

<b>Zeitschrift:</b>	Technische Mitteilungen / Schweizerische Post-, Telefon- und Telegrafenbetriebe = Bulletin technique / Entreprise des postes, téléphones et télégraphes suisses = Bollettino tecnico / Azienda delle poste, dei telefoni e dei telegrafi svizzeri
<b>Herausgeber:</b>	Schweizerische Post-, Telefon- und Telegrafenbetriebe
<b>Band:</b>	34 (1956)
<b>Heft:</b>	4
<b>Artikel:</b>	Die Beeinflussung der Hochfrequenz-Telephonrundspruch-(HFTR)-Übertragung auf Freileitungen durch Langwellensender
<b>Autor:</b>	Kallen, R.
<b>DOI:</b>	<a href="https://doi.org/10.5169/seals-874515">https://doi.org/10.5169/seals-874515</a>

### 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](#)

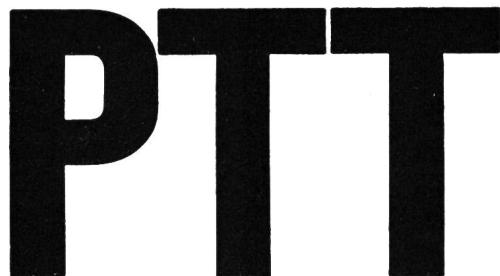
### Terms of use

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:** 23.01.2026

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

TECHNISCHE MITTEILUNGEN  
BULLETIN TECHNIQUE



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

## Die Beeinflussung der Hochfrequenz-Telephonrundspruch- (HFTR-) Übertragung auf Freileitungen durch Langwellensender

Von R. Kallen, Bern

621.395.97 : 621.396.82

**Zusammenfassung.** In der vorliegenden Arbeit werden einige Möglichkeiten zur Verbesserung des Störabstandes bei der HFTR-Übertragung auf Telephonfreileitungen geprüft. Die Untersuchungen gehen von der Voraussetzung aus, dass das Prinzip der Freileitung beibehalten werde, dass somit als Leiter blanke, unverdrillte Drähte verwendet werden.

### I. Einleitung

Die Übertragung des hochfrequenten Telephonrundspruchs (HFTR) auf Freileitungen wird in zunehmendem Masse durch Langwellensender beeinträchtigt. Der Grund dafür ist das Anwachsen der Senderzahl und die Inbetriebsetzung neuer starker Sender ausserhalb des Wellenplanes. Unsere HFTR-Anlagen lassen zufolge ihrer systembedingten Eigenarten nicht ohne weiteres ein Ausweichen in der Frequenz zu. Die Kosten einer neuen Frequenzverteilung beim HFTR können nur dann verantwortet werden, wenn man sich von dieser Massnahme eine wirkungsvolle Verbesserung auf längere Zeit verspricht. Dies ist jedoch bei der heutigen Situation und der herrschenden Willkür im Äther keineswegs möglich.

Unter den verschiedenen Lösungen zur Verbesserung der HFTR-Übertragungsverhältnisse steht u.a. auch die Verbesserung der Freileitungssymmetrie zur Diskussion. Es war zu untersuchen, welche Vergrösserung des Störabstandes man unter Beibehaltung des bisherigen oberirdischen Freileitungsprinzips bei minimalem Aufwand erreichen kann.

In einem früher erschienenen Bericht<sup>1</sup> wurde auf die Möglichkeit eines konzentrierten Abgleichs der Störspannungen hingewiesen, diese Massnahme aber als nicht empfehlenswert abgelehnt, weil es sich dabei um eine stark frequenzabhängige Kompensation han-

**Résumé.** Dans le présent article, l'auteur examine quelques possibilités d'améliorer le rapport signal/bruit en cas de transmission de la télédiffusion HF sur des lignes aériennes. On a procédé aux essais en admettant que la ligne aérienne est maintenue, donc que la transmission s'effectue par des conducteurs nus non toronnés.

delt. Wie im nächsten Abschnitt erläutert wird, ist beim direkten Zusammenschalten von Kabel und Freileitungen das Nah-Nebensprechen zwischen asymmetrischem und symmetrischem System im Kabel für die Grösse der Störwirkung mitverantwortlich. Die Kompensationselemente müssten deshalb für jede Frequenz verschieden sein.

Die Verhältnisse werden einfacher, wenn der Einfluss des Erdkabels ausgeschaltet wird. Dies bedingt, dass zwischen Kabel und Freileitung ein Trennelement eingefügt wird, das die asymmetrischen Systeme Seite Freileitung und Seite Kabel voneinander entkoppelt und für die Freileitung einen erdsymmetrischen Abschluss darstellt.

In den letzten Jahren werden verschiedentlich selbst vollständig unterirdische Leitungen über die Neben-sprechkopplungen im Kabel durch Sender gestört, wenn im Kabel Adern mit oberirdischer Fortsetzung verlaufen. Man ist so genötigt, in die Überführungs-punkte Sperrdrosseln einzubauen, die das Einschleppen der Störungen in die Kabelanlage verhindern. Es betrifft dies in erster Linie die HFTR-Zubringer-leitungen, die ganze Netze versorgen und allenfalls auch noch die NFTR-Anlagen speisen. Die Sperr-drosseln können gleichzeitig die Funktion des oben erwähnten Trennelementes übernehmen.

Nachdem sich die Verwendung von Sperrgliedern ohnehin aufdrängt, schien es angezeigt, die Mög-lichkeit des Abgleichs einer reinen Freileitung abzu-klären.

<sup>1</sup> Bericht Nr. 29.1.4 vom 9. 10. 1953 der Forschungs- und Ver-suchsanstalt PTT (nicht veröffentlicht).

## II. Problemstellung

### 1. Das Nah-Nebensprechen im Kabel

Es sei zunächst die Frequenzabhängigkeit des Nah-Nebensprechens begründet. Der Begriff Nebensprechen ist auf beliebige Leitungen anwendbar, unbedenklich darum, ob es sich um symmetrische (Stamm-, Phantom-, Superphantom-Leitungen) oder asymmetrische (Stamm/Erde, Vierer/Erde, Achter/Erde usw.) handelt. Wie aus Figur 1 hervorgeht, wird im

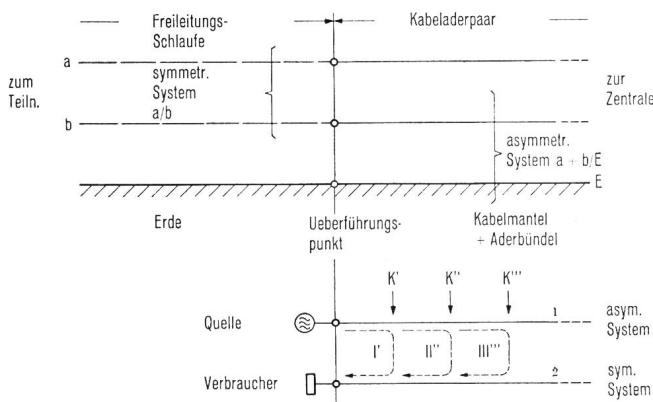


Fig. 1. Symmetrische und asymmetrische Systeme in einer Teilnehmerleitung

vorliegenden Falle das Nah-Nebensprechen zwischen der störenden Leitung 1, dargestellt durch das asymmetrische System Stamm/Erde, und der gestörten Leitung 2 betrachtet, dargestellt durch den symmetrischen Stamm. Die Freileitung wirkt als Stromquelle an der störenden Leitung 1. Bei den Kopplungsherden  $K'$ ,  $K''$ ,  $K'''$  treten entsprechende Störströme  $I'$ ,  $I''$ ,  $I'''$  in die gestörte Leitung 2 über. (Für diese allgemeine Betrachtung sei nicht zwischen kapazitiver und induktiver Kopplung unterschieden.) Die einzelnen Störanteile setzen sich im Verbraucher zusammen, wobei sie untereinander entsprechend den unterschiedlichen Wegstrecken in der Phase verschoben sind, und zwar auch dann, wenn alle Kopplungen  $K'$ ,  $K''$ ... den gleichen Charakter aufweisen oder wenn es sich um eine stetig verteilte, systematische Kopplung handelt. Da die Phasendrehung der Störströme mit der Frequenz zunimmt, muss auch der resultierende Störstrom im Verbraucher seine Phase mit der Frequenz ändern. Dies ist auch der Grund, weshalb man das Nah-Nebensprechen nicht durch einen konzentrierten Abgleich am Empfangsort beseitigen kann.

Es ist somit auch leicht einzusehen, dass selbst mit einer vollkommen symmetrischen Freileitung (z. B. verdrillte Doppelader) die im Kabel erzeugten symmetrischen Störkomponenten nicht ohne weiteres durch einen konzentrierten Abgleich beim Teilnehmer über ein breites Frequenzband kompensiert werden können.

### 2. Die Freileitung mit ideal erdsymmetrischem Abschluss

Nachdem es grundsätzlich möglich ist, Kabel und Freileitung, asymmetrisch betrachtet, zu trennen (der symmetrische Stammstromkreis erfährt bei entsprechender Gestaltung der Filter keine nennenswerte Dämpfung), bleibt zu untersuchen, ob und wie weit die reine Freileitung in der Symmetrie verbessert werden kann. Das nachstehend gewählte Vorgehen geht vorerst von idealisierten Verhältnissen aus, um die Ergebnisse möglichst anschaulich zu machen und die mathematische Behandlung nicht unnötig zu komplizieren. Es besteht zudem die Meinung, dass sich zunächst unter solchen Voraussetzungen ein positives Resultat abzeichnen muss, bevor weitere Elemente in die rechnerische Behandlung gebracht werden. Als erstes wird vorausgesetzt, dass die beidseitigen Abschlüsse vollkommen erdsymmetrisch seien und somit keinen Beitrag an die symmetrischen Störspannungen liefern. Weiter wird angenommen, dass die gestörte Freileitungsschlaufe beidseitig mit ihrem Wellenwiderstand abgeschlossen sei. (In der Praxis ist dies nicht der Fall; die Abschlussimpedanz ist stets zu niedrig, da sie aus einem Widerstand von  $150 \Omega$  parallel mit der beträchtlichen Kapazität der F-Bleikabel besteht.)

