Contribution relative à l'estimation du pouvoir radioperturbation de lignes à très haute tension

Par *J. Meyer de Stadelhofen* et *W. Walter*, Berne

621.396.823

Ex 822.2

Résumé. *Après le rappel de notions élémentaires concernant l'effet couronne, les auteurs décrivent les mesures de perturbations radioélectriques faites en Suisse le long de lignes à très haute tension et en laboratoire sur les éléments constitutifs de ces lignes. Ils constatent que le niveau du champ perturbateur décroît perpendiculairement à la ligne selon une loi en* $\frac{1}{d^{1,5}}$ *expression où d est la distance entre l'antenne de mesure et le conducteur le plus proche. Ils trouvent d'autre part que la loi d'atténuation des perturbations le long d'une ligne dont le tracé est droit correspond à une hyperbole plutôt qu'à une exponentielle. Quelques indications sont ensuite données sur la répartition statistique des niveaux perturbateurs enregistrés le long des lignes ainsi que sur le rapport existant entre ces niveaux et le pouvoir perturbateur des éléments mesurés en laboratoire.*

Introduction

Chaque fois qu'une ligne à très haute tension est mise en service, de nombreux auditeurs de radio déclarent qu'ils ne payeront plus la taxe d'écoute parce que la réception est devenue trop mauvaise. Ce fait a motivé à l'étranger comme en Suisse toute une série d'études. (La bibliographie publiée en 1956 par la commission 11 de la CIGRE (= Conférence internationale des grands réseaux électriques) comporte une centaine de titres concernant les perturbations dues aux lignes à haute tension.) Le sujet, cependant, est loin d'être épuisé. Le constructeur de lignes attend toujours un guide qui lui permette de calculer le pouvoir perturbateur d'une ligne à partir de données relatives à ses éléments constitutifs et à son parcours. La question est extrêmement complexe, car à côté des paramètres définis sur lesquels on peut agir à volonté, comme la tension de service, la dimension et la disposition des conducteurs, le type des isolateurs, il existe une quantité de paramètres très aléatoires, comme ceux dépendant du tracé de la ligne, des conditions atmosphériques ou de l'état de la surface des conducteurs. Le problème se pose donc en termes statistiques et expérimentaux.

Au cours de cet article, nous nous proposons d'exposer quelques étapes des travaux faits en Suisse par le Laboratoire de recherches et d'essais des PTT, en collaboration avec le FKH*, la station d'essai des matériaux de l'Association suisse des électriciens (ASE) et avec le bienveillant appui de plusieurs producteurs d'énergie électrique, pour tenter de répondre à la question concrète:

* FKH = Forschungskommission der Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins (SEV) und des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätswerke (VSE);

Beitrag zur Voraussage des Störverhaltens von Höchstspannungsleitungen

Von *J. Meyer de Stadelhofen* und *W. Walter*, Bern

Zusammenfassung. *Nachdem einleitend einige Grundbegriffe der Korona-Erscheinungen in Erinnerung gerufen werden, beschreiben die Verfasser die in der Schweiz an verschiedenen Höchstspannungsleitungen durchgeführten Messungen sowie die Laboratoriumsmessungen, die an einzelnen Bestandteilen solcher Leitungen vorgenommen wurden. Sie stellen fest, dass der Pegel des Störfeldes quer zur Leitung entsprechend dem Gesetz* $\frac{1}{d^{1,5}}$ *abnimmt, wenn d die Distanz zwischen der Messantenne und dem nächstgelegenen Leiter bedeutet. Anderseits finden sie, dass sich die Störungen entlang von geradlinig verlaufenden Leitungen eher nach einem hyperbolischen als nach einem exponentiellen Gesetz ausbreiten. Anschliessend werden einige Angaben über die statistische Verteilung der entlang den Leitungen registrierten Störpegel gemacht, worauf die Beziehungen zwischen diesen Pegeln und dem im Laboratorium gemessenen Störvermögen der Bestandteile untersucht werden.*

Einführung

Bei jeder Inbetriebsetzung einer Höchstspannungsleitung beklagen sich zahlreiche Radiohörer über gestörten Empfang und verweigern oft die weitere Bezahlung der Hörgebühr. Aus diesem und anderen Gründen sind im Ausland wie auch in der Schweiz zahlreiche Studien über dieses Problem gemacht worden. (Das im Jahr 1956 durch den Ausschuss 11 der CIGRE [= Conférence internationale des grands réseaux électriques] veröffentlichte Schrifttum enthält ungefähr 100 Arbeiten über die durch Hochspannungsleitungen erzeugten Störungen.) Das Problem ist jedoch bei weitem noch nicht erschöpft. Der Konstrukteur von Hochspannungsleitungen wartet immer noch auf einen Leitfaden, der ihm erlaubt, das Störvermögen einer Leitung an Hand von Angaben über die Bauelemente und die Leitungsanordnung zu berechnen. Das Problem ist jedoch ausserordentlich verwickelt. Neben den definierten, beliebig beeinflussbaren Parametern, wie Betriebsspannung, Abmessungen und Anordnung der Leiter, Isolatorentyp, existieren eine Reihe von zufälligen Parametern, die von der Leitungsführung, den atmosphärischen Bedingungen oder vom Oberflächenzustand der Leiterseile abhängen. Es handelt sich hier somit um ein statistisch und experimentell zu betrachtendes Problem.

Im folgenden sollen nun die in der Schweiz durchgeführten Untersuchungen dargelegt werden, die von der Forschungs- und Versuchsanstalt PTT in Zusammenarbeit mit der FKH*, der Materialprüfanstalt des Schweizerischen Elektrotechnischen Ver-

* FKH = Commission commune de l'Association Suisse des Electriciens (ASE) et de l'Union des Centrales Suisses d'Electricité (UCS).

Quels isolateurs et quels conducteurs faut-il utiliser pour que le champ perturbateur d'une ligne projetée ne dépasse pas un niveau donné à une distance donnée pendant plus de x % du temps?

Après avoir décrit les méthodes utilisées pour mesurer le pouvoir perturbateur des lignes en service, ainsi que les résultats obtenus, nous verrons comment l'on procède en laboratoire pour contrôler le pouvoir perturbateur des isolateurs et des conducteurs de ligne, puis nous aborderons la question de la propagation des perturbations le long des lignes. Cela nous permettra de formuler pour finir quelques relations quantitatives simples, valables pour les lignes HT à 220 kV, en guise de première réponse très grossière au problème posé.

Toutefois, avant de passer au vif du sujet, il peut être utile de rappeler à l'intention des lecteurs non spécialistes quelques notions relatives à l'effet couronne en général et aussi de montrer par un exemple l'intérêt probable qu'il y a à utiliser des conducteurs de lignes en faisceaux au lieu de conducteurs câbles simples.

Généralités concernant l'effet couronne

Lorsque l'on fait croître progressivement la tension appliquée à une ligne de transport d'énergie, on voit les armatures des isolateurs, ainsi que les conducteurs, effluver puis se couvrir d'aigrettes dès que le champ électrique à leur surface dépasse localement une valeur critique. C'est l'effet couronne. Il se forme une multitude de foyers plus ou moins stables où ont lieu de nombreuses décharges élémentaires. Ces décharges sont nuisibles, d'abord parce qu'elles occasionnent une perte de puissance et ensuite parce qu'elles provoquent des ondes de choc qui s'éloignent le long de la ligne de part et d'autre de leur origine en créant un champ radioperturbateur. Le cas de la ligne de transport d'énergie à haute tension est géométriquement très compliqué. Il vaut mieux pour analyser les phénomènes élémentaires caractéristiques de l'effet couronne avoir recours à un dispositif comportant un minimum d'éléments actifs bien définis, par exemple: un cylindre poli de rayon extérieur r placé dans l'axe d'un cylindre creux de rayon intérieur R (v. fig. 1a).

Si l'on applique une tension alternative U_e croissante entre les deux cylindres, on constate ce qui suit (fig. 1b et 1c): de 0 à U_1, il n'y a ni perte, ni phénomène lumineux, ni perturbation radioélectrique.

A la tension U_1, on voit apparaître une, puis plusieurs lueurs localisées, en forme de cône, situées sur le conducteur central là où quelque irrégularité minime de la surface ou quelque grain de poussière provoque un accroissement local du champ électrique. Un léger grésillement se fait entendre, de faibles pertes se produisent, la capacité entre les deux cylindres garde sa valeur, les perturbations radioélectriques ont un niveau moyen à fort, la densité relative de l'air n'a presque pas d'influence, les impulsions radioperturbatrices ont lieu au moment où le potentiel

eins (SEV) und mit der wohlwollenden Unterstützung durch mehrere Elektrizitätsproduzenten unternommen wurden, um eine Antwort auf folgende konkrete Frage zu finden:

Welche Isolatoren und welche Leiter müssen verwendet werden, damit die Störfeldstärke einer projektierten Leitung einen gegebenen Höchstwert bei einer gegebenen Entfernung während mehr als x% der Zeit nicht überschreitet?

Nach einer Beschreibung der angewendeten Methoden zur Messung des Störvermögens von betriebsmässig geschalteten Leitungen sowie der damit erhaltenen Resultate sehen wir, wie man im Laboratorium vorgeht, um das Störvermögen von Isolatoren und Leiterseilen zu prüfen, worauf die Frage der Ausbreitung der Störungen längs der Leitungen vorgenommen wird. Als sehr grobe erste Antwort auf das gestellte Problem wird uns dies erlauben, einige einfache quantitative Beziehungen, die für 220-kV-Leitungen gültig sind, abzuleiten.

Bevor wir jedoch zum Problem übergehen, kann es im Hinblick auf die in diesem Fachgebiet nicht spezialisierten Leser nützlich sein, einige Begriffe bezüglich den Korona-Effekt im allgemeinen in Erinnerung zu rufen und auch durch ein Beispiel den wahrscheinlichen Vorteil der Benützung von Bündelleitern anstelle von Einfachleitern zu zeigen.

Allgemeines über die Korona-Erscheinungen

Lässt man die Spannung auf einer Energieübertragungsleitung stetig ansteigen, so werden an den Armaturen der Isolatoren und am Leiter Einzelentladungen sichtbar, die alsdann beim Erreichen eines kritischen Wertes der örtlichen Randfeldstärke in Entladebüschel übergehen. Die letzteren verteilen sich dann über die gesamte Oberfläche. Es ist dies der Korona-Effekt. Es bilden sich zahlreiche mehr oder weniger stillstehende elementare Entladungsstellen. Diese Entladungen sind schädlich; einerseits verursachen sie Energieverluste und anderseits erzeugen sie Stosswellen, die sich beidseitig von ihrem Entstehungsort entlang der Leitung ausbreiten, wobei sie ein Radiostörfeld erzeugen. Die geometrische Anordnung einer Hochspannungsleitung ist ziemlich kompliziert. Für die Analyse der charakteristischen Korona-Erscheinungen verwendet man mit Vorteil eine einfache Anordnung mit genau definierten Einzelteilen: zum Beispiel einen polierten Zylinder mit dem Aussendurchmesser 2r, der sich im Innern eines Hohlzylinders mit Innendurchmesser 2 R befindet (s. Fig. 1a).

Wird zwischen den beiden Zylindern eine stetig ansteigende Wechselspannung U_e angelegt, so kann folgendes beobachtet werden (fig. 1b und 1c):

Von 0 bis U_1 treten weder Verluste noch Leuchterscheinungen, noch Radiostörungen auf.

Bei Erreichen der Spannung U_1 erscheinen auf dem Innenleiter vereinzelte pfriemartige Leuchtbüschel, und zwar überall dort, wo geringe Unregelmässig-

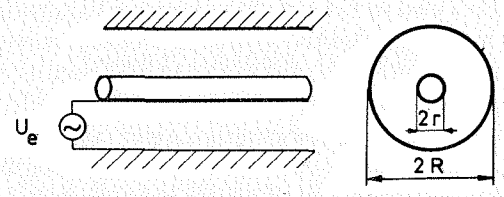


Fig. 1a. Classification de l'effet couronne
Charakteristische Merkmale der Korona-Erscheinungen
Dispositif d'essai — Versuchsanordnung

du cylindre intérieur se trouve au voisinage du maximum de l'alternance négative. C'est le domaine de tension où l'«*effet de pointe*» prévaut (voir fig. 1c). Le gradient de potentiel à la surface du cylindre intérieur est de 6 à 10 kV effectifs/cm.

A partir de la tension U_c correspondant à un gradient de 14 kV eff/cm environ, des décharges ont lieu aussi pendant les alternances positives, les aigrettes changent d'allure, elles présentent des ramifications, le bruit devient crépitement, les perturbations radioélectriques et les pertes sont fortes, la capacité entre les deux cylindres reste constante, l'influence de la densité de l'air est sensible.

Enfin, après ce «*domaine de transition*», apparaît l'effet de «*couronne en manchon*»; tout le cylindre intérieur est entouré d'un manchon lumineux; le bruit se rapproche d'un ronflement, les pertes sont très fortes, tandis que les perturbations radioélectriques n'augmentent plus; la capacité entre les cylindres varie proportionnellement à la tension, les pertes sont proportionnelles à la densité de l'air.

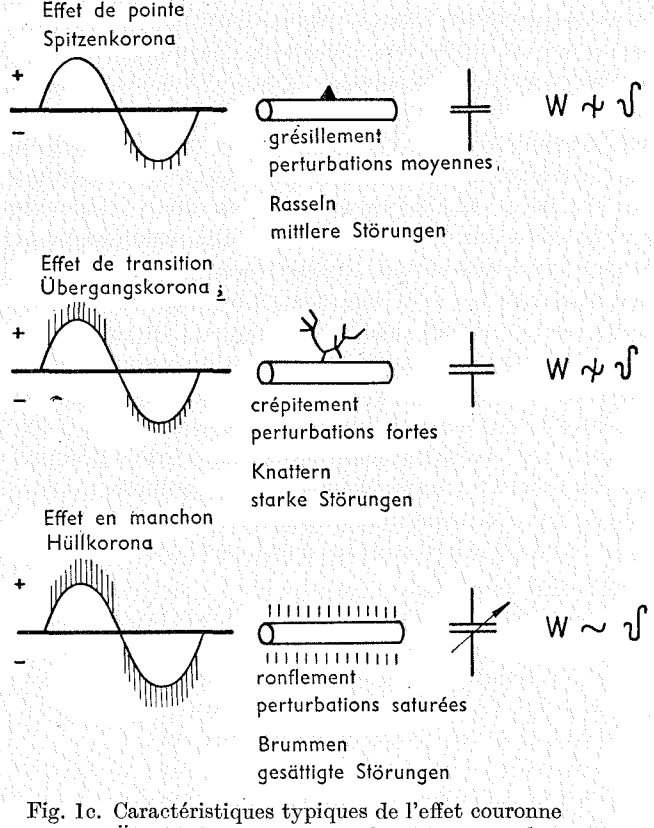


Fig. 1c. Caractéristiques typiques de l'effet couronne
Überblick über die typischen Koronaerscheinungen

keiten auf der Leiteroberfläche oder Staubteilchen eine örtliche Erhöhung des elektrischen Feldes bewirken. Man hört ein leichtes Rasseln, es entstehen geringe Verluste, die Kapazität zwischen den beiden Zylindern bleibt unverändert, die Radiostörungen erreichen mittlere bis hohe Werte, die relative Luftdichte δ hat fast keinen Einfluss, die Radiostörimpulse entstehen im Moment, in dem sich das Potential am Innenleiter in der Nähe des Maximalwertes der negativen Halbwelle befindet. Es herrscht hier die sogenannte Spitzenkorona vor (s. Fig. 1c). Die Randfeldstärke am Innenleiter beträgt 6...10 kV_{eff}/cm.

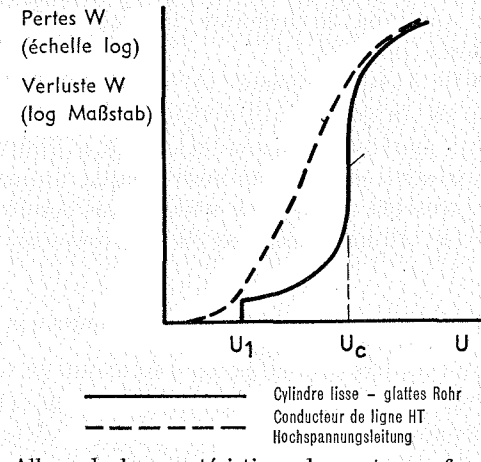


Fig. 1b. Allure de la caractéristique des pertes en fonction de la tension suivant l'état de surface du conducteur central
Verlauf der Verluste in Abhängigkeit von der Spannung und dem Oberflächenzustand des zentralen Leiters

Von der Spannung U_c an, entsprechend einer Randfeldstärke von etwa 14 kV_{eff}/cm, finden auch während der positiven Halbwelle Entladungen statt; es entstehen Entladebüschel, ähnlich einem entblätterten Baum, ein Knattern wird hörbar, die Radiostörungen und die Verluste sind stark, die Kapazität zwischen den Zylindern bleibt unverändert, ein Einfluss der Luftdichte macht sich bemerkbar.

Nach dieser «Übergangskorona» erscheint schliesslich die «Hüllkorona»; der ganze Innenleiter ist von einer glimmenden bis leuchtenden Koronahülle umgeben, es wird ein Brummen hörbar, die Verluste sind sehr hoch, währenddem die Radiostörungen nicht mehr weiter zunehmen; die Kapazität zwischen den Zylindern ändert proportional mit der Spannung, die Verluste sind linear von der Luftdichte abhängig.

Wird an Stelle des glatten Innenleiters ein solcher mit ungleichförmiger Oberfläche verwendet (z. B. das Seil einer Hochspannungsleitung), so vermischen sich die einzelnen Korona-Arten mehr oder weniger, die Verlust- und Störspannungskurven in Funktion der angelegten Spannung werden ausgeglichener und weisen weniger schroffe Übergänge auf (s. Fig. 1b).

Der Oberflächenzustand der Leiter hat einen sehr grossen Einfluss auf die Einsatzspannung der Korona und auf die Grösse der Verluste und Störungen; dagegen hat er praktisch keinen Einfluss mehr im Gebiet der Hüllkorona.

Si, au lieu d'être lisse, le conducteur central du dispositif d'essai présente des irrégularités, comme les conducteurs de ligne HT, les divers régimes d'effet couronne se mélangent plus ou moins, avec pour résultat une diminution des sauts brusques des caractéristiques de pertes et de niveau perturbateur en fonction de la tension d'excitation (v. fig. 1b).

