

Durch Wechselstrom bedingte Korrosionen von Aluminium = Les corrosions de l'aluminium dues aux courants alternatifs

Autor(en): **Vögtli, Kurt**

Objektyp: **Article**

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**

Band (Jahr): **48 (1970)**

Heft 11

PDF erstellt am: **06.08.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-876078>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Durch Wechselstrom bedingte Korrosionen von Aluminium

Les corrosions de l'aluminium dues aux courants alternatifs

Kurt VÖGTLI, Bern

620.193.7: 621.315.221.7: 669.71

Zusammenfassung. Das Problem der Wechselstromkorrosion und die damit verbundenen experimentellen Schwierigkeiten werden zunächst allgemein diskutiert. Mit Hilfe von Versuchen unter praxisnahen Bedingungen wird dann gezeigt, dass vagabundierende Wechselströme für Kabelmünten aus Aluminium eine bedeutende Korrosionsgefahr darstellen können.

Résumé. Le problème de la corrosion due aux courants alternatifs et les difficultés rencontrées dans la préparation ou la réalisation d'expériences font l'objet de la première partie de cet article. A l'aide d'essais effectués dans des conditions assimilables à celles rencontrées en pratique, il est ensuite démontré que les courants alternatifs vagabonds représentent un danger important de corrosion pour les gaines de câbles en aluminium.

Corrosione dell'alluminio determinata dalla corrente alternata

Riassunto. Dapprima si discutono il problema della corrosione provocata dalla corrente alternata e le difficoltà sperimentali connesse. Per mezzo di esperimenti a condizioni che s'avvicinano il più possibile alla realtà si dimostra che le correnti alternate vaganti rappresentano un serio pericolo di corrosione per le guaine d'alluminio dei cavi.

1. Einleitung

In einer früheren Publikation [1] wurde bereits darauf hingewiesen, dass eigene Versuche bestätigten, was die Praxis schon seit langem als Erfahrungstatsache erhärtet hat: Vagabundierende Wechselströme sind für erdverlegte Stahl- und Bleikonstruktionen nur in Ausnahmefällen eine ernsthafte Korrosionsgefahr. Da in [1] die Ergebnisse der Versuche nur ganz summarisch beschrieben sind, müssen diese Angaben noch ergänzt werden. Warum nun aber vorgängig nochmals ein vom Hauptthema abweichender Bericht über die Wechselstromkorrosion des Aluminiums? Weil ein Problem nur ungenügend an einem Beispiel erläutert und studiert werden kann, das bei den Versuchen lauter negative Ergebnisse liefert. Oder anders ausgedrückt: Weil Blei durch Wechselstrom nur schwach angegriffen wird, eignet es sich schlecht als Musterfall für diese Korrosionsart. Aluminium ist dagegen ein Metall, das einerseits von Wechselstrom sehr stark angegriffen wird und andererseits eine derart grosse praktische Bedeutung hat, dass der experimentelle Aufwand zur Abklärung der Verhältnisse gerechtfertigt ist.

2. Ist Wechselstromkorrosion immer mit einem Gleichrichtungseffekt verbunden?

In der Literatur [2, 3, 4] findet man fast immer die Ansicht vertreten, Wechselstromkorrosion sei notwendigerweise mit einer zumindest teilweisen Gleichrichtung des Wechselstromes verbunden. Diese Aussage ist auch nach den Ergebnissen unserer Versuche korrekt, nicht aber die oft beigefügte, scheinbar logische Folgerung, in einem durch Wechselstromwirkung korrodierenden Metall – zum Beispiel in einem Kabelmantel – müsse stets eine Gleichstromkomponente auftreten, und deren Grösse sei ein Mass für die Korrosionsstärke. Man kann diese Behauptung auf sehr einfache Art überprüfen, indem man den Wechselstrom durch eine Seriikapazität fliessen lässt (vergl. Fig. 1). Da diese jeden Gleichstromfluss unterbindet, müsste, falls die Grösse des Gleichstromes wirklich ein Mass für die

1. Introduction

Dans une précédente publication [1] il avait été relevé que les courants alternatifs vagabonds ne représentent un danger réel de corrosion pour les constructions en acier ou en plomb posées dans le sol, que dans des cas exceptionnels. Ce point de vue a du reste été confirmé par les expériences faites en pratique pendant de longues années. Etant donné que les résultats des essais ne sont rapportés que sommairement dans la contribution déjà mentionnée [1], il est nécessaire d'en préciser la nature. Pourquoi faut-il tout d'abord présenter un rapport déviant du thème principal et traitant de la corrosion de l'aluminium due aux courants alternatifs? Tout simplement parce qu'un problème ne peut être étudié suffisamment à fond sur la base d'un exemple pour lequel les essais ont conduit à des résultats négatifs. En d'autres termes, le plomb n'étant que peu soumis à l'influence corrosive des courants alternatifs, il ne se prête pas à des expériences valables sur ce genre de corrosion. L'aluminium par contre est un métal qui est, d'une part, très fortement attaqué par le courant alternatif et, d'autre part, a une telle signification pratique, que des travaux expérimentaux de longue haleine destinés à éclaircir la situation se justifient.

2. La corrosion par le courant alternatif est-elle toujours accompagnée d'un effet de redressement?

Le point de vue soutenu dans les ouvrages spéciaux [2, 3, 4] est que la corrosion par le courant alternatif est nécessairement liée à un redressement, au moins partiel, du courant. Si cette affirmation est vérifiée par nos expériences, il n'en est pas de même de l'idée que, dans un métal corrodé par un courant alternatif, une composante de courant continu devrait toujours apparaître, dont l'importance serait en relation avec le degré de corrosion. Il est possible de vérifier cette seconde hypothèse de façon simple en faisant s'écouler le courant alternatif à travers une capacité (voir figure 1). Cette capacité interdisant le passage du courant continu, toute corrosion par le courant

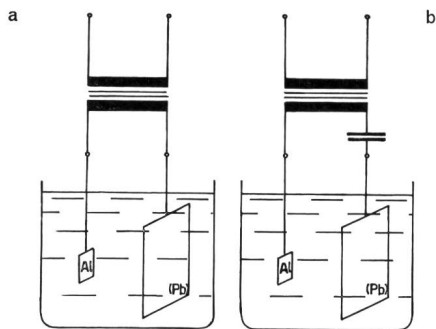


Fig. 1
Prinzipschema eines Wechselstromversuches
(a) ohne und (b) mit Seriekapazität
Schéma de principe d'un essai avec courant alternatif, (a) sans et (b) avec capacité en série dans le circuit

Korrosionsstärke ist, durch diese Massnahme jegliche Wechselstromkorrosion unterbunden sein. Tritt aber immer noch eine Korrosion auf, so kann diese nicht durch eine messbare Gleichstromkomponente erzeugt sein. Die Versuche haben nun ergeben, dass Wechselstromkorrosionen auch dann entstehen, wenn der Wechselstrom über eine Seriekapazität zugeleitet wird. Trotzdem ist die Wechselstromkorrosion stets mit einem Gleichrichtereffekt verbunden, aber es braucht kein messbarer Gleichstrom aufzutreten, und dieser ist schon gar nicht ein Mass für die Korrosionsstärke.

3. Die typische Ausbildungsform der Wechselstromkorrosion ist Lochfrass

Bevor wir die Frage der teilweisen Gleichrichtung des Wechselstromes in der Grenzschicht Metall-Elektrolyt weiterverfolgen, müssen wir uns kurz mit der Tatsache befassen, dass die typische Form der Wechselstromkorrosion der Lochfrass zu sein scheint.

Von einer metallischen Oberfläche wird also bei der Wechselstromkorrosion nur ein Teil, gewöhnlich sogar nur ein sehr kleiner Teil angegriffen. Dies heisst aber, dass die Korrosionsbedingungen auf der Metalloberfläche nicht überall gleich, sondern je nach Stelle sehr verschieden sein müssen. Es ist nun naheliegend, anzunehmen, der Wechselstrom werde vor allem oder vielleicht sogar ausschliesslich an den korrodierenden Stellen gleichgerichtet. Wäre dies der Fall und die Gleichrichtung innerhalb einer Korrosionszone hundertprozentig, so würde in einem korrodierenden Kabelmantel eine Gleichstromkomponente entstehen, deren Grösse ein Mass für das Verhältnis der angegriffenen zur intakten Oberfläche wäre. Unübersichtlich werden die Verhältnisse dann, wenn der Grad der Gleich-

alternativ devrait être rendue impossible par cette mesure, si l'intensité du courant continu était réellement un facteur déterminant pour l'importance de la corrosion. Si au contraire, malgré la connexion en série d'un condensateur, un effet de corrosion se fait remarquer, il est dû à une composante de courant continu non mesurable.