Die im nächsten Abschnitt angegebenen Formeln werden zuerst aus den allgemeinen Leitungsgleichungen ohne Vernachlässigungen abgeleitet. Für das Einsetzen der Zahlenwerte wird die Weiterbehandlung wesentlich erleichtert, wenn die betrachteten Leitungssysteme als verlustfrei gelten können. Dies trifft für die symmetrische Schlaufe annähernd zu; für das asymmetrische System bedeutet diese Annahme, dass die Erde als idealer Leiter angesehen wird und dass der Strahlungswiderstand vernachlässigt wird. (Der Strahlungswiderstand eines Freileitungsstranges ist klein gegenüber dem Erdwiderstand.)

Es geht nun darum, die Faktoren zu bestimmen, welche für die Grösse der Störspannungen in der beeinflussten Schlaufe verantwortlich sind, und dann zu untersuchen, welche Mittel zu einer Reduktion der Störspannungen führen.

Soll diese Reduktion mit Hilfe von Abgleichelementen erreicht werden, so ist einleuchtend, dass ein Abgleich nicht selektiv wirken darf. Vielmehr muss sich die Verbesserung über den ganzen HFTR-Frequenzbereich erstrecken, weil sonst neue Störungen auftreten.

## III. Allgemeine theoretische Überlegungen

### 1. Situation

Vom Kabelüberführungspunkt strahlen je nach Fassungsvermögen 2...20 Freileitungsschläufen nach verschiedenen Richtungen ab, wobei sie streckenweise als Strang parallel geführt werden. Von diesem Strang zweigen die Zuleitungen zu den einzelnen Teilnehmern ab; bei Gemeinschafts-(GA-)Anschlüssen

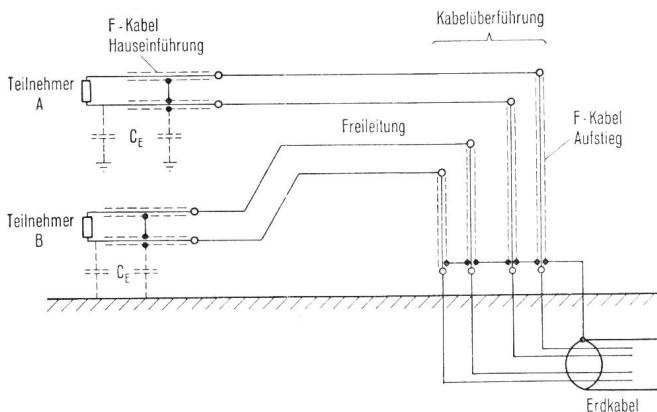


Fig. 2. Für die Hochfrequenzübertragung wesentliche Teile einer Teilnehmerleitung

bedient die gleiche Schlaufe bekanntlich zwei Teilnehmer, die mehr oder weniger weit auseinander liegen.

In der Fig. 2 sind schematisch diejenigen Teile der Teilnehmerleitung angedeutet, die für das Verhalten bei Hochfrequenz interessieren. Man sieht dar aus, dass der Strang als Ganzes auf Seite Kabel praktisch über die Kabelimpedanz geerdet ist. Dasselbe gilt annähernd, wenn die Kabeladern im Sicherungskasten von den Aufstiegadern getrennt werden, denn die Summe aller F-Kabel-Kapazitäten stellt eine niederohmige Impedanz dar. (Die Kapazität einer Aufstiegader gegen Erde beträgt beim heute verwendeten Bleikabeltyp rund 1000 pF.) Auf der Seite Teilnehmer weist die Schlaufe, asymmetrisch gesehen, gegen Erde ebenfalls eine gewisse Kapazität  $C_E$  auf. Dieser Wert kann von Fall zu Fall in weiten Grenzen liegen, je nach der Länge und der Verlegung der Hauseinführung und der Installation.

Wie aus den später folgenden Darlegungen hervorgeht, sind alle diese Erdkapazitäten für die Höhe der Störspannungen stark mitverantwortlich, weil sie den Stromfluss im asymmetrischen System begünstigen.

## 2. Einwirkung des Senderfeldes auf die Leitung

Das Senderfeld wirkt auf zweierlei Arten auf die Freileitungsschlaufe ein:

- durch direkte Rahmenwirkung der Schlaufe;
- indirekt über die Kopplung zwischen Schlaufe und asymmetrischem System.

Die Schlaufe kann als lange, schmale Rahmenantenne mit einer einzigen Windung aufgefasst werden. Die in einem Rahmen induzierte EMK ist ein Maximum, wenn das Feld in der Rahmenebene polarisiert ist und wenn sich die Sendeantenne in der Rahmenebene befindet, unter der Voraussetzung, dass die Abmessungen des Rahmens klein sind im Vergleich zur Wellenlänge. Anderseits ist bei genau vertikal polarisiertem Empfangsfeld und bei genau horizontaler Ebene durch die Freileitungsschlaufe die induzierte EMK theoretisch gleich null. In der Praxis trifft aber weder das eine noch das andere je zu, so dass stets eine Einwirkung dieser Art vorhanden ist. Sie hängt von der Neigung der Freileitungstrasse,

von den Unterschieden in den Drahthöhen und von der Orientierung des Stranges in bezug auf den Senderstandort ab. Allgemein gesagt, ist die Einwirkung um so grösser, je grösser die Projektion der Rahmenfläche auf eine vertikale Ebene wird, die Sender- und Freileitungsstandort verbindet. Dabei ist immer vorausgesetzt, dass die Ausdehnung des Rahmens gegenüber der Wellenlänge klein bleibt. Bei grösseren Leitungsgebilden wird die direkte Beeinflussung des symmetrischen Systems unsystematisch. Als solche ist sie einem künstlichen Abgleich zum vornehm unzugänglich. Sie sei deshalb vorderhand nicht weiter betrachtet.

Der zweite Anteil der Einwirkung, über die Kopplung zwischen symmetrischem und unsymmetrischem System, ist bei horizontaler Schlaufenebene an der Störspannung vorwiegend beteiligt, so dass im folgenden näher darauf eingegangen wird.

## 3. Anteil der magnetischen und elektrischen Kopplung zwischen asymmetrischem und symmetrischem System

Bei der gegenseitigen Beeinflussung von Stromkreisen wird zwischen dem magnetischen (induktiven) Anteil und dem elektrischen (kapazitiven) Anteil unterschieden. Beim ersten ist die im gestörten Kreis erzeugte Störspannung dem Strom  $I_1$  im störenden System und der Gegeninduktivität  $L_{12}$  proportional, beim zweiten sind die Spannung  $U_1$  im störenden System und die Kopplungskapazität  $C_{12}$  massgebend. Im vorliegenden Beeinflussungsfall ist der kapazitive Anteil gegenüber dem induktiven vernachlässigbar, obwohl die Kopplungskapazitäten  $C_{12}$  und die Spannung  $U_1$  keineswegs immer gering sind.

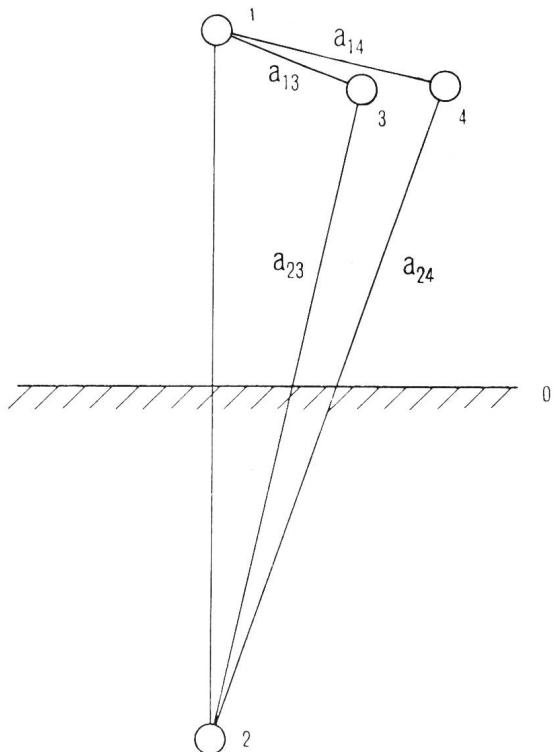


Fig. 3. Gegenseitige Lage der Leiter eines störenden Systems 1, 2 und eines gestörten Systems 3, 4

Dieser scheinbare Widerspruch wird aufgelöst, wenn man bedenkt, dass die Potentiale der Drähte einer beeinflussten Schlaufe ebenfalls vom Senderfeld gesteuert werden. In Fig. 3 sei zum Beispiel das asymmetrische System 1,2 vorerst durch eine eigene Spannungsquelle gespeist. Dann nehmen die beiden Drähte 3,4 des gestörten symmetrischen Systems solche Potentiale an, dass zwischen ihnen eine Spannung  $U_{34}$  entsteht, die von den gegenseitigen Drahtabständen abhängt:

$$U_{34} = p \cdot \ln \frac{a_{23} \cdot a_{14}}{a_{13} \cdot a_{24}} = p' C_{12}$$

$p$  und  $p'$  sind Proportionalitätsfaktoren. Dieser Fall entspricht dem kapazitiven Nebensprechen zwischen Sprechstromkreisen. Sobald sich aber das gezeichnete Gebilde im Senderfeld befindet, ergeben sich die Potentiale der Leiter 3 und 4 nicht mehr aus den Drahtabstandsverhältnissen, sondern es gilt vielmehr

$$\begin{aligned} U_{12} &\approx U_{32} \approx U_{42} \text{ und damit} \\ U_{34} &= U_{32} - U_{42} \approx 0 \end{aligned}$$

Die Tatsache, dass die Kopplung zwischen asymmetrischem und symmetrischem Stromkreis vorwiegend magnetischer Natur ist, wird durch die Messungen bestätigt (s. S. 157). Für die weitere Behandlung des Problems wird deshalb die kapazitive Beeinflussung ausser acht gelassen.

