

**Probleme der Bleikabelkorrosion. 15.
Mitteilung, wie stark dürfen Bleikabel durch
Gleich- und Wechselspannungen beeinflusst
werden, bis sie korrodieren? = Problèmes de la
corrosion des câbles sous plomb. 15e
communication, dans quelle mesure les câbles**

Autor(en): Vögtli, Kurt

S...

Objektyp: Article

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

Band (Jahr): 49 (1971)

Heft 6

PDF erstellt am: 16.07.2024

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-874282>

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.

Probleme der Bleikabelkorrosion (15. Mitteilung)

Wie stark dürfen Bleikabel durch Gleich- und Wechselspannungen beeinflusst werden, bis sie korrodieren?

Problèmes de la corrosion des câbles sous plomb (15^e communication)

Dans quelle mesure les câbles sous plomb peuvent-ils être soumis à l'influence de tensions continues ou alternatives avant qu'il y ait corrosion?

Kurt VÖGTLI, Bern

620.193.7:621.315.221.5
621.315.221:620.193

Zusammenfassung. Korrosionsversuche mit gleichzeitiger Einwirkung von Wechsel- und Gleichspannungen haben ergeben, dass eine Wechselspannungsbeeinflussung von $4 V_{eff}$ bei Blei weniger gefährlich ist als eine Potentialverschiebung um $+0,1 V$, die noch eine deutliche Korrosionswirkung hat. Es wird diskutiert, inwiefern dieses Ergebnis auf die Praxis angewendet werden kann.

Résumé. Les essais de corrosion sous l'influence conjuguée de tensions alternatives et continues ont montré que l'influence d'une tension alternative de $4 V_{eff}$ était moins dangereuse pour le plomb qu'un décalage de potentiel de $+0,1 V$, dont les effets de corrosion sont encore très nets. L'auteur discute également dans quelle mesure ce résultat peut être appliqué à la pratique.

Problemi di corrosione riguardanti i cavi di piombo

Riassunto. Esperimenti di corrosione sotto l'azione contemporanea di tensioni a corrente continua e alternata hanno rivelato che un'influenza di corrente alternata di $4 V_{eff}$ è meno pericolosa sul piombo che uno spostamento del potenziale di $+0,1 V$, ciò che ha ancora evidenti effetti corrosivi. Si discutono quindi le possibilità dell'applicazione pratica di questo risultato.

1. Einleitung

In der letzten Veröffentlichung dieser Serie [1] wurde mitgeteilt, dass bei Versuchen mit bejuten Kabelstücken stärkere Korrosionen nur auftraten, wenn mindestens 1 Volt Gleichspannung ($1 V =$) an die Versuchsanordnung angelegt wurde. Als Anode und Kathode wurde je ein Stück eines fabriktuen Kabels mit dem sogenannten alten B-Schutz (vergl. Tab. I, Typ c) und als Elektrolyt Wasser aus dem Trinkwassernetz von Bern verwendet. Die angelegte Spannung verteilte sich mehr oder weniger gleichmässig auf Anode und Kathode. Die Potentialverschiebungen wurden aber nicht genau verfolgt. Da die Versuchsdauer nur 14 Tage betrug, blieb die Frage nach der Minimalspannung zur Auslösung einer Korrosion weitgehend unbeantwortet. Deren Bestimmung war deshalb als nächstes Untersuchungsziel vorgesehen. Die Arbeiten kamen dann aber ins Stocken, weil durch die erfolgreiche Einführung des neuen B-Schutzes (vergl. Tab. I, Typ e) manche der vorher aktuellen Probleme viel von ihrer Dringlichkeit verloren [2]. Der Anstoss, die Frage nochmals ins Untersuchungsprogramm aufzunehmen, kam dann von ganz anderer Seite, nämlich durch die vermehrte Anwendung des kathodischen Schutzes. Insbesondere der Schutz sehr vieler Heizöltanks, die zum Teil nahe bei bestehenden Kabeltrassees verlegt wurden, erfordert klare Richtlinien über die zulässige Beeinflussung. Jede kathodische Schutzanlage erzeugt nämlich ein elektrisches Feld, das theoretisch bis ins Unendliche reicht, und beeinflusst dadurch alle andern im Boden liegenden Metallkonstruktionen. Wollte man verlangen, dass keinerlei Potentialverschiebungen auftreten dürfen, so würde dies praktisch ein Verbot der kathodischen Schutzmethode bedeuten. Eine gewisse Potentialverschiebung wird man also zulassen müssen. Wo aber liegt der Grenzwert?

Einerseits wäre es erwünscht, möglichst grosse Potentialverschiebungen zuzulassen, denn dadurch könnte die Anzahl der Fälle, wo sich Schutzmassnahmen aufdrängen, weil die kritische Beeinflussung überschritten wird, stark eingeschränkt werden. Andererseits wird aber kein Korrosionsfachmann bereit sein, eine Potentialverschiebung von $+0,5 V$ als zulässig zu bezeichnen. Eine derartige anodische