Les essais réalisés ont démontré qu'il y a corrosion même lorsque le courant alternatif est appliqué à travers une capacité. La corrosion est malgré cela liée à un effet de redressement sans que le courant continu produit soit mesurable. Celui-ci ne peut être en aucun cas retenu comme critère permettant de définir l'importance de la corrosion.

3. L'effet typique de la corrosion due au courant alternatif est la formation de piqûres

Avant que nous nous occupions de la question du redressement partiel du courant alternatif dans la couche limite métal-électrolyte, nous devons examiner le fait qu'il semble que la forme typique des effets de la corrosion due au courant alternatif est la formation de piqûres.

Seule une partie, et le plus souvent une petite partie, d'une surface métallique est attaquée par la corrosion due au courant alternatif. Cela signifie que les conditions de corrosion sur une surface métallique ne sont pas partout les mêmes, bien au contraire, elles doivent être très différentes selon les endroits. Il est donc tentant de supposer que le courant alternatif n'est redressé avant tout, voire exclusivement, qu'aux endroits corrodés. Si tel était le cas, et si dans une zone corrodée le redressement était complet, une composante de courant continu apparaîtrait dans une gaine de câble corrodée, dont l'importance permettrait de déterminer le rapport entre les surfaces attaquées et les surfaces intactes. La situation est moins claire lorsque le degré de redressement dépend de surcroît des conditions locales. On peut se représenter, par exemple, qu'un transfert important de matériel peut se produire en un point A, parce que la totalité du courant alternatif est redressée, alors que, en un point B, l'attaque reste minime, la plus grande partie du courant alternatif n'étant pas redressée. Une composante de courant continu sera encore décelée, mais la corrélation entre l'intensité de ce courant et l'importance de la corrosion ne peut plus être déterminée avec précision, étant donné que l'effet de redressement d'une grande surface peu corrodée est le même que celui d'une zone restreinte mais dont la corrosion est très prononcée. Pour la pratique, cela signifie qu'un courant continu circule dans les installations se corrodant sous l'influence du courant alternatif, sans qu'il soit possible de déterminer si ce courant est engendré par de grandes surfaces soumises à une corrosion lente ou au contraire dans une zone restreinte à corrosion rapide.

richtung auch noch von den örtlichen Verhältnissen abhängt. Man kann sich zum Beispiel vorstellen, dass an einer Stelle A sehr viel Material abgetragen wird, weil praktisch der gesamte Wechselstrom gleichgerichtet wird, während an der Stelle B nur ein mässiger Angriff festzustellen ist, weil der grösste Teil des Wechselstromes nicht gleichgerichtet wird. Man wird also immer noch eine Gleichstromkomponente feststellen, aber die Korrelation Gleichstromstärke – Korrosionsstärke ist nicht mehr eindeutig, indem eine grössere, mässig korrodierende Oberfläche denselben Effekt hat wie eine verstärkte Korrosion innerhalb eines kleineren Gebietes. Für die Praxis bedeutet dies, dass durch Wechselstromeinwirkung korrodierende Anlagen stets von einem Gleichstrom durchflossen werden, aber es lässt sich nicht entscheiden, ob dieser durch eine grosse, langsam korrodierende Oberfläche entsteht oder innerhalb kleiner, rasch korrodierender Bezirke.

Nehmen wir einmal an – und die Ausbildungsformen der Korrosionen als Lochfrass sprechen für diese Annahme –, letzteres sei der Fall. Was hat dann das Einfügen einer Serienskapazität für Folgen? Wenn zum Beispiel ein Prozent der Oberfläche aktiv ist und dort der Strom nur vom Metall in den Elektrolyten, aber nicht umgekehrt, fliessen kann, so wird über der Serienskapazität eine Gleichspannung auftreten, die so gerichtet ist, dass die Halbperiode, während der die gesamte Oberfläche leitet, etwas verkürzt wird. Die Gleichstromkomponente wird deshalb verschwinden, und die Korrosionstätigkeit wird an den aktiven Stellen etwas eingeschränkt aber keineswegs unterbunden. Die Verminderung der Korrosion ist umso kleiner, je geringer der Anteil der korrodierenden an der Gesamtoberfläche ist.

4. Aluminium wird durch Wechselstrom über eine Alkalibildung angegriffen

Wird eine Aluminiumelektrode mit Wechselstrom belastet, so polarisiert sie in der Art, dass die Stromaufnahme aus dem Elektrolyten grösser ist als die Stromabgabe. Es entsteht also eine Gleichstromkomponente, die einer Gleichstromaufnahme aus dem Elektrolyten entspricht. Ohne eine Serienskapazität im Stromkreis fliesst ein Gleichstrom vom Elektrolyten in die Aluminiumelektrode, anschliessend durch den metallischen Aussenkreis zur Gegenelektrode, an deren Oberfläche der Strom wieder in den Elektrolyten übertritt.

Bei Korrosionsversuchen wird man die Gegenelektrode aus unpolarisierbarem Material und mit einer im Vergleich zur Aluminiumoberfläche sehr grossen Oberfläche herstellen. Benutzt man als Gegenelektrode eine gleichgrosse Aluminiumelektrode, so heben sich natürlich die Gleichstromanteile auf, ohne dass deswegen aus den erwähnten

On peut supposer, et les effets de la corrosion conduisant à la formation de trous renforcent cette hypothèse, que la seconde variante est la bonne. Quelle est alors l'influence de la connexion d'une capacité en série? Si par exemple un certain pour-cent de la surface est actif et qu'en l'endroit considéré le courant ne puisse circuler que du métal vers l'électrolyte et non dans le sens inverse, une tension apparaîtra aux bornes de la capacité en série, dont la demi-période alors que toute la surface métallique conduit, est quelque peu raccourcie. Il s'ensuit que la composante continue disparaît et que l'effet de corrosion dans les zones actives est diminué, sans toutefois cesser. La diminution de la corrosion est d'autant plus faible que la surface corrodée est plus petite par rapport à la surface totale.

4. La corrosion de l'aluminium par le courant alternatif se fait par l'intermédiaire d'une formation d'alcali

Lorsqu'une tension alternative est appliquée à une électrode d'aluminium, la polarisation est telle que le courant s'écoulant dans le sens électrolyte-électrode est plus important que celui circulant dans l'autre sens. Une composante de courant continu dirigée dans le sens électrolyte-électrode apparaît alors. Sans capacité connectée en série, un courant continu circule de l'électrolyte vers l'électrode d'aluminium, puis, à travers le circuit métallique extérieur, atteint la contre-électrode pour passer ensuite à nouveau dans l'électrolyte.

Pour les essais de corrosion, il est nécessaire de choisir la contre-électrode en un matériel ne pouvant être polarisé et dont les dimensions seront grandes par rapport à la surface de l'électrode d'aluminium. Si l'on utilise en tant que contre-électrode une électrode d'aluminium de mêmes dimensions, les composantes continues se compenseront, sans pour autant que la corrosion disparaisse, pour les raisons déjà invoquées. Il serait cependant faux, si l'on voulait tirer les conclusions de cette observation, de penser qu'aucun redressement n'a eu lieu [5], bien plus, les deux électrodes se polarisent dans le même sens et au même degré.

Le fait que l'aluminium se polarise cathodiquement a différentes conséquences. Premièrement, la corrosion de l'aluminium par le courant alternatif n'est pas provoquée par un simple transfert de matière, comme c'est le cas dans une électrolyse, les ions métalliques ne se formant que lorsqu'il y a passage du courant dans le sens électrode-électrolyte. Il serait logique de penser que l'aluminium est protégé cathodiquement par l'effet de redressement. Cette protection n'est cependant qu'illusoire puisqu'elle s'accompagne de la formation d'une combinaison de potassium et que le potassium attaque de son côté fortement l'aluminium.

Gründen die Korrosion verschwindet. Es ist aber falsch, wenn man aus dieser Beobachtung folgert, es habe überhaupt keine Gleichrichtung stattgefunden [5].

