

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

Herausgeber: Schweizerische Post-, Telefon- und Telegrafienbetriebe

Band: 45 (1967)

Heft: 5

Artikel: Sind vagabundierende Wechselströme eine Korrosionsgefahr? = Les courants alternatifs vagabonds présentent-ils un danger de corrosion?

Autor: Vögtli, Kurt

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-874874>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 14.05.2025

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

Sind vagabundierende Wechselströme eine Korrosionsgefahr?

Les courants alternatifs vagabonds présentent-ils un danger de corrosion?

Kurt VÖGTLI, Bern

620.193.7

Zusammenfassung. Zwei Tatsachen geben dem Problem der Wechselstromkorrosion eine besondere Prägung: Einerseits der Umstand, dass Streuströme von Wechselstromanlagen weit verbreitet und nur mit grossem Aufwand vollständig zu unterdrücken sind, andererseits die schon Jahrzehnte dauernde Diskussion, ob vagabundierende Wechselströme überhaupt Korrosionen bewirken. Eigene Versuche bestätigen die Erfahrungen der Praxis, dass für erdverlegte Kabel Wechselströme nur in Ausnahmefällen eine ernsthafte Korrosionsgefährdung darstellen.

Résumé. Deux circonstances placent le problème de la corrosion par le courant alternatif sous un jour particulier: d'une part, le fait que des courants de dispersion des installations à courant alternatif apparaissent sur de larges étendues et, d'autre part, la discussion, qui se poursuit depuis des dizaines d'années sur le point de savoir si les courants alternatifs provoquent ou non la corrosion. Les essais auxquels l'auteur a procédé confirment les expériences faites dans la pratique: pour les câbles souterrains, les courants alternatifs ne présentent qu'exceptionnellement un danger sérieux de corrosion.

Le correnti alternate vagabonde presentano pericolo di corrosione?

Riassunto. Due circostanze danno al problema della corrosione provocata da correnti alternate un'impronta speciale: da una parte il fatto che le correnti di dispersione degli impianti a corrente alternata sono molto estese e che la loro eliminazione totale è possibile solo con un eccessivo impiego di mezzi e dall'altra la discussione, che si protrae da decenni, per determinare se queste correnti presentano o meno un pericolo di corrosione. Le prove effettuate dall'autore confermano le esperienze pratiche già raccolte: per i cavi sotterranei le correnti alternate rappresentano solo eccezionalmente un serio pericolo di corrosione.

Arbeiten über «Wechselstromkorrosion» findet man in der umfangreichen Literatur über Korrosionsprobleme zwar schon seit Jahrzehnten, aber meistens nur als Einzelbeiträge, deren Inhalt selten über allgemeine Feststellungen hinausgeht. Es gibt dafür verschiedene Gründe, aber vor allem ein Umstand hat schon viele davon abgehalten, sich mit dem Problem der Wechselstrombeeinflussung metallischer Leitungen im Untergrund zu befassen, nämlich die sehr weitreichenden Konsequenzen für den Fall, dass es eine Wechselstromkorrosion tatsächlich geben sollte.

Als 1960 in der Zeitschrift «Corrosion» [1] ein redaktioneller Artikel erschien, in welchem auf mögliche Korrosionsgefahren im Zusammenhang mit der Verseuchung des Untergrundes mit Wechselströmen hingewiesen wurde, erhob sich vor allem bei den amerikanischen und australischen Elektrizitätsgesellschaften ein Entrüstungssturm, wie die etwa ein halbes Jahr später veröffentlichten «Leserbriefe» [2] beweisen.

In manchen Ländern ist es üblich, Verbrauchern in abgelegenen Gebieten die elektrische Energie nur einphasig zuzuführen und den Untergrund als Rückleiter zu benutzen. Sollten Wechselströme im Boden für die Röhren und Kabel eine Gefahr bedeuten, so müsste von diesem System abgegangen werden, eine Forderung, die im erwähnten Artikel tatsächlich erhoben wurde. Damit wurden natürlich die Interessen jener Gesellschaften, die derartige Systeme betreiben, direkt betroffen, und die Reaktion war entsprechend eindeutig. Der Verfasser musste in einem zweiten Artikel [3] einiges richtigstellen und zugeben, dass offensichtlich die meisten Praktiker der Ansicht seien, dass Wechselströme keine Korrosionsgefahr bedeuten.