Sobald ein Freileitungsstrang aus mehreren Drähten besteht, lassen sich ausser den beiden direkt interessierenden Stromkreisen weitere, dritte Leitungen (Vierer, Achter, unsymmetrische usw.) unterscheiden. Eine Kopplung zwischen den beiden ersten Leitungen kann direkt (unmittelbares Nebensprechen) und über dritte Leitungen (mittelbares Nebensprechen) erfolgen. Das mittelbare Nebensprechen wird hier ebenfalls nicht weiter beachtet.

#### IV. Berechnung der Störspannungen

Im folgenden soll nun der theoretische Wert der Störspannung berechnet werden, die ihre Ursache in der systematischen, induktiven und direkten Kopplung zwischen dem störenden asymmetrischen System und dem gestörten symmetrischen System hat. Dass die Leiter des symmetrischen Systems zugleich am Aufbau des unsymmetrischen teilhaben, ist für die grundsätzlichen Überlegungen und für die Rechnung unerheblich. Wir sprechen von zwei Systemen; dabei ist als selbstverständlich eingeschlossen, dass die Drähte beiden zugleich dienen können.

Es wird angenommen, dass beide Systeme längs-homogen seien, das heisst, alle Schlaufen des Stranges verbinden den gleichen Anfangs- und Endpunkt der (geraden) Linie.

Je nach der Grösse der Kapazität  $C_E$  (Fig. 2) ergeben sich verschiedene Rechnungsresultate. Es werden die beiden Grenzfälle herausgegriffen:

1.  $C_E$  sehr klein, für die Rechnung vernachlässigbar;
2.  $C_E$  so gross, dass für HFTR-Frequenzen mit einem Kurzschluss gerechnet werden kann.

#### 1. Berechnung der Störspannung für den Fall verschwindend kleiner Erdkapazität beim Teilnehmer

Allgemein gilt für jede Übertragung über Leitungen mit den Bezeichnungen nach Fig. 4:

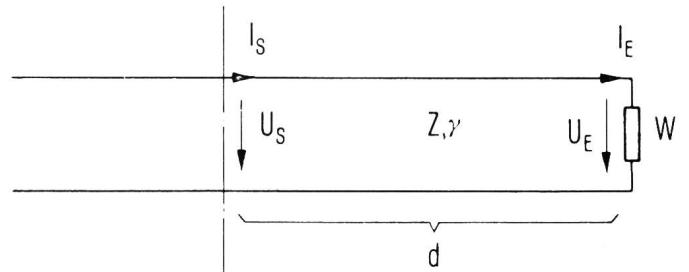


Fig. 4. Spannungen und Ströme auf einer Leitung

$$U_S = U_E \cosh \gamma d + I_E Z \sinh \gamma d \quad (1)$$

$$I_S = I_E \cosh \gamma d + \frac{U_E}{Z} \sinh \gamma d \quad (2)$$

wobei die Grössen mit dem Index E der Empfangsseite zugehören und die Werte mit dem Index S auf der Leitung im Abstand d vom Empfänger (in Richtung Sender) auftreten.

Auf die Fig. 5 angewendet, erhält man mit

$C_E = 0; I_E = I_{10} = 0$  (Stromkreis 1 am linken Ende offen,  $E_0$  unwirksam)

$$U_{11} = U_{10} \cosh \gamma_1 l; I_{11} = \frac{U_{10}}{Z_1} \sinh \gamma_1 l; I_{1x} = \frac{U_{10}}{Z_1} \sinh \gamma_1 x l \quad (3)$$

dabei ist

$$U_{11} = E_1 \quad (3a)$$

die vom Senderfeld im Aufstieg induzierte EMK.

Der Strom  $I_{1x}$  bewirkt über die magnetische Koppelung an der Stelle x im gestörten System die elementare EMK

$$E_{2x} = -j\omega L_{12} I dx \cdot I_{1x} \quad (4)$$

Diese hat den Elementarstrom

$$I_{2x} = \frac{E_{2x}}{2Z_2} \quad (5)$$

zur Folge. Die Summe aller Elementarströme setzt sich im Empfänger  $R = Z_2$  zum Störstrom  $I_{20}$  zusammen

$$I_{20} = \int_0^l I_{2x} e^{-\gamma_2 l x} dx \quad (6)$$

Die Störspannung ist dann ganz allgemein mit

$$U_{20} = I_{20} \cdot Z_2 \text{ und } \gamma_2 l = \Gamma_2$$

$$U_{20} = -j\omega \frac{L_{12}}{2} l \int_0^l I_{1x} \cdot e^{-\Gamma_2 x} dx \quad (7)$$

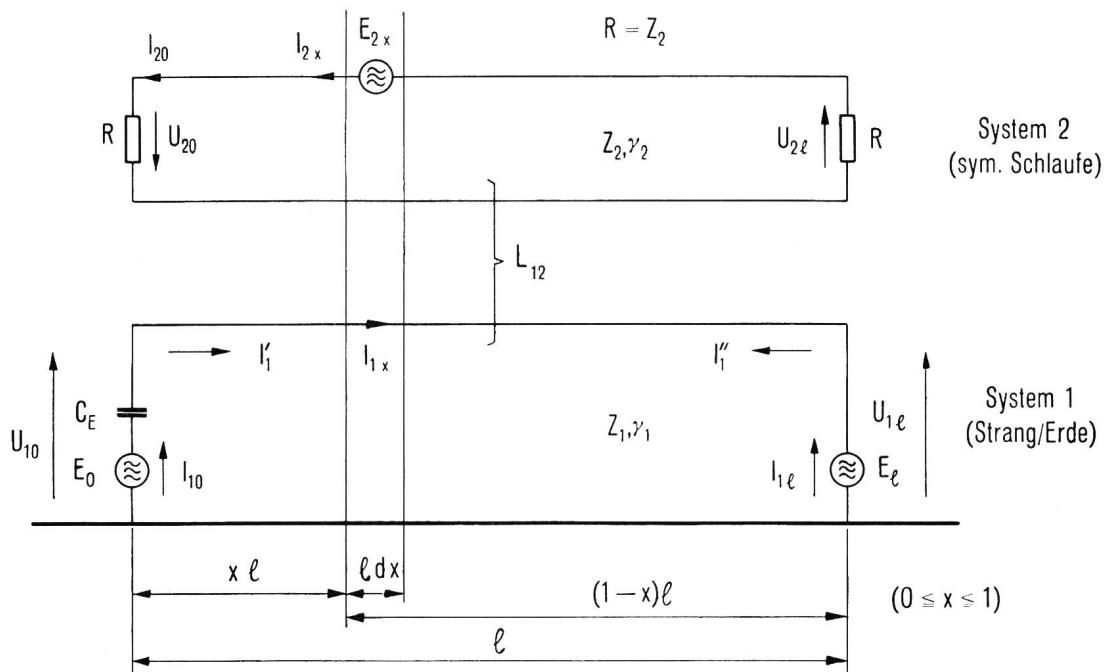


Fig. 5.

Spannungen und Ströme im unsymmetrischen (1) und symmetrischen (2) System

Setzt man zur Abkürzung

$$Z^* = -j\omega \frac{L_{12}}{2} l \quad (8)$$

so wird mit  $\gamma_1 l = \Gamma_1$  und (3) in (7) eingesetzt:

$$U_{20} = \frac{Z^*}{Z_1} U_{10} \cdot \int_0^l \sinh \Gamma_1 x \cdot e^{-\Gamma_2 x} dx \quad (9)$$

Nimmt man an, dass beide Systeme gleiche Fortpflanzungskonstanten haben, ist also

$$\Gamma_1 = \Gamma_2 = \Gamma,$$

dann ergibt die Ausrechnung des Integrals:

$$U_{20} = \frac{Z^*}{Z_1} U_{10} \cdot \frac{1}{2} \left[ 1 - \frac{1 - e^{-2\Gamma}}{2\Gamma} \right] \quad (10)$$

und unter der Voraussetzung verlustfreier Leitungen mit

$$\Gamma = A + jB \approx jB \quad (11)$$

wird schliesslich die Störspannung

$$U_{20} \approx \frac{Z^*}{Z_1} U_{10} \cdot F(B) = \frac{Z^*}{Z_1} U_{10} \cdot \frac{1}{4B} \cdot \left[ (2B - \sin 2B) + j(1 - \cos 2B) \right] \quad (12)$$

Die Funktion  $F(B)$  gibt dabei die Abhängigkeit der Störspannung von der elektrischen Leitungslänge an, da allgemein gilt:

$$B = \beta l = 2\pi \frac{l}{\lambda} \quad (13)$$

Für eine gegebene Leitungslänge  $l$  nimmt  $B$  proportional mit der Frequenz zu, so dass die Frequenzabhängigkeit der Störspannung  $U_{20}$  in den Faktoren  $Z^* = -j\omega L_{12} l/2$  und  $F(B)$  zum Ausdruck kommt.

In der Fig. 6/1) ist die Funktion  $F(B)$  in der komplexen Zahlebene mit  $B$  als Parameter dargestellt.

Aus dem Ergebnis (12) ersieht man, dass die Störspannung der Senderfeldstärke – mit (3) und (3a) – und dem Gegeninduktivitätsbelag  $L_{12}$  proportional und dem Wellenwiderstand  $Z_1$  des asymmetrischen Systems umgekehrt proportional ist.