Die Tatsache, dass Aluminium sich kathodisch polarisiert, hat verschiedene wichtige Folgen. Zunächst kann die Wechselstromkorrosion des Aluminiums nicht durch eine einfache Metallauflösung in der Art einer Elektrolyse bedingt sein, denn Metallionen werden nur bei Stromaustritt gebildet. Man wäre daher geneigt zu behaupten, durch die Gleichrichterwirkung werde das Aluminium kathodisch geschützt. Nun ist es aber mit dieser kathodischen Schutzwirkung deshalb nicht weit her, weil damit eine Alkalibildung verbunden ist und das Alkali das Aluminium seinerseits stark angreift. Alle Versuche haben bestätigt, dass als Korrosionsprodukt bei der Wechselstromkorrosion des Aluminiums zunächst gallertiges Aluminiumhydroxyd entsteht. Eine weitere Wirkung der kathodischen Polarisation des Aluminiums besteht darin, dass die Gegenelektrode automatisch anodisch belastet wird und deshalb unter Umständen ebenfalls korrodiert. Betreibt man zum Beispiel einen Stromkreis bestehend aus Speisetransformator, einer Aluminiumelektrode, einer Kupferelektrode mit ähnlich grosser Oberfläche und Brunnenwasser als Elektrolyten mit z. B. 50 V \sim , so wird nach einiger Zeit nicht nur das Aluminium, sondern auch das Kupfer Korrosionsschäden zeigen.

Da die Wechselstromkorrosion beim Aluminium durch eine kathodische Polarisation ausgelöst wird, hat ein zusätzlicher kathodischer Schutz wenig Aussichten auf Erfolg. Es ist allerdings zu beachten, dass bei geringer Strombelastung und unter praxisnahen Bedingungen durch die nur an wenigen Stellen auftretende Wechselstromgleichrichtung die Metalloberfläche in ihrer Gesamtheit nur wenig beeinflusst wird. Ein kathodischer Schutz könnte dann trotzdem erhebliche Milieuveränderungen bewirken, die aber normalerweise die Korrosion nur noch beschleunigen würden.

Weil das Aluminium nicht direkt durch den Strom, sondern erst durch das dabei gebildete Alkali angegriffen wird, sollten sich in einem sauren Milieu die typischen Korrosionslöcher gar nicht ausbilden können. Versuche mit verdünnten Säuren, insbesondere mit Essigsäure, haben diese Vermutung bestätigt. Eine starke Korrosion sollte aber auch dann nicht entstehen, wenn durch geeignete Massnahmen bei den Versuchen das gebildete Alkali rasch aus der Korrosionszone entfernt wird. Starkes Rühren und die Verwendung grosser Elektrolytmengen wirken einer Alkalianreicherung entgegen. Derartige Experimente bestätigen unsere Vermutung, und die Tatsache, dass erst eine Alkalianreicherung starke Korrosionen auslöst, ist für die Praxis besonders bedeutungsvoll.

Tous les essais ont confirmé que le produit de la corrosion de l'aluminium par le courant alternatif est en premier lieu un hydroxyde d'aluminium gélatineux. Une autre conséquence de la polarisation cathodique de l'aluminium est que la contre-électrode est automatiquement chargée anodiquement et peut, dans certains cas, également se corroder. Si l'on applique par exemple (à partir d'un transformateur d'alimentation) une tension de 50 V \sim à un circuit composé d'une électrode d'aluminium, d'une électrode de cuivre de surface pratiquement égale, le tout étant plongé dans un électrolyte constitué par de l'eau potable, on s'aperçoit après un certain temps que non seulement l'aluminium mais encore le cuivre présentent des dégâts dus à la corrosion.

La corrosion de l'aluminium par le courant alternatif étant déclenchée par un phénomène de polarisation cathodique, une protection cathodique supplémentaire ne conduirait probablement pas au succès. Il est cependant nécessaire de remarquer que, pour une faible densité de courant et dans des conditions aussi rapprochées que possible de la pratique, l'effet de redressement du courant alternatif n'apparaissant qu'en peu d'endroits, la surface métallique dans son ensemble n'est que peu influencée. Cependant, une protection cathodique pourrait malgré tout entraîner des modifications importantes du milieu, qui ne conduiraient toutefois, dans les cas normaux, qu'à une corrosion accélérée.

Etant donné que l'aluminium ne se corrode pas sous l'influence directe du courant, mais par suite de formation d'alcali, les trous typiques dus à la corrosion ne devraient pas pouvoir se former dans un milieu acide. Des essais faits avec des acides dilués, en particulier avec l'acide acétique, ont confirmé cette hypothèse. Une forte corrosion ne devrait pas non plus apparaître si l'alcali formé est éliminé rapidement de la zone de corrosion par des moyens appropriés, au cours de l'expérience. L'utilisation de grandes quantités d'électrolyte ainsi qu'un brassage intensif de celui-ci agissent à l'encontre de la formation d'alcali. De telles expériences confirment nos suppositions, et le fait qu'une corrosion importante n'est déclenchée qu'en présence d'alcali est d'une grande signification pour la pratique.

5. La planification d'essais réalisés dans des conditions assimilables à celles rencontrées en pratique

Si un laboratoire voulait étudier avec une précision scientifique le problème de la corrosion due au courant alternatif, il devrait réaliser une série importante d'essais pour déterminer l'influence des différents paramètres tels que composition de l'électrolyte, densité de courant, fréquence du

5. Die Planung praxisnaher Versuche

Wollte ein Laboratorium das Problem der Wechselstromkorrosion mit wissenschaftlicher Genauigkeit untersuchen, so müsste es eine grosse Zahl Versuche durchführen, um den Einfluss der verschiedenen Parameter, wie Elektrolytzusammensetzung, Stromdichte, Frequenz des Wechselstromes, Einwirkzeit, Temperatur und anderer mehr, abzuklären. Dabei wäre es sehr wichtig, stets eindeutige Versuchsbedingungen zu haben. Als Elektrodenmaterial wählte man deshalb vermutlich reinstes Aluminium. Den Elektrolyten würde man in grossem Überschuss ansetzen und zudem ständig umrühren, damit an den Elektrodenoberflächen stets dieselben Bedingungen herrschten. Ablagerungen an den Elektroden würden als unerwünschte Nebenerscheinungen lieber nicht gesehen, und man bevorzugte Systeme, die keine festhaftenden und vor allem keine instabilen Deckschichten bilden. Als Elektrolyte wären einfach zusammengesetzte Lösungen geeignet, zum Beispiel verdünnte Natronlauge, Essigsäure, Kochsalzlösung usw. Bestünde die Gefahr von pH-Änderungen, so wäre die Verwendung von gepufferten Systemen angezeigt. Um die Frequenzabhängigkeit zu prüfen, würde in dekadischen oder ähnlichen Stufen ein möglichst breiter Frequenzbereich punktförmig abgetastet. Ferner bestimmte man als Mass für die korrosive Wirkung die Gewichtsverluste der Proben, und die Wechselstrombelastung gäbe man in mA/cm^2 an, wobei der gemessene Wechselstrom durch die Gesamtoberfläche der Elektrode zu dividieren wäre.

Ein ausgedehntes Untersuchungsprogramm der skizzierten Art übersteigt unsere Möglichkeiten bei weitem. Wir konnten deshalb derartige Versuche nur im Rahmen von Vorversuchen zur Abklärung der grundsätzlichen Gegebenheiten ausführen. Dabei stellten wir, wie bereits erwähnt, fest, dass Wechselstromkorrosionen mit Lochfrassbildung beim Aluminium stets mit einer kathodischen Polarisation verbunden ist. Die Grösse der Polarisation ist von der Versuchsdauer und der Grösse der Strombelastung abhängig. Auch die Elektrolytzusammensetzung spielt eine grosse Rolle. In Natronlauge (allgemeiner Angriff) und Essigsäure (Neutralisation des Alkalis) unterbleibt die Polarisation, wenn die Lösungen nicht sehr verdünnt sind. Um einen Hinweis dafür zu geben, was hier mit «sehr verdünnt» gemeint ist, sei erwähnt, dass bei einer bestimmten Versuchsanordnung ein deutliches Maximum bei der Gleichrichterwirkung für 0,001n Natronlauge gefunden wurde.

Häufig beobachteten wir auch instabile Verhältnisse. Besonders konnten kurzzeitig andere Bedingungen, etwa in der Form eines Stromstosses, das Polarisationsgleichgewicht irreversibel verändern. Manche Experimente waren deshalb nur in ihrem grundsätzlichen Verlauf reproduzierbar.

courant alternatif, temps d'action, température, et bien d'autres encore. Il serait alors très important de pouvoir reproduire toujours les mêmes conditions d'expérience. A cet effet, on utiliserait probablement une électrode en aluminium le plus pur. L'électrolyte serait préparé en grandes quantités et de plus brassé continuellement, de façon que les conditions régnant à la surface de l'électrode soient toujours les mêmes. Des dépôts sur les plaques, considérés comme effets secondaires indésirables, devraient être évités. Il faudrait donner l'avantage aux systèmes n'entraînant avant tout pas la formation de couches adhérentes instables sur les surfaces métalliques. L'électrolyte serait constitué par des solutions appropriées, telles que solution diluée de soude, d'acide acétique, de chlorure de sodium, etc. Pour parer au danger éventuel d'une variation du pH du liquide, il faudrait faire appel à des systèmes tamponnés. Pour examiner l'influence de la fréquence, il y aurait lieu de réaliser les essais dans un domaine de fréquences étendu en procédant à des mesures point par point pour des valeurs se succédant selon une progression décimale ou autre. De plus, l'effet de corrosion serait déterminé en mesurant la perte de poids des échantillons et la densité de courant serait indiquée en mA/cm^2 , cette valeur étant obtenue en divisant le courant alternatif mesuré par la surface totale de l'électrode.