Mit dieser Feststellung ist indessen noch nichts bewiesen, und der Umstand, dass grosse wirtschaftliche Interessen einer objektiven Abklärung der Wechselstromfrage hinderlich sind, hinterlässt ein eher unangenehmes Gefühl. Gewissen Kreisen war offenbar jede Diskussion um diesen Fragenkomplex zum vornherein unangenehm. Nur keine Beunruhigung des Publikums, war allzu oft das Leitmotiv der Einsendungen.

Wie ist die Situation bei uns? Da keine einphasigen Stromzuführungen benutzt werden, treten Erdströme nur dann auf, wenn die Belastung der einzelnen Phasen in einem geerdeten Drehstromsystem ungleichmässig ist. Die Bedingungen sind also bezüglich der Streuströme aus dem Niederspannungsnetz günstig, dafür zirkulieren bei uns vermehrt Bahnstreuströme im

L'abondante littérature sur les problèmes de la corrosion fournit depuis des décennies déjà des études sur la «corrosion due au courant alternatif»; mais ce ne sont généralement que des contributions isolées dépassant rarement le stade des constatations générales. Il y a de nombreux motifs à cette carence, mais un fait surtout a déjà retenu nombre de spécialistes en la matière de s'occuper du problème de l'influence du courant alternatif sur les lignes métalliques souterraines, soit les conséquences retentissantes dans le cas où une corrosion due au courant alternatif existerait réellement.

Lorsqu'en 1960 parut dans la revue «Corrosion» [1] un article appelant l'attention sur les dangers possibles de la corrosion due à la contamination du sous-sol par des courants alternatifs, un tollé s'éleva surtout au sein des compagnies d'électricité américaines et australiennes, ainsi que le prouvèrent les «lettres des lecteurs» [2] publiées quelque six mois plus tard.

Dans maints pays, il est d'usage de n'amener l'énergie électrique aux consommateurs des régions écartées que sur une phase et d'utiliser la terre comme conducteur de retour. Si les courants alternatifs dans le sol représentaient un danger pour les conduites et les câbles, il faudrait abandonner ce système, exigence qui a précisément été soulevée dans l'article précité. Cela touchait naturellement les intérêts des compagnies exploitant des systèmes de ce genre et la réaction fut en conséquence vive. Dans un second article [3], l'auteur dut faire quelques rectifications et admettre que la plupart des praticiens étaient manifestement d'avis que les courants alternatifs ne représentaient aucun danger de corrosion.

Cette espèce de rétractation n'a, somme toute, rien prouvé du tout et le fait que de grands intérêts économiques font obstacle à une mise au point objective de la question des courants alternatifs laisse plutôt un sentiment mitigé. Il était évident que toute discussion sur ces questions complexes était de prime abord désagréable à certains milieux. Les envois étaient trop souvent destinés à ne pas jeter le trouble parmi le public.

Quelle est la situation chez nous? Etant donné qu'aucune amenée de courant monophasée n'est utilisée, des courants vagabonds n'apparaissent que lorsque la charge des différentes phases est inégale dans un système à courant triphasé mis à la terre. Les conditions sont donc favorables en ce qui concerne les courants vagabonds résultant du réseau à basse tension, en

Untergrund. Die meisten Bahnstrecken – vor allem das ganze Netz der Schweizerischen Bundesbahnen (SBB) und der Bern-Lötschberg-Simplon-Bahn (BLS) – haben Wechselstromtraktion (16⅔ Hz, 15 kV), wobei die mittlere Stromaufnahme einer Lokomotive über 100 A beträgt. Diese Ströme werden der Fahrleitung entnommen und grösstenteils, aber nicht ausschliesslich, durch die Schienen zurückgeleitet. Der Untergrund bildet zum Schienenstrang einen parallellaufenden Leiter mit zwar sehr geringer spezifischer Leitfähigkeit, aber umso grösserem Querschnitt. Die Stromverteilung wird durch verschiedene Faktoren, wie Schienenquerschnitt, Übergangswiderstände der Schwellen, Leitfähigkeit von Schotterbett und Untergrund, Anordnung der Speisestellen, Verzweigung des Schienennetzes, Zustand der Schienenverbinder und anderer Umstände mehr, in komplizierter Weise beeinflusst. Trotzdem dürfen wir ganz allgemein sagen, dass in der Nähe von Wechselstrombahnen jede metallische Struktur von einiger Ausdehnung Streuströme führt und in grösseren Siedlungen auch Streuströme aus dem Niederspannungsnetz nachgewiesen werden können.