L'état de la surface des conducteurs joue un très grand rôle sur la tension d'amorçage de l'effet couronne ainsi que sur les pertes et perturbations correspondantes, tandis qu'il n'a pratiquement pas d'influence au régime de l'effet de couronne en manchon.

De toute façon, il est clair que, pour réduire l'effet couronne des lignes, il faut abaisser le gradient du champ électrique $|E_s|$ dans l'air en contact avec la surface du conducteur, soit en augmentant le diamètre des conducteurs de phase, soit en formant des faisceaux de conducteurs élémentaires parallèles.

A ce propos, on peut aisément se faire une idée de l'intérêt que présentent les conducteurs en faisceau par rapport aux conducteurs cylindriques simples en considérant comment varie le gradient superficiel relatif défini par $g = \frac{|E_s|}{U_e}$, dans un cas concret élémentaire connu, par exemple celui d'un conducteur placé dans l'axe d'un cylindre de rayon R et excité par une tension U_e.

Pour un conducteur cylindrique unique (v. fig. 1a) de rayon r

$$g = \frac{1}{\mathrm{r}} \cdot \frac{1}{\ln \frac{R}{r}} \qquad (1)$$

Pour un conducteur en faisceau régulier à n conducteurs élémentaires de rayon r et distants de a les uns des autres (voir fig. 2).

$$g_{max} \approx \frac{1}{r} \cdot \frac{1}{\ln \frac{R}{\sqrt{ra}}} \cdot \frac{1 + \beta \frac{r}{a}}{\mathrm{n}} \qquad (2)$$

où	$\beta = 2$	3,48	4,24
pour	n = 2	3	4

Si $R = 3$ m $r = 1{,}5$ cm et $a = 40$ cm

on obtient

Pour n = 1	g_1	= 0,125	100%
2	g_{max}	= 0,097	78%
3	g_{max}	= 0,069	55%
4	g_{max}	= 0,053	42,5%

Ces chiffres se passent de commentaires.

Nous ne nous étendrons pas davantage sur ces particularités et renvoyons le lecteur désireux d'informations plus étendues sur l'effet couronne et les éléments constitutifs des lignes à très haute tension aux travaux cités à la fin de l'article.

Zur Verminderung der Korona der Leitungen ist es notwendig, die Randfeldstärke $|E_s|$ zu reduzieren, entweder durch Vergrösserung des Durchmessers der Leiter, oder durch die Bildung von Bündelleitern, bestehend aus mehreren parallel verlegten Einzelleitern. In diesem Zusammenhang kann man sich leicht ein Bild vom Vorzug der Bündelleiter gegenüber den Einzelleitern machen, wenn man betrachtet, wie sich der relative Spannungsgradient $g = \frac{|E_s|}{U_e}$ verhält. Für einen genau definierten Fall, zum Beispiel wenn sich die Leiter in einem Hohlzylinder vom Radius R befinden und die Spannung U_E angelegt wird, erhält man:

Für einen runden Einzelleiter vom Radius r (s. Fig. 1a)

$$g = \frac{1}{\mathrm{r}} \cdot \frac{1}{\ln \frac{R}{r}} \qquad (1)$$

Für einen Bündelleiter, bestehend aus n Einzelleitern mit dem Radius r und einem gegenseitigen Abstand a (s. Fig. 2)

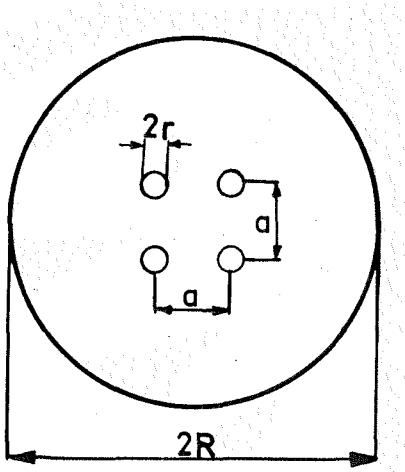


Fig. 2. Exemple de faisceau à 4 conducteurs élémentaires dans le cylindre de mesure
Beispiel eines Bündelleiters, bestehend aus 4 Einzelleitern, im Innern des Messzylinders

$$g_{max} \approx \frac{1}{r} \cdot \frac{1}{\ln \frac{R}{\sqrt{ra}}} \cdot \frac{1 + \beta \frac{r}{a}}{\mathrm{n}} \qquad (2)$$

wobei	$\beta = 2$	3,48	4,24
für	n = 2	3	4

wenn $R = 3$ m $r = 1{,}5$ cm und $a = 40$ cm

erhält man

für n = 1	g_1	= 0,125	100%
2	g_{max}	= 0,097	78%
3	g_{max}	= 0,069	55%
4	g_{max}	= 0,053	42,5%

Diese Zahlen sprechen für sich!

Da wir uns nicht eingehender mit derartigen Einzelheiten der Korona-Erscheinung sowie den Bauteilen von Höchstspannungsleitungen befassen möch-

Généralités concernant les perturbations radioélectriques et leur mesure

Tout cas de perturbation met en jeu les éléments suivants:

Un récepteur R, une source de signal utile E_u, une ou plusieurs sources de signal perturbateur P et des couplages k_u et k_p entre ces sources et le récepteur (voir fig. 3).

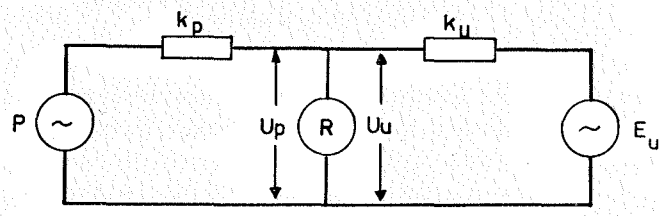


Fig. 3. Eléments d'un cas de perturbation
Im Störungsfall beteiligte Elemente

L'effet perturbateur de la source P est caractérisé par le rapport signal/bruit $\frac{U_u}{U_p}$ qui apparaît aux bornes du récepteur. En raison de la forme irrégulière des tensions perturbatrices, il faut, pour que ce rapport ait une signification non équivoque, que le niveau perturbateur soit mesuré avec un voltmètre spécial parfaitement défini, par exemple celui qu'a normalisé le CISPR (voir annexe 1) (l'importance de cette normalisation saute aux yeux si l'on songe que, d'après les auteurs du rapport n° 416 de la CIGRE 1956, des divergences atteignant 26 dB ont été constatées entre les indications de voltmètres sélectifs non normalisés utilisés pour mesurer simultanément une même tension perturbatrice produite par une ligne HT, alors que les écarts des indications de divers récepteurs conformes aux recommandations du CISPR ne dépassaient pas $\pm$ 3 dB).

Pouvoir perturbateur d'une ligne et de ses éléments

Dans le cas des lignes à haute tension, les sources perturbatrices (isolateurs ou éléments de conducteurs) peuvent être assimilées à des générateurs élémentaires qui débitent chacun sur une charge constituée par la ligne ainsi que le montre de façon simplifiée la fig. 4 pour une ligne très longue et homogène.

La ligne est portée à un potentiel HF V_p par rapport à la terre et un courant $\frac{I_p}{2}$ s'établit dans chaque moitié de la ligne. Un champ électrique dû au premier et un champ magnétique dû au second règnent le long de la ligne. L'action cumulée de tous les perturbateurs élémentaires répartis le long de la ligne détermine son influence perturbatrice. On pourrait songer à caractériser le *pouvoir perturbateur spécifique* d'une ligne par la tension HF perturbatrice résultante entre conducteurs de lignes et terre, affectée d'un coefficient dépendant de la position de ces derniers. Malheureusement, les difficultés d'isolation du voltmètre HF font que la mesure de cette tension est rarement réalisée.

Allgemeines über die Radiostörungen und deren Messung

In jedem Störungsfall sind folgende Elemente beteiligt:

Ein Empfänger R, eine Nutzsignalquelle E_u, eine oder mehrere Störsignalquellen P und die Kopplungen k_u und k_p zwischen diesen Quellen und dem Empfänger.

Der Störeffekt ist charakterisiert durch das an den Anschlussklemmen des Empfängers auftretende Verhältnis zwischen Nutz- zu Störsignal $\frac{U_u}{U_p}$. Da das Störsignal von unregelmässiger Form ist, muss der Störpegel mit einem genau definierten speziellen Voltmeter gemessen werden. Nur so kann das Verhältnis $\frac{U_u}{U_p}$ eindeutig bestimmt werden. Das CISPR* hat ein solches Messgerät normalisiert (s. Anhang 1). Die Wichtigkeit einer solchen Normalisierung ist schon daraus ersichtlich, dass – entsprechend dem Bericht Nr. 416 der CIGRE 1956 – Störungsmessungen mit nicht normalisierten selektiven Voltmetern Unterschiede bis zu 26 dB ergaben; dies für Messungen, die gleichzeitig an ein und derselben Hochspannungsleitung ausgeführt wurden. Dagegen ergeben Messungen mit verschiedenen Empfängern, die entsprechend den Empfehlungen des CISPR gebaut wurden, höchstens Unterschiede von $\pm$3 dB.

Störvermögen einer Leitung und ihrer Bestandteile

Im Falle einer Hochspannungsleitung können wir die Störquellen (Isolatoren oder Leiterelemente) mit einzelnen Generatoren vergleichen, von denen jeder einen Lastwiderstand, gebildet durch die Leitung, speist, wie dies in vereinfachter Form in Figur 4 für eine lange homogene Leitung dargestellt ist.

Die Leitung führt ein HF-Potential V_p gegenüber Erde und in jeder Leitungshälfte fliesst ein Strom $\frac{I_p}{2}$. Längs der Leitung entsteht ein elektrisches Feld als Folge von V_p und ein magnetisches Feld als Folge von I_p. Die Störwirkung der Leitung ist bestimmt

* CISPR = Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques

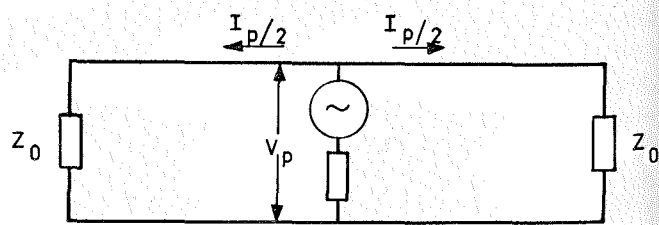


Fig. 4. Représentation simplifiée du mode d'action d'un élément perturbateur d'une ligne à haute tension
Vereinfachte Darstellung der Wirkungsweise eines Störelementes auf einer Hochspannungsleitung

ten, verweisen wir den interessierten Leser auf das am Schluss angegebene Schrifttum.

sable. Il est préférable d'exprimer le «pouvoir perturbateur» par la valeur d'un champ mesuré d'une manière définie. En effet, de nombreuses observations faites le long de lignes de divers profils ont montré que si l'emplacement de mesure est assez loin de tout ce qui risque de compliquer la conformation du champ, par exemple les pylônes, les changements de direction du tracé, les lignes secondaires de distribution ou de téléphone, etc., la décroissance de la composante verticale du champ électrique ou de la composante horizontale du champ magnétique, perpendiculairement à la direction de la ligne HT, obéit très sensiblement à une loi en $\frac{1}{d^{1,5}}$ dans la gamme de 150 à 1500 kHz (d représente la distance entre l'antenne et le conducteur de ligne le plus proche). Cette approximation demeure valide dans toute la largeur de la zone réellement perturbée, quelle que soit la disposition des conducteurs (v. fig. 5).

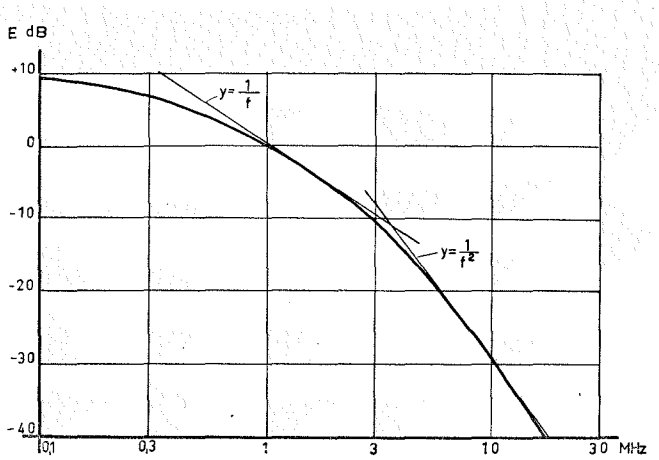


Fig. 6. Spectre typique relevé sous les lignes à haute tension longues. Ce spectre est pratiquement identique à celui d'impulsions de forme $U_t = k\,(e^{-2,2 \cdot 10^6 t} - e^{-21 \cdot 10^6 t})$

Typisches Spektrum, aufgenommen unter langen Hochspannungsleitungen. Dieses Spektrum ist praktisch identisch mit demjenigen von Impulsen von der Form: $U_t = k\,(e^{-2,2 \cdot 10^6 t} - e^{-21 \cdot 10^6 t})$

Comme, d'autre part, la composition du spectre perturbateur relevé auprès de lignes longues en bon état est remarquablement constante (v. fig. 6) et que les valeurs moyennes du champ électrique et du champ magnétique sont égales, il suffit pour la plupart des besoins pratiques de caractériser *le pouvoir perturbateur d'une ligne* en adoptant comme norme *la valeur médiane du champ mesuré à 20 m du conducteur le plus proche au moyen d'un cadre vertical à la fréquence de 1 MHz, valeur complétée par une indication relative à la dispersion des valeurs mesurées comme, par exemple, les limites dépassées respectivement pendant plus de 5% et plus de 95% du temps.*

Mesures statistiques du champ perturbateur de lignes à 220 kV

Si la loi de la propagation perpendiculairement à la ligne et la forme du spectre peuvent être considérées

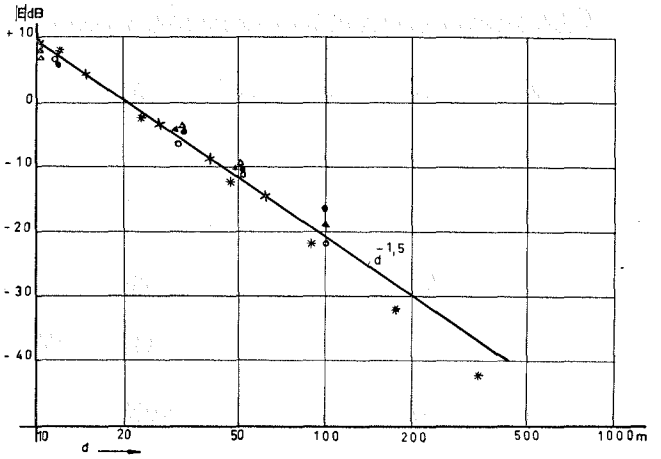


Fig. 5. Décroissance du champ perpendiculairement à la ligne
x moyenne de 82 mesures américaines ($d^{-1,5}$)
* mesures suédoises ($d^{-1,7}$)
● 220 kHz à 2,7 km des sources ($d^{-1,25}$) Ligne 220 kV
○ 1500 kHz à 2,7 km des sources ($d^{-1,5}$) Mühleberg–
▲ 220 kHz à 11,2 km des sources ($d^{-1,4}$) Laufenburg
△ 1500 kHz à 11,2 km des sources ($d^{-1,25}$)

Abnahme des Feldes quer zur Leitung
x Mittelwert aus 82 amerikanischen Messungen ($d^{-1,5}$)
* Schwedische Messungen ($d^{-1,7}$)
● 220 kHz in 2,7 km Distanz von den Quellen ($d^{-1,25}$)
○ 1500 kHz in 2,7 km Distanz von den Quellen ($d^{-1,5}$)
▲ 220 kHz in 11,2 km Distanz von den Quellen ($d^{-1,4}$)
△ 1500 kHz in 11,2 km Distanz von den Quellen ($d^{-1,25}$)
Leitung Mühleberg–Laufenburg

durch die Gesamtwirkung von allen längs der Leitung verteilten Einzelgeneratoren. Man könnte versuchen, das *spezifische Störvermögen einer Leitung* durch die resultierende, zwischen Leiter und Erde liegende HF-Spannung auszudrücken, unter Berücksichtigung eines Koeffizienten, der von der Leiteranordnung abhängen würde.