## 2. Berechnung der Störspannung für den Fall sehr grosser Erdkapazität beim Teilnehmer

In diesem Fall kann der asymmetrische Stromkreis 1 am Anfang der Leitung als kurzgeschlossen gelten (Fig. 5), und im senkrechten Teil ist die vom Senderfeld induzierte EMK  $E_0$  wirksam. Diese EMK treibt den Strom  $I_{1'}$  durch das am Ende ebenfalls kurzgeschlossene asymmetrische System, wogegen die im Aufstieg wirksame EMK  $E_1$  einen analogen Strom  $I_{1''}$

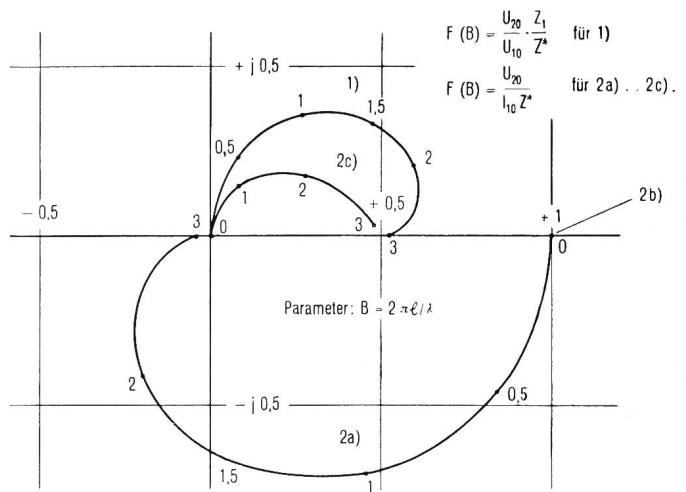


Fig. 6. Darstellung der Funktion  $F(B)$  in der komplexen Zahlebene

zur Folge hat. Die Überlagerung der beiden Teilströme ergibt an jedem Punkt der Leitung den Gesamtstrom

$$I_{1x} = I'_{1x} - I''_{1x} \quad (14)$$

Die allgemeinen Leitungsgleichungen (1), (2) ergeben mit den Bezeichnungen der Figur 5 diesmal

( $U_E = 0$  gesetzt)

$$E_0 = I'_{11} Z_1 \sinh \gamma_1 l; \quad E_l = I''_{10} Z_1 \sinh \gamma_1 l \quad (15)$$

$$I'_{1x} = I'_{11} \cosh \gamma_1 l (1-x); \quad I''_{1x} = I''_{10} \cosh \gamma_1 l x \quad (16)$$

Aus (15) und (16) und mit  $\gamma_1 l = \Gamma_1$  folgt sofort

$$I_{1x} = I'_{1x} - I''_{1x} = \frac{1}{Z_1 \sinh \Gamma_1} \left[ E_0 \cosh \Gamma_1 (1-x) - E_l \cosh \Gamma_1 x \right] \quad (17)$$

Nimmt man für beide Leitungsenden dieselbe wirkende Antennenhöhe an, dann kann man setzen

$$E_l = E_0 e^{-\gamma_0 l_0} = E_0 e^{-\Gamma_0} \quad (18)$$

wobei  $\gamma_0$  die Fortpflanzungskonstante des freien Raumes bedeutet. Die Länge  $l_0$  ist nach Fig. 7 gleich der Wegdifferenz zwischen der Wellenfront und dem Leitungsanfang bzw. -ende.

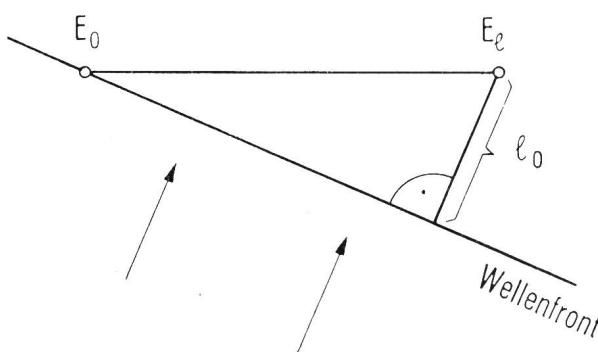


Fig. 7. Die in den Aufstiegen induzierten elektromotorischen Kräfte  $E_0$  und  $E_l$  unterscheiden sich in Betrag und Phase in Abhängigkeit von der Wegdifferenz  $l_0$

Man erhält somit für den Strom am Punkt  $x$

$$I_{1x} = \frac{E_0}{Z_1 \sinh \Gamma_1} \left[ \cosh \Gamma_1 (1-x) - e^{-\Gamma_0} \cosh \Gamma_1 x \right] \quad (19)$$

Die Berechnung der Störspannung  $U_{20}$  sei für die folgenden Spezialfälle durchgeführt:

- Fortpflanzungsrichtung der Sendewelle in Leitungsrichtung vom Teilnehmer weg;
- Fortpflanzungsrichtung der Sendewelle in Leitungsrichtung auf den Teilnehmer zu;
- Fortpflanzungsrichtung der Sendewelle quer zur Leitungsrichtung.

Fall a)  $\text{---} \rightarrow \text{T } \circ \text{---} \circ \text{ Z } \leftarrow \text{---}$

Für diesen Fall kann man setzen

$$\Gamma_0 = \Gamma_1 = \Gamma,$$

wenn man wiederum verlustfreie Übertragung an-

nimmt und die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Leitung gleich der Lichtgeschwindigkeit setzt, was annähernd zutrifft. Die Störung des Senderfeldes durch die Antennenrückwirkung wird vernachlässigt. Man erhält dann

$$I_{1x} = \frac{E_0}{Z_1 \sinh \Gamma} \left[ \cosh \Gamma (1-x) - e^{-\Gamma} \cosh \Gamma x \right] \quad (20)$$

und nach einigen Umformungen resultiert die einfache Stromverteilung

$$I_{1x} = \frac{E_0}{Z_1} e^{-\Gamma x} \quad (\sinh \Gamma \neq 0) \quad (21)$$

$$\text{oder } I_{1x} = I_{10} \cdot e^{-\Gamma x}, \quad \text{da } I_{10} = \frac{E_0}{Z_1} \quad (22)$$

Der Strom im asymmetrischen System ist demnach bei verlustloser Leitung über die ganze Leitungslänge konstant im Betrag und erfährt eine Phasendrehung wie bei jeder normalen Übertragung auf angepassten Leitungen. Mit dieser Stromverteilung ergibt sich dann für die Störspannung (Formeln (7), (8), (21), (22) und mit  $\Gamma_2 = \Gamma$ )

$$U_{20} = Z^* \cdot I_{10} \int_0^1 e^{-2\Gamma x} dx \quad (23)$$

und nach Auswertung des Integrals

$$U_{20} = Z^* \cdot I_{10} \frac{1 - e^{-2\Gamma}}{2\Gamma} \quad (24)$$

und wiederum  $\Gamma \approx j B$  gesetzt:

$$U_{20} \approx Z^* \cdot I_{10} \cdot F(B) = Z^* I_{10} \cdot \frac{1}{2B} \left[ \sin 2B - j (1 - \cos 2B) \right] \quad (25)$$

Die Funktion  $F(B)$  ist ebenfalls in Fig. 6/2a) grafisch dargestellt. Die Störspannung ist auch in diesem Fall den auf Seite 149 erwähnten Größen proportional.

Fall b)  $\text{---} \rightarrow \text{T } \circ \text{---} \circ \text{ Z } \leftarrow \text{---}$

Analog dem Fall a) erhält man zunächst

$$I_{1x} = \frac{E_0}{Z_1} e^{I_x} = I_{10} \cdot e^{I_x}; \quad I_{10} = \frac{E_0}{Z_1}; \quad (\sinh \Gamma \neq 0) \quad (26)$$

In diesem Fall ist der Strom am zentralenseitigen Leitungsende gegenüber dem Strom am Teilnehmerende voreilend. (26) in (7) eingesetzt und mit (8) und  $\Gamma_2 = \Gamma$  ergibt diesmal

$$U_{20} = Z^* \cdot I_{10} \int_0^1 e^{I_x} \cdot e^{-\Gamma x} dx = Z^* \cdot I_{10} \quad (27)$$

Die Störspannung ist also in diesem Fall nicht mehr mit der elektrischen Leitungslänge  $l/\lambda = B/2\pi$  verknüpft, ist aber immer noch gemäss  $Z^* = -j\omega L_{12}l/2$  frequenzabhängig und der effektiven Leitungslänge  $l$  proportional. Die Funktion  $F(B) = U_{20}/I_{10} Z^* = 1$  ist diesmal eine Konstante.

Fall c) T ○ —○ Z



In diesem Falle werden die beiden Vertikalpartien der asymmetrischen Leitung gleichphasig und gleich stark erregt; für die nähere Umgebung der Leitung gilt daher

$$\Gamma_0 = 0 \text{ und } e^{-\Gamma_0} = 1$$

Die Gleichung (19) bekommt die Form

$$I_{1x} = \frac{E_0}{Z_1 \sinh \Gamma} \left[ \cosh \Gamma (1-x) - \cosh \Gamma x \right] \quad (28)$$

Die Störspannung wird dann ( $\Gamma_2 = \Gamma$ ):

$$U_{20} = Z^* \frac{E_0}{Z_1 \sinh \Gamma} \int_0^1 \left[ \cosh \Gamma (1-x) - \cosh \Gamma x \right] e^{-\Gamma x} dx \quad (29)$$

Will man sie auch hier mit dem Strom  $I_{10}$  in Beziehung bringen, dann ist

$$I_{10} = \frac{E_0}{Z_1 \sinh \Gamma} \left[ \cosh \Gamma - 1 \right] \left( \text{Gl. (28) mit } x=0 \right) \quad (30)$$

$$U_{20} = Z^* \cdot I_{10} \frac{1}{\cosh \Gamma - 1} \cdot \int_0^1 \left[ \cosh \Gamma (1-x) - \cosh \Gamma x \right] \cdot e^{-\Gamma x} dx \quad (31)$$

Nach Ausrechnung des Integrals resultiert:

$$U_{20} = Z^* I_{10} \frac{1}{\cosh \Gamma - 1} \cdot \frac{1}{2} \left[ (e^\Gamma - 1) \frac{1 - e^{-2\Gamma}}{2\Gamma} + e^{-\Gamma} - 1 \right] \quad (32)$$

Mit  $\Gamma \approx jB$  folgt schliesslich nach einigen Umformungen

$$U_{20} \approx Z^* I_{10} F(B) = Z^* I_{10} \cdot \frac{1}{2} \frac{1 - \sin B/B}{1 - \cos B} \cdot (1 - \cos B + j \sin B) \quad (33)$$

Die Grösse  $F(B)$  ist in Fig. 6/2c) dargestellt.