Es ist deshalb begreiflich, dass auf der einen Seite die Korrosionsfachleute wissen möchten, ob Wechselströme eine wirkliche Korrosionsgefahr darstellen und entsprechend bekämpft werden müssen. Auf der anderen Seite beharren aber die Verursacher, der schwerwiegenden Konsequenzen wegen, darauf, dass zunächst eindeutig bewiesen werden müsse, dass im Untergrund fliessende Wechselströme im komplizierten Mechanismus einer Korrosion tatsächlich auch eine praktisch ins Gewicht fallende Rolle spielen. Einen Praktiker kann es nämlich nicht befriedigen, wenn in einem Laboratorium die Existenz einer Wechselstromkorrosion bewiesen wird, aber keinerlei Angaben darüber gemacht werden, ob Wechselströme im Vergleich zu den übrigen Korrosionsfaktoren auch unter natürlichen Bedingungen eine merkliche Wirkung haben, oder ob der Wechselstromeffekt so klein ist, dass er praktisch immer vernachlässigt werden kann. Wenn zum Beispiel zu erwarten wäre, dass Bleikabel nach 100 Jahren wegen der Wechselstrombeeinflussung ausfallen können, so würde dieses Ergebnis den Praktiker wenig interessieren, solange andere Ursachen Ausfälle bereits nach wenigen Jahren bedingen.

Dass Wechselströme eine rasch fortschreitende Korrosion bewirken können, bestreitet nun aber offensichtlich die bei weitem überwiegende Zahl der Fachleute, und auch unsere eigene Erfahrung scheint diese Ansicht zu bestätigen. Aber man könnte sich trotzdem täuschen. Es wäre doch zum Beispiel denkbar, dass Wechselstromeinflüsse sehr bald einen Grenzwert erreichen und deshalb in Gebieten mit starken Streuströmen nicht wesentlich andere Einflüsse anzutreffen wären als in solchen mit nur geringer Wechselstromverseuchung. Was könnte man an Beobachtungen gegen die Behauptung anführen, Korrosionen seien überhaupt nur dann möglich, wenn zwischen Metall und Elektrolyt Wechselspannungen von einigen Millivolt mit im Spiel seien? Derartige Spannungen kommen praktisch überall vor und damit fehlen Vergleichsmöglichkeiten. Natürlich könnte in diesem Fall mit einem einfachen Laboratoriumsversuch leicht bewiesen werden, dass die Behauptung nicht stimmt. Aber oft ist es doch viel leichter eine Behauptung aufzustellen, als sie zu entkräften. Dazu kommt, dass immer wieder Zusammenhänge festgestellt werden, die vorher nicht beachtet wurden, und das auch in Fällen, die bis

revanche des courants vagabonds des chemins de fer circulent chez nous dans une plus large mesure dans le sol. La plupart des lignes de chemins de fer – en particulier le réseau complet des chemins de fer fédéraux (CFF) et la ligne Berne-Lötschberg-Simplon (BLS) – ont une traction à courant alternatif (16⅔ Hz, 15 kV), la consommation moyenne de courant d'une locomotive étant de plus de 100 A. La ligne de contact fournit ces courants et le retour est assuré en majeure partie, mais pas exclusivement, par les rails. La terre constitue un conducteur parallèle aux rails, de conductivité spécifique très faible, mais de section d'autant plus grande. La répartition du courant est influencée par différents facteurs, tels que section des rails, résistances de passage des traverses, conductivité du ballast et de la terre, disposition des points d'alimentation, ramifications des lignes, état des joints de rails, et par d'autres circonstances d'une façon très compliquée. Malgré cela, nous pouvons dire que toute structure métallique de quelque envergure au voisinage de chemins de fer à courant alternatif conduit des courants vagabonds et que, dans de grandes agglomérations, il peut être établi que des courants vagabonds proviennent du réseau à basse tension.

C'est pourquoi il est tout à fait compréhensible que, d'une part, les spécialistes de la corrosion désirent savoir si les courants alternatifs présentent un danger réel de corrosion et doivent en conséquence être combattus. D'autre part, du fait des conséquences très lourdes, les compagnies d'électricité persistent à demander qu'on prouve indubitablement que les courants alternatifs s'écoulant dans la terre jouent effectivement un rôle important dans le mécanisme compliqué d'une corrosion. En effet, cela ne saurait satisfaire le praticien que de prouver en laboratoire l'existence d'une corrosion due au courant alternatif sans préciser si les courants alternatifs ont, comparativement aux autres facteurs de la corrosion, aussi une action importante dans les conditions naturelles ou si l'effet du courant alternatif est si minime qu'il peut pratiquement toujours être négligé. Si, par exemple, il fallait attendre que des câbles sous plomb puissent défaillir après 100 ans par suite de l'influence du courant alternatif, ce résultat ne présenterait qu'un intérêt mineur pour le praticien, tant que d'autres causes provoquent des défaillances déjà après quelques années.