1. Introduction

Il ressortait de la dernière publication de cette série [1] que des corrosions importantes n'apparaissaient, lors d'essais avec des tronçons de câbles enrobés de jute, que si une tension continue d'au moins 1 volt ($1 V =$) était appliquée au dispositif d'essai. Les anode et cathode utilisées alors étaient constituées par des tronçons de câbles sortant de fabrique et dont la protection était de l'ancien type B (voir tableau I, type c). L'électrolyte utilisé provenait du réseau de distribution d'eau potable de la ville de Berne. La tension appliquée se répartissait plus ou moins régulièrement sur l'anode et la cathode. La question des décalages de potentiel n'avait pas pu être étudiée en détail. Les essais n'ayant porté que sur une durée de 14 jours, la question de savoir quelle était la tension minimum conduisant à une corrosion était restée pratiquement sans réponse. En déterminer la valeur était l'un des buts que nous nous étions fixés, sachant qu'une nouvelle série d'expériences serait nécessaire. Les travaux ont été retardés par le fait que l'introduction, couronnée de succès, du nouveau type de protection B (voir tableau I, type e) rendit moins urgente l'étude de plusieurs problèmes à l'époque actuels [2]. La nécessité de reprendre la question se fit sentir dans un tout autre domaine, à la suite de l'introduction de plus en plus fréquente de la protection cathodique. La protection de nombreuses citernes à mazout en particulier, enfouies à proximité d'installations de câbles existantes, exigeait la mise au point de directives claires quant aux influences admissibles. Chaque installation de protection cathodique engendre un champ électrique dont les effets se font sentir théoriquement jusqu'à l'infini et qui, par conséquent, influence toutes les autres constructions métalliques du sous-sol. N'admettre aucun décalage de potentiel reviendrait à condamner l'utilisation des méthodes de protection cathodique. Il faut donc accepter un certain décalage de potentiel, la question étant de savoir dans quelles limites.

Il serait, d'une part, souhaitable de tolérer des décalages de potentiel aussi importants que possible, ce qui permettrait de réduire le nombre des cas où des mesures de

Belastung hätte unweigerlich schwere Korrosionen zur Folge. Man kann aber den Schwellwert so tief ansetzen, wie man will, eine Verschiebung des Potentials um einen auch nur sehr kleinen Wert bedeutet stets die Beschleunigung einer schon bestehenden und unter Umständen auch die Auslösung einer noch nicht akuten Korrosion. Aus diesem Sachverhalt lässt sich die schon oft geäußerte Ansicht begründen, dass es eigentlich für die Potentialverschiebungen gar keinen Grenzwert gebe, sondern in jedem Falle durch Messungen der zulässige Wert bestimmt werden müsse.

Bei der Vielzahl der kathodisch geschützten Objekte ist es aber schon aus rein praktischen Gründen nicht möglich, jeden Beeinflussungsfall näher zu untersuchen, ganz abgesehen davon, dass die Kriterien, nach welchen derartige Messungen zu beurteilen wären, weitgehend fehlen oder mindestens umstritten sind. Man muss deshalb einen noch zulässigen Beeinflussungswert fixieren, auch wenn nicht ausgeschlossen werden kann, dass unter gewissen seltenen Bedingungen der festgelegte Wert bereits zu hoch ist.

Wir haben deshalb versucht, jenen Wert einer positiven Potentialverschiebung zu ermitteln, der unter normalen Bedingungen gerade noch ernsthafte Korrosionen bewirken kann. Den als zulässig anzusehenden Grenzwert wird man dann noch einiges tiefer ansetzen müssen, um den in der Praxis wirksamen Verschärfungsfaktoren, wie sehr lange Dauer der Einwirkung, wechselnde Verhältnisse, bereits vorhandene Beeinflussung infolge unterschiedlicher Bichtung und Belüftung usw., Rechnung zu tragen.

2. Bleikorrosion und Wechselstrom

Seit einigen Jahren wird bei Bleimantelkorrosionen auch die Wechselstrombeeinflussung als mögliche Ursache in Betracht gezogen [3]. Im Gegensatz zur Wechselstromkorrosion des Aluminiums [4], ist indessen die korrosive Wirkung des Wechselstroms bei Blei umstritten [5, 6].

Da in der Schweiz einerseits seit den dreissiger Jahren fast alle grossen Bahnlinien mit 15 kV ($16 \frac{2}{3}$ Hz) elektrifiziert sind und auch ein sehr engmaschiges 50-Hz-Netz besteht, und andererseits gerade wegen der fortschreitenden Elektrifizierung zwischen 1920 und 1940 praktisch alle Fern- und Bezirksleitungen verkabelt werden mussten, hätten sich vagabundierende Wechselströme als Korrosionsursache verheerend auswirken müssen, wenn sie unter normalen Bedingungen eine schwere Korrosionsgefahr darstellen würden. Da aber zwischen den sehr häufigen Korrosionsschäden (über 1000 Fälle im Jahr) und der Streustrombeeinflussung durch Wechselströme keine Korrelation festgestellt werden konnte, ist anzunehmen, dass normalerweise durch vagabundierende Wechselströme keine Korrosionen erzeugt werden.

protection s'imposent, lorsque les conditions d'influence ont dépassé la limite critique. D'autre part, aucun spécialiste de la corrosion n'est prêt à déclarer admissible un décalage de potentiel de $+0,5 \text{ V}$. Une telle charge anodique entraînerait inévitablement des corrosions importantes. On peut en fixer la valeur admissible aussi bas que l'on voudra, tout décalage de potentiel aura toujours pour conséquence l'accélération d'un phénomène de corrosion existant ou éventuellement le déclenchement d'une corrosion qui jusqu'alors n'était pas encore aiguë. Cet état de choses confirme l'opinion déjà maintes fois émise qu'il n'est pas possible, en réalité, de fixer une valeur limite pour les décalages de potentiel, mais que celle-ci devrait être déterminée dans chaque cas par des mesures.

Etant donné le nombre important d'objets protégés cathodiquement, il n'est cependant pas possible, pour des raisons pratiques, d'examiner de près chaque cas d'influence, sans oublier que les critères sur la base desquels devraient se faire les mesures manquent en grande partie ou font l'objet de controverses. Il est donc nécessaire de fixer une valeur d'influence admissible, même s'il ne peut pas être exclu que, dans certaines conditions particulières, cette limite soit trop élevée.

C'est pourquoi nous avons tenté de déterminer la valeur d'un décalage positif de potentiel qui, dans des conditions normales, peut juste encore provoquer une corrosion sérieuse. La valeur limite à considérer comme admissible devra être fixée suffisamment en dessous afin de tenir compte de facteurs d'aggravation tels que très longue durée de l'influence, conditions changeantes ou influence déjà présente, du fait d'une pose, aération, etc. différentes.