Un programme d'essais étendus, comme esquissé, dépasse de loin nos possibilités. C'est pourquoi nous ne pouvions réaliser ce genre d'expériences que sous forme d'essais préliminaires destinés à tirer au clair les données de base. Comme déjà indiqué, nous avons constaté que la corrosion de l'aluminium, liée à la formation de piqûres, était toujours accompagnée d'une polarisation cathodique. L'importance de cette polarisation dépend de la durée de l'expérience et de la densité de courant. La composition de l'électrolyte joue également un grand rôle. Pour des solutions de soude (attaque générale) et d'acide acétique (neutralisation des alcalis), il n'y a pas de polarisation, lorsque les solutions ne sont pas très diluées. Pour donner une idée de ce que l'on entend par «très dilué», mentionnons qu'au cours d'une série d'essais, un maximum très net de l'effet de redressement est apparu pour une dilution correspondant à un millième d'une solution normale de soude.

Nous avons également souvent remarqué des effets instables. En particulier, certaines conditions, par exemple une pointe de courant, modifiaient de façon irréversible l'équilibre atteint dans la polarisation. C'est pourquoi certaines expériences ne purent être reproduites que dans leur déroulement de principe.

Ces difficultés mises à part, les essais de ce genre réalisés en laboratoire présentent encore un inconvénient

Abgesehen von derartigen Schwierigkeiten haftet solchen Laborversuchen noch ein weiterer sehr gewichtiger Nachteil an: Die Praxis kann aus ihren Ergebnissen nur sehr schwer Nutzen ziehen!

Es sei zum Beispiel ein Kabel mit Aluminiummantel und einem äusseren Korrosionsschutz aus Bitumen, Papier und Jute direkt in den Boden verlegt worden. Inwiefern unterscheidet sich in diesem Fall die Praxis vom Laboratoriumsversuch? Zunächst ist unter den Bedingungen der Praxis der Elektrolyt im Gegensatz zu den üblichen Laborversuchen nicht einfach zusammengesetzt. In der Praxis ist der Elektrolyt in erster Linie durch die Bodenfeuchtigkeit gebildet, die zur Aluminiumoberfläche des Kabelmantels gelangt. Je nach dem Ort wird diese Bodenfeuchtigkeit praktisch dem Quell- oder Grundwasser entsprechen, oder aber durch Düngstoffe, zufließendes Abwasser usw. mehr oder weniger stark verunreinigt sein. Ist das Kabel wie in unserem Fall mit einem Korrosionsschutz aus verrottbarem Material umgeben, so besteht auch noch die Möglichkeit, dass gewisse Abbaustoffe, die bei der Verrottung der Kabelhülle entstehen, in den Feuchtigkeitsfilm an der Oberfläche des Aluminiummantels gelangen. Die Zusammensetzung des Elektrolyten ist daher stets sehr kompliziert und zudem zeitlich variabel. Ein Boden kann austrocknen, was die Konzentration an gelösten Stoffen stark erhöht. Düngstoffe werden oft periodisch zugeführt und nachher langsam wieder ausgewaschen. Die Verrottung der Jute, und damit verbunden die Produktion von Abbaustoffen, ist gleich nach der Verlegung gering, erreicht nach einiger Zeit ein Maximum und ist nach einigen Jahren (bei Teerimprägnierung Jahrzehnten) abgeschlossen. Am meisten verändern sich indessen die Elektrolyteigenschaften innerhalb einer Korrosionszone durch die Korrosionstätigkeit selber. Bei einem Kabel bleiben nämlich die Korrosionsprodukte wegen des beschränkten Austausches mit der Umgebung zusammen mit allen andern Stoffen lange Zeit im Bereich der Korrosionszone. Sogar wenn der äussere Korrosionsschutz des Kabels fehlen würde und man einen blanken Aluminiummantel direkt in den Boden verlegt hätte, wäre die Diffusion verglichen mit Laborverhältnissen extrem eingeschränkt. Dies gilt noch verstärkt, wenn, wie dies bei Laborversuchen üblich ist, der Elektrolyt gerührt wird. Aber nicht nur hinsichtlich der Elektrolytzusammensetzung stellen wir zwischen Laborversuch und Praxis kaum überbrückbare Unterschiede fest. Auch die im Labor so beliebten Bestimmungen der Gewichtsverluste sind für die Praxis wenig aussagefähig. Den Praktiker interessiert es nämlich nur, ob er damit rechnen muss, dass ein Kabelmantel nach einiger Zeit wegen gewisser korrosiver Effekte durchlöchert ist. Ob das Kabel dabei einige Gramm leichter wird, kümmert ihn wenig. Wenn, wie im Fall der Wechselstromkorrosion, lokal konzentrierte Korrosionen erwartet werden müssen, ist der

majeur: il est très difficile d'en tirer des conclusions valables pour la pratique.

Prenons l'exemple d'un câble avec gaine d'aluminium et protection extérieure contre la corrosion constituée par du bitume, du papier et du jute posé dans le sol. Dans quelle mesure la pratique est-elle en ce cas différente des essais de laboratoire?

En premier lieu, dans la pratique, l'électrolyte n'est pas constitué simplement, comme c'est le cas en laboratoire. Dans la pratique, l'électrolyte est avant tout formé par l'humidité du sol pouvant atteindre la surface de la gaine d'aluminium. Suivant les conditions, cette humidité aura la composition de l'eau d'une nappe souterraine ou d'une source par exemple. Elle pourra aussi être plus ou moins contaminée par des eaux usées ou des engrais par exemple. Le câble est-il, comme dans notre cas, enrobé d'une protection contre la corrosion en matière putrescible, il est alors possible que certains produits de la décomposition, en présence dans le film d'humidité, atteignent la gaine d'aluminium. Il s'ensuit que la composition de l'électrolyte est toujours très compliquée et de plus varie dans le temps. Un sol peut également s'assécher, ce qui augmente dans une forte proportion la concentration en matières dissoutes. Les engrais sont souvent apportés périodiquement et leur présence diminue lentement entre deux apports, par suite d'une élimination constante due à l'eau.

La putréfaction du jute et, par là, la production de matières de décomposition ne sont que peu importantes tout de suite après la pose du câble. Au bout d'un certain temps, le phénomène passe par un maximum pour cesser après quelques années, voire quelques décennies pour les câbles imprégnés au goudron.

Ce sont les propriétés de l'électrolyte qui se modifient de la façon la plus marquée dans une zone de corrosion, du fait de la corrosion elle-même. Pour un câble, les produits de la corrosion apparaissant dans une zone active restent longtemps à proximité de celle-ci, avec les autres matières, les échanges avec le milieu ambiant étant limités. Même dans le cas où un câble serait posé dans le sol sans protection contre la corrosion, c'est-à-dire la gaine d'aluminium étant à nu, la diffusion comparée à celle rencontrée dans les conditions de laboratoire serait beaucoup plus faible. Cela est d'autant plus vrai si l'on prend soin, lors des essais, de brasser l'électrolyte, comme il est courant de le faire. Des différences presque insurmontables entre la pratique et les essais de laboratoire ne se rencontrent du reste pas seulement dans la composition de l'électrolyte.

La détermination de la perte de poids des échantillons, qui est une méthode souvent utilisée en laboratoire pour évaluer l'importance de la corrosion, n'a pas une grande signification en pratique. En effet, ce qui intéresse le praticien est de savoir si la gaine du câble sera percée après

mittlere Gewichtsverlust einer Laborprobe für die Abschätzung der Gefährdung nicht geeignet, es sei denn, die Angabe sei dadurch ergänzt, dass auch im Laborversuch der Prozentsatz der korrodierten Oberfläche bestimmt wurde. Aber leider findet man in den Veröffentlichungen diesbezüglich kaum brauchbare Werte.

Wir wollen deshalb das Problem einmal von einem neuen Gesichtspunkt aus betrachten und uns fragen, ob nicht Laborversuche ganz anderer Art durchgeführt werden könnten, bei denen die Versuchsbedingungen nur schwer erfassbar, dafür aber den praktischen Gegebenheiten angepasst wären, so dass die Ergebnisse ohne Schwierigkeiten auf die Praxis angewandt werden könnten. Halten wir zunächst nochmals fest, was der Praktiker wissen möchte. Ganz einfach und wenig wissenschaftlich formuliert doch etwa folgendes:

Besteht die Gefahr, dass Aluminiummäntel von Kabeln mit einem gewickelten Korrosionsschutz aus Bitumen, Papier und Jute infolge vagabundierender Wechselströme an manchen Stellen vor Ablauf der vorgesehenen Verwendungsdauer durchkorrodieren?