Leider ist die Messung dieser Spannung kaum durchführbar, da das HF-Voltmeter gegenüber der Hochspannung isoliert werden müsste. Es ist vorzuziehen, das «Störvermögen» durch einen Feldstärkewert auszudrücken, der auf genau definierte Weise

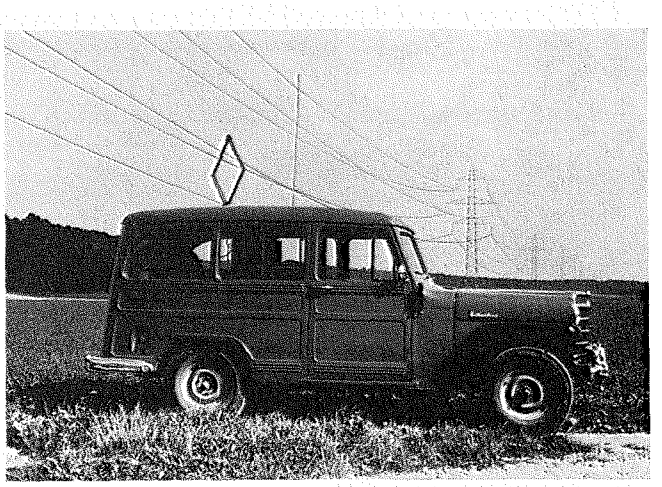


Fig. 7. Voiture de mesure équipée d'un récepteur CISPR avec cadre et antenne tige

Messwagen, ausgerüstet mit einem CISPR-Empfänger mit Rahmen- und Stabantenne

comme constantes, il n'en est pas de même du niveau absolu du champ, qui dépend étroitement des conditions atmosphériques. Il a donc fallu établir des postes d'enregistrement pour étudier la répartition statistique de ce niveau perturbateur. Comme les variations à mesurer atteignent jusqu'à une trentaine de dB, on a dû renoncer à équiper ces postes d'un récepteur

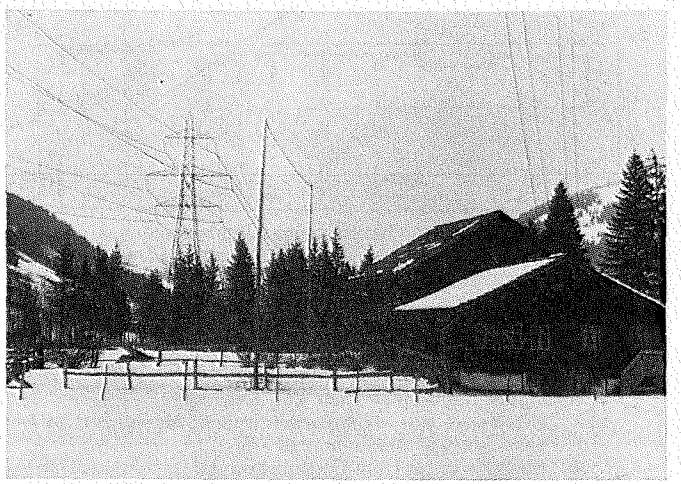


Fig. 8. Poste de mesure de Grund près de Gstaad
Meßstation in Grund bei Gstaad

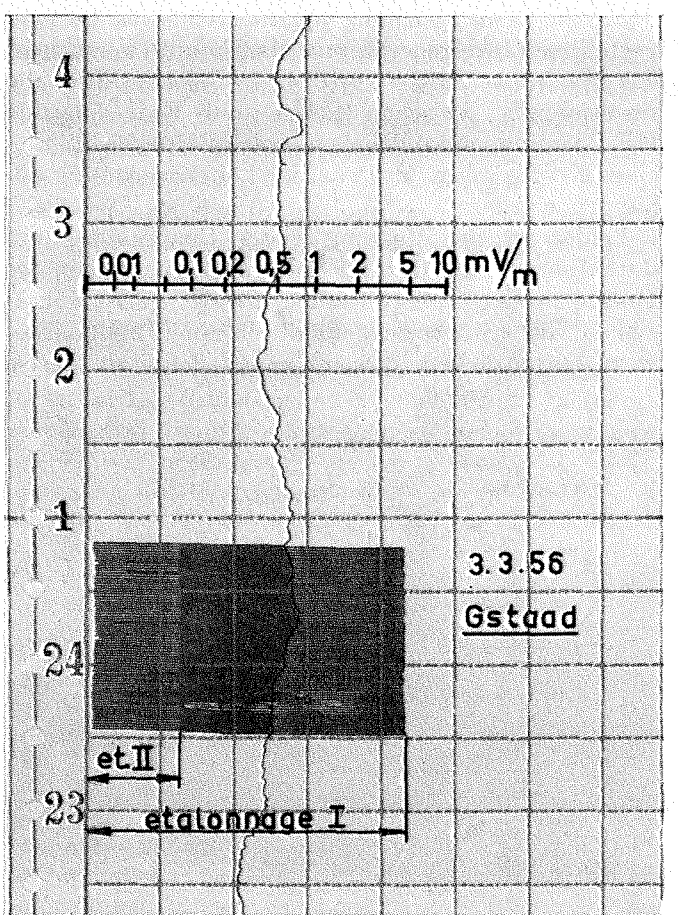


Fig. 9. Echantillon de bande enregistrée
Muster eines Registrierstreifens

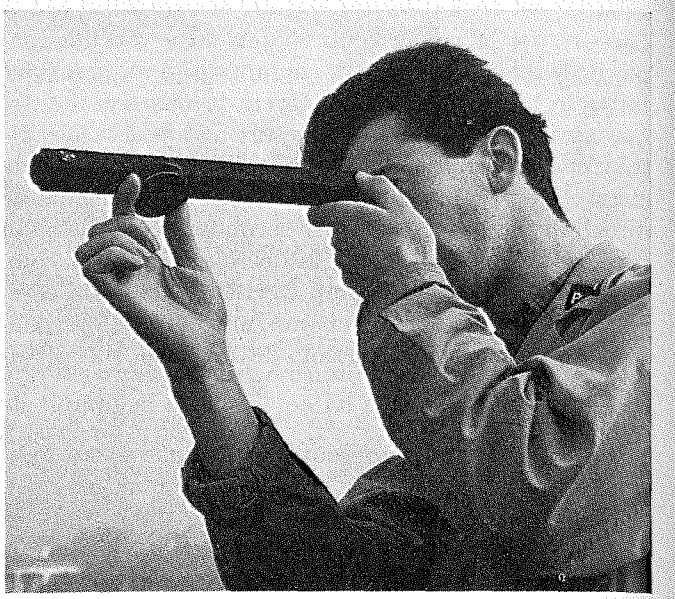


Fig. 7a. Mesure de la distance des conducteurs
Messung der Leiterentfernung

gemessen wird. Zahlreiche, längs verschiedener Leitungen ausgeführte Messungen haben gezeigt, dass die Abnahme der vertikalen Komponente des elektrischen Feldes oder der horizontalen Komponente des magnetischen Feldes quer zur Leitung ziemlich genau nach dem Gesetz $\frac{1}{d^{1,5}}$ erfolgt (im Bereich von 150... 1500 kHz). Voraussetzung hierfür ist, dass sich der Messpunkt in genügender Entfernung von allen Dingen, die das Feld beeinflussen, befindet, zum Beispiel Masten, Richtungsänderungen der Leitung, Telephon- oder Starkstromleitungen usw. d ist die Distanz zwischen der Antenne und dem nächstgelegenen Leiter. Die Formel gilt für die gesamte wirklich gestörte Zone, unabhängig von der Anordnung der Leiter (s. Fig. 5).

Anderseits ist die Form des Störspektrums für alle in gutem Zustand befindlichen langen Leitungen praktisch dieselbe (s. Fig. 6); ebenso sind die Mittelwerte des elektrischen und magnetischen Feldes gleich. *Um das Störvermögen einer Leitung zu charakterisieren, genügt es in den meisten praktischen Fällen, den Zentralwert der Störfeldstärke, die in 20 m Abstand vom nächsten Leiter mit einer senkrechten Rahmenantenne bei 1 MHz gemessen wird, als Norm anzunehmen. Dieser Wert muss durch eine Angabe in bezug auf die Streuung der gemessenen Werte, zum Beispiel durch Angabe der Grenzen, die während 5% und 95% der Zeit überschritten werden, ergänzt werden.*

Statistische Erfassung der Störfeldstärke von 220-kV-Leitungen

Das Gesetz für die Ausbreitung quer zur Leitung und die Form des Spektrums können als konstant angesehen werden. Dies gilt jedoch nicht für den absoluten Störpegel der Leitung, der stark von den

CISPR ordinaire à échelle linéaire. On utilise à la place un appareil spécial à fréquence fixe de 500 kHz (fréquence réservée aux appels de secours et exempte en permanence de brouillage par des émetteurs) et à variation automatique de gain. Cet appareil permet de mesurer en une seule gamme des tensions de 10 μV à 20 mV avec une précision de l'ordre de ± 2 dB; sa réponse aux impulsions brèves régulièrement répétées coïncide bien avec celle exigée par le CISPR au-dessus de 10 imp/s et suffit tout à fait pour les perturbations dues à l'effet couronne. Toutes les 24 heures, un dispositif automatique de tarage relie l'entrée du récepteur de mesure à un générateur d'impulsions brèves travaillant à la cadence de 100 impulsions par seconde et donnant successivement un signal correspondant à 0, 100 μV et 10 mV CISPR. On emploie ordinairement pour ces postes d'observation fixes une antenne constituée par un fil horizontal parallèle à la ligne HT, munie d'une descente blindée (v. fig. 8). L'étalonnage de l'installation a lieu par comparaison avec le champ mesuré à 20 m de la ligne HT. Les fig. 9 à 12 montrent les différentes étapes d'analyse des enregistrements obtenus auprès de la ligne du Sanetsch (Grund) et auprès de la ligne Mettlen-Amsteg (Brunnen) (voir annexes).

On constate une remarquable constance de la façon dont sont répartis les niveaux perturbateurs. L'ana-

atmosphärischen Bedingungen abhängt. Zum Studium der statistischen Verteilung dieses Störpegels mussten deshalb Registriereinrichtungen geschaffen werden. Da die Messwerte Schwankungen bis zu 30 dB aufweisen, konnten die Meßstellen nicht mit einem gewöhnlichen CISPR-Empfänger mit linearer Skala ausgerüstet werden. An dessen Stelle wurde ein spezielles Gerät mit einer Fixfrequenz von 500 kHz (diese Frequenz ist für Hilferufe reserviert und daher ständig frei von störenden Sendern) und automatischer Verstärkungsregelung verwendet. Das Gerät erlaubt die Messung von Spannungen von 10 μV bis 20 mV in einem einzigen Bereich mit einer Genauigkeit von etwa ±2 dB. Die Wiedergabe bei kurzen, regelmässig wiederholten Impulsen stimmt oberhalb 10 Hz gut mit den vom CISPR vorgeschriebenen überein und genügt vollkommen für die von der Korona erzeugten Störungen. Alle 24 Stunden verbindet eine automatische Eicheinrichtung den Eingang des Messempfängers mit einem Impulsgenerator, der kurzzeitige Impulse mit einer Wiederholungsfrequenz von 100 Impulsen je Sekunde liefert und ein Signal von 0, 100 μV und 10 mV CISPR erzeugt. Normalerweise werden für die Registrierstationen ortsfeste Antennen verwendet, die aus einem horizontalen, zur Leitung parallelen Draht bestehen und eine abgeschirmte Niederführung besitzen (s. Fig. 8). Die Eichung der

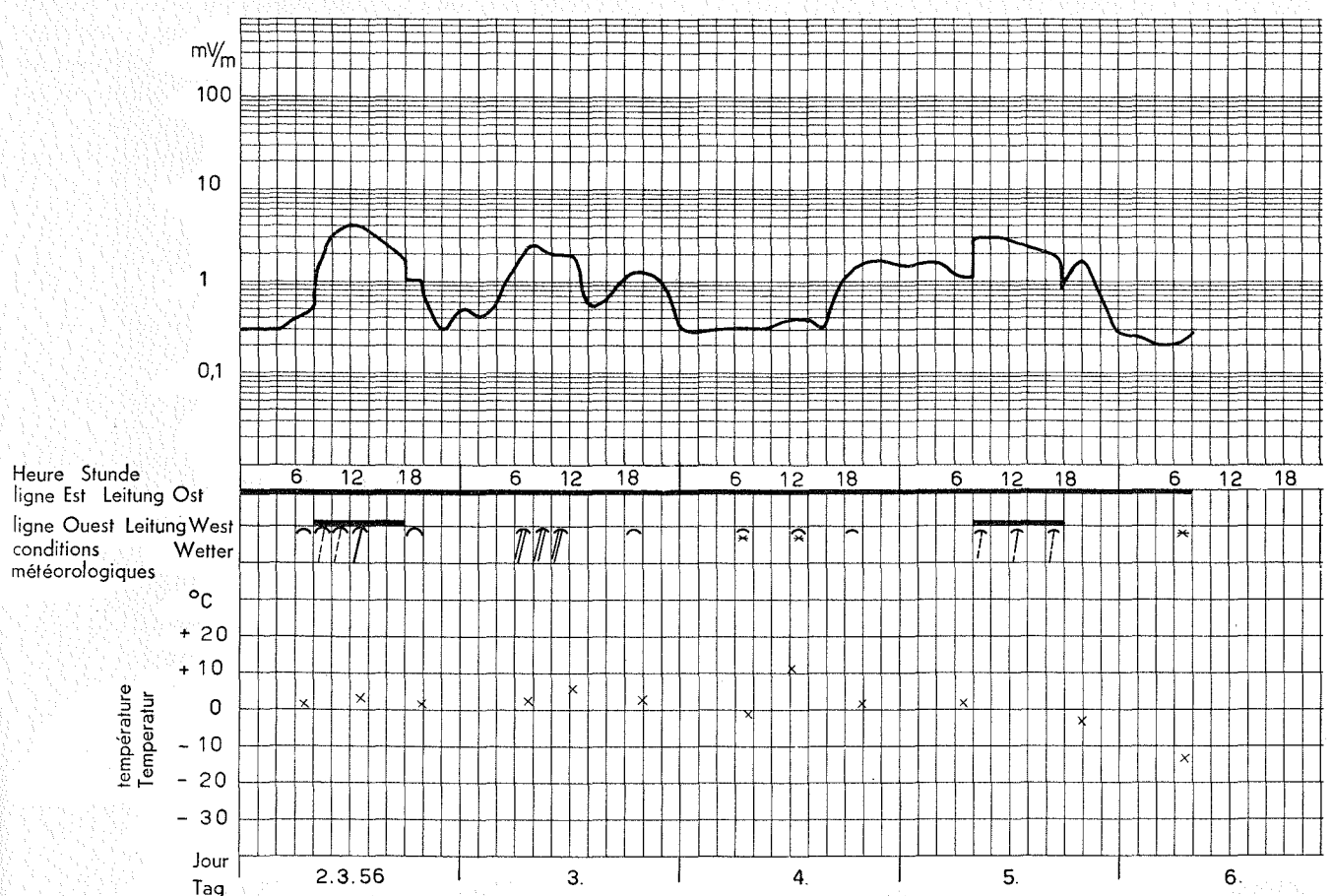


Fig. 10. Report sur diagramme — Zwischendiagramm für die Auswertung

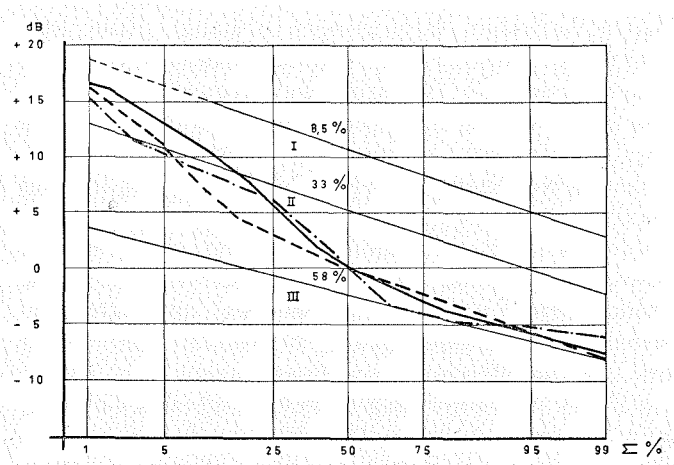


Fig. 11. Courbe des fréquences cumulées
Répartition statistique du niveau perturbateur de 2 lignes à 220 kV doubles mesuré à la fréquence de 500 kHz:
-·-·-·- à Grund du 1. 2.–21. 3. 1956 (232 heures); médiane ≙ 60 $dB_{(1\ \mu V/m)}$
------ à Brunnen du 23. 5.–17. 8. 1956 (1583 heures); médiane ≙ 48 $dB_{(1\ \mu V/m)}$
———— à Grund du 25. 1.–7. 6. 1957 (655 heures); médiane ≙ 56 $dB_{(1\ \mu V/m)}$
Les collectifs représentés par les droites I, II et III résultent de l'analyse de la distribution obtenue en prenant une moyenne des distributions observées

Summenhäufigkeitskurven
Statistische Verteilung des Störpegels von 2 doppelten 220-kV-Leitungen, gemessen bei einer Frequenz von 500 kHz:
-·-·-·- in Grund vom 1. 2.–21. 3. 1956 während 232 Stunden. Zentralwert ≙ 60 $dB_{(1\ \mu V/m)}$
------ in Brunnen vom 23. 5.–17. 8. 1956 während 1583 Stunden. Zentralwert ≙ 48 $dB_{(1\ \mu V/m)}$
———— in Grund vom 25. 1.–7. 6. 1957 während 655 Stunden. Zentralwert ≙ 56 $dB_{(1\ \mu V/m)}$
Die Kollektive, dargestellt durch die Geraden I, II und III, ergeben sich aus der Analyse einer mittleren Verteilungskurve

lyse de la courbe des fréquences cumulées moyennes relevées en deux emplacements permet de distinguer trois régimes perturbateurs principaux:

a) un régime qui règne pendant environ 60% du temps et dont le niveau a une valeur médiane environ 2 dB plus faible que la médiane générale;
b) un régime actif pendant environ un tiers du temps avec une valeur médiane de 6 dB plus élevée que la médiane générale, et enfin
c) un régime présent pendant le reste du temps avec un niveau médian de 11 dB plus élevé que la médiane générale.

Les écarts quadratiques moyens qui caractérisent la dispersion des observations relatives à chacun de ces régimes sont respectivement de ± 3,2 dB, ± 3,5 et ± 2,3 dB.

Mesures d'isolateurs et de conducteurs en laboratoire

Parallèlement aux observations sur le terrain, des études ont été faites en laboratoire pour chercher à déterminer par un essai restreint le pouvoir perturbateur des isolateurs et des conducteurs de ligne.

Anlage geschieht durch Vergleich mit der Feldstärke in 20 m Entfernung von der Hochspannungsleitung. Die Figuren 9 bis 12 zeigen verschiedene Etappen der Auswertung von Registrierungen, die an der Sanetsch-Leitung (Grund) und an der Leitung Mettlen–Amsteg (Brunnen) aufgenommen wurden (s. Anhang). Es besteht eine bemerkenswerte Beständigkeit in der Art, wie die Störpegel statistisch verteilt sind. Die Analyse der Summenhäufigkeitskurve erlaubt drei Hauptstörzustände zu unterscheiden:

a) Ein Störzustand, der während etwa 60% der Zeit vorherrscht, wobei der Zentralwert des Störpegels rund 2 dB unterhalb dem allgemeinen Zentralwert liegt;
b) ein Störzustand, dessen Zentralwert 6 dB höher als der allgemeine Zentralwert liegt und der während eines Drittels der Zeit massgebend ist;
c) ein während des Rests der Zeit auftretender Störzustand mit einem Zentralwert, der um 11 dB über dem allgemeinen Zentralwert liegt.

Die mittleren quadratischen Abweichungen, die die Streuung der Messwerte angeben, haben bei den drei entsprechenden Kollektiven die folgenden Werte: ±3,2 dB, ±3,5 dB und ±2,3 dB.

Messungen an Isolatoren und Hochspannungsleitern im Laboratorium

Parallel mit den Ermittlungen im Freien wurden auch im Laboratorium Untersuchungen durchgeführt. Es wurde versucht, auf möglichst einfache Art das Störvermögen von Isolatoren und Leitern zu bestimmen.

Die für die Isolatoren verwendete Messeinrichtung ist in Figur 13 dargestellt.