2. Corrosion du plomb et courant alternatif

L'influence du courant alternatif en tant que cause possible de la corrosion des gaines de plomb est prise en considération depuis quelques années déjà [3]. A l'encontre de la corrosion de l'aluminium par le courant alternatif [4], la corrosion du plomb par ce même courant est controversée [5, 6].

Etant donné qu'en Suisse, d'une part, presque toutes les grandes lignes de chemin de fer sont électrifiées à 15 kV, $16 \frac{2}{3}$ Hz, et qu'il existe un réseau serré de distribution d'énergie à 50 Hz, puis que, d'autre part, à la suite de l'électrification intensive réalisée entre 1920 et 1940, pratiquement toutes les lignes téléphoniques interurbaines et rurales ont été mises sous câbles, les effets des courants alternatifs vagabonds, s'ils présentent vraiment un danger de corrosion, auraient dû être dévastateurs. Cependant, comme il n'est pas possible, dans les cas très fréquents de corrosion (plus de 1000 par année), d'établir une corrélation entre la corrosion et les courants alternatifs vagabonds, il est à supposer qu'ils ne peuvent provoquer de dégâts.

Es ist aber trotzdem möglich, durch Wechselströme Blei zu korrodieren, sofern bei den Versuchen eine genügend grosse Stromdichte und ein geeigneter Elektrolyt verwendet wird. Es gibt also offenbar auch bei der Wechselspannungsbeeinflussung einen Grenzwert, der nicht ohne Folgen überschritten werden kann. Verschiedene Faktoren, wie Elektrolytzusammensetzung, Kabelaufbau, Bleiqualität usw. werden diesen Grenzwert beeinflussen. Es ist aber gestützt auf die Erfahrung anzunehmen, er liege normalerweise derart hoch, dass die praktisch auftretenden Beeinflussungen ihn nicht erreichen.

3. Was sind «normale» Bedingungen?

Bei den eben gemachten Ausführungen wurde immer wieder von «normalen Bedingungen», «normalerweise auftretenden Verhältnissen» usw. gesprochen. Versuche, deren Ergebnisse leicht auf die Praxis übertragbar sein sollten, müssen daher auch unter normalen Bedingungen durchgeführt werden. Bei einem Laboratoriumsversuch von normalen Bedingungen zu reden, ist indessen mindestens vieldeutig, wenn nicht sogar verwegen. Wenn wir präzisieren, dass bei unseren Experimenten als Anoden verschieden ummantelte Kabelstücke, als Elektrolyt Wasser vom nächsten Hahnen und als Versuchsdauer 2 Monate gewählt wurden, so ist die Frage sicher berechtigt, was denn bei diesen Versuchsbedingungen «normal» sei.

Zunächst sei freimütig zugegeben, dass «normal» in diesem Fall nichts mit «normalisiert» zu tun hat. Es ist auch klar, dass das Berner Trinkwasser keinerlei Anspruch darauf erheben kann, ein «Normalwasser» zu sein. Auch die getesteten Kabelstücke sind keineswegs wohldefinierte Gebilde, und die Versuchsdauer von 2 Monaten ist zwar nicht willkürlich gewählt worden, sie stellt aber trotzdem einen diskutablen Kompromiss dar, zwischen der sehr lange dauernden Wirkung in der Praxis und der Forderung in nützlicher Frist zu Ergebnissen zu kommen. Trotzdem sind wir der Ansicht, dass die gewählten Versuchsbedingungen vergleichsweise normal sind. Wäre nämlich als Anode nicht ein Kabelstück, sondern ein blankpoliertes, entfettetes und gebeiztes Blech aus reinstem Blei, als Elektrolyt entsalztes Wasser, dem ganz bestimmte Mengen chemisch reiner Stoffe zugesetzt worden wären, und als Versuchsdauer einige Stunden gewählt worden, so hätte man ganz eindeutige, möglicherweise sogar normierte Bedingungen einhalten können, die aber in bezug auf die Praxis völlig abnormal gewesen wären.

Dadurch, dass wir bei den Versuchen Kabelstücke verwendet haben, die von Kabeln genommen wurden, die in der Praxis benützt werden, und einen Elektrolyten, der mehr oder weniger mit der Bodenfeuchtigkeit in einem grossen Gebiet übereinstimmt, konnten die Versuchsbedingungen wenigstens hinsichtlich Elektrodenmaterial und Elektrolyt

Il est malgré tout possible de provoquer la corrosion du plomb par le courant alternatif, en tant que, lors de l'expérience, une densité de courant suffisante et un électrolyte approprié soient choisis. Il y a donc également une limite à l'influence des tensions alternatives, qui ne peut pas être dépassée sans danger. Divers facteurs, tels que la construction du câble, la qualité du plomb, la composition de l'électrolyte, etc. ont certainement une influence sur cette valeur limite. Cependant, étant données les expériences faites, on peut admettre que les conditions d'influence dangereuses ne sont pratiquement jamais atteintes.

3. Qu'entend-on par «conditions normales»?

Dans ce qui précède, il a toujours été question de «conditions normales», «conditions rencontrées normalement», etc. Des essais dont les résultats doivent pouvoir être transposés en pratique sont à réaliser dans des conditions normales. Il est peut-être équivoque, voire audacieux de parler de conditions normales lorsqu'il s'agit d'essais en laboratoire. Si nous précisons que pour nos expériences nous avons pris comme anodes différents tronçons de câbles gainés, que l'électrolyte était de l'eau de robinet et que la durée était fixée à deux mois, la question peut se poser de savoir ce qu'il était juste de considérer comme «normal» dans ces conditions.