Um eine Antwort auf diese an sich sehr einfache Frage zu erhalten, überlege ich folgendermassen:

- a) Vorerst sind Versuche mit Brunnenwasser durchzuführen. Kann ich nachweisen, dass bereits Brunnenwasser zusammen mit Wechselstrom ein gefährliches System bildet, so darf ich folgern, dass Wechselstromkorrosionen verbreitet auftreten können. In der Praxis wird nämlich an sehr vielen Orten die Bodenfeuchtigkeit ähnlich zusammengesetzt sein wie das von mir benutzte Brunnenwasser. Eine andere Frage ist es, ob auch die andern Korrosionsparameter wie Zeitdauer, Frequenz, Strombelastung usw. bei diesen Versuchen den praktischen Verhältnissen angepasst werden können.
- b) Kann ich mit reinem Brunnenwasser als Elektrolyt keine Wechselstromkorrosion erzeugen oder nur unter Bedingungen wie sie in der Praxis kaum je auftreten, so muss ich untersuchen, ob allenfalls Zusätze die Korrosivität des Brunnenwassers in einem gefährlichen Mass erhöhen. Dabei werde ich aber nie alle praktisch vorkommenden Verunreinigungen untersuchen können, so dass ich mir bewusst sein muss, dass die Ergebnisse dieser Versuche immer nur auf Fälle mit ähnlichen Bedingungen wie den untersuchten anwendbar sind.
- c) Da eine Wechselstromkorrosion beim Aluminium nur auftritt, wenn eine grössere Alkalikonzentration vorhanden ist, muss den Diffusionsproblemen besondere Beachtung geschenkt werden. Es ist anzunehmen, dass irgendwelche Diffusionshemmungen die Korrosion fördern. Es müssen daher geeignete Diffusionshindernisse

quelque temps par la corrosion. Le fait de savoir que le câble est devenu ainsi de quelques grammes plus léger lui importe peu. Si, comme tel est le cas pour la corrosion par courant alternatif, il faut s'attendre à voir se former des zones fortement corrodées, la perte de poids moyenne d'un échantillon n'est pas un critère valable permettant de déterminer l'importance du dommage, ou alors il faudrait que cette indication fût complétée par un facteur illustrant le rapport de la surface corrodée à celle qui ne l'est pas. Les mentions faites à ce sujet dans les ouvrages spéciaux ne sont malheureusement pas toujours utilisables. C'est pourquoi nous voulons examiner le problème sous un autre angle et nous demander s'il ne serait pas possible de réaliser des essais d'un tout autre genre, pour lesquels, il est vrai, les conditions d'expérience sont difficiles à déterminer, mais sont par contre adaptées à la pratique, et dont les résultats pourraient être transposés sans difficultés dans la réalité. Examinons encore une fois quelles sont les questions que le praticien se pose. Formulé simplement, sans faire appel au jargon scientifique, il s'agit à peu près de ceci: Le danger existe-t-il que les gaines d'aluminium de câbles protégés contre la corrosion par un revêtement de bitume, papier et jute, soient percées par la corrosion due aux courants alternatifs vagabonds, avant la fin de la période d'utilisation prévue?

Pour répondre à cette question en soi très simple, nous partons des considérations suivantes:

- a) Premièrement, les essais sont à faire avec de l'eau potable. Si nous pouvons démontrer que déjà l'eau potable et le courant alternatif forment un système dangereux, nous pouvons en déduire que les corrosions dues au courant alternatif devraient être répandues. En effet, en pratique, l'humidité du sol en bien des endroits a une composition analogue à celle de l'eau potable utilisée pour les essais. Une autre question est de savoir si les paramètres tels que durée de l'essai, fréquence et densité du courant, etc., peuvent être adaptés aux conditions pratiques.
- b) Si nous ne pouvons, avec de l'eau potable comme électrolyte, pas obtenir de corrosion par le courant alternatif, ou alors dans des conditions telles qu'elles ne se rencontrent pratiquement pas dans la réalité, nous devons examiner si certains additifs peuvent augmenter de façon dangereuse l'effet corrodant de l'eau potable. Comme nous ne pourrions jamais examiner tous les cas d'impuretés, nous devons être conscients que le résultat de ces essais ne pourra être appliqué à la pratique que dans les cas où les conditions rencontrées sont similaires.
- c) Une corrosion de l'aluminium par courant alternatif n'apparaissant qu'en présence d'une grande concentration d'alcali, il y a lieu de vouer une attention particulière

in die Versuche eingebaut werden. Um die Wirkung dieser Barrieren abschätzen zu können, sind aber auch Vergleichsversuche ohne Diffusionshemmung nötig.

- d) Die Strombelastung muss ich so wählen, dass praxisgerechte Bedingungen entstehen. Da ich nicht weiss, wie gross die Stromdichte in den Poren und an den schlecht isolierten Stellen der Kabelhülle ist, werde ich lieber die Spannung zwischen Aluminiummantel und Elektrolyt einregulieren, denn ich weiss, dass diese in der Praxis nur in Ausnahmefällen 10 V überschreitet. Benutze ich bei meinen Versuchen als Elektroden gerade ein Kabelstück, so stellen sich in den Poren der Umhüllung automatisch praxisgerechte Stromdichten ein, deren Grösse ich allerdings nicht messen kann, was aber weiter nicht stört.
- e) Da Deckschichten und Ablagerungen bei Korrosionsprozessen immer eine sehr wichtige Rolle spielen, zu ihrer Ausbildung aber eine gewisse Zeit erforderlich ist, müssen die Versuche während einer längeren Zeit laufen. Strom- und Spannungsmessungen können nützliche Hinweise über den Stand der Stabilisierung liefern.
- f) Sind bereits Korrosionsfälle in der Praxis aufgetreten, von denen man sicher weiss oder wenigstens stark vermutet, dass sie durch Wechselstromeinwirkung entstanden sind, so sollte man die Korrosionsformen mit jenen, welche bei den Laborversuchen entstanden sind, sorgfältig vergleichen. Sind sie einander sehr ähnlich, so darf man folgern, dass auch die Bedingungen, unter denen sie entstanden sind, im wesentlichen die gleichen waren.

Da bei den Versuchen mit Aluminiumelektroden bereits mit Brunnenwasser und nur geringen Diffusionswiderständen (Proben mit Filterpapier umwickelt) schon nach kurzer Zeit (zum Beispiel drei Wochen) schwere Korrosionsschäden aufgetreten sind, genügten einige wenige Experimente der eben beschriebenen Art, um die Frage nach der korrosiven Gefährdung von Aluminiumkabeln durch Wechselstrom eindeutig bejahen zu können. Bei den Bleikabeln war dies wesentlich schwieriger, weil Versuche mit negativem Ausgang die Möglichkeit eines Vorgangs immer nur unwahrscheinlicher machen, aber nie völlig ausschliessen können.

6. Unter praxisnahen Bedingungen durchgeführte Laborversuche und deren Ergebnisse

In einem ungefähr 25 Liter fassenden Glasgefäss (vergl. Fig. 2) wurden kleine Proben (10 cm² Oberfläche) eines extrudierten Al-Kabelmantels eingehängt. Als Gegenelektrode dienten Bleistreifen mit einer rund hundertmal grösseren Oberfläche. Der Elektrolyt war normales Leitungswasser mit der folgenden Zusammensetzung:

au problème de la diffusion. Il est à supposer que certains matériaux ralentissant la diffusion peuvent activer la corrosion. Des essais devront donc être réalisés avec des systèmes ralentissant la diffusion et, pour en mesurer les effets, il faudra faire également une série d'expériences comparatives sans ces éléments.

- d) La densité de courant doit être choisie de façon à reproduire aussi bien que possible les conditions rencontrées en pratique. Comme nous ne connaissons pas l'intensité du courant dans les pores d'une portion mal isolée de l'enveloppe du câble, il est préférable de régler la différence de potentiel entre la gaine d'aluminium et l'électrolyte. Nous savons en effet qu'en pratique la valeur de 10 V n'est dépassée que dans des cas tout à fait exceptionnels. Si les électrodes utilisées pour les essais sont des fragments de câble, les densités de courant s'établissant dans les pores de l'enveloppe seront automatiquement celles apparaissant en pratique. Le fait qu'elles ne soient pas mesurables ne joue pas de rôle.
- e) Les couches ou dépôts se formant sur les électrodes jouant un rôle important dans le processus de la corrosion, mais leur formation demandant un certain temps, il sera nécessaire de réaliser les expériences pendant une période prolongée. Des mesures de courant ou de tension fourniront des renseignements utiles concernant le degré de stabilisation.
- f) Lorsque des cas de corrosion apparaissent en pratique, pour lesquels on est certain, ou tout au moins on a de fortes présomptions, qu'ils sont dus à l'effet du courant alternatif, il faudra comparer soigneusement les formes de cette corrosion avec celles obtenues en laboratoire. Sont-elles semblables, on pourra en déduire que les conditions dans lesquelles elles se sont produites sont également voisines.