Mais le nombre de loin le plus important des spécialistes contestent de toute évidence que des courants alternatifs puissent provoquer une corrosion progressant rapidement; et notre propre expérience semble confirmer cette opinion. Mais on pourrait malgré tout se tromper. On pourrait, par exemple, très bien imaginer que des influences dues au courant alternatif atteignent très rapidement une valeur limite et que, par conséquent, dans les régions à forts courants vagabonds, des influences ne seraient pas sensiblement différentes de celles des régions faiblement contaminées par des courants alternatifs. Quelles réfutations pourrait-on alléguer à l'affirmation que des corrosions ne sont possibles que lorsque des tensions alternatives de quelques millivolts sont en jeu entre le métal et l'électrolyte? De telles tensions se présentent pratiquement partout et des possibilités de comparaison font ainsi défaut. Il va de soi que, dans ce cas, un simple essai en laboratoire pourrait aisément prouver que l'affirmation n'est pas exacte, mais il est souvent plus facile de présenter une affirmation que de la réfuter. Il faut encore ajouter qu'on constate

ins letzte abgeklärt zu sein scheinen. So konnten wir vor einiger Zeit nachweisen, dass Gleichströme, ausser durch die bekannten Elektrolyse-Korrosionen, das Blei auch interkristallin zerstören können [4], wobei die Reaktionsfolge noch keineswegs geklärt ist. Könnte nicht gerade bei einem derartigen, komplizierten Prozess dem Wechselstrom eine wichtige Rolle zufallen?

Wir haben in diesem Zusammenhang eine grössere Zahl Versuche durchgeführt, deren Ergebnisse noch veröffentlicht werden¹. Sie haben gezeigt, dass auch in diesem Fall ein Wechselstrom die Korrosionen nicht beschleunigt, aber dieses Ergebnis war zum vorneherein nicht vorauszusehen.

Es soll hier nun aber nicht über Einzelheiten dieser Versuche berichtet werden, sondern über einige allgemeine Überlegungen, die derartigen Versuchen vorausgehen müssen, falls die Ergebnisse auf die Praxis übertragbar sein sollen.

Gehen wir auch hier von der Tatsache aus, dass die meisten Praktiker das Vorhandensein einer eigentlichen Wechselstromkorrosion verneinen. Halten wir nochmals fest: auch bei uns hat die praktische Erfahrung keinerlei Hinweise geliefert, dass Wechselströme für Bleikabel eine Gefahr bedeuten. Dabei sind in der Schweiz, wie bereits erwähnt, die meisten Bahnen und praktisch alle Haushaltungen schon seit Jahrzehnten elektrifiziert.

Aber es gibt dennoch einige Argumente, die für die Möglichkeit einer Wechselstromkorrosion sprechen, die nicht unbesehen übergangen werden können.

Stellen wir uns in diesem Zusammenhang zunächst die Frage: Worin liegt denn eigentlich der Unterschied, der den vagabundierenden Gleichstrom zum längst bekannten und gefürchteten Korrosionsfaktor macht, den vagabundierenden Wechselstrom aber zu einem Zankapfel der Meinungen?

Dazu ist zu bemerken, dass strombedingte Korrosionen nur an den Übergangsstellen zwischen Materialien mit Elektronenleitung und Lösungen mit Ionenleitung zu erwarten sind, oder weniger theoretisch ausgedrückt: an der Grenze Metall-Elektrolyt, zum Beispiel an der Kontaktfläche eines Bleimantels mit dem Boden. Der Stromtransport im Elektrolyten ist mit einem Materialtransport verbunden, der Anlass geben kann zu einer Deckschichtbildung, zu Veränderungen im Säuregrad, zu Verschiebungen im Oxydationsvermögen des Elektrolyten und natürlich auch zu Korrosionen. Dies ist dann der Fall, wenn der Stromdurchgang bewirkt, dass Metallatome den Gitterverband verlassen und als geladene Teilchen, also als Ionen, in den Elektrolyten übertreten. Der Übergang vom neutralen Metallatom in den geladenen Ionenzustand ist der Kern eines jeden Korrosionsprozesses unter Stromeinfluss.