Disons pour commencer que par «normal» il ne faut pas entendre «normalisé». Nous ne prétendons pas que l'eau potable de la ville de Berne soit une eau «normale». Les tronçons de câbles testés ne sont pas non plus des éléments parfaitement définis, et la durée des essais de deux mois, qui si elle n'a pas été choisie arbitrairement, ne représente qu'un compromis discutable entre les conditions de très longues expositions aux influences rencontrées dans la pratique et le désir d'obtenir des résultats d'expérience dans un délai raisonnable. Nous sommes malgré cela d'avis que les conditions choisies soutiennent la comparaison avec des conditions normales. En effet si l'on avait pris comme anode, non pas un tronçon de câble, mais une plaque de plomb le plus pur, polie, dégraissée et décapée, comme électrolyte de l'eau distillée à laquelle on aurait ajouté des quantités bien définies de composants chimiques purs, et fixé la durée des essais à quelques heures, on aurait pu créer des conditions d'expériences parfaitement bien établies, voire normalisées, qui pourtant, vues sous l'angle de la pratique, eussent été absolument anormales. En prenant pour les essais des tronçons de câbles utilisés en pratique et un électrolyte qui correspond plus ou moins à l'humidité du sol d'une région étendue, nous avons certainement, pour ce qui est des électrodes et de l'électrolyte, reconstitué approximativement en laboratoire les conditions normales rencontrées en pratique.

den praktischen Verhältnissen angenähert werden. In diesem Sinne sind die Versuche unter «normalen» Bedingungen durchgeführt worden. Die Tatsache, dass die Ergebnisse mit den praktischen Erfahrungen übereinstimmen, und die erzeugten Korrosionsformen von den praktisch auftretenden nicht zu unterscheiden sind, bestätigt diese Behauptung. Normale Versuchsbedingungen sind aber auch die Voraussetzung für eine allgemeine Gültigkeit der Ergebnisse unter bewusster Ausschliessung der Sonderfälle. Trotzdem ist natürlich die Frage berechtigt, warum zum Beispiel gerade Kabelstücke mit dem alten B-Schutz (Tab. I, Typ c) oder das seit Jahren nicht mehr fabrizierte Cellux-Kabel (Tab. I, Typ d) und als Elektrolyt Berner Wasser und nicht solches aus dem Jura oder den Alpen verwendet wurde. Dazu ist zu bemerken, dass wir Kabel mit einem guten Korrosionsschutz, solche mit einem weniger guten und schliesslich auch blanke Bleimäntel untersuchen wollten. Dadurch sollten die Ergebnisse auch auf Kabeltypen anwendbar sein, die zwar nicht einen identischen, aber ähnlich auf-

Cette affirmation est confirmée par le fait que les résultats obtenus correspondent à ceux de la pratique et que, en particulier, les formes de la corrosion provoquée lors des essais ne peuvent pas être différenciées de celles de la pratique. Des conditions d'essai normales, faisant abstraction des cas particuliers, sont nécessaires si l'on veut que les résultats obtenus soient transposables en pratique. Une question pertinente se pose tout de même. Comment se fait-il que l'on ait utilisé des tronçons de câbles d'ancienne construction, avec protection du type B (tableau I, type c), voire des câbles à gaine de Cellux (tableau I, type d) qui ne sont plus fabriqués depuis des années et comme électrolyte de l'eau du réseau de distribution de la ville de Berne plutôt que de l'eau en provenance du Jura ou des Alpes? Il y a lieu de remarquer que nous voulions examiner des câbles offrant une bonne protection contre la corrosion, ainsi que des échantillons moins bien protégés et à gaine de plomb nue. Cette façon de procéder devait permettre d'appliquer également les résultats d'expérience à des types de câbles de construction à peu près identique. Les essais ont du reste montré que la construction de la gaine de protection ne joue pas de rôle important dès qu'il existe des pores atteignant l'enveloppe de plomb. De plus, à l'exception des types (a) et (b), selon tableau I, les échantillons étaient faciles à obtenir et correspondent à des câbles posés en grande quantité. Le type (b) a été fabriqué spécialement pour ces expériences par les Câbleries de Brougg, que nous remercions. Le résultat des essais avec ce type de câble mal protégé devait montrer comment se comportent les anciens câbles aux papiers partiellement pourris et enrobés de jute de mauvaise qualité. En ce qui concerne, pour terminer, l'eau potable de la ville de Berne, elle représente, par rapport aux conditions rencontrées en Suisse, une eau de qualité moyenne, c'est-à-dire sans teneur extrême en calcaire, avec une teneur normale en résidus secs, une conductibilité moyenne, pas trop de nitrates, etc. La pratique, comme des essais précédents, ont montré que cette eau contenait tous les éléments propres à provoquer des corrosions importantes (voir tableau II).

Tabelle I. Aufbau der untersuchten Kabeltypen
Tableau I. Construction des types de câbles examinés

Kabeltyp Type de câble	Aufbau (von innen nach aussen) Construction (de l'intérieur vers l'extérieur)
a	Blanker Bleimantel Gaine de plomb nu
b	Bleimantel, Bitumenguss, mit Bitumen imprägnierte Jute, Bitumenguss, Talk Gaine de plomb, couche de bitume, jute imprégné de bitume, couche de bitume, talc
c	Bleimantel, Bitumenguss, 3 mit Bitumen imprägnierte Papiere, Bitumenguss, mit Bitumen imprägnierte Jute, Bitumenguss, Talk Gaine de plomb, couche de bitume, 3 couches de papier imprégné de bitume, couche de bitume, jute imprégné de bitume, couche de bitume, talc
d	Bleimantel, Bitumenguss, Band aus Hydratzellulose (Cellux), mit Teer imprägniertes Papierband, Band aus Hydratzellulose (Cellux), Bitumenguss, Talk Gaine de plomb, couche de bitume, bande d'hydrate de cellulose (Cellux), bande de papier imprégné de goudron, bande d'hydrate de cellulose (Cellux), couche de bitume, talc
e	Bleimantel, Bitumenguss, mit Teer imprägniertes Papierband, beidseitig mit Polyäthylen beschichtetes Band aus Hydratzellulose (Polycellux), Bitumenguss, mit Teer imprägnierte Jute, Bitumenguss, Talk Gaine de plomb, couche de bitume, bande de papier imprégné de goudron, bande d'hydrate de cellulose recouverte des deux côtés de polyéthylène (Polycellux), couche de bitume, jute imprégné de goudron, couche de bitume, talc