Etant donné que lors des essais avec électrodes d'aluminium, eau potable et éléments ne ralentissant que très peu la diffusion (les échantillons étaient simplement enrobés de papier filtre), les effets de la corrosion étaient déjà importants après un temps relativement court (par exemple 3 semaines), il n'a fallu qu'un nombre restreint d'expériences de ce genre pour démontrer l'existence de la corrosion de l'aluminium par le courant alternatif. Pour les câbles au plomb, cela fut beaucoup plus difficile, le résultat négatif des essais ne permettant de conclure qu'à l'improbabilité d'une telle corrosion, sans toutefois l'exclure.

6. Essais réalisés dans des conditions assimilables à celles rencontrées en pratique, et leurs résultats

De petits échantillons d'une gaine de câble en aluminium extrudé (surface environ 10 cm²) ont été suspendus dans un bac de verre d'environ 25 litres de contenance (fig. 2).

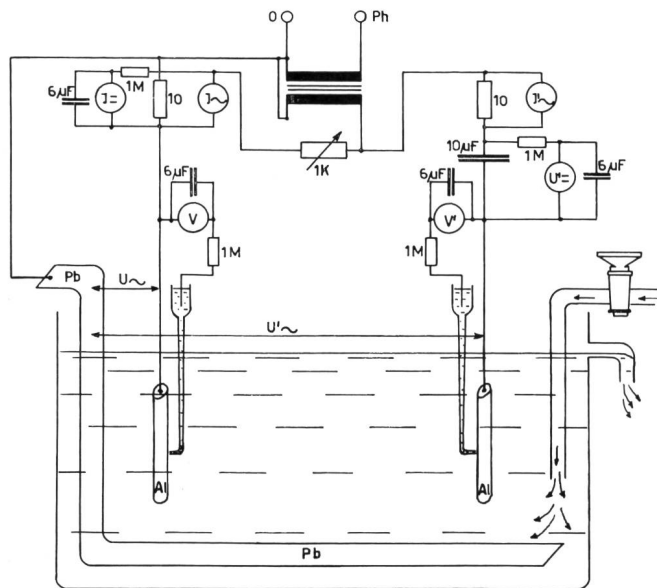


Fig. 2

Versuchsanordnung zur Bestimmung der korrosiven Wirkung von Wechselstrom beim System Aluminium-Brunnenwasser. Parallelversuch mit unbeeinflusster (links) und unterdrückter (rechts) Gleichstromkomponente

Disposition prévue pour l'essai tendant à déterminer l'effet corrosif du courant alternatif dans un système aluminium - eau potable. Essai comparatif avec (à gauche) et sans composante de courant continu (à droite)

Spezifischer elektrischer Widerstand	3000 Ω cm
pH-Wert	7,5
Trockenrückstand	220 mg/l
Gesamthärte	21 fr H°
Calciumhärte	18 fr H°
Sulfat (SO ₄ '')	6 mg/l
Chlorid (Cl')	2 mg/l
Nitrat (NO ₃ '')	5 mg/l

Das Leitungswasser der Stadt Bern hat keinerlei Abnormalitäten und kann daher als repräsentativ für viele andere Wasservorkommen gelten. Die Anordnung der Stromzuführung sowie der Messstellen ist aus der Figur 2 ersichtlich. Für die Gleichspannungsmessungen stand ein extrem hochohmiges Instrument zur Verfügung ($R_i: 10^{14} \Omega$), so dass die Wechselspannungskomponente jeweils leicht ausgefiltert werden konnte. Die Versuche wurden gleichzeitig mit und ohne Serienskapazität im Speisekreis durchgeführt. So konnte bewiesen werden, dass Wechselstromkorrosionen auch hier trotz vollständiger Unterdrückung der Gleichstromkomponente auftreten. Zudem erlaubt die Anordnung mit Serienskapazität die Messung von ($U =$), was einen guten Hinweis auf die Polarisierbarkeit einer Probe gibt (vergl. Fig. 2). Im Gegensatz zu Laborversuchen mit hohen Strombelastungen, gerührtem Elektrolyt und blanken Elektroden

La contre-électrode, de surface à peu près 100 fois plus grande, était formée par des bandes de plomb. L'électrolyte était constitué par de l'eau potable d'un réseau de distribution normal. Ses caractéristiques étaient les suivantes:

résistance électrique spécifique	3000 Ω cm
pH	7,5
résidus secs	220 mg/l
dureté totale	21 fr H°
dureté calcaire	18 fr H°
sulfates (SO ₄ '')	6 mg/l
chlorures (Cl')	2 mg/l
nitrate (NO ₃ '')	5 mg/l

L'eau potable du réseau de distribution de la ville de Berne n'a rien d'anormal dans ses caractéristiques et peut être considérée comme représentative des conditions rencontrées en bien d'autres lieux. La disposition des conduites d'amenée du courant et des points de mesure est illustrée par la figure 2. Pour les mesures des tensions continues, on disposait d'un instrument dont la résistance interne était très élevée ($R_i: 10^{14} \Omega$) si bien que la composante de tension alternative pouvait être éliminée facilement à l'aide de filtres. Les essais furent exécutés avec et sans capacité en série dans le circuit d'alimentation. Cela a permis de démontrer que la corrosion par courant alternatif apparaît également lorsque la composante de courant continu est totalement supprimée. De plus, l'insertion d'une capacité en série permet la mesure de la tension continue ($U =$), ce qui donne des indications valables sur les facultés de polarisation d'un échantillon. A l'encontre des essais de laboratoire sous hautes densités de courant, avec électrodes nues et brassage de l'électrolyte, les essais sous conditions assimilables à celles rencontrées en pratique ne donnent pas une grande quantité de résultats univoques. On ne constate pas de modifications marquées des potentiels ou d'effets de redressement importants. La cause en est à rechercher dans le fait que les processus de corrosion, qui n'apparaissent qu'en peu d'endroits de la surface totale de l'échantillon, ont une influence minime sur les valeurs mesurées. C'est ainsi que, dans les expériences décrites ci-après, le courant continu par exemple ($J =$ dans la figure 2) s'écoulait toujours dans le sens de l'électrode à grande surface, en plomb, vers les échantillons en aluminium. La polarisation provoquée par la corrosion due au courant alternatif n'a en aucun cas pu couvrir l'influence de la réaction galvanique plomb-aluminium.

Dans un premier essai, l'apport d'eau fraîche dans le bac était d'environ 1 l par minute. Il s'ensuivit un léger brassage et un renouvellement constant de l'électrolyte. Les électrodes étaient nues et la tension par élément ($U \sim$) respectivement ($U' \sim$) était de 4 V_{eff} . Le courant alternatif ($J \sim$), dont la valeur moyenne était de 14 mA, ne variait que de 1 mA. La composante de courant continu ($J =$) de 0,01 mA

geben Versuche unter praxisnahen Bedingungen keine grosse Ausbeute an eindeutigen Messergebnissen. Man stellt weder starke Veränderungen der Potentiale noch erhebliche Gleichrichtereffekte fest. Grund dafür ist der Umstand, dass die Korrosionsprozesse, die nur an wenigen Stellen der Gesamtoberfläche ablaufen, die Messwerte nur geringfügig beeinflussen. So floss zum Beispiel der Gleichstrom ($J =$ in Fig. 2) bei den im folgenden beschriebenen Versuchen stets von der grossflächigen Bleielektrode zur Aluminiumprobe. Die durch die Wechselstromkorrosion verursachte Polarisierung vermochte also in keinem Fall den Einfluss der galvanischen Kette Blei - Aluminium zu überdecken.

Bei einem ersten Versuch floss ständig etwa 1 Liter frisches Wasser pro Minute in das Glasgefäss. Dadurch wurde das Wasser leicht bewegt und ständig erneuert. Die Elektroden waren blank und die Zellenspannung ($U \sim$) beziehungsweise ($U' \sim$) betrug $4 V_{eff}$. Der Wechselstrom ($J \sim$) schwankte bei 14 mA Mittelwert nur um 1 mA. Die Gleichstromkomponente ($J =$) war mit 0,01 mA stets sehr klein. Nach 20 Tagen wurde der Versuch abgebrochen. Die Aluminiumelektroden waren mit einer dünnen Deckschicht bedeckt, doch waren keinerlei Korrosionsspuren vorhanden.