Wie steht es nun aber mit der Wechselstromeinwirkung? Vereinfachend könnte man sagen: die Vorgänge, die sich während der Dauer der einen Halbwelle abspielen, werden in der nächsten Halbwelle rückgängig gemacht, so dass überhaupt keine Wirkung entsteht. Es würde zu weit führen, wollten wir hier auch nur die wichtigsten Einflüsse besprechen, die dazu beitragen, dass diese Rechnung nicht aufgeht, weil die Teilprozesse nicht vollständig umkehrbar sind und somit eine Restwirkung bestehen bleibt.

Es ist aus diesem Grunde ganz sicher so, dass bei niedrigen Frequenzen (bis einige 100 Hz) eine Wechselstromelektrolyse

toujours de nouvelles corrélations qui n'avaient pas été retenues auparavant, et même dans des cas qui semblent être élucidés jusque dans le moindre détail. Il y a quelque temps, nous avons pu prouver que les courants continus pouvaient, en dehors des corrosions par électrolyse connues depuis longtemps, provoquer la destruction intercrystalline du plomb [4], la succession des réactions n'étant encore nullement élucidée. Un rôle important ne pourrait-il pas justement incomber au courant alternatif dans un processus aussi compliqué?

Dans cet ordre d'idées, nous avons fait un grand nombre d'essais dont les résultats seront encore publiés¹. Ces derniers ont démontré que, même dans ce cas, un courant alternatif n'accélérait pas les corrosions, mais ce résultat ne se prévoyait pas à priori.

Il ne s'agit pas ici de rapporter sur les détails de ces essais, mais sur quelques considérations générales qui doivent précéder des essais de ce genre au cas où les résultats sont applicables à la pratique.

Partons ici du fait que la plupart des praticiens nient la réalité d'une corrosion due au courant alternatif proprement dite. Relevons à nouveau que, chez nous aussi, l'expérience pratique n'a fourni aucune indication que les courants alternatifs constituaient un danger pour les câbles sous plomb. Nous avons déjà dit à ce propos qu'en Suisse les chemins de fer étaient électrifiés et que l'électricité existait pratiquement dans tous les ménages depuis des décennies. Mais quelques arguments, qui ne peuvent pas être passés sous silence, parlent en faveur de la possibilité d'une corrosion due aux courants alternatifs.

La question qui se pose tout d'abord en cette circonstance est la suivante: Où réside à vrai dire la différence qui fait du courant continu vagabond le facteur de corrosion le plus connu et le plus craint, mais qui a fait du courant alternatif un sujet de controverses? Il convient de dire à ce propos que les corrosions provoquées par le courant doivent être attendues uniquement là où des matériaux à conduction électronique sont en contact avec des solutions à conduction ionique, ou exprimé de façon moins théorique: à la limite entre le métal et l'électrolyte, par exemple à la surface de contact d'une gaine de plomb avec le sol. Le transport de courant dans l'électrolyte est lié à un transport de matériel qui peut donner lieu à la formation d'une couche protectrice, à des modifications dans le degré d'acide, à des changements dans le pouvoir d'oxydation de l'électrolyte et naturellement aussi à des corrosions. Cela est le cas lorsque le passage du courant a pour effet que des atomes de métal quittent leurs places dans le réseau et passent comme particules chargées, c'est-à-dire comme ions, dans l'électrolyte. Le passage de l'atome de métal neutre dans l'état ionique chargé est le phénomène principal de chaque processus de corrosion sous l'influence du courant.

Qu'en est-il de l'influence du courant alternatif? On pourrait dire d'une façon quelque peu simpliste que les phénomènes qui surgissent pendant la durée d'une demi-onde s'annulent durant la demi-onde suivante, de sorte qu'il ne s'ensuit aucun effet. Ce serait aller trop loin que de ne vouloir parler ici que des influences les plus importantes qui contribuent à ce que ce calcul n'ait pas de

¹ Die Beiträge werden in der Serie «Probleme der Bleikabelkorrosion» in den «Technischen Mitteilungen PTT» erscheinen.

¹ Les contributions paraîtront dans la série «Problèmes de la corrosion des câbles sous plomb» dans le Bulletin technique PTT.

besteht und damit auch grundsätzlich eine Wechselstromkorrosion. Bevor wir diese Tatsache weiter diskutieren, noch eine kurze Bemerkung zur Frage des Frequenzeinflusses. Was passiert Neues bei höheren Frequenzen, dass in diesen Fällen kein Wechselstromeinfluss erwartet werden muss? Wenn wir wiederum stark vereinfachen, so können wir sagen, dass die Dauer einer Halbwelle nicht mehr genügt, um die Ionen zu entladen, sondern dass diese nur noch um eine Mittellage schwingen. Damit entstehen keine neuen Ionen mehr, und eine Elektrolyse oder Korrosion ist ausgeschlossen.