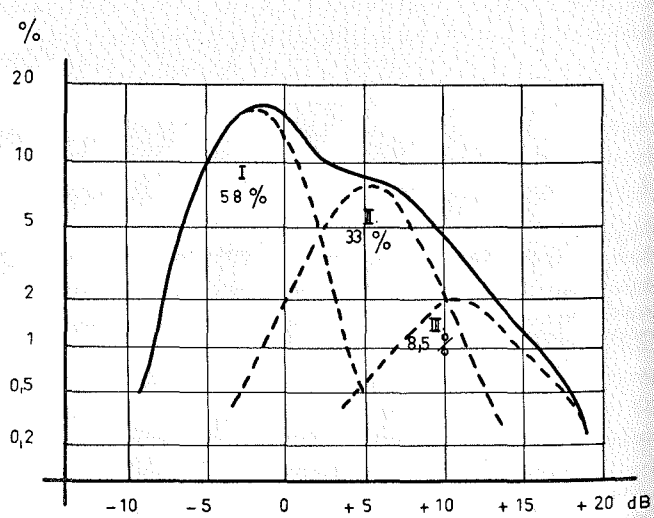


Fig. 12. Exemple d'analyse d'une répartition statistique
Répartition moyenne des fréquences statistiques observées à Grund et Brunnen pour une largeur de classe de 2 dB

Beispiel der Analyse einer statistischen Verteilung.
Mittlere Verteilung der in Grund und Brunnen beobachteten Häufigkeit für eine Klassenbreite von 2 dB

Le dispositif de mesure utilisé pour les isolateurs est représenté par la fig. 13.

Comme en ligne, l'isolateur est soumis à une haute tension à fréquence industrielle et peut être assimilé, lorsqu'il perturbe, à un générateur chargé par une impédance HF de 300 Ω égale à la moitié de l'impédance caractéristique d'une ligne moyenne. Le bouchon S empêche les perturbations étrangères d'entrer dans le circuit de mesure, tandis que le circuit série LC établit un court-circuit HF entre la résistance de charge et le perturbateur. La valeur de la tension perturbatrice à 1 MHz mesurée aux bornes de la résistance caractérise le pouvoir perturbateur de l'isolateur.

Les figures 14 et 15 montrent deux exemples de mesures effectuées sur des isolateurs à long fût avec armature à cornes, d'une part, et avec corbeille EWZ, d'autre part.

Jusqu'à maintenant, l'on s'est contenté de mesurer les isolateurs à sec parce que cela est plus facile, parce que les résultats sont relativement bien reproductibles et aussi parce que, *sous pluie*, dans nos régions où l'atmosphère est peu polluée, *les perturbations les plus fortes proviennent de l'effet couronne à la surface des conducteurs.*

Par temps sec, cet effet couronne est pratiquement négligeable pour les lignes de construction normale, alors que, lorsqu'il pleut, il faut s'en préoccuper au

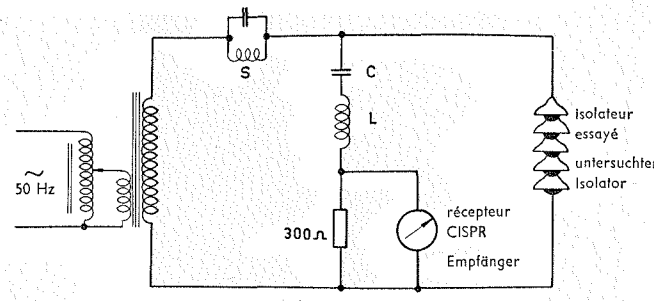
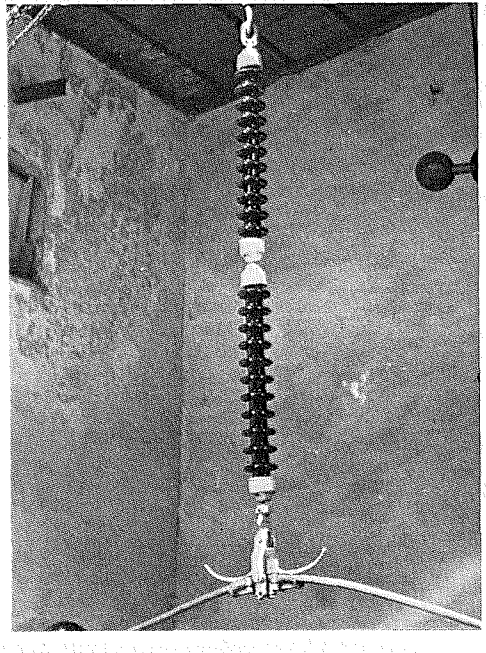


Fig. 13. Dispositif de mesure du pouvoir perturbateur des isolateurs à 1 MHz
Messeinrichtung für das Störvermögen von Isolatoren bei 1 MHz

Wie auf der Leitung, wird der Isolator an eine 50-Hz-Hochspannungsquelle gelegt; sobald er stört, ist er mit einem HF-Generator zu vergleichen, der mit einer Impedanz von 300 Ohm – entsprechend der Hälfte des Wellenwiderstandes einer durchschnittlichen Leitung – belastet ist. Der Sperrkreis S verhindert das Eindringen von Fremdstörungen in den Messkreis, wogegen der Seriekreis LC für die Hochfrequenz einen Kurzschluss zwischen dem Belastungswiderstand und dem Störer herstellt. Der Wert der Störspannung, an den Klemmen des Widerstandes bei 1 MHz gemessen, charakterisiert das Störvermögen des Isolators.

Die Figuren 14 und 15 zeigen zwei Beispiele von



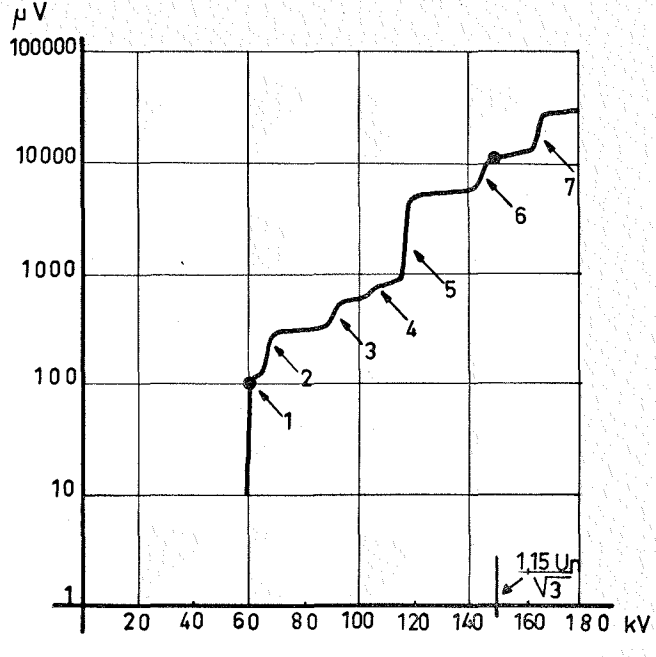


Fig. 14. Pouvoir perturbateur d'une chaîne d'isolateurs pour ligne à 220 kV avec pince à cornes et conducteur Aldrey 550 mm² Störvermögen einer Isolatorenkette für 220 kV-Leitungen mit Seilklemme mit Hörnern und Aldrey-Seil 550 mm²

1 Effluve sur 1 corne
2 Effluve sur 2 cornes
3 Effluve sur la cape et l'écran inférieur de l'isolateur du bas
4 Effluve sur le conducteur de ligne
5 Aigrette sur la cape et l'écran inférieur
6 Aigrette sur la corde
7 Aigrette sur la pince

1 1. Horn glimmt
2 2. Horn glimmt
3 Kappe und unterster Schirm des Isolators glimmen
4 Seil glimmt
5 Büschel an Kappe und unterstem Schirm des Isolators
6 Büschel am Seil
7 Büschel am Seilschiff

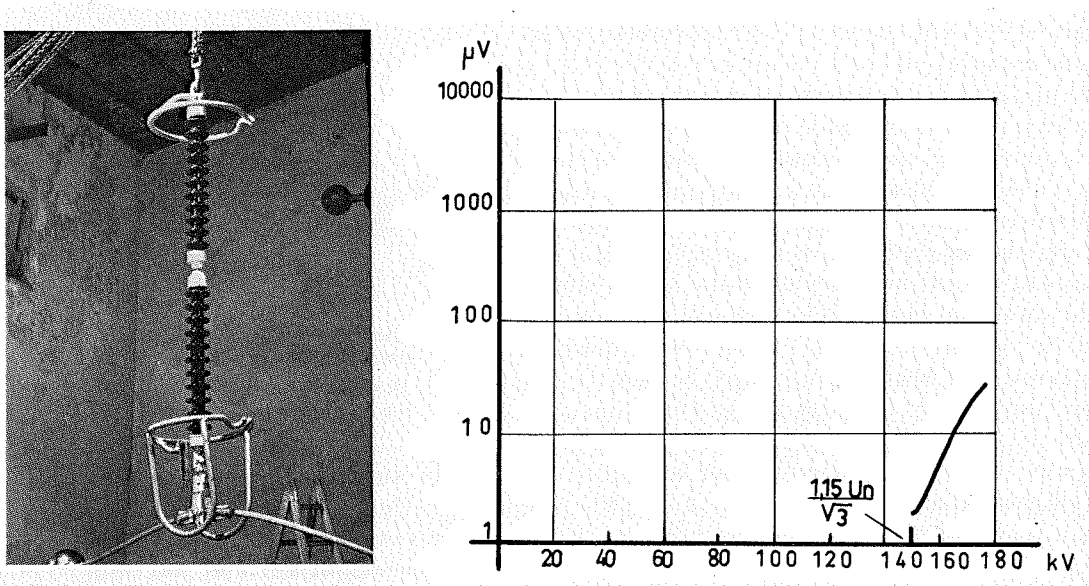


Fig. 15. Pouvoir perturbateur d'une chaîne d'isolateurs pour ligne à 220 kV avec corbeille de protection type EWZ
Störvermögen einer Isolatorenkette für 220-kV-Leitungen mit Schutzkorb Typ EWZ

double point de vue des pertes d'énergie et des perturbations radioélectriques. C'est pourquoi le FKH a construit une enceinte climatique[1] permettant d'effectuer des mesures sur des échantillons de conducteurs d'une dizaine de mètres de longueur (fig. 16).

Cette enceinte consiste en un cylindre de 14 m de long et de 3 m de diamètre intérieur, dans lequel on peut créer un climat artificiel en agissant sur la pression de l'air entre 0,1 et 1,6 kg/cm², la température entre + 40° et – 30° C, l'humidité, le brouillard et le vent. Certaines conditions de pluie peuvent aussi être reproduites. Le conducteur essayé est placé dans l'axe du cylindre de mesure; on peut lui appliquer des tensions allant jusqu'à 300 kV par rapport à la masse du cylindre. On caractérise le pouvoir perturbateur des échantillons de conducteurs comme celui des isolateurs par la tension perturbatrice U_p qu'ils produisent à un MHz aux bornes d'une résistence HF de 300 Ω placée entre le conducteur essayé et la masse de l'enceinte climatique.

Les conditions climatiques utilisées normalement sont les suivantes:

a) 730 mm Hg 15° C correspondant à une altitude de 400 m;
b) 640 mm Hg 10° C correspondant à une altitude de 1500 m;
c) 560 mm Hg 5° C correspondant à une altitude de 2500 m.

Les conducteurs sont d'abord dégraissés et formés, puis essayés à sec et sous une très forte pluie aux différentes «altitudes».

Les figures 17 et 17a, où l'on a choisi comme abscisses la tension composée qui, en ligne, correspondrait au gradient superficiel nominal existant

[1] *E. Seylaz* et *K. Berger*. Installation d'essai et de mesure des pertes par effet de couronne des conducteurs à très haute tension placés sous conditions climatiques imposées ou naturelles. Bulletin de l'ASE 1952, nº 14, p. 593...601.

Messungen an Langstabisolatoren; einerseits mit Armaturen mit Hörnern und anderseits mit dem Schutzkorb EWZ.

Bis jetzt hat man sich der Einfachheit halber damit begnügt, Messungen an trockenen Isolatoren auszuführen, da die Resultate verhältnismässig gut reproduzierbar sind und da, infolge der geringen Verschmutzung der Atmosphäre in unseren Gegenden, die stärkeren Störungen bei Regen ohnehin von der *Korona auf der Seiloberfläche der Leitungen* herrühren.

Bei trockenem Wetter ist für normal gebaute Leitungen dieser Korona-Effekt praktisch vernachlässigbar, dagegen macht er sich bei Regen auf zwei Arten bemerkbar: Durch Energieverluste und durch Radiostörungen. Aus diesem Grunde hat die FKH eine klimatisierte Reuse** konstruiert, die die Ausführung von Messungen an Leitungsstücken von etwa 10 m Länge gestattet (Fig. 16).

** *E. Seylaz* und *K. Berger*. Versuchsanlage für die Messung der Koronaverluste von Hochspannungsleitern unter willkürlich erzeugbaren oder natürlichen klimatischen Verhältnissen. Bulletin SEV 1952, Nr. 14, S. 593...601.

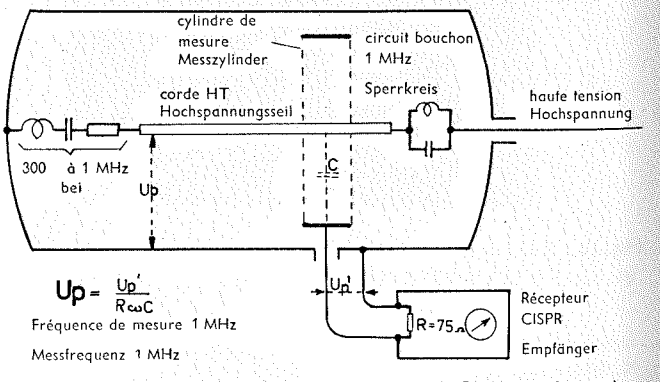


Fig. 16. Enceinte climatique pour la mesure du pouvoir perturbateur d'échantillons de conducteurs de ligne
Klimareuse zur Messung des Störvermögens an Versuchsmustern von Hochspannungsleitern

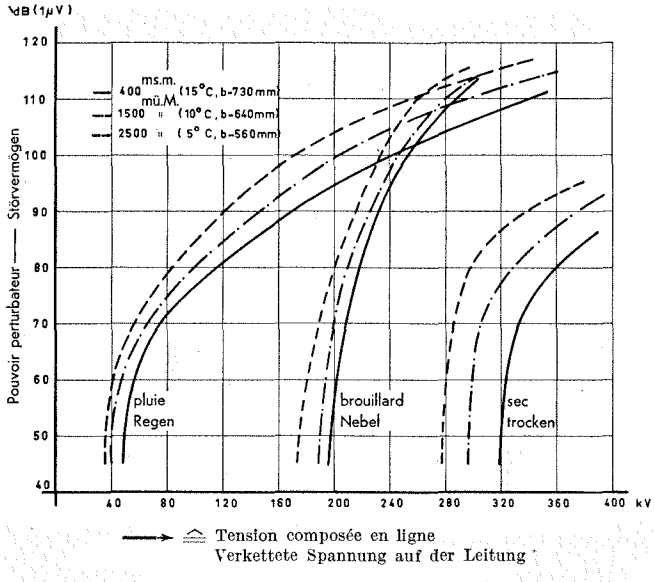


Fig. 17. Pouvoir perturbateur d'un conducteur Aldrey de 30,6 mm de diamètre mesuré en nasse sous pluie avec brouillard et à sec à 3 «altitudes»
Störvermögen eines Aldrey-Seiles von 30,6 mm ⌀, gemessen in der Reuse bei Regen, Nebel und trocken in drei «Höhenlagen»

en nasse[2] montrent quelques résultats de mesure typiques obtenus avec un échantillon de câble simple de 30,6 mm de diamètre.

On voit qu'en portant la tension perturbatrice observée en fonction de la tension de ligne dans un réseau à coordonnées logarithmiques[3], les caractéristiques obtenues sont sensiblement des droites, spécialement lorsqu'il s'agit de mesures effectuées sous forte pluie.

[2] $U_{\text{ligne}} = \sqrt{3}\, U_{\text{nasse}} \cdot \frac{C_{\text{nasse}}}{C_{\text{ligne}}}$ Expression où C = capacité de service par unité de longueur

[3] Le pouvoir perturbateur en dB indiqué en ordonnées = $20 \log_{10}$ où $U_p \mathrel{\hat{=}}$ tension perturbatrice exprimée en μV.

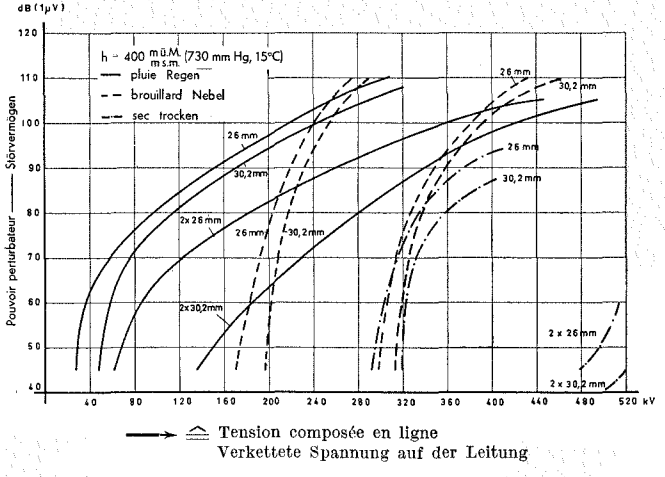


Fig. 18. Comparaison entre faisceaux et cordes simples
Les faisceaux sont formés de 2 conducteurs parallèles distants de 40 cm dans le sens horizontal
Vergleich zwischen Bündel- und Einzelleitern.
Die Bündelleiter bestehen aus 2 parallelen Leitern mit einem gegenseitigen horizontalen Abstand von 40 cm

Diese Reuse besteht aus einem Zylinder von 14 m Länge und 3 m Innendurchmesser, in dem ein künstliches Klima erzeugt werden kann (durch Einstellen des Luftdruckes zwischen 0,1 und 1,6 kg/cm², der Temperatur zwischen +40° und −30° C, der Feuchtigkeit sowie Erzeugen von Nebel und Wind). Gewisse Regenbedingungen können ebenfalls nachgebildet werden. Der zu untersuchende Leiter befindet sich in der Achse des Messzylinders; man kann ihm Spannungen bis zu 300 kV gegenüber dem geerdeten Zylinder anlegen. Das Störvermögen der Leiterstücke wird wie bei den Isolatoren definiert, das heisst durch die Störspannung U_p, die bei 1 MHz an den Klemmen eines zwischen dem Leiter und der Masse der Klimareuse liegenden HF-Widerstandes von 300 Ohm auftritt.