4. Organisation des essais

Le dispositif mis en place pour les essais est représenté schématiquement à la figure 1. Toutes les anodes utilisées étaient constituées par des tronçons de câbles, à gaine de plomb non allié, d'environ 80 cm de longueur. Elles plongeaient dans l'eau sur une longueur d'environ 60 cm. Les bacs utilisés avaient les dimensions suivantes: longueur 40 cm, largeur 27 cm, hauteur 28 cm. Ils étaient tous remplis d'eau potable à la hauteur d'environ 20 cm. L'électrolyte n'était pas brassé. Les cathodes étaient formées d'une bande de plomb pur de 1,5 cm de large (épaisseur 2,5 mm),

gebauten Korrosionsschutz wie die untersuchten haben. Die Ergebnisse zeigen zudem, dass der Aufbau der Schutzhülle gar nicht so wichtig ist, sobald Poren bis zum Bleimantel vorhanden sind. Die untersuchten Kabeltypen sind auch leicht zu beschaffen und bereits in grossen Mengen verlegt worden. Ausnahmen bilden die Typen (a) und (b) (vergl. Tab. I). Der Typ (b) wurde von den Kabelwerken Brugg in verdankenswerter Weise speziell für diese Versuche hergestellt. Die Ergebnisse der Versuche mit diesem nur schlecht geschützten Kabeltyp sollten zeigen, wie sich alte Kabel mit teilweise verrotteten Papieren und schlechter Jute verhalten.

Was schliesslich das Berner Brunnenwasser anbelangt, so ist es – wenigstens für schweizerische Verhältnisse – ein Durchschnittswasser: ohne extremen Kalkgehalt, mit normalem Trockenrückstand, mittlerer Leitfähigkeit, nicht zuviel Nitrat usw. Dieses Wasser hat zudem sowohl in der Praxis als auch bei früheren Laborversuchen bewiesen, dass es alles enthält um wahrhaftige Korrosionen zu bewirken (vergl. Tab. II).

Tabelle II. Ergebnisse der Wasseranalyse beim Trinkwasser von Bern

Tableau II. Résultats d'analyse de l'eau potable du réseau de distribution de la ville de Berne

Spezifischer elektrischer Widerstand	3000 Ω cm
Résistance électrique spécifique	3000 Ω cm
Trockenrückstand, résidus secs	220 mg/l
Gesamthärte, dureté totale	21 fr H°
Calciumhärte, dureté calcaire	18 fr H°
Sulfat, sulfates (SO ₄ '')	6 mg/l
Chlorid, chlorures (Cl')	2 mg/l
Nitrat, nitrates (NO ₃ '')	5 mg/l

4. Versuchsanordnung

Die Versuchsanordnung ist in *Figur 1* schematisch dargestellt. Als Anoden wurden durchwegs etwa 80 cm lange Kabelstücke verwendet. Diese tauchten mit ihren unlegierten Bleimänteln auf einer Länge von etwa 60 cm ins Wasser. Die benützten Gefässe hatten folgende Innenmasse: 40 cm Länge, 27 cm Breite und 28 cm Höhe. Jedes Gefäss war etwa 20 cm hoch mit stehendem Trinkwasser aus dem stadtbernerischen Netz gefüllt. Als Kathoden wurden 1,5 cm breite Reinbleibänder verwendet, die aus einem Kabelmantel hergestellt worden waren (Dicke 2,5 mm). Die Versuchsdauer betrug stets 2 Monate. Die Zellenspannungen (Anode-Kathode) wurden mindestens wöchentlich, während der ersten Woche sogar täglich, nachreguliert und gleichzeitig die Stromstärken (Gleich und Wechselstrom) gemessen.

Aus der *Tabelle III* sind die Bedingungen ersichtlich, unter denen die Versuche durchgeführt wurden. Ferner sind die Messwerte für die Ströme eingetragen, wie sie bei Versuchs-

provenant d'une gaine de câble. La durée des essais était toujours de deux mois. La tension par élément (anode-cathode) était réglée au moins une fois par semaine, pendant la première semaine même journalièrement. A cette occasion, on mesurait également les intensités des courants alternatif et continu.

Les conditions d'expérience sont reportées dans le *tableau III*. De plus, on a reporté les valeurs mesurées des courants, au début des essais (un jour après l'immersion), après un mois et à la fin de l'épreuve (après deux mois). Il est ainsi possible de se faire une idée de l'ordre de grandeur des intensités de courant apparues et de leur tendance de variation dans le temps. Il faut remarquer à ce sujet que deux effets se sont contrecarrés. L'humidification progressive des échantillons a provoqué une diminution des résistances de passage du courant, la polarisation lente des électrodes et les produits de corrosion engendrés tendent à une diminution du courant en circulation.

