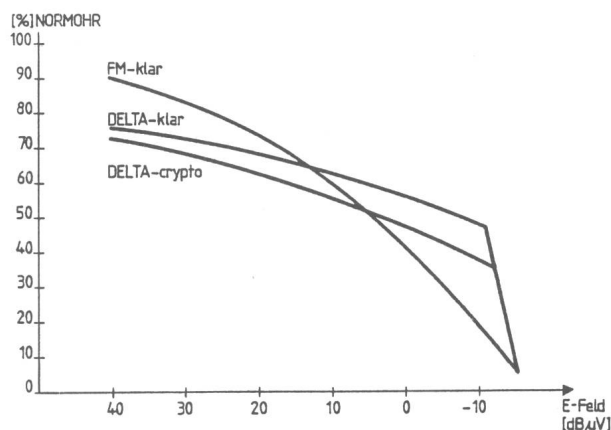


Fig. 11 Vergleich der Systeme im Gelände

Adresse des Autors

W. Zeller, dipl. El.-Ing. ETHZ, Bundesamt für Übermittlungstruppen, Sektion Planung, Postfach, 3000 Bern 25 (seit 1. Juli 1982 bei den Bernischen Kraftwerken AG, Viktoriaplatz 2, 3000 Bern 25).