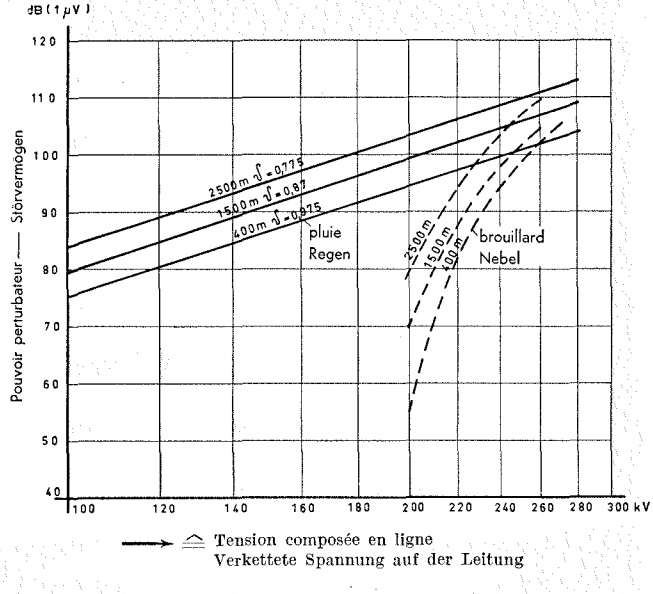


Fig. 17a. Effet de la tension relative de l'air δ et de la tension de service U_L sur le pouvoir perturbateur U_p d'un échantillon de conducteur de ⌀ = 30,6 mm

sous pluie $$\frac{U_{p1}}{U_{p2}} \approx \left(\frac{U_{L1}}{U_{L2}}\right)^{3,3} \approx \left(\frac{\delta_2}{\delta_1}\right)^{4,2}$$

Einfluss der relativen Luftdichte δ und der Betriebsspannung U_L auf das Störvermögen U_p eines Seilmusters von 30,6 mm Durchmesser

bei Regen: $$\frac{U_{p1}}{U_{p2}} \approx \left(\frac{U_{L1}}{U_{L2}}\right)^{3,3} \approx \left(\frac{\delta_2}{\delta_1}\right)^{4,2}$$

Die normalerweise verwendeten Klimabedingungen sind die folgenden:

a) 730 mm Hg 15° C entsprechend einer Höhe von 400 m ü. M.;
b) 640 mm Hg 10° C entsprechend einer Höhe von 1500 m ü. M.;
c) 560 mm Hg 5° C entsprechend einer Höhe von 2500 m ü. M.

Die Leiter wurden zuerst gut entfettet und formiert und alsdann bei trockenem Wetter, bei Nebel und bei sehr starkem Regen gemessen; dies bei den verschiedenen «Höhenlagen».

L'interprétation des résultats de ces mesures, ainsi que celle de résultats représentés à la figure 18, est très délicate, car, d'une part, les échantillons sont très courts, et, d'autre part, il existe une infinité d'états intermédiaires mal définis entre celui de la corde sans éraflure, sèche, dégraissée et formée, et celui de la corde soumise à une pluie très violente. Ces états extrêmes ne règnent pratiquement jamais tout le long d'une ligne à haute tension. Tout au moins les essais en nasse permettent-ils d'étudier commodément l'influence de la densité relative de l'air[4] sur le niveau perturbateur et d'apprécier assez grossièrement certaines caractéristiques relatives des conducteurs simples et des conducteurs en faisceaux (v. fig. 18).

Mesures relatives à la propagation des perturbations

Il reste à voir comment se propagent le long de la ligne et autour d'elle les perturbations produites par une source perturbatrice élémentaire ou, éventuellement, un groupe de sources. Divers auteurs se sont penchés sur ce problème et ont démontré que la composante verticale du champ électrique doit décroître proportionnellement à l'inverse du carré de la distance transversale par rapport à la ligne, alors que toutes les observations précises conduisent à une loi de décroissance qui se rapproche de $\frac{1}{d^{1,5}}$.

D'autre part, on rencontre dans les publications des indications extrêmement divergentes en ce qui concerne la valeur de l'atténuation des courants HF le long des lignes HT.

Toutes ces incertitudes relatives à la propagation des perturbations nous ont amenés à procéder à un essai adhérant d'aussi près que possible aux conditions présentes par temps sec sur une ligne HT en exploitation. Les Forces Motrices Bernoises ayant pu mettre à notre disposition pour quelques jours la ligne à 220 kV qui va de Mühleberg à Laufenburg (voir annexe), nous avons monté parallèlement à chacun des 6 isolateurs d'un pylône (v. fig. 21a) un générateur à arc du type Siemens STVS 3803, qui donne un niveau perturbateur défini et a une résistance interne négligeable.

Puis nous avons mesuré le champ transversalement à la ligne et le long de la ligne. Auparavant, nous avions confronté des signaux sous une ligne en service à ceux de nos générateurs à arc (fig. 19). Nous avions aussi examiné comment s'additionnent les effets perturbateurs de ces générateurs (fig. 20 et 21).

Lorsque les 6 générateurs donnant chacun une tension V_1 sont en service et que l'on mesure le champ $|E|$ à 20 m du conducteur le plus proche, de part et d'autre de la ligne, à une distance du pylône supportant les générateurs jugée suffisante pour que l'influence directe de celui-ci soit négligeable, mais telle que l'atténuation longitudinale du niveau perturba-

[4] $S = \frac{0{,}385 \cdot b}{273 + t^0}$ b = en mm Hg, t = en ° C

Die Figuren 17 und 17a zeigen einige typische Resultate von Messungen, die an einem Einzelseil von 30,6 mm Durchmesser gemacht wurden. Als Abszisse wurde die verkettete Spannung gewählt, die auf einer Freileitung die gleiche Randfeldstärke verursachen würde wie in der Messreuse[1]. Wenn man zur Darstellung der Störspannung in Funktion der Spannung an der Leitung ein logarithmisches Koordinatennetz[2] verwendet, so werden die Diagramme annähernd zu Geraden, besonders wenn es sich um Messungen bei sehr starkem Regen handelt.

Die Interpretation dieser Messresultate sowie der in Figur 18 dargestellten Resultate ist sehr heikel; einerseits sind die Seilstücke sehr kurz und anderseits bestehen eine ganze Menge von schlecht definierten Zuständen zwischen demjenigen des trockenen, entfetteten und formierten Seiles ohne Oberflächenverletzungen und demjenigen des unter sehr starkem Regen stehenden Seiles.

Diese extremen Zustände sind praktisch nie auf der ganzen Länge einer Hochspannungsleitung vorhanden. Gleichwohl gestatten die Versuche in der Reuse, den Einfluss der relativen Luftdichte[3] auf den Störpegel zu studieren; ebenso sind gewisse annähernde Vergleiche zwischen Einzel- und Bündelleitern möglich.

Störausbreitungsmessungen

Es bleibt zu untersuchen, wie sich die – durch eine Einzelstörquelle oder allenfalls durch eine Gruppe von Störquellen erzeugten – Störungen längs der Leitung und in ihrer Umgebung ausbreiten. Verschiedene Autoren haben dieses Gebiet behandelt und gezeigt, dass die vertikale Komponente des elektrischen Feldes entsprechend $\frac{1}{d^2}$ abnehmen muss (wobei d die Distanz quer zur Leitung bedeutet). Alle genauen Messungen ergeben jedoch ein Ausbreitungsgesetz von annähernd $\frac{1}{d^{1,5}}$.

Anderseits findet man in den Veröffentlichungen stark auseinandergehende Angaben in bezug auf die Dämpfung der HF-Ströme längs der Hochspannungsleitungen.

Infolge dieser unbestimmten Angaben in bezug auf die Störausbreitung führten wir einen diesbezüglichen Versuch durch, wobei die an einer in Betrieb stehenden Hochspannungsleitung bei trockenem Wetter auftretenden Bedingungen so gut als möglich eingehalten wurden. Die Bernischen Kraftwerke konnten uns für einige Tage die 220-kV-Leitung Mühleberg–Laufenburg (s. Anhang) zur Verfügung stellen. Bei einem Mast montierten wir parallel zu jedem Isolator

[1] $U_{\text{Leitung}} = \sqrt{3} \cdot U_{\text{Reuse}} \cdot \frac{C_{\text{Reuse}}}{C_{\text{Leitung}}}$, worin C die Betriebskapazität je Längeneinheit bedeutet.

[2] Auf der Ordinate ist das Störvermögen in dB = $20 \log_{10} Up$ aufgetragen, wobei Up die Störspannung in μV ist.

[3] $\delta = \frac{0.385\,\text{b}}{273+\text{t}}$ b = mm Hg, t = °C

teur à la ligne soit faible, on trouve que l'écart entre la tension V_1 aux bornes des isolateurs exprimée en dB (1 μV) et le champ $|E|$ exprimé en dB (1 μV/m) est de 46,5 dB ± 2,7, quelle que soit la fréquence de mesure entre 150 kHz et 6 MHz, ceci aussi bien pour le champ électrique que pour le champ magnétique (v. fig. 22).

En enclenchant successivement chacun des six générateurs et en observant le long de la ligne le niveau du champ perturbateur à la distance normalisée de 20 m du conducteur le plus proche, on constate qu'aucune corrélation n'existe entre la valeur du champ et la position du conducteur excité, sauf au voisinage immédiat des sources. Les courbes d'atténuation du champ correspondant aux sources isolées sont irrégulières. Lorsque les 6 sources fonctionnent ensemble, ces irrégularités s'atténuent et il devient possible de tracer sans trop d'erreur une courbe moyenne caractéristique. La figure 23 représente à titre d'exemple les résultats de mesures effectuées à 1500 kHz. Contrairement à ce que l'on pensait, la décroissance du champ le long de la ligne n'est pas exponentielle, car si tel était le cas les caractéristiques de la figure 24 représentant, après égalisation graphique, les atténuations $Y = 20 \log_{10} \frac{|E_o|}{|E_x|}$ observées aux diverses fréquences entre le champ $|E_x|$ mesuré à une distance x des sources perturbatrices et le champ $|E_o|$ mesuré près de celles-ci, devraient être des droites. En réalité, c'est la loi

$$\frac{|E_o|}{|E_x|} = 1 + k\,x \qquad (4)$$

qui s'accorde le mieux avec l'expérience (v. fig. 25). Il y a lieu de remarquer que la loi de propagation transversale en $\frac{1}{d^{1,5}}$ (fig. 5) est valable aussi bien pour les perturbations de la ligne en service normal que lorsqu'elle est excitée, comme ici, par un groupe

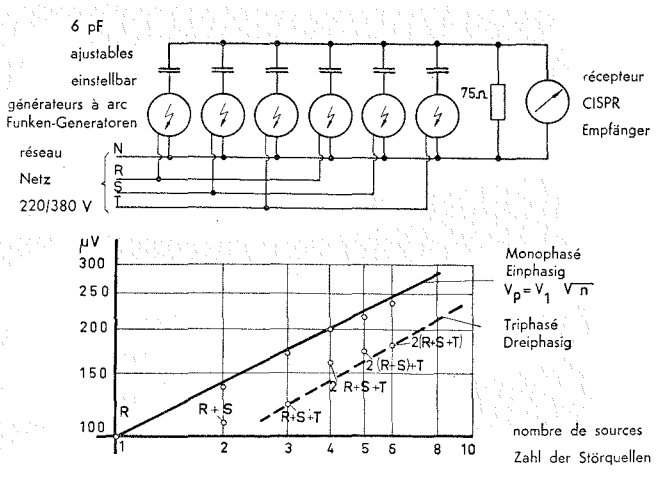


Fig. 20. Dispositif pour étudier la loi d'addition de l'effet de plusieurs sources perturbatrices simultanées égales
Einrichtung zur Untersuchung des Additionsgesetzes bei gleichzeitiger Einwirkung von mehreren gleichartigen Störquellen

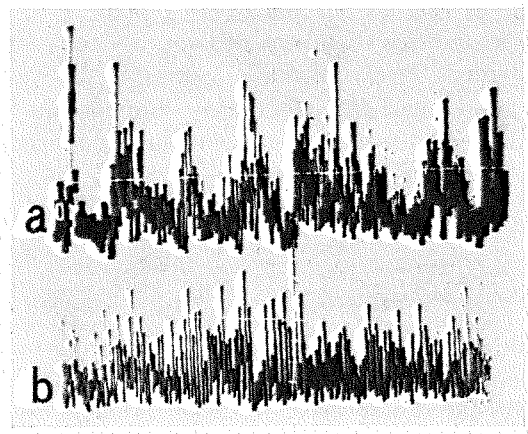


Fig. 19. Comparaison des oscillogrammes relevés à la sortie basse fréquence d'un récepteur CISPR captant a) le champ de la ligne Mühleberg–Laufenburg excité par 6 générateurs à arc et b) le champ de la ligne 220 kV Mühleberg–Riddes en service normal (f = 1400 kHz, d = 50 m)
Vergleich von Oszillogrammen, die am Niederfrequenzausgang des CISPR-Empfängers aufgenommen wurden. Der Empfänger erfasste hierbei
a) das Störfeld der Leitung Mühleberg–Laufenburg bei Erregung durch 6 Funkengeneratoren und
b) das Störfeld der 220-kV-Leitung Mühleberg–Riddes bei normalem Betrieb (f = 1400 kHz, d = 50 m)

(s. Fig. 21a) je einen Funken-Störgenerator vom Typ Siemens STVS 3803. Diese Generatoren geben ein definiertes Störsignal bei vernachlässigbar kleinem innerem Widerstand. Anschliessend konnte das Feld längs der Leitung sowie quer zur Leitung gemessen werden. Vorher hatten wir die Störsignale einer in Betrieb stehenden Leitung mit denjenigen unserer Funkensender verglichen (s. Fig. 19). Wir hatten ebenso untersucht, auf welche Weise sich die Störsignale der Funkensender addieren (s. Fig. 20 und 21).

Nach Einschalten aller sechs Generatoren, wobei jeder eine Spannung V_1 erzeugte, konnte nun die Feldstärke $|E|$ in 20 m Distanz vom nächstliegenden Leiter entfernt gemessen werden. Die Messung wurde beidseitig der Störer längs der Leitung gemacht, wobei einerseits der Abstand vom Mast genügend gross sein musste, um durch diesen keine direkte Beeinflussung zu bekommen, und anderseits der Abstand nicht zu gross sein durfte, um eine möglichst kleine Längsdämpfung des Störsignals durch die Leitung zu erhalten. Es ergab sich hierbei als Verhältnis zwischen der Spannung V_1 an den Klemmen der Isolatoren [ausgedrückt in dB (1 μV)] und der Feldstärke $|E|$ [ausgedrückt in dB (1 μV/m)] der Wert von 46,5 dB ±2,7. Dieser Wert gilt für jede beliebige Messfrequenz zwischen 150 kHz und 6 MHz, und zwar sowohl für das elektrische als auch für das magnetische Feld (s. Fig. 22).

Werden die sechs Generatoren jeweilen einer nach dem andern eingeschaltet, und kontrolliert man hierbei die Störfeldstärke (bei der normalisierten Messdistanz von 20 m bis zum nächstliegenden Leiter) an verschiedenen Punkten längs der Leitung, so erkennt man keine direkte Übereinstimmung zwischen

de sources réunies sur un même pylône. Ceci a été vérifié à diverses distances des sources tout au long de la ligne.

En représentant l'atténuation kilométrique α en fonction de la distance, on obtient le réseau de courbes de la figure 26

$$\text{où } \alpha_{1_{dB/km}} = \frac{8{,}7\ k}{1 + kx} \qquad (5)$$

pour $x = 0$ $\qquad \alpha_o = 8{,}7\ k$ (dB/km) $\widehat{=}$ k (néper/km)

L'allure générale des courbes montre qu'il doit y avoir une influence de rayonnement de la partie de la ligne voisine des sources, car le phénomène est d'autant plus accusé que la fréquence est élevée. Cette allure explique aussi en partie la diversité des valeurs d'atténuation données par divers auteurs pour des lignes de constitution semblable, diversité que ne suffisent pas à motiver les écarts des résistivités du sol situé sous ces lignes.