5. Interpretation des résultats

Dans les phénomènes de corrosion, ce ne sont pas les intensités mais beaucoup plus les densités de courant rencontrées qui ont une importance pour les dégâts provoqués. En effet, pour un câble gainé de plomb et recouvert d'une enveloppe extérieure, seule une petite partie de la surface totale se corrode. Il n'est donc pas possible d'interpréter les mesures du courant si l'on ne connaît pas la surface des zones corrodées. Cependant, il serait faux de penser qu'il suffit de diviser l'intensité du courant par la surface totale des zones corrodées, en tant qu'elle soit connue, pour obtenir la densité de courant recherchée. La raison en est que pour des zones défectueuses de grandeurs différentes, et toutes conditions restant égales par ailleurs, la densité de courant est d'autant plus élevée que les surfaces corrodées sont plus petites. La densité de courant augmente rapidement avec la diminution des zones corrodées jusqu'à un diamètre correspondant à peu près à l'épaisseur de l'enveloppe protectrice. Pour des zones plus faibles, les lignes de champ sont encore plus concentrées et la densité de courant tend rapidement vers une valeur maximum finie. Cette valeur dépend de l'épaisseur de la couche isolante extérieure, c'est-à-dire de la longueur des pores et de la conductibilité de l'électrolyte. Nous rencontrons là une difficulté supplémentaire. Il semble que pour des trajets de ce genre il faille prendre en considération les modifications de la matière liées au passage du courant. En effet, dans les pores fins on aura rapidement un manque d'ions, ceux-ci ne pouvant être amenés que par un lent procédé de diffusion. La conductibilité de l'électrolyte en est diminuée, même si les autres facteurs entrant en jeu restent inchangés. Dans les petites zones défectueuses il est facilement possible que les produits

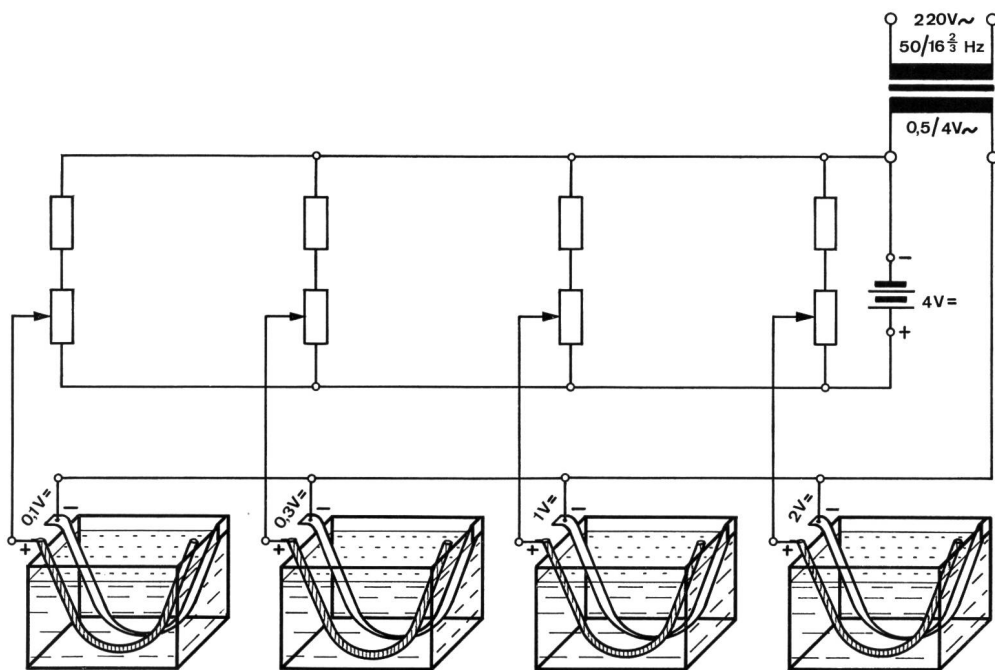


Fig. 1
Schematische Darstellung der Versuchsanordnung, welche benutzt wurde, um verschiedene Kabelstücke gleichzeitig mit Gleich- und Wechselstrom zu belasten. Ein Teil der Versuche wurde mit Wechselstrom 50 Hz, ein anderer mit Wechselstrom 16 $\frac{2}{3}$ Hz durchgeführt

Représentation schématique du dispositif d'essai utilisé, permettant de charger simultanément différents tronçons de câbles avec du courant alternatif et continu. Une partie des essais a été faite avec du courant alternatif à 50 Hz, l'autre avec du courant à 16 $\frac{2}{3}$ Hz

beginn (1 Tag nach dem Eintauchen), nach 1 Monat und bei Versuchsende (2 Monate) erhalten wurden. Man kann so die Größenordnung der Stromstärken und die Tendenz des zeitlichen Verlaufs erkennen. Es sind dabei zwei gegenläufige Effekte wirksam. Einerseits sinken die Übergangswiderstände wegen der fortschreitenden Durchfeuchtung, andererseits wird der Stromdurchgang durch die Polarisierung der Elektroden und die entstehenden Korrosionsprodukte gehemmt.

de corrosion engendrés entraînent pratiquement l'interruption du passage du courant. Ce ne sont donc pas les pores les plus fins qui sont dangereux, mais ceux dont le diamètre est comparable à l'épaisseur de la gaine de câble. L'effet d'une porosité éventuelle de la couche protectrice d'un câble gainé de plomb nu est particulièrement prononcé, puisque dans ce cas il faut s'attendre à l'apparition d'une densité de courant spécialement élevée dans des pores très courts.

5. Auswertung

Bei Korrosionen ist viel weniger die Stromstärke als die Stromdichte massgebend, denn bei einem Kabel mit einer äusseren Hülle über dem Blei ist stets nur ein kleiner Bruchteil der gesamten Oberfläche korrodiert. Man kann Strommessungen deshalb nicht interpretieren, wenn die Fläche der Korrosionsstellen nicht bekannt ist. Aber auch wenn man die gesamte Oberfläche kennen würde, wäre es nicht möglich, die gesuchten Stromdichten durch eine einfache Division des festgestellten Stromes durch die Gesamtoberfläche der stromführenden Stellen zu erhalten. Der Grund liegt in der Tatsache, dass bei Fehlerstellen unterschiedlicher Grösse bei sonst gleichen Bedingungen, die Strom-

De ce qui précède on peut tirer qu'il est possible de déterminer la quantité de matériel présent dans une solution (l'électrolyte) par la mesure du courant mais non pas l'importance de la pénétration de la corrosion. Ce qui intéresse le praticien ce n'est pas la perte de poids de son câble, mais plutôt la profondeur des corrosions les plus profondes. C'est pourquoi nous n'avons choisi ni les intensités de courant alternatif ou continu ni la quantité des charges transportées (en courant continu) comme critères permettant de définir l'importance de la corrosion, mais nous avons cherché à déterminer, aussi précisément que possible, la profondeur des attaques rencontrées.