Vergleicht man die Resultate (25), (27) und (33) für die drei Grenzfälle, so fällt die starke Richtungsabhängigkeit der Leitungsanordnung auf, im Gegensatz zu dem auf Seite 148 behandelten Fall, wo  $C_E \approx 0$  ist.

Es ist interessant, noch die Stromverteilung  $I_{1x} = f(x)$  im Fall c) zu betrachten. Sie ist aus der Formel (28) nicht ohne weiteres zu deuten, wird aber nach einigen Umformungen anschaulicher:

Mit  $\Gamma \approx jB$  erhält man zunächst

$$I_{1x} \approx \frac{E_0}{Z_1 j \sin B} \left[ \cos B (1-x) - \cos B x \right] \quad (34)$$

und für den Strom  $I_{10}$  mit  $x = 0$ :

$$I_{10} \approx \frac{E_0}{Z_1 j \sin B} (\cos B - 1) \quad (35)$$

Nun gilt für kleine Winkel  $B$  ( $B < 1$ )

$$\cos B (1-x) - \cos B x \approx (1-2x) (\cos B - 1) \quad (36)$$

Aus (34), (35) und (36) folgt dann unmittelbar

$$I_{1x} \approx I_{10} (1-2x) \quad (37)$$

Diese Gleichung (37) besagt, dass bei Leitungslängen bis rund 150 m und Frequenzen bis 350 kHz der Strom vom Wert  $I_{10}$  bis gegen die Leitungsmitte hin nahezu gleichmässig bis auf Null ( $x = 0,5$ ) abnimmt und von da an bis zum Leitungsende ( $x = 1$ ) wieder auf den Wert  $|I_{10}| = |I_{11}|$  nahezu gleichmässig ansteigt. Dabei ist er in der zweiten Leitungshälfte gegenüber dem Strom in der ersten Hälfte in der Phase um  $180^\circ$  gedreht. Die Summe der Ströme  $I_{1x}$  ist demnach über die ganze Leitungslänge annähernd gleich null. Dies stimmt mit der Erwartung überein, wenn man die asymmetrische Schlaufe Strang/Erde als Rahmenantenne betrachtet, deren Ebene quer zur Senderrichtung steht. Dass dabei am Ende des Systems 2 trotzdem eine Störspannung resultiert, ist der unterschiedlichen Phasendrehung der einzelnen Anteile zuzuschreiben. In der Mitte der symmetrischen Schlaufe müsste aber die Störspannung  $U_2$  ( $x = 0,5$ ) tatsächlich gleich null sein.

### 3. Berechnung der Gegeninduktivität

Die Gegeninduktivität  $L_{12}$  lässt sich aus den Maßen des Stangenbildes berechnen (s. Fig. 8). Nach Klein<sup>2</sup> ist die Gegeninduktivität zwischen einer

<sup>2</sup> W. Klein. Trägerfrequenztechnik. Leipzig, 1949. S. 167 und 171.

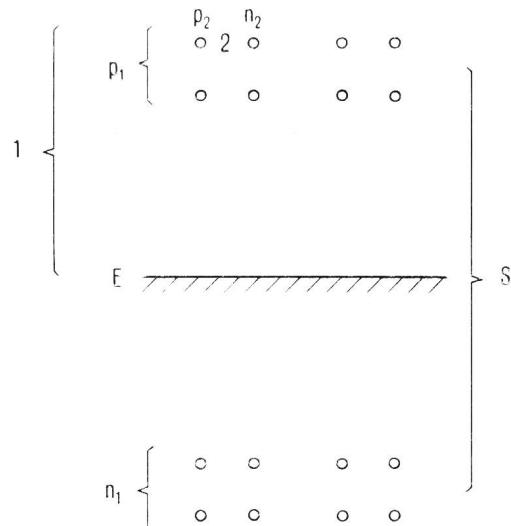


Fig. 8. Bezeichnungen der Hinleitung (p) und Rückleitung (n) im unsymmetrischen (1) und symmetrischen (2) System eines Freileitungsstranges

Schlaufe 2 und dem unsymmetrischen System 1 Strang/Erde gleich gross wie diejenige zwischen der Schlaufe 2 und der Schleife S, die aus dem Strang und dessen Spiegelbild an der Erdoberfläche gebildet wird:

$$L_{12} = L_{S2}$$

Bezeichnet man Hin- und Rückleitung des 1. Systems mit  $p_1$  bzw.  $n_1$ , die des 2. Systems mit  $p_2$  bzw.  $n_2$  und die gegenseitigen Abstände mit einem Strich über diesen Bezeichnungen, so gilt allgemein

$$L_{12} = 0,2 \ln \frac{\overline{p_1 n_2} \cdot \overline{p_2 n_1}}{\overline{p_1 p_2} \cdot \overline{n_1 n_2}} \text{ mH/km} \quad (38)$$

Wird eine Hin- oder Rückleitung aus mehreren Drähten gebildet (z. B.  $p_1$  und  $n_1$ ), so ist das geometrische Mittel aus den einzelnen Drahtabständen einzusetzen.

Für die Fig. 8 erhält man mit

$$\begin{aligned} \overline{p_2 n_1} &\approx \overline{n_1 n_2} \\ L_{12} &\approx 0,2 \ln \frac{\overline{p_1 n_2}}{\overline{p_1 p_2}} \text{ mH/km} \end{aligned} \quad (39)$$

Für eine Linie im Zweierbild mit Traversen ist die systematische Gegeninduktivität  $L_{12}$  für jede Schlaufe gleich null, denn es ist

$$\overline{p_1 n_2} = \overline{p_1 p_2} \text{ und } \overline{n_1 n_2} = \overline{p_2 n_1}$$

und somit

$$L_{12} = 0,2 \ln 1 = 0 \quad (40)$$

Die praktisch stets vorhandenen Durchhangdifferenzen bewirken jedoch eine restliche Gegeninduktivität (die sogenannten unsystematischen Kopplungen).

Um einen Anhaltspunkt über die Höhe der systematischen Gegeninduktivität zu erhalten, seien einige Zahlenbeispiele durchgerechnet:

a) Schlaufe 1 im Viererbild (Versuchsleitung s. S. 155 und Fig. 13).

Das geometrische Mittel aus den Drahtabständen ergibt bei 2 mm Drahtdurchmesser

$$\overline{p_1 n_2} = 487 \text{ mm}; \overline{p_1 p_2} = 589 \text{ mm}$$

damit wird

$$L_{12} = 0,2 \ln \frac{487}{589} = -0,038 \text{ mH/km}$$

b) Schlaufe 1 im Zweierbild mit Seitenträgern, Fig. 9.

Die Auswertung des Stangenbildes ergibt:

$$\overline{p_1 n_2} = 155,8 \text{ mm}; \overline{p_1 p_2} = 159,8 \text{ mm}$$

$$\text{und } L_{12} = 0,2 \ln \frac{155,8}{159,8} = -0,005 \text{ mH/km}$$

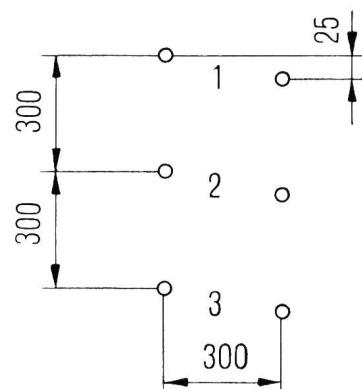


Fig. 9. Zweier-Stangenbild mit drei Schlaufen auf Seitenträgern

### c) Einzelschlaufe

Die systematische Gegeninduktivität ist wie beim Zweier-Traversen-Bild gleich null. Die folgende Rechnung zeigt, dass mit relativ grossen Durchhangdifferenzen noch geringe Kopplungen resultieren, weil die Nachbarschaft der übrigen stromführenden Drähte fehlt:

Für untereinanderliegende Drähte im Abstand  $d$  und mit der mittleren Höhe  $h$  über Boden erhält man die Näherung

$$L_{12} \approx 0,1 \frac{d}{h} \text{ mH/km} \quad (41)$$

Mit  $d = 300$  mm und  $h = 6000$  mm ergibt dies

$$L_{12} \approx 0,1 \frac{300}{6000} = 0,005 \text{ mH/km}$$

Man sieht aus diesen Beispielen, dass das Viererbild wegen der exzentrischen Schlaufenlage die weitaus grössten Kopplungen ergibt, dass die um 25 mm in der Höhe versetzten Seitenträger im Zweierbild ebenfalls eine systematische Kopplung ergeben, dass dagegen die Einzelschlaufe grosse Durchhangfehler verträgt, bis die Kopplung mit den andern Fällen vergleichbar wird.

## V. Massnahmen zur Reduktion der Störspannungen

### 1. Abgleich der systematischen Störspannungsanteile

Für den Fall verschwindend kleiner Erdkapazität  $C_E$  beim Teilnehmer (s. S. 148) ist die Störspannung theoretisch von der Sendereinfallsrichtung unabhängig und ergibt sich aus der Formel (12). Zu ihrer Kompensation ist beim Teilnehmer eine gleich grosse, in der Phase entgegengesetzte Spannung  $U_{20}^k$  erforderlich.

$$U_{20}^k = -U_{20} \quad (42)$$

Da im asymmetrischen System beim Teilnehmer voraussetzungsgemäss kein Strom fliessst, muss die Kompensationsspannung aus der asymmetrischen Spannung  $U_{10}$  abgeleitet werden. Es ist naheliegend, diese Kompensationsspannung als Querspannungsabfall am Abschluss durch einen kleinen Strom  $I^k$  zu gewinnen, der durch eine unsymmetrische hochohmige Ableitung  $Y$  entsteht (s. Fig. 10).