Viel wichtiger aber ist die Frage nach dem Ausmass der bei niedrigen Frequenzen auftretenden Abtragungen. Dazu sind nur wenige Tatsachen bekannt geworden. Man weiss, dass bei grossen Stromdichten erhebliche Korrosionsschäden auftreten können. Man hat zum Beispiel derartige Schäden an Erdungsanlagen im Meer festgestellt, die zur Rückleitung sehr grosser Ströme dienten. Man hat aber auch bei Laboratoriumsversuchen schwere Korrosionswirkungen beobachtet. Es mussten allerdings Wechselstromdichten von mindestens einigen mA/cm² angewendet werden. Ein Bleimantel von 4 cm Durchmesser und 300 m Länge müsste unter ähnlichen Bedingungen mindestens 400 A in den Boden ableiten, vorausgesetzt, dass der Stromaustritt gleichmässig erfolgt. Gerade hier aber liegt nun die Schwierigkeit. Natürlich wird der Strom nicht gleichmässig abgeleitet, nicht bei einem blanken Kabel und schon gar nicht bei einem Kabel mit einer Hülle aus verschiedenen, imprägnierten Papieren, Schichten von Bitumen oder Teer und einer Juteumspinnung. Also sind viel kleinere Mantelströme zu erwarten. Aber darf man deshalb umgekehrt behaupten, dass jedes Strömchen gefährlich sei, weil es durch wenige Poren abflüsse und deshalb dort bedeutende örtliche Stromdichten auftreten, mit ähnlichen Folgen wie bei den Experimenten mit hohen Stromdichten? Eine Diskussion dieser Frage ist schwierig, denn die Argumente beruhen notwendigerweise fast ausschliesslich auf vagen Vermutungen. Wer kann schon sagen, wieviele Poren je Meter Kabel nach einer gewissen Betriebszeit vorhanden sind? Wer könnte Auskunft geben über die Grösse dieser Poren, über ihre Grössenverteilung und die Leitfähigkeit des Elektrolyten im Porenraum? Und falls es trotzdem einigermaßen gelingen sollte, die Stromdichten abzuschätzen, wie steht es dann mit den Diffusionsverhältnissen, mit der damit verbundenen Ionenverarmung und mit den chemischen Sekundärreaktionen? Und, spielt etwa auch noch die Zusammensetzung der Metalle eine Rolle oder die Anwesenheit von Inhibitoren, wie es bei der interkristallinen Korrosion der Fall war? Wer sagt schliesslich, ob es belanglos ist, wie die Kabelhüllen aufgebaut sind, ob zum Beispiel die Papiere gut imprägniert oder noch saugfähig sind? Der Fragenkatalog liesse sich ohne Mühe noch erweitern, wobei auch Spezialisten nur ausnahmsweise eine befriedigende Antwort geben könnten. Die Lage scheint deshalb zunächst ziemlich hoffnungslos. Gleichgültig, ob man pro oder contra Wechselstromkorrosion eingestellt ist, immer scheinen sich genügend Einwände finden zu lassen, um eine Arbeit als Sonderfall abzutun. Man muss sich deshalb, bevor man mit derartigen Versuchen beginnt, genau überlegen, wie weit durch geeignete Versuchsbedingungen die vielen Unsicherheitsfaktoren ausgeschaltet werden könnten.

fraction, étant donné que les phénomènes partiels ne sont pas complètement réversibles et qu'ainsi un effet résiduel subsiste.

C'est pourquoi il est tout à fait certain qu'aux basses fréquences (jusqu'à quelques 100 Hz) une électrolyse du courant alternatif existe et, par conséquent, en principe aussi une corrosion due au courant alternatif. Avant de poursuivre la discussion de cette question, faisons une brève observation au sujet du problème de l'influence de la fréquence. Que se passe-t-il de nouveau aux fréquences supérieures pour que, dans ces cas, il ne faille attendre aucune influence due au courant alternatif? Si nous simplifions derechef grandement le sujet, nous pouvons dire que la durée d'une demi-onde ne suffit plus pour décharger les ions, mais ces derniers oscillent autour d'une position moyenne. Il ne se produit ainsi pas de nouveaux ions et une électrolyse ou corrosion est exclue.