Pour ce faire, les câbles furent tout d'abord soigneusement nettoyés. Les portions de gaines laissant supposer une corrosion en profondeur furent extraites, puis décou-

Tabelle III. Versuchsbedingungen und Ergebnisse der Strommessungen
Tableau III. Conditions d'essais et résultats des mesures de courant

Kabelltyp und \varnothing Type de câble et \varnothing	Versuchs- nummer No de l'essai	Zellenspannung Tension par élément		Ströme Courants			Gleichstrom [mA] Courant continu [mA]		
		Wechselspannung [Veff.] Tension alternative [Veff]	Gleichspannung [V] Tension continue [V=]	Wechselstrom [mA] Courant alternatif [mA]		Gleichstrom [mA] Courant continu [mA]	nach 24 h après 24 h	nach 1 Monat après 1 mois	nach 2 Monaten après 2 mois
				nach 24 h après 24 h	nach 1 Monat après 1 mois				
		50 Hz	16 2/3 Hz						
a	1	4	2	19	1,2	0,8	5	0,2	0,06
\varnothing über Blei:	2	4	1	22	0,9	0,8	4	0,05	0,02
12 mm	3	4	0,3	23	23	23	0,5	0,06	0,06
\varnothing sur plomb:	4	4	0,1	32	34	37	0,2	0,04	0,03
12 mm	5	0,5	2	1,5	0,15	0,2	6	0,3	0,2
	6	0,5	1	1,5	0,15	0,15	3	0,03	0,05
	7	0,5	0,3	1,5	1,5	1,5	0,3	0,2	0,2
	8	0,5	0,1	1,5	1,5	1,5	0,1	0,04	0,02
b	9	4	2	0,2	1	2	0,01	0,15	0,25
\varnothing über Blei:	10	4	1	0,05	0,6	0,8	0,0005	0,04	0,08
17 mm	11	4	0,3	0,1	1	1,5	< 0,0005	0,02	0,04
\varnothing sur plomb:	12	4	0,1	0,1	3	3	< 0,0005	0,01	0,01
17 mm	13	0,5	2	0,02	0,1	0,5	0,002	0,35	0,35
\varnothing über Jute:	14	0,5	1	0,02	0,1	0,1	0,01	0,08	0,1
20 mm	15	0,5	0,3	< 0,02	0,1	0,2	< 0,0005	0,02	0,05
\varnothing sur jute:	16	0,5	0,1	< 0,02	0,1	0,1	< 0,0005	0,005	0,01
20 mm									
c	17	4	2	< 0,02	0,7	0,7	< 0,0005	0,2	0,2
\varnothing über Blei:	18	4	1	< 0,02	0,8	0,8	< 0,0005	0,1	0,1
21 mm	19	4	0,3	< 0,02	0,75	0,7	< 0,0005	0,025	0,02
\varnothing sur plomb:	20	4	0,1	< 0,02	0,8	0,8	< 0,0005	0,003	0,003
21 mm	21	0,5	2	< 0,02	0,15	0,2	< 0,0005	0,2	0,2
\varnothing über Jute:	22	0,5	1	< 0,02	0,08	0,08	< 0,0005	0,1	0,1
26 mm	23	0,5	0,3	< 0,02	0,05	0,05	< 0,0005	0,02	0,03
\varnothing sur jute:	24	0,5	0,1	< 0,02	0,02	0,02	< 0,0005	0,005	0,004
26 mm	25		2	0,01	0,65	0,63	0,001	0,2	0,2
	26	4	1	0,02	1,0	1,0	0,001	0,15	0,15
	27	4	0,3	0,015	0,4	0,4	0,0005	0,01	0,01
	28	4	0,1	0,025	0,65	0,8	< 0,0005	0,005	0,005
	29	0,5	2	< 0,01	0,1	0,1	0,001	0,15	0,15
	30	0,5	1	< 0,01	0,08	0,1	0,001	0,1	0,15
	31	0,5	0,3	< 0,01	0,025	0,025	< 0,0005	0,01	0,015
	32	0,5	0,1	< 0,01	0,02	0,02	< 0,0005	0,005	0,001
	33		1				< 0,0005	0,07	0,1
	34		0,3				< 0,0005	0,006	0,02
	35		0,1				< 0,0005	0,004	0,001
	36		0,03				< 0,0005	< 0,0005	< 0,0005
	37	4		0,1	0,4	0,6			
	38	1		< 0,01	0,08	0,1			
	39	0,3		< 0,01	0,01	0,015			
	40	0,1		< 0,01	< 0,01	0,015			
d	41	4	2	< 0,01	0,25	0,15	< 0,0005	0,04	0,025
\varnothing über Blei:	42	4	1	< 0,01	0,02	0,02	< 0,0005	0,001	0,002
12 mm	43	4	0,3	< 0,01	0,02	0,03	< 0,0005	< 0,0005	< 0,0005
\varnothing sur plomb:	44	4	0,1	< 0,01	0,2	0,08	< 0,0005	< 0,0005	< 0,0005
12 mm	45	0,5	2	< 0,01	< 0,02	0,02	< 0,005	0,035	0,03
\varnothing über Jute:	46	0,5	1	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,005	0,01	0,006
17 mm	47	0,5	0,3	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,005	0,001	0,0005
\varnothing sur jute:	48	0,5	0,1	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,005	0,001	0,0005
17 mm	49	4	0,1	0,02	0,1	0,15	< 0,0005	0,0005	0,001
	50	0,5	0,1	< 0,01	0,01	0,01	< 0,0005	< 0,0005	< 0,0005
e	51	4	2	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,0005	< 0,0005	< 0,0005
\varnothing über Blei:	52	4	1	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,0005	< 0,0005	< 0,0005
12 mm	53	4	0,3	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,0005	< 0,0005	< 0,0005
\varnothing sur plomb:	54	4	0,1	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,0005	< 0,0005	< 0,0005
12 mm	55	0,5	2	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,0005	< 0,0005	< 0,0005
\varnothing über Jute:	56	0,5	1	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,0005	< 0,0005	< 0,0005
17 mm	57	0,5	0,3	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,0005	< 0,0005	< 0,0005
\varnothing sur jute:	58	0,5	0,1	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,0005	< 0,0005	< 0,0005
17 mm									