Den nächsten Versuch führten wir bei sonst gleichen Anfangsbedingungen mit stehendem Wasser durch. Nach 19 Tagen war wiederum keine Spur einer Korrosion zu erkennen.

Natürlich wäre es falsch, aus diesen Ergebnissen zu schliessen, es gebe offenbar keine Wechselstromkorrosion. In diesem Stadium kann man nur sagen: Einige wenige Volt Wechselspannung bedeuten für blankes Aluminium, das sich in einem grossen Wasservolumen befindet und dessen Oberfläche frei im Wasser schwebt, keine grosse Gefahr. Wie die Verhältnisse bei grösseren Strombelastungen werden, haben wir nicht untersucht, weil hierzu Speisespannungen hätten verwendet werden müssen, wie sie in der Praxis nur in Ausnahmefällen auftreten.

Das Ziel der weiteren Versuche bestand in der Abklärung des Einflusses von Diffusionshemmungen. Bei den nächsten zwei Versuchen umwickelten wir deshalb die blanken Aluminiumproben mit einer Lage Filterpapier. Dadurch war der Austausch an gelösten Stoffen zwischen der Aluminiumoberfläche und dem freien Elektrolyten etwas gehemmt. Die Speisespannung an der Zelle stieg diesmal auf $6 V \sim$ an, da der Wechselstrom rasch auf 1 mA zurückging. Die Gleichstromkomponente ($J =$) erreichte trotzdem zeitweise 0,03 mA. Beide Aluminiumproben, das heisst die bei der die Serienkapazität jeglichen Gleichstrom unterband und jene mit einer Gleichstromkomponente, waren nach 22 Tagen durch Lochfrass bereits stark angegriffen (vgl. Fig. 3 und 4). Durch Tränken der Filterpapiere mit Indikatorlösung konnte zudem sehr schön gezeigt werden, dass innerhalb der Korro-

était toujours très faible. L'essai fut interrompu après 20 jours. Les électrodes d'aluminium étaient recouvertes d'un film mince, mais nous n'avons pu déceler aucune trace de corrosion.

L'essai suivant fut réalisé sous les mêmes conditions de départ, mais sans renouvellement ni brassage de l'eau. Après 19 jours, nous ne pouvions pas non plus déceler de corrosion.

Il serait naturellement erroné de conclure sur la base de ces résultats que la corrosion par courant alternatif n'existe pas. A cet état d'avancement des travaux, on ne peut dire que ceci: une tension alternative de quelques volts ne représente pas un gros danger de corrosion pour des électrodes d'aluminium nu, suspendues dans un grand volume d'eau. Nous n'avons pas examiné quelles étaient les conditions pour des densités de courant supérieures, étant donné qu'il eût fallu faire appel à des tensions d'alimentation plus élevées, rencontrées seulement dans des cas exceptionnels en pratique. Le but des essais subséquents était de déterminer l'influence des matériaux freinant la diffusion. Pour ce faire, nous avons, en vue des deux essais suivants, enrobé les échantillons d'une couche de papier filtre. L'échange de matières dissoutes entre la surface de l'aluminium et l'électrolyte libre était ainsi quelque peu entravé. La tension

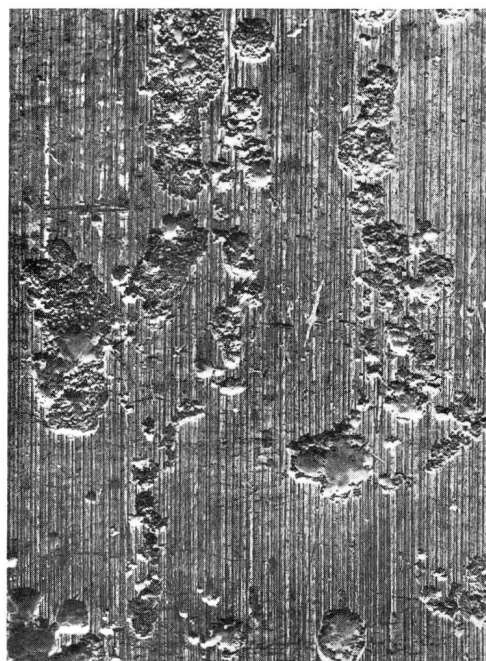


Fig. 3

Typischer Lochfrass auf der Oberfläche einer Aluminiumelektrode, die mit Filterpapier umwickelt war. Zellenspannung 6 V, Einwirkzeit 22 Tage. Vergrösserung: 10 \times

Formation typique de piqûres dans une électrode d'aluminium enrobée de papier filtre. Tension par élément 6 V, durée d'essai 22 jours, agrandissement 10 fois

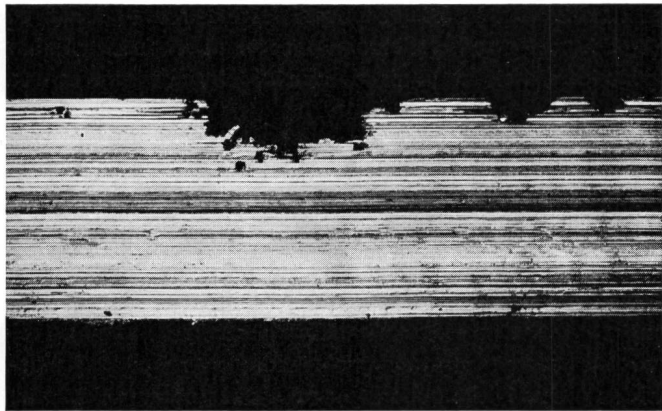


Fig. 4
Gleiche Probe wie bei Fig. 3
Querschnitt durch eine Korrosionsstelle. Wandstärke 1 mm
Coupe à travers une zone de corrosion
Épaisseur de l'enveloppe: 1 mm

sionsbezirke – erkennbar an der Bildung von Aluminiumhydroxidgel – die Lösung stark alkalisch geworden war.

Bei den folgenden Versuchen wurden kurze Abschnitte eines fabrikneuen Kabels mit einer kautschukartigen Gussmasse über dem Aluminiummantel verwendet. Auch hier entstanden bei 6 V ~ Zellenspannung sowohl an der Probe ohne als auch an jener mit einer Seriikapazität im Stromkreis innerhalb dreier Wochen tiefreichende Anfrassungen (vgl. Fig. 5).

Schliesslich beschichteten wir Abschnitte des Kabelmantels selber mit Bitumen. Obwohl die Zellenspannung auf 4 V ~ reduziert wurde, traten wiederum die typischen Anfrassungen auf. Kontrollversuche mit reiner Gleichspannung haben aber ergeben, dass derartige Lochfrass auch durch Gleichstromelektrolyse hervorgerufen werden kann, so dass mindestens beim Aluminium aus den Korrosionsformen allein nicht zwischen Wechselstrom- und Gleichstromelektrolyse unterschieden werden kann. Dieses Ergebnis überrascht keineswegs, da die Wechselstromelektrolyse ebenfalls eine örtliche Gleichstrombildung zur Voraussetzung hat.

Es wäre nun noch interessant gewesen, mit Hilfe von Versuchen mit zunehmend kleinerer Wechselspannung zu untersuchen, welches die minimale Spannung zwischen Aluminium und Wasser sein muss, damit noch eine Korrosion auftritt. Vermutlich ist dieser Wert aber stark von der Elektrolytzusammensetzung und der Art der Hülle abhängig. Ferner müsste bei diesen Untersuchungen die Einwirkzeit stark verlängert werden. Auch wäre es denkbar, dass bei sehr kleinen Spannungen die Frequenz eine wesentliche Rolle spielt. Es wäre deshalb nochmals eine grössere Versuchsreihe nötig gewesen, um diese Frage zu klären, so

d'alimentation par élément est montée cette fois à 6 V ~, le courant alternatif ayant diminué rapidement à 1 mA. La composante de courant continu (J =) atteignait cependant par instants la valeur de 0,03 mA. Les deux échantillons, c'est-à-dire celui en série avec une capacité, pour lequel il n'y avait pas de composante de courant continu, et l'autre, soumis à l'influence d'une telle composante, présentaient, après 22 jours d'essai, les traces d'une forte attaque corrosive accompagnée de la formation de trous (figure 3 et 4).

De plus, l'immersion des papiers filtres dans une solution d'indicateur a permis de déceler que dans les zones de corrosion, reconnaissables à la formation d'un hydroxyde d'aluminium gélatineux, la solution était devenue fortement alcaline.