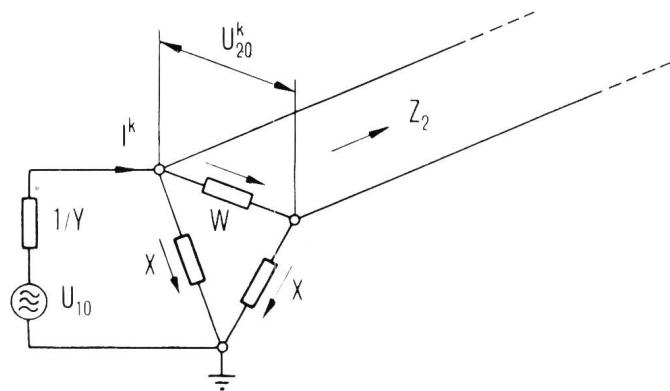


Fig. 10. Kompensation der Störspannung durch eine unsymmetrische Ableitung Y

Ohne im Detail auf die Berechnung der Ersatzimpedanzen  $X$  und  $W$  einzugehen, sei hier sofort das Resultat mitgeteilt:

$$U_{20}^k = \frac{Z_2}{4} \cdot I^k = \frac{Z_2}{4} \cdot Y \cdot U_{10} \quad (43)$$

Aus (12), (42) und (43) folgt dann

$$\begin{aligned} -\frac{Z_2}{4} Y U_{10} &= \frac{Z^*}{Z_1} U_{10} F(B) \\ Y &= -4 \frac{Z^* F(B)}{Z_1 Z_2} = j \omega \frac{2L_{12}}{Z_1 Z_2} I F(B) \end{aligned} \quad (44)$$

Das zu verwendende Abgleichelement müsste demnach eine Ableitung  $Y$  aufweisen, die proportional  $j\omega F(B)$  verläuft. Ein Blick auf die Ortskurve Fig. 6/1 zeigt, dass dies mit einfachen Mitteln nicht zu erreichen ist, auch nicht bei sehr kurzen Leitungen: In der Umgebung  $B = 0$  ist mit  $\cos 2B \approx 2B^2$  und  $\sin 2B \approx 2B$

$$F(B) \approx j \frac{B}{2} = j\omega k$$

$$\text{und } Y \approx \omega^2 k_1 \quad (45)$$

wobei  $k$  und  $k_1$  Konstanten sind.

Nach (45) müsste die verwendete Ableitung reell sein und mit dem Quadrat der Frequenz zunehmen, eine Forderung, die kaum erfüllt werden kann.

Ebenso ungünstig liegen die Verhältnisse in den Fällen, wo  $C_E$  sehr gross ist. In allen drei Grenzfällen a...c ist die Störspannung

$$U_{20} = Z^* \cdot I_{10} \cdot F(B) \quad (46)$$

Im Fall b (s. S. 150), wo  $F(B) = 1$  eine Konstante ist, liesse sich eine Kompensationsspannung

$$-U_{20} = j\omega \frac{L_{12}}{2} I_{10}$$

physikalisch als sekundäre Leerlaufspannung eines Transformators denken, dessen Primärwicklung vom Strom  $I_{10}$  durchflossen wird. Nun ist aber die Einfallrichtung der verschiedenen Störsender verschieden und damit auch der Charakter von  $F(B)$ , so dass selbst bei gleicher Frequenz nicht mit einem fest

eingestellten Abgleichsatz auszukommen wäre. Man entnimmt aus den Fig. 6/2b) und 2c) sofort, dass ein Abgleichelement, das auf den Fall b eingestellt ist, für einen Störer gleicher Frequenz aus einer Richtung quer zur Leitung (Fall c) eine viel zu hohe Kompensationsspannung erzeugt und dass sich der Nutzen somit ins Gegenteil umkehrt.

\*

Diese theoretischen Überlegungen zeigen, dass sogar bei den sehr stark vereinfachten Verhältnissen ein wirksamer Abgleich über den ganzen HFT-R-Bereich unmöglich ist. In der Praxis liegen die Verhältnisse noch weit komplizierter: Abgesehen von den Leistungsverlusten und den Anpassungsfehlern, ist das asymmetrische System in der Regel sehr unhomogen, mit andern Worten, eine Schlaufe wird von Drähten mit beeinflusst, die nur eine Teilstrecke weit parallel laufen und für die Kompensation im Abgleichelement nicht zur Verfügung stehen. Ein für jeden HFT-R-Kanal separat eingestellter, umschaltbarer Kompensationssatz ist wohl noch denkbar, bietet aber keine wesentlichen Vorteile. Für GA-Anschlüsse eignet er sich wegen der gegenseitigen Störung nicht, verhindert auch nicht die Verstärkung von allgemeinen Geräuschstörungen durch Industrie, Bahn oder Gewitter und ist ebenfalls den zeitlichen Änderungen unterworfen. Bei jeder Änderung der Kopplungsverhältnisse, sei es infolge Drahtnachzugs oder Durchhangänderungen durch Rauhreif und Fremdkörper, muss der Abgleich neu vorgenommen werden, eine Arbeit, die der Verwaltung unzählige Arbeitsgänge verursachen würde.

Es mag hier interessieren, dass bei Messungen mit Abgleichelementen an einer Versuchslleitung (s. S. 155) der Störpegel um 2 N im Rhythmus des Drahtpendelns schwankte, wenn der Wind die Drähte bewegte und der Abgleich auf die Spitze getrieben wurde.

## 2. Verminderung der systematischen Kopplung durch Einbau von Drahtkreuzungen

Es soll noch kurz untersucht werden, welche Verbesserung mit dem Mittel der Drahtkreuzung theoretisch erreichbar ist.

Das Vertauschen von a- und b-Draht einer Schlaufe ändert am asymmetrischen System nichts, bewirkt aber, dass die Gegeninduktivität  $L_{12}$  an jeder Kreuzungsstelle das Vorzeichen wechselt.

Bezeichnet man den Abstand zwischen zwei aufeinanderfolgenden Kreuzungen mit

$$s = \sigma l \quad (0 < \sigma < 1) \quad (47)$$

und mit  $n$  die (gerade) Anzahl Kreuzungsschritte, dann erhält man für die Störspannung

$$\begin{aligned} U_{20} = Z^* \left[ \int_0^\sigma I_{1x} e^{-I_2 x} dx - \int_\sigma^{2\sigma} I_{1x} e^{-I_2 x} dx + \right. \\ \left. \int_{2\sigma}^{3\sigma} I_{1x} e^{-I_2 x} dx - \dots + \dots - \int_{(n-1)\sigma}^n I_{1x} e^{-I_2 x} dx \right] \quad (48) \end{aligned}$$

Das Ergebnis der Integration hängt von der Stromverteilung  $I_{1x} = f(x)$  ab; es wird nachstehend für die zwei Spezialfälle a und b der Aufstellung auf Seite 150 angegeben. Ferner soll angedeutet werden, dass im Fall c eine Kreuzung zu einer Vergrösserung der Störspannung führen kann.

Fall a) 

$$U_{20} = Z^* \cdot I_{10} \frac{1 - e^{-2\Gamma}}{2\Gamma} \operatorname{tgh} \Gamma \sigma \quad (49)$$

Die Änderung gegenüber dem ungekreuzten Zustand – Formel (24) – kommt im Faktor

$$\operatorname{tgh} \Gamma \sigma \approx \operatorname{tgh} j B \sigma = j \operatorname{tg} B \sigma \quad (50)$$

zum Ausdruck. Damit eine Verbesserung resultiert, muss  $j \operatorname{tg} B \sigma < 1$  sein. Dies ist der Fall, wenn

$$\sigma \frac{l}{\lambda} = 0, \dots, \frac{1}{8}; \frac{3}{8}, \dots, \frac{5}{8}; \frac{7}{8}, \dots, \frac{9}{8} \text{ usw. ist.} \quad (51)$$

In den dazwischenliegenden Bereichen bewirkt das Kreuzen eine Vergrösserung der Störspannung. Die Kurve in Fig. 11 zeigt die Verbesserung für den

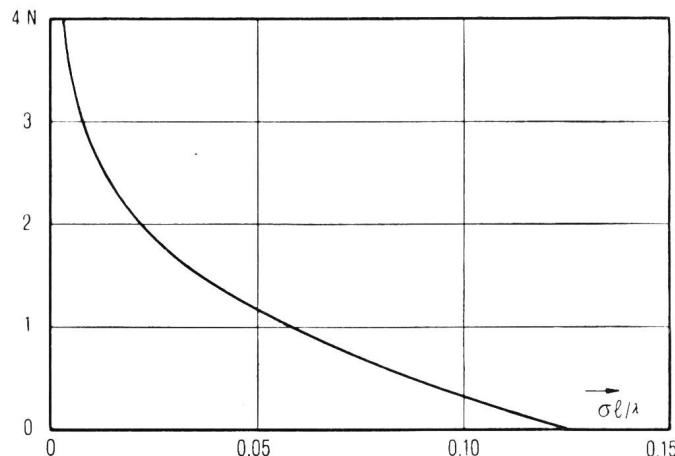


Fig. 11. Verbesserung des Störabstandes in Funktion des Kreuzungsabstandes

Bereich  $\sigma l/\lambda = 0 \dots 1/8$ . Daraus ist zu entnehmen, dass zum Beispiel bei der Frequenz 300 kHz für eine Verminderung des systematischen Anteils der Störspannung um 2N der Kreuzungsabstand  $\sigma l$  höchstens 22 m betragen darf. Für die halbe Frequenz 150 kHz resultiert die gleiche Verbesserung schon bei einem Kreuzungsabstand von 44 m.

Fall b) 

Hier wird der systematische Anteil der Störspannung verschieden, je nachdem, ob die Anzahl Kreuzungsschritte gerade oder ungerade ist:

$$n \text{ gerade: } U_{20} = Z^* I_{10} \cdot 0 = 0 \quad (52)$$

$$n \text{ ungerade: } U_{20} = Z^* I_{10} \cdot \sigma$$

Für eine Senderwelle, die sich in Leitungsrichtung auf den Teilnehmer zu fortpflanzt, genügt demnach theoretisch eine einzige Kreuzung in der Mitte der Leitung, um die (systematische) Störspannung zu eliminieren. Für ungerade  $n$  reduziert sich die Störspannung gegenüber dem ungekreuzten Zustand – Gleichung (27) – auf den Bruchteil  $\sigma = s/l$ .