Si l'on cherche à calculer *le niveau perturbateur U_{Res} résultant produit au milieu d'une ligne infiniment longue par des sources égales réparties régulièrement le long de celle-ci*, on démontre aisément qu'en vertu de la loi d'addition quadratique (fig. 20)

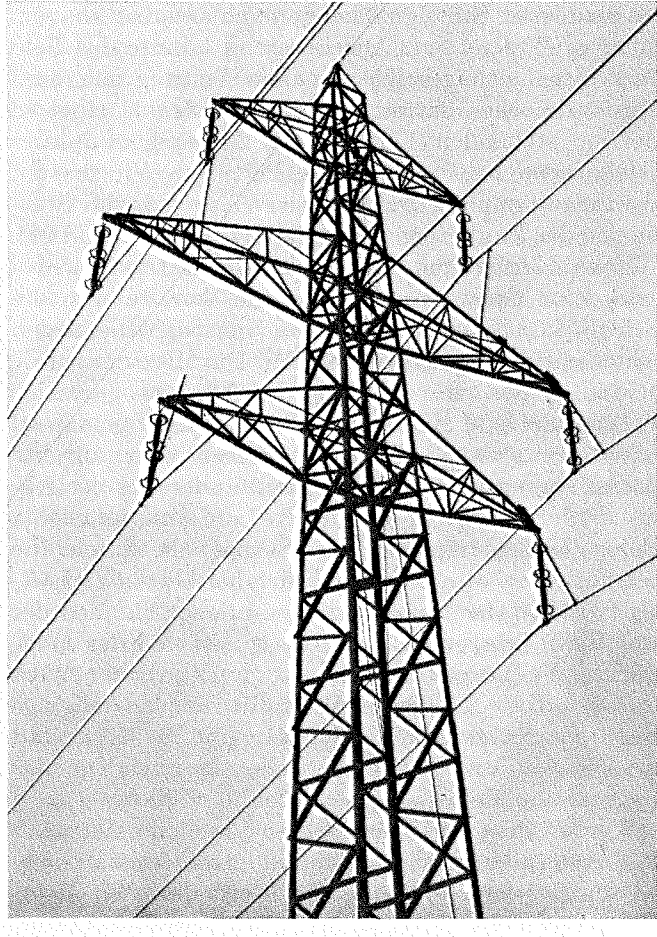


Fig. 21a. Pylône avec générateur à arc
Mast mit montierten Funkengeneratoren

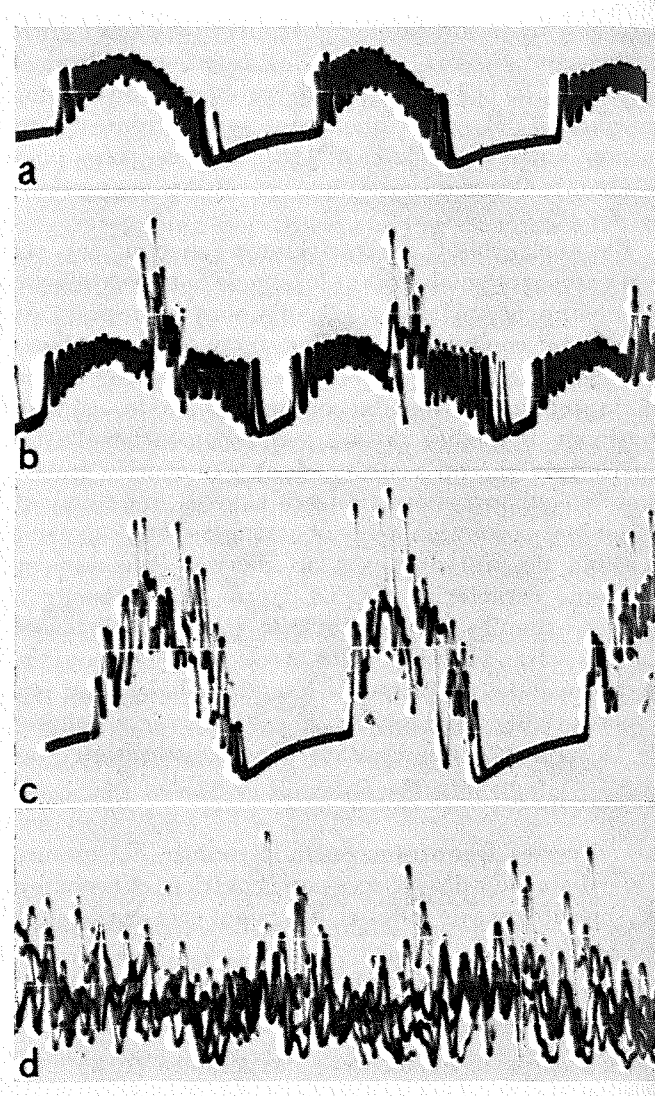


Fig. 21. Oscillogrammes obtenus avec le dispositif de la fig. 20
a) 1 générateur excité par la phase R
b) 1 générateur excité par chacune des phases R et S
c) 2 générateurs excités par la phase R
d) 2 générateurs excités par chacune des phases R, S, et T

Oszillogramme, die mit der Einrichtung nach Fig. 20 erhalten wurden.
a) 1 Generator gespeist durch die Phase R
b) je 1 Generator gespeist durch die Phasen R und S
c) 2 Generatoren gespeist durch die Phase R
d) je 2 Generatoren gespeist durch die Phasen R, S und T

der Position des störenden Leiters und der Feldstärke, ausgenommen in unmittelbarer Umgebung der Störquelle. Die Dämpfungskurven für die Feldstärke sind bei Einzelstörquellen unregelmässig. Sind alle sechs Generatoren gleichzeitig in Betrieb, so gleichen sich diese Unregelmässigkeiten ein wenig aus, und es ist ohne grosse Fehler möglich, eine mittlere charakteristische Kurve zu zeichnen. Als Beispiel sind in Figur 23 die bei 1500 kHz gemessenen Resultate dargestellt. Entgegen den Erwartungen erfolgt die Abnahme der Feldstärke längs der Leitung nicht exponentiell. Wenn dies der Fall wäre, so müssten die in Figur 24 dargestellten, bei verschiedenen Frequen-

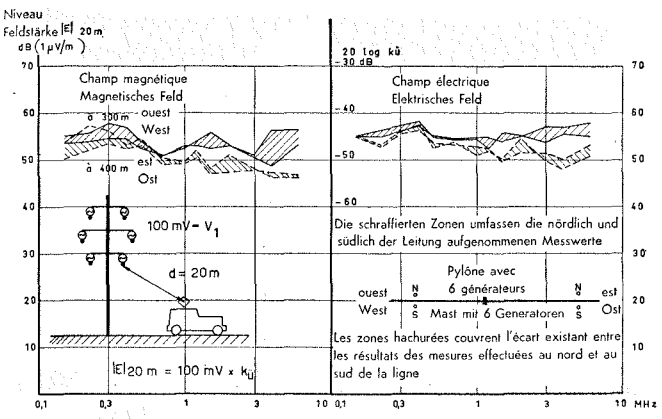


Fig. 22. Exemple de résultats de mesure du rapport entre le champ mesuré à 20 m de lignes à 220 kV et la tension perturbatrice U_1 entre conducteurs et mât, dans le cas de 6 générateurs perturbateurs égaux attaquant chacun un conducteur de ligne

Beispiel von Messresultaten zur Bestimmung der Beziehung zwischen der Feldstärke (gemessen in 20 m Distanz von der Leitung) und der Störspannung U_1 (zwischen Leitern und Mast), im Falle der Erregung einer 220-kV-Leitung durch 6 gleiche Störgeneratoren, von denen jeder einen Phasenleiter speist

$$U_{Res_H} = \frac{U_1 \sqrt{2}}{\sqrt{k}} \qquad (6)$$

dans le cas où l'on admet que $U_{1_x} = \dfrac{U_1}{1 + kx}$

Expression où U_1 est la tension perturbatrice correspondant à un élément de longueur unité: et k le coefficient de propagation qui caractérise la pente des droites de la fig. 25.

Si l'on admet que $U_{1_x} = U_1 \, e^{-\alpha x}$ expression où α représente l'atténuation le long de la ligne en népers par unité de longueur, on trouve

$$U_{Res_{exp}} = \frac{U_1}{\sqrt{\alpha}} \qquad (7)$$

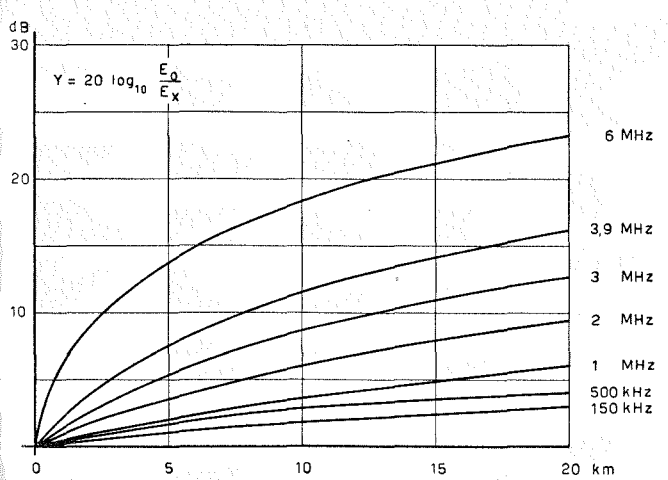


Fig. 24. Atténuation totale le long de la ligne 220 kV Mühleberg–Laufenburg en fonction de l'éloignement de la source

Gesamtdämpfung längs der 220-kV-Leitung Mühleberg–Laufenburg in Funktion der Entfernung von der Störquelle

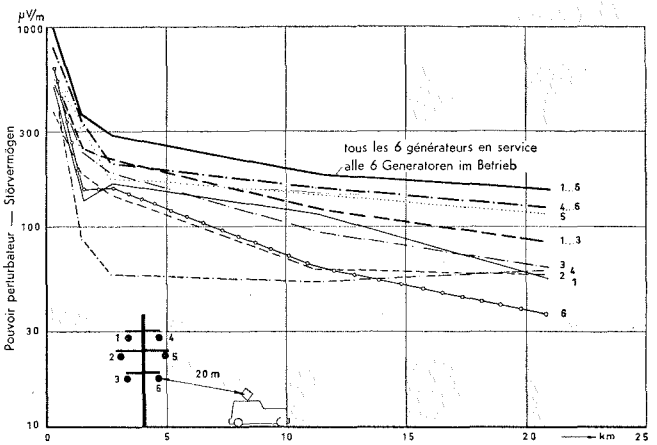


Fig. 23. Champ magnétique le long de la ligne Mühleberg–Laufenburg avec excitation à Niederoesch (à la fréquence de 1500 kHz et à 20 m de distance)

Magnetisches Feld längs der Leitung Mühleberg–Laufenburg mit Erregung in Niederösch (Messfrequenz 1500 kHz, Messdistanz 20 m).

zen gemessenen Dämpfungen $y = 20 \log_{10} \dfrac{|E_o|}{|E_x|}$ in Form von Geraden verlaufen. $|E_x|$ ist hierbei die im Abstand X von den Störquellen gemessene Feldstärke und $|E_o|$ ist die Feldstärke direkt bei den Störquellen. In Wirklichkeit stimmt das Gesetz

$$\frac{|E_o|}{|E_x|} = 1 + k\,x \qquad (4)$$

mit den Messungen am besten überein.

Es muss hier noch bemerkt werden, dass das Ausbreitungsgesetz quer zur Leitung $\dfrac{1}{d^{1,5}}$ (Fig. 5) sowohl bei normal in Betrieb stehenden Leitungen als auch in diesem vorliegenden Fall, bei Erregung der Leitung durch eine Gruppe von Störern, die auf einem Mast vereinigt sind, gültig ist. Dies wurde in verschiedenen Entfernungen von der Störquelle längs der Leitung überprüft.

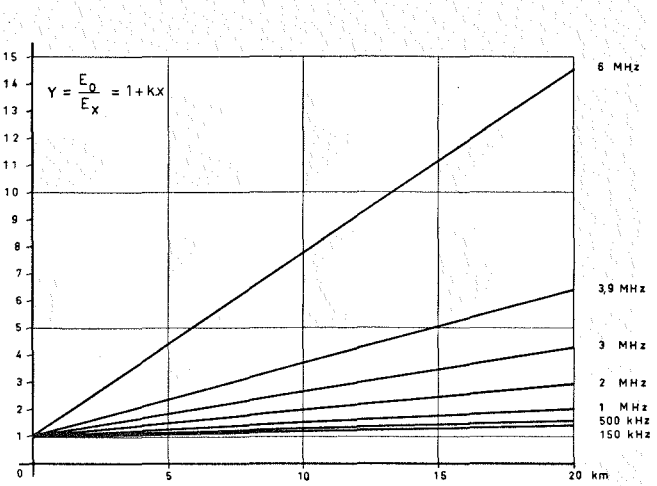


Fig. 25. Rapport entre le champ E_o mesuré près des générateurs et le champ E_x mesuré à une distance x le long de la ligne

Verhältnis zwischen der Feldstärke E_o – gemessen in Nähe der Störgeneratoren – und der Feldstärke E_x – gemessen bei einer Distanz x längs der Leitung

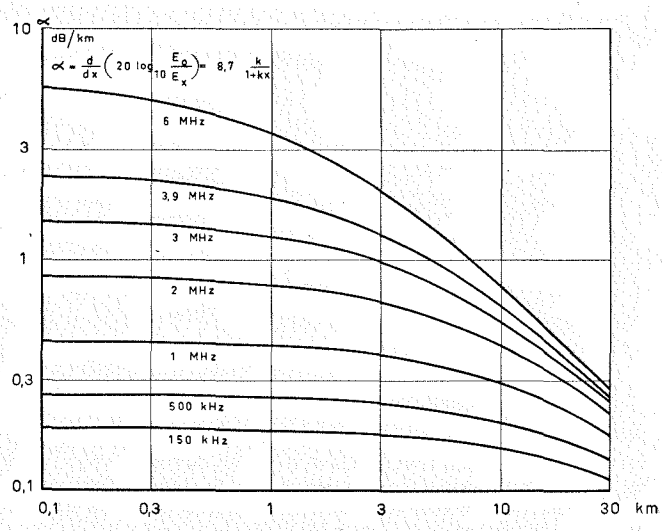


Fig. 26. Variation de l'atténuation locale le long de la ligne 220 kV Mühleberg–Laufenburg en fonction de l'éloignement x de la source

Änderung der örtlichen Dämpfung längs der 220-kV-Leitung Mühleberg–Laufenburg in Funktion der Distanz von der Störquelle

comme pour $x = 0$

$\alpha_0 = k$

$$U_{Res_{exp}} = \frac{U_1}{\sqrt{k}} \text{ et } \frac{U_{Res\,H}}{U_{Res_{exp}}} = \sqrt{2} \mathrel{\widehat{=}} 3\,\text{dB} \qquad (8)$$

Il n'y a que 3 dB de différence entre le niveau perturbateur résultant U_{Res} de la loi de propagation hyperbolique et le niveau $U_{Res_{exp}}$ résultant de la loi de propagation exponentielle, si l'on s'en tient à l'atténuation $\alpha_0 = k$ que l'on mesurerait au voisinage d'une source placée sur la ligne considérée. Par contre, l'action de sources importantes localisées superposées à celle des sources réparties se manifeste à des distances qui peuvent être très diverses suivant l'hypothèse de propagation considérée. En effet, la distance x à laquelle une source localisée de niveau U_s provoque un accroissement de 10% du niveau perturbateur résultant en un point d'une ligne infiniment longue dont les conducteurs produisent un niveau U_1 par unité de longueur s'exprime par

$$x_H = \frac{1}{k}\left(\frac{U_s}{U_1} \cdot 1{,}54\sqrt{k} - 1\right) \qquad (9)$$

pour la propagation hyperbolique, et par

$$x_{exp} = \frac{1}{k} \cdot \ln\left(2{,}17\,\frac{U_s}{U_1}\sqrt{k}\right) \qquad (10)$$

pour la propagation exponentielle.

En admettant, par exemple, une atténuation $\alpha_0 = 0{,}05$ N/km $\mathrel{\widehat{=}}$ k $= 0{,}05$ une ligne produisant un niveau perturbateur U_1 de 10 mV/km et une source concentrée U_s donnant 100 mV, on trouve que

$x_H = 48$ km et $x_{exp} = 32$ km

Si $U_1 = 30$ mV/km et $U_s = 100$ mV

x_H, 2,8 km et $x_{exp} = 9{,}6$ km

Wird die kilometrische Dämpfung α in Funktion der Entfernung aufgetragen, so erhält man die in Figur 26 dargestellte Kurvenschar.

$$\alpha_{1\,\text{dB/km}} = \frac{8{,}7\,k}{1 + kx} \qquad (5)$$

für $x = 0$ wird $\alpha_0 = 8{,}7$ k (dB/km) $\mathrel{\widehat{=}}$ k (Neper/km)

Der allgemeine Verlauf dieser Kurven zeigt, dass eine Strahlungsbeeinflussung auf dem den Störquellen benachbarten Teil der Leitung vorhanden sein muss, da diese Erscheinung um so ausgeprägter wird, je höher die Frequenz ist. Dieser Dämpfungsverlauf erklärt auch zum Teil die Unterschiede in den von verschiedenen Autoren angegebenen Dämpfungswerten für Leitungen von ähnlicher Beschaffenheit. Die unterschiedliche Leitfähigkeit des Bodens unter den Leitungen genügt jedenfalls allein nicht, um diese Unterschiede zu begründen.

Zur Berechnung des resultierenden Störpegels U_{Res}, der in der Mitte einer unendlich langen Leitung durch eine Anzahl von gleichen, regelmässig auf die ganze Leitung verteilten Quellen erzeugt wird, kann man im Hinblick auf das Gesetz der quadratischen Addition (Fig. 20) leicht zeigen, dass

$$U_{Res_H} = \frac{U_1\sqrt{2}}{\sqrt{k}} \qquad (6)$$

unter der Annahme, dass $U_{1_x} = \dfrac{U_1}{1 + kx}$

Hierin bedeutet U_1 die Störspannung je Längeneinheit und k den Ausbreitungskoeffizienten, entsprechend der Steilheit der Geraden in Figur 25.

Unter der Annahme, dass $U_{1_x} = U_1 \cdot e^{-\alpha x}$, wobei α die Dämpfung längs der Leitung in Neper je Längeneinheit darstellt, findet man

$$U_{Res_{Exp}} = \frac{U_1}{\sqrt{\alpha}} \qquad (7)$$

Da für $x = 0$, $\alpha_0 = k$, so ergibt sich

$$U_{Res_{Exp}} = \frac{U_1}{\sqrt{k}} \text{ und } \frac{U_{Res_H}}{U_{Res_{Exp}}} = \sqrt{2} \mathrel{\widehat{=}} 3\,\text{dB} \qquad (8)$$

Die Differenz zwischen dem resultierenden Störpegel U_{Res_H} beim hyperbolischen Ausbreitungsgesetz und dem resultierenden Pegel $U_{Res_{Exp}}$ beim exponentiellen Ausbreitungsgesetz beträgt nur 3 dB, wenn man sich an die Dämpfung $\alpha_0 = k$ hält, die man in der Nähe einer auf der betreffenden Leitung angebrachten Störquelle messen würde. Dagegen können sich starke Einzelstörquellen, die sich den verteilten Störquellen überlagern, je nach dem betrachteten Ausbreitungsgesetz auf sehr unterschiedliche Entfernungen auswirken. Tatsächlich ist an einem Punkt einer unendlich langen Leitung (deren Leiter einen Pegel U_1 je Längeneinheit erzeugen) die Entfernung X, bei der eine Einzelstörquelle vom Pegel U_s eine Erhöhung des Gesamtpegels von 10% verursacht, gegeben durch

D'après ce qui précède, on peut grossièrement calculer le champ perturbateur produit par les isolateurs et par les conducteurs lorsque la ligne est longue et homogène.