Mais la question de l'importance des destructions apparaissant aux basses fréquences est beaucoup plus importante. Et peu de faits sont connus à ce sujet. On sait, toutefois, que des dommages considérables dus à la corrosion peuvent se produire sous de grandes densités de courant. On a, par exemple, constaté des dommages de ce genre aux installations de mise à la terre dans la mer, qui servaient de conducteur de retour à de très grands courants. On a aussi constaté de graves effets dus à la corrosion lors d'essais en laboratoire. Mais il a fallu appliquer des densités de courant alternatif d'au moins quelques mA/cm². Une gaine de plomb de 4 cm de diamètre et de 300 m de longueur devrait, dans des conditions analogues, dériver au moins 400 A dans le sol, sous réserve que la sortie du courant soit uniforme. Mais c'est précisément ici que réside la difficulté. Les fuites du courant ne sont pas uniformes pour un câble nu et à plus forte raison pour un câble avec enveloppe de différentes couches de papiers imprégnés, avec des couches de bitume ou de goudron et une enveloppe de jute. Il faut donc attendre des courants de gaine beaucoup plus petits. Peut-on affirmer pour autant que chaque petit courant est dangereux, du fait qu'il s'écoule par un nombre moins élevé de pores et que, par conséquent, des densités de courant locales considérables s'y produisent avec des conséquences analogues à celles qui résultent des expériences faites avec des densités de courant élevées? Une discussion de cette question est très difficile, car les arguments reposent nécessairement presque exclusivement sur de vagues suppositions. Qui peut dire combien de pores par mètre de câble existent après une certaine période d'exploitation? Qui pourrait fournir des renseignements sur la grandeur de ces pores, sur leur répartition d'après la grosseur et sur la conductivité de l'électrolyte dans les tubes des pores? Et si on parvenait néanmoins à apprécier dans une certaine mesure les densités de courant, qu'en serait-il des conditions de diffusion, de l'appauvrissement conjoint des ions et des réactions chimiques secondaires? La composition des métaux ou la présence d'inhibiteurs jouent-elles encore un rôle quelconque, comme ce fut le cas dans la corrosion intercrystalline? Qui peut enfin dire s'il est important de savoir comment les enveloppes de câbles sont construites, si, par exemple, les papiers sont bien imprégnés ou s'ils absorbent encore l'humidité? La liste des questions pourrait s'allonger sans aucune peine et un spécialiste même ne serait qu'exceptionnellement en mesure de répondre de façon satisfaisante jusqu'à un certain point.

Wir haben unsere Versuche nach folgenden Gesichtspunkten ausgerichtet und glauben, damit den meisten Einwänden entgegen zu sein:

- a) Die Versuche wurden mit demselben Material ausgeführt, auf das die Ergebnisse angewandt werden sollen, das heisst, wir experimentierten mit Kabelabschnitten aus der normalen Fabrikation, und zwar mit allen uns interessierenden Typen.
- b) Die Korrosionsbedingungen wurden den natürlichen Verhältnissen möglichst angenähert. Als korrosives Agens verwendeten wir deshalb nicht irgendeinen künstlich zusammengestellten Elektrolyten, sondern normales Bodenwasser, das heisst Wasser, wie es aus dem Hahn fliesst. Ferner haben wir nicht die Stromstärke eingestellt, sondern die Spannungsdifferenz zwischen dem Bleimantel und dem Elektrolyten. Im Gegensatz zu den Stromwerten, die, wie erwähnt, schwierig zu interpretieren sind, weil man über die Grösse und Zahl der Austrittsstellen nur ungenügend informiert ist, lassen sich die Spannungen zwischen Bleimantel und Boden auch im Feld leicht messen. Man weiss deshalb sehr gut, in welcher Grössenordnung diese Werte liegen. Spannungen von mehr als einigen Volt sind sehr selten.
- c) Die Dauer der Versuche muss einigermassen den natürlichen Korrosionszeiten entsprechen, also mindestens in der Grössenordnung von Wochen, besser von Monaten liegen.
- d) Um für die Wirksamkeit der Wechselstromkorrosion eine Vergleichsmöglichkeit zu bekommen, haben wir nicht nur Wechselspannungen, sondern gleichzeitig auch Gleichspannungen auf die Kabelproben einwirken lassen.
Durch die Gleichströme sind erwartungsgemäss, je nach Intensität, verschieden starke Korrosionen bewirkt worden. Damit konnte der Einwand, die Bedingungen für eine Stromkorrosion seien gar nicht vorhanden gewesen, zum vornherein entkräftet werden.
Wenn wir trotzdem feststellten, dass Wechselspannungen bis zu mehreren Volt weder für sich allein eigene Korrosionen bewirken, noch die Gleichstromkorrosion beschleunigen, so glauben wir damit bewiesen zu haben, dass Wechselströme nur in ganz extremen Ausnahmefällen eine eigentliche Korrosionsgefahr darstellen.
- e) Wir sind der Meinung, dass Korrosionsversuche erst dann brauchbare Ergebnisse liefern, wenn die erzeugten Korrosionen dem Aussehen nach und in ihrer Struktur mit jenen übereinstimmen, die in der Praxis angetroffen werden. Auch in dieser Hinsicht waren die Ergebnisse unserer Versuche in allen Teilen befriedigend.