Eine einzelne Kreuzung in der Mitte der Linie muss sich anderseits sehr ungünstig im Fall c auswirken, wenn man sich die Stromverteilung (s. S. 151) vergegenwärtigt:

Fall c) 

Während sich bei ungekreuzter Schlaufe die entgegengesetzt gerichteten Teilströme  $I_1'$  und  $I_1''$  zum grössten Teil in ihrer Wirkung auf die gestörte Schlaufe kompensieren, wird durch das Umpolen der Schlaufe dieser günstige Einfluss gerade aufgehoben. Für nicht allzu grosse Leitungslängen ( $B < 1$ ) gilt mit Gleichung (37):

$$U_{20} \approx Z^* I_{10} \left[ \int_0^{1/2} (1-2x) e^{-\Gamma x} dx - \int_{1/2}^1 (1-2x) e^{-\Gamma x} dx \right] \quad (53)$$

mit Kreuzung, gegenüber

$$U_{20} \approx Z^* I_{10} \int_0^1 (1-2x) e^{-\Gamma x} dx \quad (54)$$

ohne Kreuzung. Die Ausrechnung ergibt

$$r = \frac{U_{20} \text{ mit Kreuzung}}{U_{20} \text{ ohne Kreuzung}} = \frac{4 e^{-\Gamma/2} + \Gamma - 2 - e^{-\Gamma}(\Gamma + 2)}{\Gamma - 2 + e^{-\Gamma}(\Gamma + 2)} \quad (55)$$

Mit der Näherung  $\Gamma \approx j B$  ergeben sich zum Beispiel folgende Faktoren  $r$ :

$$\begin{aligned} B &= 0,5 & 1 \\ r &= -j 5,9 & -j 2,9 \end{aligned}$$

Dies besagt, dass für eine Sendewelle von beispielsweise 200 kHz quer zur Leitung von 120 m Länge die Kreuzung in der Mitte eine Vergrösserung der Störspannung auf das rund Sechsfache bewirkt, was einer Verschlechterung um 1,8 N entspricht.

\*

Das Kreuzen der Schlaufen ist ein geeignetes Mittel zur Reduktion der systematischen Kopplungen, sofern der Kreuzungsabstand klein genug gewählt wird. Damit steht aber der Aufwand in keinem rechten Verhältnis mehr zum Nutzen.

### 3. Verhinderung des asymmetrischen Stromflusses

Die Tatsache, dass im vorliegenden Beeinflussungsfall die magnetischen Kopplungen vorherrschen, führt auf den Gedanken, den Strom im asymmetrischen System zu unterbinden. Dem stellt sich aber die

große Kapazität der F-Kabel entgegen. Die gegenwärtig geprüfte Umstellung auf unabgeschirmte Kunststoff-F-Kabel für die Aufstiege und Hauseinführungen würde sich hierin günstig auswirken. Der Vorteil dieser Kunststoffkabel lässt sich aber auch nur dann ausnützen, wenn zwischen Kabeladern und Freileitung Drosselpulen geschaltet werden, die für die Freileitung bei Hochfrequenz asymmetrisch einen hochohmigen Abschluss darstellen.

Die Messungen an einer Versuchsleitung zeigen, welche Reduktion der Störspannungen bei asymmetrischem Leerlauf zu erwarten sind. Die Resultate finden sich im nächsten Abschnitt.

## VI. Messungen und Versuche

Zur Bestätigung der theoretischen Ergebnisse wurden die Störspannungsverhältnisse an Freileitungen gemessen.

### 1. Versuchsleitung auf dem PTT-Areal in Ostermundigen

In Ostermundigen bot sich die Gelegenheit, eine zu Instruktionszwecken gebaute Freileitung für unsere Zwecke umzubauen und daran jederzeit Messungen vorzunehmen. Die Fig. 12 orientiert über die

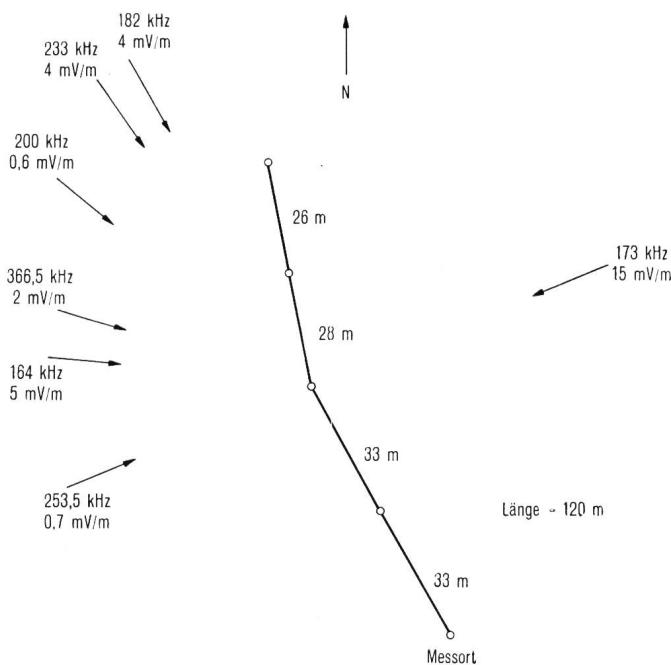


Fig. 12. Lage der Versuchsleitung

Situation. Die Einfallsrichtungen und die ungefähren Feldstärken sind für einige Langwellensender ebenfalls in der Figur eingezeichnet. Das Stangenbild der Leitung zeigt Fig. 13. Dieses Bild ist nicht normal; es wurde eigens für unsere Untersuchungen aus Vierer- und Zweierbild kombiniert, um den Unterschied in den Störspannungen zu demonstrieren. Die Schlaufen 1 und 2 sind auf jeder Stange gekreuzt, die übrigen sind nicht gekreuzt.

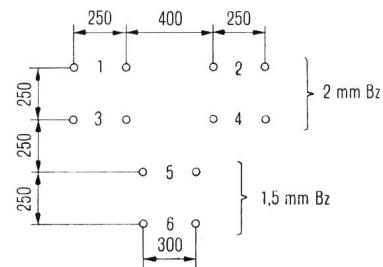


Fig. 13. Stangenbild der Versuchsleitung

In der Fig. 14 sind die Feldstärken  $E$  und die asymmetrischen Ströme  $I_{10}$  am Messort im logarithmischen Maßstab aufgezeichnet. Der logarithmische Maßstab wurde gewählt, damit die Werte direkt untereinander und mit denen der Fig. 15 verglichen werden können, die die symmetrischen Störpegel  $U_{20}$  darstellen.

Die Bezugspunkte 0N sind:

für die Feldstärken $E$	1 mV/m
für die Ströme $I_{10}$	1 $\mu$ A
für die Pegel $U_{20}$	0,775 V

Die Fig. 14 zeigt, dass die Ströme  $I_{10}$  im allgemeinen den Feldstärken folgen, wobei auch deutlich hervorgeht, dass bei seitlicher Einstrahlung (164, 173, 253,5 kHz) der Strom reduziert wird, was mit der Theorie – Gleichung (28) – übereinstimmt. Der Vergleich der Fig. 14 und 15 ergibt, dass die Kurven der Störpegel für die ungekreuzten Schlaufen 3...6 ähnlichen Verlauf wie die Kurve für  $I_{10}$  aufweisen, wogegen die beiden gekreuzten Schlaufen 1 und 2 eindeutig einen höheren Störpegel für 173 kHz aufweisen, als dem Verlauf von  $I_{10}$  entspricht. Dies lässt sich nach dem auf Seite 154 Gesagten erklären, wonach die Kreuzung in der Mitte der Leitung bei seitlicher Einstrahlung zu einer Vergrößerung der Störspannung führt.

Die Fig. 15 zeigt ferner, dass die ungekreuzten Schlaufen 3 und 4 im Viererbild entsprechend den grössten Kopplungen auch die höchsten Störpegel aufweisen, dass der Einbau der Kreuzungen eine mittlere Verbesserung um 1,6 N ergibt und dass die gekreuzten Schlaufen 1 und 2 damit noch etwas günstiger dastehen als die beiden Schlaufen 5 und 6, die im Zweierbild liegen. Eine Ausnahme macht die Frequenz 173 kHz aus dem schon erwähnten Grund.

Alle symmetrischen Störpegel wurden bei beidseitigem Abschluss der symmetrischen Schlaufe von  $150 \Omega$  gemessen. Der asymmetrische Kreis war dabei nur über die Kapazität der F- (Blei-) Kabel geschlossen, die am Anfang und Ende der Leitung als Aufstiegskabel verwendet wurden. Der Strom  $I_{10}$  wurde dagegen bei einseitigem Kurzschluss (am Messende) des asymmetrischen Systems gemessen.

Mit Hilfe der Messbrücke für komplexe Kopplungen Siemens 3R 312 wurde der Kopplungsvektor zwischen  $I_{10}$  und  $U_{20}$  der Schlaufe 5 für die verschiedenen Senderfrequenzen gemessen:

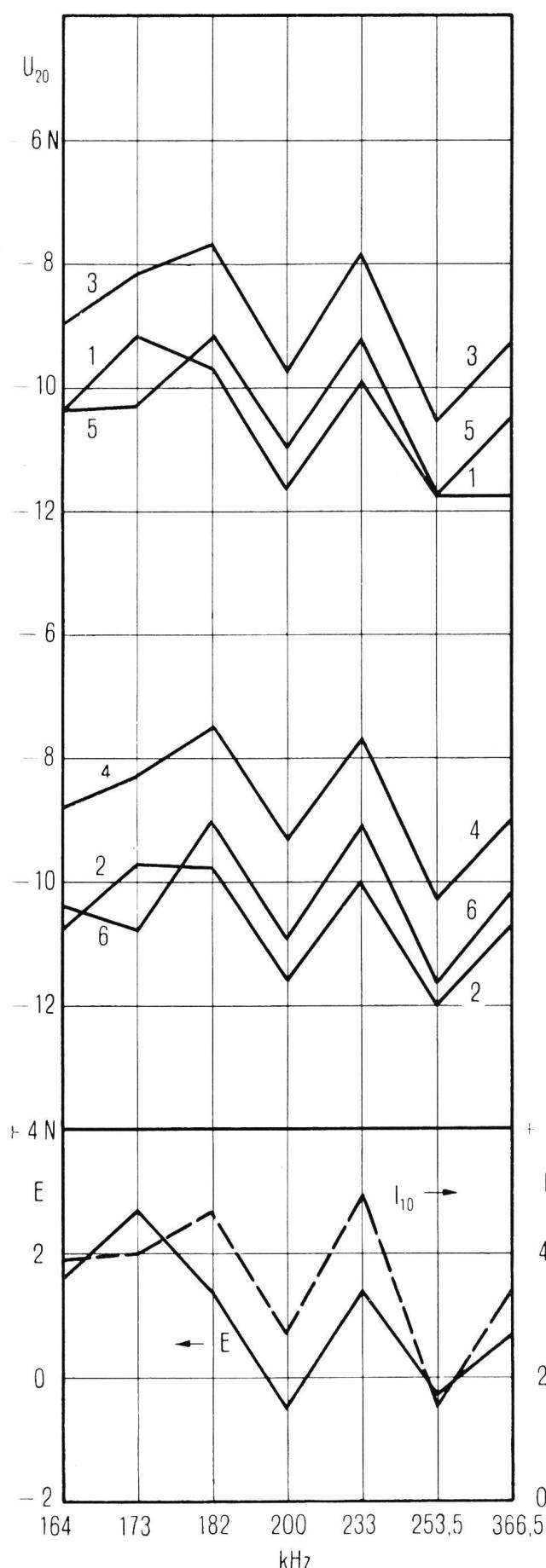


Fig. 14 (unten). Feldstärke  $E$  am Messort und asymmetrische Ströme  $I_{10}$  in der Versuchsleitung

Fig. 15 (oben). Symmetrische Störpegel  $U_{20}$  auf den sechs Schlaufen der Versuchsleitung

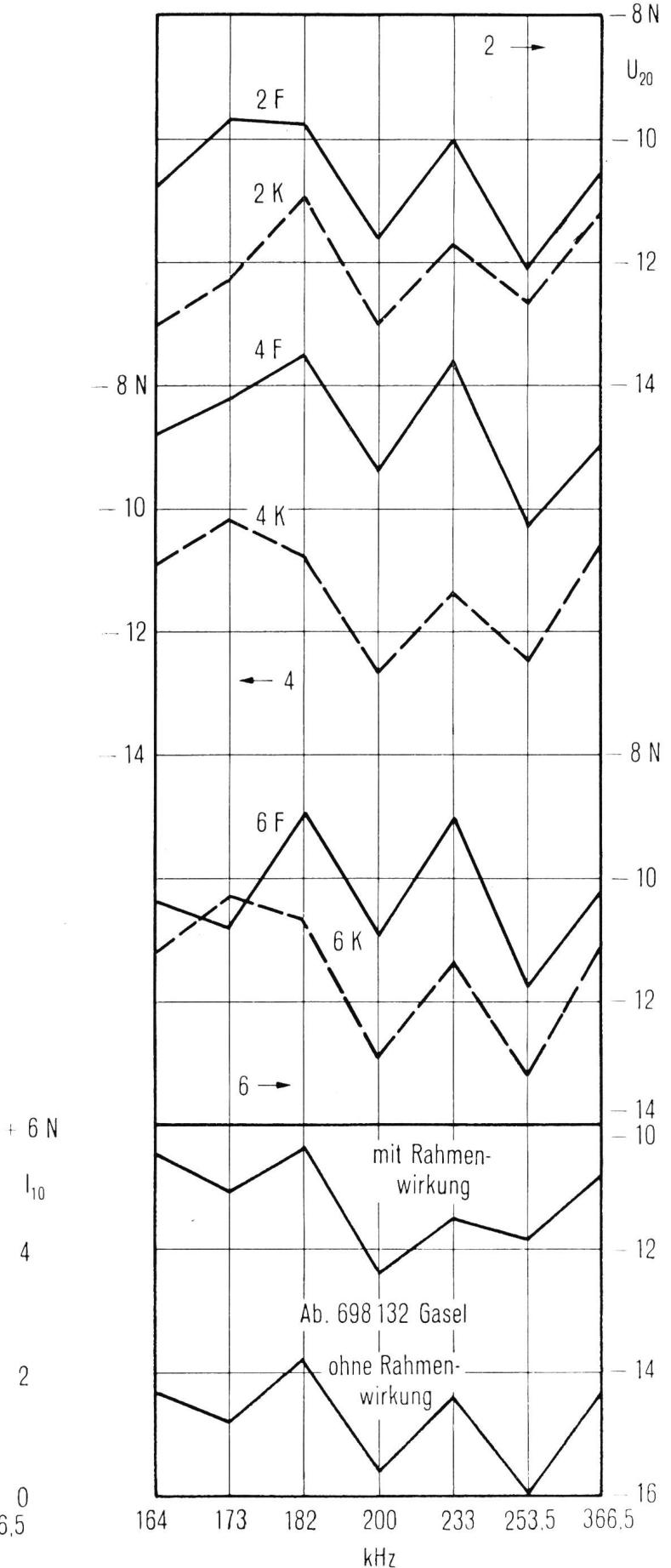


Fig. 16. Symmetrische Störpegel  $U_{20}$  auf den Schlaufen 2, 4, 6 mit Aufstiegskabeln Typ F mit Bleimantel (F) und mit ungeschirmten Kunststoff-Aufstiegskabeln (K)

Fig. 17. Einfluss der Rahmenwirkung einer Teilnehmerschlaufe auf die symmetrischen Störpegel

f	164	173	200	233	253,5	366,5	kHz
M	+220	-700	+200	+250	-600	>+1000	nH
R/ω	-380	>+1000	+50	+100	+600	>+1000	nH

Das Resultat bestätigt die Theorie, wonach für Sender mit wenig verschiedenen Frequenzen und Einfalls winkeln (z. B. 200 und 233 kHz) ähnliche Abgleichelemente nötig sind, dass aber bei unterschiedlichen Einfalls winkeln auch bei fast gleicher Frequenz gänzlich verschiedene Kopplungsglieder zum Abgleich der Störspannung nötig werden (z. B. 173 und 200 kHz oder 233 und 253,5 kHz).

In der Fig. 16 sind schliesslich die symmetrischen Störpegel für die Schlaufen 2, 4, 6 noch einmal aufgezeichnet (2F, 4F, 6F) und den Werten gegenübergestellt, die mit kapazitätsarmen Aufstiegskabeln erreicht werden (2K, 4K, 6K). Der Erfolg ist augenscheinlich. Man sieht, dass die Viererbildschlaufe 4 die grösste Reduktion des Störpegels erfährt und sich damit nicht mehr von der Zweierbildschlaufe 6 unterscheidet. Die restliche Störspannung ist der Rahmenwirkung zuzuschreiben. Es ist damit auch erklärt, dass die Schlaufe 2 (K) noch etwas niedrigere Pegel aufweist, da die Kreuzungen auch die symmetrische Rahmen-EMK reduzieren.

## 2. Messungen an Teilnehmerschläufen

Im Netz Niederscherli wurden an einigen Teilnehmerleitungen Messungen ausgeführt, die bestätigten, dass Einzelschläufen sehr geringe Kopplungen mit dem asymmetrischen System aufweisen (vgl. S. 152). Es wurde auch eine Leitung gemessen, die mit einer zweiten Schlaufe zusammen im Zweierbild vom Überführungspunkt weg zum gleichen Haus in einer Spannweite führte und die ebenfalls günstige Kopplungen zeigte. Durch einen beidseitigen Kapazitätsabgleich konnten die von den F-Kabeln herrührenden (punktformigen) Kapazitätsunsymmetrien noch so weit reduziert werden, dass ein Nah-Nebensprechen von rund 8N resultierte. Mit dieser Nebensprechdämpfung (asymmetrisch/symmetrisch) müssten die Störpegel

die in Fig. 17 unten gezeichneten Werte annehmen, wenn keine Rahmenwirkung vorhanden wäre. Die tatsächlichen Pegel lagen aber wesentlich höher (obere Kurve), was zeigt, dass auch bei vollkommen symmetrischen Linien der Störpegel nicht unter einen bestimmten Wert gesenkt werden kann. Nebenbei ist hervorzuheben, dass die erwähnte ausserordentlich hohe Nebensprechdämpfung am folgenden Tag nicht wieder erreicht werden konnte, sondern um rund 1,5N darunter blieb. Dies bestätigt die Ausführungen auf Seite 153, wonach die Kopplungsverhältnisse zeitlich ändern können.

An einem grössern Freileitungsstrang von 1 km Länge wurde schliesslich noch der Einfluss der Horizontalfeldstärke untersucht. Es zeigte sich, dass die horizontale Komponente des Senderfeldes, die durch die unvollkommene Erdleitfähigkeit hervorgerufen wird, an der Anregung des asymmetrischen Stromes nicht merklich beteiligt ist.

## VII. Schlussfolgerungen

Sowohl aus der theoretischen Behandlung als auch aus den Messungen ergeben sich die gleichen Folgerungen:

1. Auch bei stark idealisierten Verhältnissen erweist sich ein Abgleich von Freileitungen mit künstlichen Mitteln als wenig wirksam. Es lassen sich nur örtlich begrenzte Unsymmetrien durch Abgleichelemente an diesem gleichen Ort frequenzunabhängig korrigieren.
2. Die natürliche Symmetrie der Freileitung ist am besten bei der Einzelschlaufe, gefolgt vom Strang im Zweierbild auf Traversen und nachher vom Zweierbild auf Seitenträgern.  
Die Freileitung im Viererbild eignet sich schlecht für die HFTR-Übertragung.
3. Der Einbau von Kreuzungen ist nur wirksam, wenn mindestens auf jeder Stange gekreuzt würde. Dieser Aufwand ist aber zu gross für die zu erwartende Verbesserung.

Aller Anfang ist schwer! Das mag in einem gewissen Sinne wahr sein;  
allgemeiner aber kann man sagen: aller Anfang ist leicht,  
und die letzten Stufen werden am schwersten und seltensten erstiegen.

Goethe