Pour une ligne comme celle de Mühleberg–Laufenburg, équipée de conducteurs de ⌀ 30,6 mm, la capacité linéique est de 8,8 pF/m, l'impédance caractéristique correspondante

$$Z_o = \frac{1}{cC} = \frac{1}{3 \cdot 10^8 \cdot 8{,}8 \cdot 10^{-12}} = 380\ \Omega \qquad (11)$$

Chaque isolateur débite sur une charge de $\frac{Z_0}{2} =$ 190 Ω au lieu de 300 Ω en laboratoire, de sorte que la tension perturbatrice à ses bornes vaut environ

$$\frac{190}{300} \cdot U_{lab} = 0{,}63\ U_{lab} \qquad (12)$$

En raison de la loi d'addition quadratique, on peut admettre un pouvoir perturbateur correspondant par km de ligne de

$$0{,}63\ U_{lab} \cdot \sqrt{\frac{1000}{300}} = 1{,}14\ U_{lab} \qquad (13)$$

si l'on suppose les pylônes éloignés de 300 m les uns des autres. La tension résultante U_{res} au milieu d'une ligne longue présentant un coefficient de propagation k = 0,05[5] vaut donc d'après (6)

$$U_{Res} = 1.14\ U_{lab} \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{0{,}05}} = 7{,}4\ U_{lab} \qquad (14)$$

Comme d'autre part $\frac{|U_{res}|}{|E_{20\ m}|} \approx 210 \mathrel{\widehat{=}} 46{,}5$ dB

le champ à 20 m de la ligne vaudrait

$$|E_{20\ m}| = \frac{7{,}4}{210} \cdot U_{lab} = \frac{U_{lab}}{28} \qquad (15)$$

La valeur de 100 μV/m mesurée par beau temps près de la ligne Mühleberg–Laufenburg correspondrait donc à un pouvoir perturbateur des isolateurs mesuré en laboratoire de 3 mV environ, ce qui est en accord avec l'ordre de grandeur effectivement constaté. Il convient, toutefois, de noter que même par temps sec on entend par places, le long des lignes du Sanetsch et Mühleberg–Laufenburg, des grésillements locaux correspondant à des éraflures des conducteurs.

En opérant de même pour le niveau perturbateur dû aux conducteurs de ligne en cas de forte pluie, on trouve

$$|E_{20\ m}| \mathrel{\widehat{=}} \frac{1}{5{,}5}\ U_{p_{nasse}} \quad \text{à 1 MHz (calculé)} \qquad (16)$$

[5] $k = \frac{1}{8{,}7} \alpha_o = 0$ expression où α_o a la valeur de α indiquée à la fig. 26 pour $x = 0$.

$$x_H = \frac{1}{k}\left(\frac{U_s}{U_1} \cdot 1{,}54\ \sqrt{k} - 1\right) \qquad (9)$$

für die hyperbolische Ausbreitung und

$$x_{Exp} = \frac{1}{k} \cdot \ln\left(2{,}17\ \frac{U_s}{U_1}\sqrt{k}\right) \qquad (10)$$

für die exponentielle Ausbreitung.

Nimmt man zum Beispiel bei einer Leitung, die den Störpegel $U_1 = 10$ mV/km erzeugt, sowie eine Einzelstörquelle U_s, die 100 mV abgibt, eine Dämpfung von $\alpha_o = 0{,}05$ Neper/km, $\mathrel{\widehat{=}}$ k = 0,05 an, so findet man

$$x_H = 48 \text{ km und } x_{Exp} = 32 \text{ km}$$

wenn $U_1 = 30$ mV/km und $U_s = 100$ mV

$$x_H = 2{,}8 \text{ km und } x_{Exp} = 9{,}6 \text{ km}.$$

Nach dem Vorausgehenden kann man das ungefähre Störfeld berechnen, das durch die Isolatoren und die Leiter auf einer langen homogenen Leitung erzeugt wird.

Für eine Leitung wie diejenige von Mühleberg–Laufenburg, die mit Seilen von 30,6 mm ⌀ ausgerüstet ist, beträgt die Betriebskapazität 8,8 pF/m, und der entsprechende Wellenwiderstand hat den Wert von

$$Z_o = \frac{1}{cC} = \frac{1}{3 \cdot 10^8 \cdot 8{,}8 \cdot 10^{-12}} = 380\ \Omega \qquad (11)$$

Jeder Isolator speist auf eine Last von $\frac{Z_o}{2} = 190\ \Omega$, anstelle der 300 Ω im Laboratorium, so dass die Störspannung an seinen Klemmen

$$\frac{190}{300} \cdot U_{Lab} = 0{,}63\ U_{Lab} \qquad (12)$$

Infolge des quadratischen Additionsgesetzes kann man das Störvermögen je Kilometer Leitung annehmen zu

$$0{,}63\ U_{Lab} \cdot \sqrt{\frac{1000}{300}} = 1{,}14\ U_{Lab} \qquad (13)$$

unter der Annahme, dass die Entfernung zwischen den Masten 300 m beträgt. In der Mitte einer langen Leitung, die einen Ausbreitungskoeffizienten k = 0,05* aufweist, ergibt sich die resultierende Störspannung U_{Res} somit aus (6)

$$U_{Res} = 1{,}14\ U_{Lab} \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{0{,}05}} = 7{,}4\ U_{Lab} \qquad (14)$$

Da anderseits $\frac{|U_{res}|}{|E_{20\ m}|} \approx 210 \mathrel{\widehat{=}} 46{,}5$ dB

ist, ergibt sich für die Feldstärke in 20 m:

$$|E_{20\ m}| = \frac{7{,}4}{210} \cdot U_{Lab} = \frac{U_{Lab}}{28} \qquad (15)$$

* $k = \frac{1}{8{,}7} \cdot \alpha_o$ wobei α_o der in Figur 26 angegebene Wert α für x = 0 ist.

Ainsi, par exemple, le champ maximum enregistré près de la ligne Mühleberg–Laufenburg étant de 2,5 mV/m à 500 kHz, ce qui correspond à environ 2 mV à 1 MHz[6] pour une ligne double, le pouvoir perturbateur d'un échantillon de 10 m mesuré en nasse par forte pluie à l'altitude correspondante devrait être de $5{,}5 \cdot 2 = 11$ mV $\widehat{=}$ 81 dB (1 μV) pour un conducteur de 30,6 mm de diamètre comme celui de la ligne. En réalité, cette dernière mesure donne une valeur beaucoup plus élevée:

100 mV ($\widehat{=}$ 100 dB $_{(1\,\mu V)}$) à 240 kV de sorte que

$$|E_{20\,m}| \mathrel{\widehat{\approx}} \frac{1}{50} U_{p_{nasse}} \qquad (17)$$

à Zuzwil, à l'altitude de 560 m.

A Grund, à l'altitude de 1100 m, on obtient

$$|E_{20\,m}|_{\max} \mathrel{\widehat{\approx}} \frac{1}{55} U_{p_{nasse}} \qquad (18)$$

A Brunnen, à l'altitude de 460 m, la ligne est équipée de conducteurs de 24,4 mm de diamètre, la tension maximum atteint 235 kV et le champ perturbateur à 1 MHz, 1 mV/m à 20 m de la ligne. En nasse, ce même conducteur a un pouvoir perturbateur de 120 mV, on trouve donc

$$|E_{20\,m}|_{\max} \mathrel{\widehat{\approx}} \frac{1}{120} U_{p_{nasse}} \qquad (19)$$

On voit d'après les expressions 16 à 19 combien il faut être prudent dans l'interprétation des mesures de conducteurs faites en laboratoire. Même en admettant que le coefficient k d'affaiblissement le long de la ligne atteigne avec la pluie une valeur 10 fois plus grande qu'à sec, ce qui est nettement exagéré, on ne pourrait pas expliquer l'écart constaté entre le champ perturbateur mesuré le long des lignes et celui calculé à partir des mesures en nasse. Il faut donc que le procédé utilisé pour réaliser ces dernières pèche par quelque côté, soit en ce qui concerne la production de la pluie, soit par le mode d'étalonnage. La vraie signification des mesures en nasse apparaîtra lorsque l'on aura mesuré les perturbations de la ligne Mettlen–Amsteg dont on vient de remplacer les conducteurs simples de 26 mm ⌀ par des faisceaux à 2 conducteurs. On saura alors si les niveaux perturbateurs constatés le long de lignes munies de conducteurs différents sont vraiment proportionnels à ceux mesurés en nasse.

Tout ceci, cependant, est encore très schématique. En fait, pour résoudre le problème posé, il faudrait tenir compte d'une foule de circonstances locales qui font que les lignes HT ne sont pas homogènes, par exemple des variations de hauteur des conducteurs

[6] La ligne Mühleberg-Laufenburg est exploitée à 220...240 kV sur la terne nord tandis que la terne sud est exploitée à 150 kV. Le niveau de 2 mV a été trouvé en tenant compte de la chute du spectre et en majorant la valeur trouvée de 2 dB pour obtenir le champ correspondant à une ligne double.

Der bei schönem Wetter an der Leitung Mühleberg–Laufenburg gemessene Wert von 100 μV/m würde somit einem Störvermögen der Isolatoren (gemessen im Laboratorium) von ungefähr 3 mV entsprechen. Der effektiv gemessene Wert liegt auch tatsächlich in dieser Grössenordnung. Es muss jedoch bemerkt werden, dass auch bei schönem Wetter an verschiedenen Orten längs der Sanetsch-Leitung sowie der Leitung Mühleberg–Laufenburg ein örtlich begrenztes Knistern hörbar ist, das von einzelnen Unebenheiten auf den Leitern herrührt.

Wird auf analoge Weise der Störpegel, der bei starkem Regen von den Leitern erzeugt wird, berechnet, so findet man

$$|E_{20\,m}| \mathrel{\widehat{=}} \frac{1}{5{,}5} U_{p\ Reuse} \text{ bei 1 MHz} \qquad (16)$$

Der Maximalwert des an der Leitung Mühleberg–Laufenburg registrierten Störpegels beträgt 2,5 mV/m bei 500 kHz; dies entspricht ungefähr 2 mV/m bei 1 MHz* für eine Doppelleitung.

Das Störvermögen eines in der Reuse bei starkem Regen und entsprechender Höhenlage gemessenen Seilmusters sollte somit $5{,}5 \cdot 2 = 11$ mV $\widehat{=}$ 81 dB$_{(1\,\mu V)}$ betragen; dies für einen Leiter von 30,6 mm ⌀.

In Wirklichkeit ergibt diese Messung wesentlich höhere Werte:

100 mV $\widehat{=}$ 100 dB$_{(1\,\mu V)}$ bei 240 kV, so dass

$$|E_{20\,m}| \mathrel{\widehat{\approx}} \frac{1}{50} U_{p\ Reuse} \qquad (17)$$

(gemessen in Zuzwil bei 560 m ü. M.)

In Grund, bei einer Höhe von 1100 m ü. M., erhält man

$$|E_{20\,m}|_{\max} \mathrel{\widehat{\approx}} \frac{1}{55} U_{p\,Reuse} \qquad (18)$$

In Brunnen, bei einer Höhe von 460 m ü. M., ist die Leitung mit Seilen von 24,4 mm ⌀ ausgerüstet; die Spannung erreicht einen maximalen Wert von 235 kV und die Störfeldstärke bei 1 MHz beträgt 1 mV/m in einer Entfernung von 20 m. In der Reuse hat das gleiche Seil ein Störvermögen von 120 mV. Man findet somit

$$|E_{20\,m}|_{\max} \mathrel{\widehat{\approx}} \frac{1}{120} U_{p\,Reuse} \qquad (19)$$

Aus den Formeln (16) bis (19) ersieht man, wie vorsichtig man mit der Interpretation der an Leitern im Laboratorium ausgeführten Messungen sein muss. Selbst wenn man annehmen würde, dass der Ausbreitungskoeffizient k längs der Leitung bei Regen einen zehnmal grösseren Wert hat (was entschieden übertrieben ist), so könnte man diesen Unterschied

* Die Leitung Mühleberg–Laufenburg wird auf dem nördlichen Strang mit 220...240 kV betrieben, während die Spannung auf dem südlichen Strang vorläufig 150 kV beträgt. Der Pegel von 2 mV ergab sich unter Berücksichtigung des Abfalls des Spektrums und durch Erhöhung des Wertes um 2 dB, um die Feldstärke einer entsprechenden Doppelleitung zu erhalten.

au-dessus du sol, des variations de direction et d'altitude des tracés, des rassemblements de gouttes d'eau aux points bas des portées, des réflexions aux extrémités, etc. Il faudrait aussi connaître la dispersion statistique du pouvoir perturbateur des isolateurs et autres éléments mesurés en laboratoire.

Quoi qu'il en soit, on peut d'ores et déjà affirmer qu'il n'y a guère d'espoir avec les moyens classiques de construire des lignes à 220 kV satisfaisantes[7] dans nos vallées alpestres au point de vue de la radio, c'est-à-dire telles que pendant 95% du temps une réception d'un champ de 1 mV/m soit possible à 100 m de la ligne avec un écart signal/bruit de 40 dB, sans recourir à des faisceaux à 2 conducteurs d'environ 30 mm de diamètre, placés côte à côte à 40 cm l'un de l'autre.

En admettant que les niveaux mesurés en nasse sous pluie soient directement proportionnels à ceux mesurés en ligne quel que soit le type de conducteur, les perturbations à attendre des futures lignes à 380 kV devraient être sensiblement égales à celles des lignes à 220 kV actuelles, car la répartition statistique des niveaux perturbateurs indiquée par Gross et Wagner pour les lignes à 500 kV coïncide bien avec celle que nous avons constatée pour les lignes à 220 kV. Cette déduction semble cependant trop optimiste, car d'après les mesures effectuées en Suède auprès d'une ligne en exploitation et en Allemagne auprès d'un tronçon d'essai, il faut s'attendre à un pouvoir perturbateur maximum de l'ordre de 12 mV/m pour nos lignes en tonne armées de conducteurs jumelés de 30 mm de diamètre et, par conséquent, à des portées perturbatrices de 2 à 3 km par temps de pluie et de 200 à 300 m par temps sec.

Conclusion

En résumé, un certain nombre de mesures effectuées en laboratoire et auprès de 3 lignes typiques à 220 kV montrent qu'il est très difficile, sinon impossible, dans l'état actuel de nos connaissances, de prévoir exactement le comportement perturbateur d'une ligne à haute tension uniquement à partir de mesures faites en laboratoire sur ses éléments constitutifs. Ces mesures se justifient cependant pour les contrôles de production et pour l'analyse de l'effet de modification apportés à la forme des isolateurs, à leurs armatures et aux conducteurs, elles sont une aide précieuse pour le constructeur de lignes, qui peut grâce à elles choisir judicieusement son matériel. Pour le cas particulier des lignes à 220 kV en tonne que nous avons étudiées, la valeur de l'intensité du champ perturbateur oscille pour une même ligne dans la proportion de un à trente suivant les conditions atmosphériques. Dans les conditions les plus mauvaises et en l'absence d'induction sur les lignes secondaires de distribution, ces lignes perturzwischen der längs den Leitungen gemessenen Feldstärke und der aus den Reusen-Messungen berechneten Feldstärke nicht erklären. In der bei Reusen-Messungen verwendeten Messmethode muss somit irgendwo ein Fehler stecken, entweder in bezug auf die Erzeugung des Regens oder die Art der Eichung. Die wirkliche Brauchbarkeit der Reusen-Messungen wird sich nach der Messung der umgebauten Leitung Mettlen–Amsteg zeigen, wo kürzlich die Einzelseile von 24,4 mm ⌀ durch Bündelleiter von 30,6 mm ⌀ ersetzt worden sind. Man wird dann wissen, ob die an Leitungen mit verschiedenartigen Seilen gemessenen Störungen tatsächlich proportional den in der Reuse gemessenen sind.

Dies alles ist jedoch noch ziemlich schematisch. In Wirklichkeit müsste man eine grosse Menge von örtlichen Umständen berücksichtigen, die bewirken, dass die Hochspannungsleitungen nicht homogen sind. Es sind dies zum Beispiel Änderungen in der Höhe der Leiter über Boden, Richtungsänderungen und Höhenänderungen im Leitungsverlauf, Ansammlungen von Wassertropfen am untersten Punkt des Durchhanges der Leiter, Reflexionen an den Enden der Leitung usw. Man müsste ebenfalls die statistische Streuung des Störvermögens der Isolatoren und der anderen im Laboratorium gemessenen Elemente kennen.

Trotz allem kann man schon jetzt feststellen, dass kaum die Hoffnung besteht, mit den klassischen Mitteln Hochspannungsleitungen für 220 kV zu bauen, die in unseren Alpentälern in bezug auf den Radioempfang befriedigen*, das heisst, dass während 95% der Zeit der Empfang eines Nutzfeldes von 1 mV/m in 100 m Entfernung von der Leitung, bei einem Nutz- zu Störsignalverhältnis von 40 dB, möglich ist. Dies bedingt schon die Verwendung von Bündelleitern, bestehend aus zwei Leitern von etwa 30 mm ⌀, die nebeneinander in einem gegenseitigen Abstand von 40 cm verlegt sind.

Nimmt man an, dass bei Regen die in der Reuse gemessenen Pegel direkt proportional den auf den Leitungen gemessenen sind, gleichgültig welcher Leitertyp verwendet wird, so ergibt sich, dass die zukünftigen 380-kV-Leitungen (mit Zweierbündeln) bei jeder Witterung ziemlich genau gleich hohe Störungen wie die bestehenden 220-kV-Leitungen (mit Einzelseilen) verursachen sollten, da die von *Gross* und *Wagner* angegebene statistische Verteilung des Störpegels von 400-kV-Leitungen gut mit der von uns an 220-kV-Leitungen beobachteten übereinstimmt.

Nach den in Schweden (an einer in Betrieb stehenden Leitung) und in Deutschland (an einer kurzen Versuchsleitung) gemessenen Werten scheint jedoch die obige Folgerung ein wenig zu optimistisch zu sein. Für unsere 380-kV-Leitungen mit Tonnenmasten

[7] Le critère adopté ici pour préciser le terme «satisfaisant» ne figure dans aucune norme officielle, mais correspond à l'appréciation des auteurs de cet article.

* Die hier für den Ausdruck «befriedigend» angegebene Definition findet sich in keiner offiziellen Vorschrift, sondern entspricht dem Ermessen der Verfasser.

bent jusqu'à une distance de 1000 m environ dans la gamme des ondes moyennes la réception d'un champ utile de 1 mV/m.

Lorsque le temps est beau et en plaine, cette distance tombe à 100 m. En comparant les mesures du pouvoir perturbateur d'échantillons de conducteurs et d'isolateurs faites en laboratoire aux mesures de champ le long des lignes, et en supposant que les perturbations par temps sec sont causées par les premiers tandis que les perturbations les plus fortes par temps de pluie sont dues aux seconds, on peut établir à titre de guide les relations suivantes en arrondissant respectivement les expressions (15) et (17), (18), (19) par temps sec

$$|E_{20\,m}|_{\min} \approx \frac{U_{lab}}{30}\ [\mu V] \quad \text{pour les isolateurs } [\mu V/m]$$

par très forte pluie

$$|E_{20\,m}|_{\max} \approx \frac{U_{nasse}}{80}\ [\mu V] \quad \text{pour les conducteurs } [\mu V/m]$$

On ne saurait trop insister sur la prudence avec laquelle il convient d'interpréter ces relations. Des mesures statistiques en préparation le long d'une ligne équipée de conducteurs en faisceaux doivent bientôt montrer jusqu'à quel point elles sont justifiées.