Bibliographie

- [1] Editorial, Beware of Ground Return Circuits in Electrification. Corrosion 16, August 1960, p. 7.
- [2] Letters to the Editor, Majority Opinion Favors Belief A-C Corrosion Problem Insignificant. Corrosion 17, March 1961, p. 60ff.
- [3] Editorial, Is There Such a Thing as A-C Corrosion? Corrosion 17, March 1961, p. 7.
- [4] Vögtli K. Probleme der Bleikabelkorrosion (14. Mitteilung): Potentialverschiebungen und interkristalline Bleikorrosion. Techn. Mitt. PTT 40 (1962), S. 324ff.

C'est pourquoi la situation paraît de prime abord vouée à l'insuccès. Il importe peu qu'on soit pour ou contre la possibilité d'une corrosion due au courant alternatif, car des objections suffisantes semblent toujours se présenter pour qu'un travail soit considéré comme travail particulier. On doit donc, avant de commencer des essais de ce genre, considérer exactement de quelle façon les nombreux facteurs d'incertitude pourraient être éliminés par des conditions d'essai appropriées. Nous avons exécuté nos essais d'après les points de vue suivants et croyons avoir ainsi éliminé la plupart des objections:

- a) Les essais ont été faits avec le même matériel que celui auquel les résultats doivent être appliqués, c'est-à-dire que nous avons fait nos expériences avec des bouts de câbles de fabrication normale et avec tous les types qui nous intéressent.
- b) Les conditions de corrosion se sont approchées aussi près que possible des conditions naturelles. Comme agent de corrosion, nous n'avons pas employé des électrolytes quelconques composés artificiellement, mais de l'eau de source normale, c'est-à-dire de l'eau s'écoulant du robinet. En outre, nous n'avons pas réglé l'ampérage, mais la différence de tension entre la gaine de plomb et l'électrolyte. Contrairement aux valeurs de courant qui, comme déjà dit, sont difficiles à interpréter, du fait qu'on n'est pas suffisamment au courant de la grandeur et du nombre des points de fuite, les tensions entre la gaine de plomb et le sol se mesurent aisément, même en campagne. On sait donc très bien de quel ordre de grandeur sont ces valeurs et les tensions de plus de quelques volts sont très rares.
- c) La durée des essais doit correspondre dans une certaine mesure aux temps de corrosion naturels, c'est-à-dire être au moins de l'ordre de quelques semaines ou mieux de quelques mois.
- d) Pour obtenir une possibilité de comparaison pour l'efficacité de la corrosion due au courant alternatif, nous n'avons pas uniquement fait agir des tensions alternatives, mais simultanément aussi des tensions continues sur les échantillons de câbles.
Comme prévu, les courants continus ont, selon leur intensité, provoqué certaines fortes corrosions. Ainsi, l'objection que les conditions pour une corrosion due au courant n'existaient pas du tout a été tout d'abord réfutée. Si nous avons, malgré tout, constaté que des tensions alternatives jusqu'à plusieurs volts ne provoquent pas pour elles-mêmes des corrosions proprement dites et n'accélèrent pas la corrosion due au courant continu, nous croyons avoir ainsi démontré que les courants alternatifs ne représentent un danger de corrosion proprement dit que dans des cas exceptionnels tout à fait extrêmes.
- e) Nous sommes d'avis que les essais de corrosion ne fourniront des résultats utilisables que lorsque les corrosions produites concorderont, d'après leur apparence et leur structure, à celles qu'on trouve dans la pratique. A ce point de vue, les résultats de nos essais étaient entièrement satisfaisants.