Pour les essais suivants, on a utilisé des morceaux de câble courts sortant de fabrique et recouverts d'une masse genre caoutchouc. Là également la tension par élément est montée à 6 V ~, tant pour l'échantillon avec capacité en série que pour celui inséré directement dans le circuit, et on a constaté des effets profonds de corrosion après 3 semaines d'expérience (fig. 5).

Pour terminer, nous avons recouvert nous-mêmes de bitume les enveloppes de câble prises comme échantillons. Bien que la tension par élément n'excédât pas 4 V ~, nous avons également décelé les attaques typiques dues à la corrosion. Des essais comparatifs faits à l'aide d'une tension d'alimentation purement continue ont cependant in-

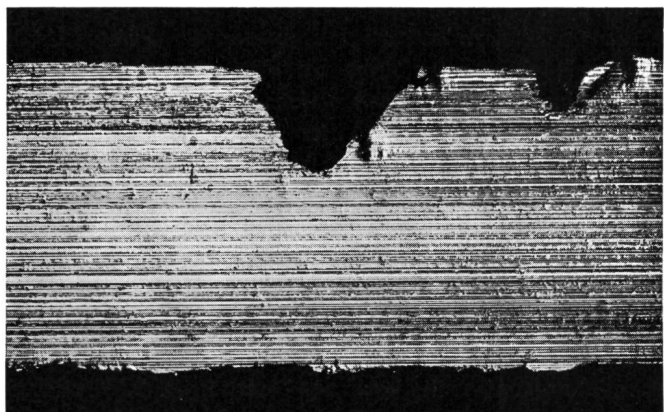


Fig. 5
Querschnitt durch den Aluminiummantel (Wandstärke 1,4 mm) eines fabrikneuen Kabels mit einer etwa 1 mm dicken kautschukähnlichen Gussmasse. Die Korrosionen entstanden überall dort, wo Luftbläschen aus der noch heissen Masse entwichen und dabei feine Kanälchen hinterliessen. Zellenspannung 6 V, Einwirkzeit 22 Tage

Coupe à travers la gaine d'aluminium (épaisseur 1,4 mm) recouverte d'une masse genre caoutchouc (épaisseur 1 mm) d'un câble sortant de fabrique. Il y a eu corrosion partout où de petits canaux ont pu se former par suite de présence de bulles d'air au moment de l'application à chaud de la masse protectrice. Tension par élément 6 V. Durée de l'essai 22 jours

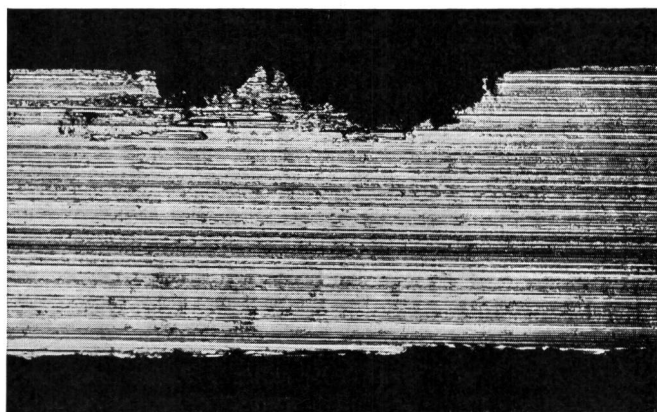


Fig. 6
Querschnitt durch den Aluminiummantel (Wandstärke 1,4 mm) einer Kabelprobe, die mit Bitumen übergossen wurde. Zellenspannung 4 V, Einwirkzeit 23 Tage
Coupe à travers la gaine d'aluminium (épaisseur 1,4 mm) d'un câble recouvert de bitume. Tension par élément 4 V. Durée de l'essai 23 jours

dass wir mit unseren beschränkten Möglichkeiten das Problem nicht mehr weiter bearbeiten konnten. Die Grösse der minimalen Wechselfspannung ist zudem im Augenblick nicht mehr so interessant, da wir sicher sind, dass Spannungen, wie sie sehr verbreitet vorkommen, bereits eine eindeutige Korrosionsgefahr bedeuten. Aus ähnlichen Überlegungen heraus verzichten wir auch auf die Abklärung des Frequenzeinflusses. Wenn schon Streuströme mit 50 Hz gefährlich sind, dann sind es solche mit 16 $\frac{2}{3}$ Hz (Bahnstreuströme) erst recht! Und vergessen wir schliesslich nicht, dass die ganze Untersuchung mit Aluminium nur ein Exkurs war bei der Abklärung der Wechselstromgefährdung von Blei! In einer nächsten Arbeit soll deshalb über die Versuche und Überlegungen im Zusammenhang mit der Bleikorrosion berichtet werden. Glücklicherweise wird es dann aber nicht mehr möglich sein, derart eindeutige Schnittbilder zu zeigen, und es wird bei den Versuchen unter praxisnahen Bedingungen nur noch von möglichen Korrosionsspuren die Rede sein.

Bibliographie

- [1] *Vögtli K.* Sind vagabundierende Wechselströme eine Korrosionsgefahr? Techn. Mitt. PTT Nr. 5, 1967, S. 264...268.
- [2] *Sherer C. M., Granbois K. J.* Study of A-C Sheath Currents and Their Effect on Lead-Cable-Sheath Corrosion. AIEE Trans. May 1945, p. 264...268.
- [3] *Erdey-Groz T., Devay J.* Über die Wirkung des Wechselstromes auf die elektrolytische Korrosion der Metalle. *Electrochimica Acta*, 9, 1964, p. 911...918.
- [4] *Galimberti C. E.* Corrosion of Lead by Alternating Current. *Corrosion* 20, 1964, p. 150...157.
- [5] *Williams J. F.* Alternating Current and Aluminium. *Materials Protection* 6, February 1967, p. 50...52.

diqué que la formation des trous peut également avoir comme cause une électrolyse à courant continu, si bien qu'il est impossible, tout au moins pour l'aluminium, de déterminer, uniquement suivant la forme de la corrosion, si l'on est en présence d'une influence due au courant alternatif ou continu. Ce résultat ne surprend du reste pas, l'électrolyse à courant alternatif ayant toujours comme point de départ la formation de courant continu en un point du circuit.

Il eût été encore intéressant de déterminer par une série d'essais faisant appel à des tensions d'alimentation toujours plus faibles quelle est la différence de potentiel minimum à appliquer entre l'électrolyte et l'électrode d'aluminium pour qu'il y ait encore corrosion. Cette valeur dépend probablement dans de grandes mesures de la composition de l'électrolyte et du genre d'enveloppe en présence. Il eût fallu prolonger les essais. On pourrait penser également qu'aux très faibles tensions d'alimentation, la fréquence joue un rôle important. Une plus grande série d'expériences aurait été nécessaire pour tirer cette question au clair, et étant donné nos moyens limités, nous n'avons pu étudier ce problème plus à fond. Connaître la grandeur de la tension minimum conduisant à une corrosion n'est du reste pas d'une importance capitale, puisque nous savons déjà que des tensions telles qu'elles se rencontrent couramment en pratique représentent un danger réel. Pour des considérations du même ordre, nous avons également renoncé à rechercher quelle était l'influence de la fréquence. Si les courants vagabonds à 50 Hz sont dangereux, ceux à 16 $\frac{2}{3}$ Hz (en provenance des installations de chemin de fer) le sont à plus forte raison! Et n'oublions pas pour terminer que l'étude de la corrosion de l'aluminium n'était qu'une digression dans l'étude de la corrosion du plomb. Les résultats de nos essais et réflexions dans ce domaine seront du reste publiés dans un prochain article. Disons d'emblée que nous serons heureux de ne pas pouvoir vous présenter des illustrations de coupes d'enveloppes aussi fortement attaquées et qu'il ne sera alors question que de déceler des traces de corrosion éventuelle du plomb, à la suite des expériences réalisées dans des conditions assimilables à celles rencontrées en pratique.

Bibliographie

- [1] *Vögtli K.* Les courants alternatifs vagabonds présentent-ils un danger de corrosion? Bulletin technique PTT No 5, 1967, p. 264...268.
- [2] *Sherer C. M., Granbois K. J.* Study of A-C Sheath...
- [3] *Erdey-Groz T., Devay J.* Über die Wirkung des Wechselstromes auf die elektrolytische Korrosion der Metalle. *Electrochimica Acta*, 9, 1964, p. 911...918.
- [4] *Galimberti C. E.* Corrosion of Lead by Alternating Current. *Corrosion* 20, 1964, p. 150...157.
- [5] *Williams J. F.* Alternating Current and Aluminium. *Materials Protection* 6, February 1967, p. 50...52.