Bibliographie

F. Cahen et *R. Pélissier*. L'emploi de conducteurs en faisceaux pour l'armement des lignes à très haute tension. Résultats d'essais de la station expérimentale à 500 kV de Chevilly. Bull. Soc. franç. Electr. 8 (1948), 111.

G. D. Lippert, W. E. Pakala, S. C. Bartlett and *C. D. Fahrnkopf*. Radio Influence Tests in Field and Laboratory-500-kV Test Project of the American Gas and Electric Company. Trans. Amer. Inst. Electr. Engrs **70** (1951), Part I, 251.

J. S. Forrest. Mesures des pertes d'énergie et des perturbations radiophoniques sur une ligne expérimentale de transport à 275 kV. Conférence internationale des grands réseaux électriques (CIGRE) 1952, Rapport n° 301.

J. W. Gross et *C. F. Wagner*. Essais concernant l'effet de couronne et les perturbations radiophoniques sur la ligne expérimentale à 500 kV de l'American Gas and Electric Co. CIGRE 1952, Rapport n° 403.

W. Rudolph. Die Korona von Drehstrom-Höchstspannungsleitungen als Verlust und Störquelle. Elektrotechnik und Maschinenbau (E u M) **70** (1953), 131, 149, 178, 199.

R. Pélissier. Les perturbations radiophoniques émises par les lignes à très haute tension. Bull. Soc. franç. Electr., 7e série, **3** (1953), 409.

J. Fabre. Etude expérimentale et théorique du mécanisme de propagation et de rayonnement des perturbations émises par les lignes à haute tension. Bull. Soc. franç. Electr., 7e série, **3** (1953), 419.

D. Renaudin. Mesures des perturbations radiophoniques engendrées par les lignes à haute tension. Bull. Soc. franç. Electr., 7e série, **3** (1953), 425.

und Zweierbündeln von 30 mm Durchmesser müsste man demzufolge Störfelder von maximal 12 mV/m erhalten; dies würde zur Störreichweiten von 2 bis 3 km bei Regen und von 200...300 m bei trockenem Wetter führen.

Schlussfolgerungen

Zusammenfassend zeigen zahlreiche Messungen im Laboratorium und an drei typischen 220-kV-Leitungen, dass es nach dem gegenwärtigen Stand unserer Kenntnisse schwierig oder sogar ausgeschlossen ist, das Störverhalten einer Hochspannungsleitung vorauszusagen, wenn man nur von den Resultaten aus Laboratoriumsmessungen der einzelnen Bestandteile ausgeht. Diese Messungen haben jedoch ihre Berechtigung bei der Fabrikationskontrolle, wie auch beim Untersuchen der Auswirkung von Abänderungen an der Form der Isolatoren, ihrer Armaturen, oder an den Leitern; sie sind auch eine wertvolle Hilfe für den Konstrukteur der Leitungen, der damit sein Material aussuchen kann.

In dem von uns besonders untersuchten Falle der 220-kV-Leitungen mit Tonnenmasten variiert die Störfeldstärke im Verhältnis von 1:30, je nach den atmosphärischen Bedingungen. Bei den ungünstigsten Bedingungen und in Abwesenheit einer Induktion auf Leitungen des sekundären Verteilnetzes stören diese Leitungen den Empfang eines Nutzsignals von 1 mV/m im Mittelwellenband bis auf eine Distanz von ungefähr 1000 m.

Bei schönem Wetter geht diese Entfernung in der Ebene bis auf 100 m zurück.

Vergleicht man die im Laboratorium an Mustern von Seilen und Isolatoren gemachten Messungen des Störvermögens mit den entlang der Leitungen ausgeführten Feldstärkemessungen, so kann man im Sinne eines Leitfadens die nachfolgenden Beziehungen aufstellen, die sich durch Angleichen der Werte aus den Formeln (15), (17), (18) und (19) ergeben:

Bei trockenem Wetter

$$|E_{20\,m}|_{\min} \approx \frac{U_{Lab}}{30}\ [\mu V] \quad \text{für die Isolatoren } [\mu V/m]$$

Bei sehr starkem Regen

$$|E_{20\,m}|_{\max} \approx \frac{U_{pReuse}}{80}\ [\mu V] \quad \text{für die Leiter } [\mu V/m]$$

Hierbei wurde von der Voraussetzung ausgegangen, dass die Störungen bei schönem Wetter durch die Isolatoren erzeugt werden, während die stärkeren Störungen bei Regen von den Leitern allein herrühren.

Es muss jedoch nochmals betont werden, dass man mit der Auslegung dieser Beziehungen sehr vorsichtig sein muss. Gegenwärtig sind statistische Messungen an einer mit Bündelleitern ausgerüsteten Leitung in Vorbereitung, und es wird sich bald zeigen, bis zu welchem Punkt diese Angaben ihre Berechtigung haben.

P. Passerieux. Influence des perturbations radioélectriques engendrées par les lignes à haute tension sur la réception des émissions de radiodiffusion et de télévision. Bull. Soc. franç. Electr., 7e série, **3** (1953), 432.

R. Bartenstein, A. Bergmann und *L. Menstell.* Messung der Hochfrequenzbeeinflussung durch 380-kV-Anlagen in Schweden. Elektrotechn. Z. (ETZ), Ausgabe A, 1955, H. 24, S. 856.

R. Bartenstein et *G. Lesch.* Mesure des pertes par effet de couronne et des perturbations radiophoniques à la station de recherches de Mannheim-Rheinau, avec étude spéciale des conducteurs en faisceaux. CIGRE 1956, Rapport n° 402.

F. Cahen, J. Carteron, B. Prokocimer et *W. S. Price.* Méthodes de mesure des perturbations radioélectriques dues à l'effet de couronne des lignes à très haute tension. CIGRE 1956, Rapport n° 416. – Rapport présenté au nom du Comité des transmissions à très haute tension.

Annexe 1

Remarques diverses concernant les lignes à 220 kV mesurées

La *ligne du Sanetsch* relie Riddes (Valais) à Mühleberg près de Berne à travers le col du Sanetsch. Son tracé suit assez exactement la direction Sud–Nord. Cette ligne a de nombreux changements de direction et d'altitude; elle se prête mal à des mesures de propagation à cause du terrain accidenté qu'elle traverse. D'autre part, elle n'est pas homogène; au col du Sanetsch, distant d'une dizaine de km de Grund où se trouve la station d'enregistrement, la ligne est subdivisée en 2 et équipée de conducteurs de 26 mm de diamètre. Dans la direction opposée, au voisinage du village de Saanen, situé à 4 km de la station de mesure, les conducteurs ont été recouverts sur environ 2 km d'une couche de peinture.

Les enregistrements effectués du 1er février au 21 mars 1956 ont été renouvelés du 25 janvier au 7 juin 1957 après modification de pinces et d'anneaux de protection des isolateurs.

La ligne *Mettlen-Amsteg* relie Mettlen près de Lucerne, nœud principal du réseau suisse de transport d'énergie, à Amsteg, d'où partent les lignes transalpines du St-Gothard et du Lukmanier. Les pylônes ont été prévus pour 380 kV. Le tracé de cette ligne est passablement moins accidenté que celui de la ligne du Sanetsch, mais il l'est encore trop pour une mesure commode de la répartition longitudinale du champ perturbateur. Les conducteurs de 24,4 mm Cu qui équipaient la ligne au moment de nos premières mesures statistiques viennent d'être remplacés par des faisceaux à 2 conducteurs de même diamètre disposés l'un à côté de l'autre à une distance de 40 cm. L'exploitation de la ligne se poursuit provisoirement avec une tension de 225 kV. Il est prévu de refaire un enregistrement du niveau perturbateur au printemps 1958.

La ligne *Mühleberg–Laufenburg* prolonge la ligne du Sanetsch à travers le plateau suisse, connectant entre elles les usines au fil de l'eau du Rhin et de l'Aar aux usines à haute chute du Valais. Cette ligne, de section identique à celle du Sanetsch, comporte deux ternes, l'une exploitée à 225 kV et l'autre, provisoirement à 150 kV. Elle est équipée d'isolateurs de divers types: isolateurs à capot et tige, isolateurs à long fût, munis ou non d'anneaux de garde.

Anhang 1

Bemerkungen in Bezug auf die gemessenen 220-kV-Leitungen

Die *Sanetsch-Leitung* verbindet Riddes (Wallis) mit Mühleberg bei Bern und überquert hierbei den Sanetschpass. Der Leitungsverlauf ist ziemlich genau in Richtung Süd–Nord. Die Leitung weist zahlreiche Richtungs- und Höhenänderungen auf. Infolge des unebenen Geländes eignet sie sich schlecht für Ausbreitungsmessungen. Zudem ist die Leitung nicht homogen. Auf dem Sanetschpass, in ungefähr 10 km Entfernung von unserer Registrierstation bei Grund, ist die Leitung in zwei separate Stränge unterteilt, wobei der Seildurchmesser 26 mm beträgt. In der entgegengesetzten Richtung, in der Nähe des Dorfes Saanen, in einer Entfernung von etwa 4 km von der Meßstation, sind die Leiter auf einer Länge von rund 2 km mit einer Farbschicht überzogen.

Die vom 1. Februar bis 21. März 1956 vorgenommenen Registrierungen wurden im Jahre 1957 vom 25. Januar bis 7. Juni wiederholt, nachdem Änderungen an den Klemmen und Schutzringen der Isolatoren angebracht worden waren.

Die Leitung *Mettlen-Amsteg* verbindet den Hauptknotenpunkt des schweizerischen Energieübertragungsnetzes, Mettlen bei Luzern, mit Amsteg, wo die transalpinen Leitungen über den Gotthard und über den Lukmanier beginnen. Die Masten sind für 380 kV vorgesehen. Die Leitung verläuft bedeutend weniger uneben als die Sanetschleitung; eine bequeme Messung der Ausbreitung entlang der Leitung ist jedoch auch hier nicht möglich. Die Leiter, die bei unseren ersten statistischen Messungen aus Einzelseilen von 24,4 mm Cu bestanden, sind nun durch Zweierbündel ersetzt worden, die in einem gegenseitigen Abstand von 40 cm verlegt sind. Die Leitung wird vorläufig immer noch mit 225 kV betrieben. Es ist vorgesehen, im Frühling 1958 erneut Registrierungen des Störpegels vorzunehmen.

Die Leitung *Mühleberg–Laufenburg* führt als Verlängerung der Sanetsch-Leitung durch das schweizerische Mittelland. Sie stellt eine Verbindung zwischen den Laufkraftwerken an Aare und Rhein her und verbindet diese mit den Hochdruckwerken des Wallis. Diese Leitung hat den gleichen Querschnitt wie die Sanetsch-Leitung und besteht ebenfalls aus zwei

Dans la région choisie pour les mesures de propagation longitudinale des perturbations, le tracé de la ligne est pratiquement rectiligne et plat.

On peut admettre que la tension composée à la ligne diffère très peu à Zuzwil de celle mesurée à l'usine de Mühleberg.

Strängen, wovon der eine mit 225 kV betrieben wird, während der andere vorerst nur 150 kV führt. Sie ist mit verschiedenen Typen von Isolatoren ausgerüstet: Kappen-Klöppel-Isolatoren, Langstabisolatoren, mit Schutzringen oder ohne.

Im Gebiet, das für die Messung der Störausbreitung längs der Leitung gewählt wurde, ist der Leitungsverlauf praktisch geradlinig und flach.

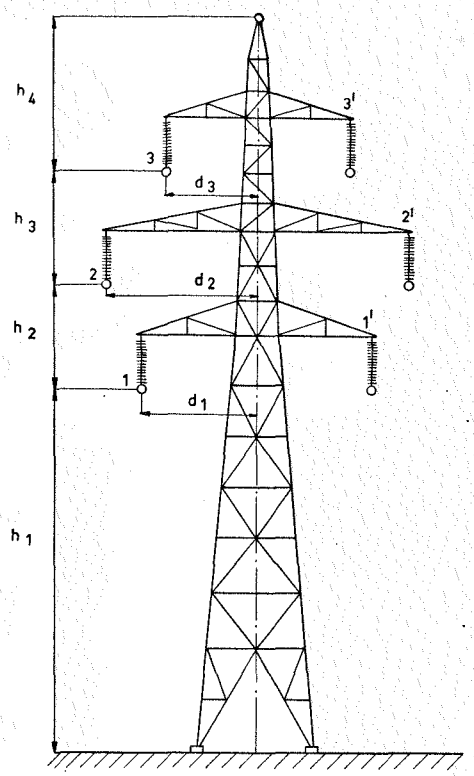
Man kann annehmen, dass in Zuzwil die verkettete Spannung nur wenig von der im Kraftwerk Mühleberg gemessenen abweicht.

Annexe 2 *Anhang 2*

Caractéristiques principales des lignes à 220 kV ayant fait l'objet de mesures

Hauptmerkmale der 220-kV-Leitungen, an denen Messungen vorgenommen wurden

	Ligne du Sanetsch Sanetsch-Leitung	Mettlen–Amsteg	Mühleberg– Laufenburg
∅ des conducteurs – ∅ der Leiter	30,6 mm	24,4 mm	30,6 mm
Section des conducteurs – Leiterquerschnitt	550 mm² Aldrey	350 mm² Cu	550 mm² Aldrey
h_1	13 m	13 m	13 m
h_2	5,50 m	8,5 m	5,50 m
h_3	6,20 m	8,5 m	5,90 m
h_4			
d_1	5,70 m	7 m	5,50 m
d_2	7,50 m	9 m	7,30 m
d_3	4,50 m	5,5 m	4,30 m
Gradient superf. pour U_{comp} = 225 kV Randfeldstärke für $U_{verkettet}$ = 225 kV — E_1, E_1'	13,2 kV/cm	15,1 kV/cm	13,2 kV/cm
— E_2, E_2'	14,1 kV/cm	16,2 kV/cm	14,1 kV/cm
— E_3, E_3'	12,6 kV/cm	14,4 kV/cm	12,6 kV/cm
Capacité de service – Betriebskapazität	8,8 pF/m	8,6 pF/m	8,8 pF/m
Longueur totale de la ligne – Gesamtlänge	≈ 95 km	54 km	90 km
Tête de ligne – Beginn der Leitung	Riddes	Mettlen	Mühleberg
Station d'enregistrement/altitude Registrierstation/m ü. M. — distance	≈ 40 km	26 km	17,0 km
—	Grund 1100 m	Brunnen 420 m	Zuzwil 570 m
— Entfernung	≈ 55 km	28 km	73 km 18 km
Fin de ligne – Ende der Leitung	Mühleberg	Amsteg	Laufenburg-Bickingen
Altitude max. – Maximale Höhe ü. M.	2100 m	900 m	≈ 700 m
» min. – Minimale Höhe ü. M.	540 m	420 m	318 m
Tension de service maximum pendant les enregistrements – Maximale Betriebsspannung während der Registrierungen	240...250 kV	230...235 kV	240 kV
Isolateurs – Isolatoren	Type Motor VK5	Type Motor VK5	Capot et tige Kappen-Klöppel
Chaîne de – Kette aus	6 éléments Elemente	6 éléments Elemente	15 éléments Elemente
Fixation du câble – Seilbefestigung	Armourrods	Anneaux Fischer Fischer-Ringe	Armourrods



Dimensions des mâts – Mast-Abmessungen
(voir tableau page 478 – siehe Tabelle Seite 478)

Annexe 3 *Anhang 3*

Caractéristiques du récepteur CISPR pour la gamme de 0,15 à 25 MHz
Charakteristik des CISPR-Empfängers für 0,15 ... 25 MHz

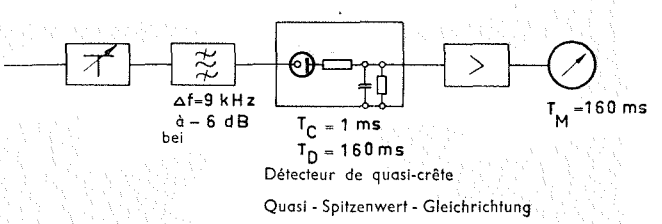
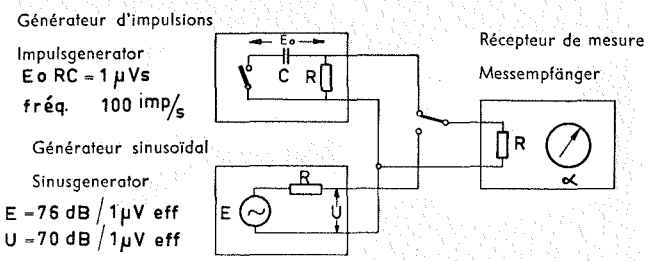
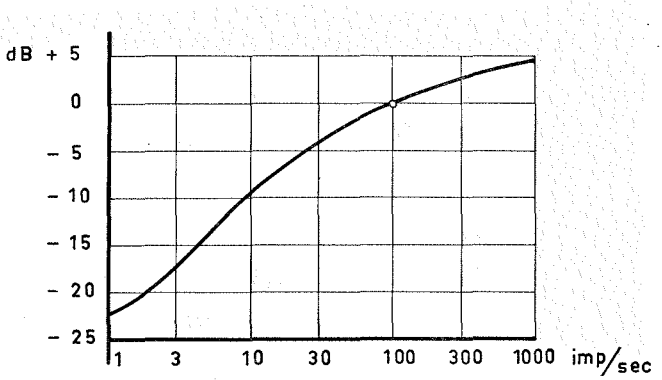


Schéma-bloc – Blockschema



Le générateur d'impulsions et le générateur sinusoïdal provoquent la même indication α du récepteur CISPR
Der CISPR-Empfänger ergibt die gleiche Anzeige α für den Sinus- sowie für den Impulsgenerator

Etalonnage absolu du récepteur – Absoluteichung des Empfängers



Courbe de réponse aux impulsions brèves répétées régulièrement
Wiedergabekurve bei kurzen, regelmässig wiederholten Impulsen

Corrigenda

Deux erreurs s'étant glissées dans l'article *Les installations de poste pneumatique des services des PTT suisses*, par *Marcel Hochuli*, paru dans le n° 8/1957, nous vous prions de rectifier:

Page 339, lettre *b) Lubrifiants*, aux 4e et 5e lignes: «Cette huile est purifiée après emploi, mélangée à de la nouvelle huile et réutilisée.»

Page 350, chiffre 7. *Perspectives*, aux 6e et 7e lignes: «Cela ne sera possible que parce qu'on a adopté le même, etc.»