Tabelle IV. Versuchsergebnisse
Tableau IV. Résultats des essais

Kabeltyp Type de câble	Versuchsnummer No de l'essai	Wechselspannung [V _{eff}] Tension alternative [V _{eff}]	Gleichspannung [V=] Tension continue [V=]	max. Eindringtiefe [mm] Pénétration max. [mm]	Kabeltyp Type de câble	Versuchsnummer No de l'essai	Wechselspannung [V _{eff}] Tension alternative [V _{eff}]	Gleichspannung [V=] Tension continue [V=]	max. Eindringtiefe [mm] Pénétration max. [mm]
a	1	4 (50 Hz)	2	0,8		30	0,5	1	0,6
	2	4	1	0,5		31	0,5	0,3	0,2
	3	4	0,3	0,7		32	0,5	0,1	0,0
	4	4	0,1	0,0		33	nur ~ seulem. ~	1	0,6
	5	0,5 (50 Hz)	2	0,9		34		0,3	0,4
	6	0,5	1	0,5		35		0,1	0,0
	7	0,5	0,3	0,6		36		0,03	0,0
		8	0,5	0,1		0,1	37	4 (16 2/3 Hz)	
b	9	4 (50 Hz)	2	0,7	38	1	nur ~ seulem. ~		0,0
	10	4	1	0,4	39	0,3			0,0
	11	4	0,3	0,5	40	0,1			0,0
	12	4	0,1	0,1	d	41		4 (50 Hz)	2
	13	0,5 (50 Hz)	2	0,8		42	4	1	0,4
	14	0,5	1	0,4		43	4	0,3	0,1
	15	0,5	0,3	0,2		44	4	0,1	0,0
	16	0,5	0,1	0,1		45	0,5	2	1,0
c	17	4 (50 Hz)	2	0,5		46	0,5	1	0,8
	18	4	1	0,4		47	0,5	0,3	0,2
	19	4	0,3	0,2		48	0,5	0,1	0,0
	20	4	0,1	0,0	49	4 (16 2/3 Hz)	nur ~ seulem. ~	0,0	
	21	0,5 (50 Hz)	2	0,9	50			0,5	0,0
	22	0,5	1	0,6	e	51	4	2	0,0
	23	0,5	0,3	0,3		52	4	1	0,0
	24	0,5	0,1	0,1		53	4	0,3	0,0
	25	4 (16 2/3 Hz)	2	0,6		54	4	0,1	0,0
	26	4	1	0,5		55	0,5 0,5	2	0,0
	27	4	0,3	0,3		56	1	1	0,0
28	4	0,1	0,0	57		0,5	0,3	0,0	
29	0,5 (16 2/3 Hz)	2	0,7	58		0,1	0,1	0,0	

dichte um so grösser ist, je kleiner die Fehlstelle ist. Dabei nimmt die Stromdichte mit kleiner werdender Fläche rasch zu, bis der Durchmesser ungefähr der Dicke der Hülle entspricht. Bei noch kleineren Stellen werden die Stromlinien stark gebündelt. Praktisch der gesamte Spannungsabfall erfolgt dann im Porenkanal und die Stromdichte nähert sich rasch einem endlichen Maximalwert. Dieser ist von der Dicke der isolierenden Aussenschicht, das heisst der Porenlänge und der Leitfähigkeit des Elektrolyten abhängig. Damit stossen wir auf eine zusätzliche Schwierigkeit. Offenbar müssen bei derart engen Strompfaden auch noch die mit dem Stromfluss verbundenen stofflichen Änderungen berücksichtigt werden. In feinen Poren werden die Ionen rasch mangeln, weil sie durch Diffusionsprozesse nur langsam nachgeliefert werden können. Dadurch sinkt die Leitfähigkeit des Elektrolyten, die Stromdichte wird bei sonst gleichen Bedingungen kleiner. Bei kleinen Fehlerstellen ist es zudem leicht möglich, dass sich bildende Kor-

pées à l'aide d'un microtome et examinées au microscope, afin de déterminer avec le plus de précision possible la profondeur de la corrosion. Les résultats obtenus sont portés dans le *tableau IV*.

6. Résultats des essais

En premier lieu, il est remarquable de constater que les câbles protégés au Polycellux (tableau I, type e) ne présentent aucune trace de corrosion et que la résistance de passage après deux mois d'épreuve était encore supérieure à 1 MΩ. Pour tous les autres types de câbles par contre, les différences quant à leur résistance à la corrosion n'étaient que minimales, en ce sens que l'un ou l'autre des échantillons s'est mieux comporté dans l'une ou l'autre des séries d'essais. En aucun cas, il n'a pu être prouvé que le courant alternatif avait une influence favorisant la corrosion. L'influence d'une tension alternative de 4 V_{eff}, qui en pratique ne se rencontre qu'exceptionnellement,

rosionsprodukte den Stromfluss praktisch unterbinden. Es sind deshalb nicht die ganz feinen Poren besonders gefährlich, sondern jene, die einen mit der Dicke der Kabelhülle vergleichbaren Durchmesser aufweisen. Ganz schlimm wirkt sich bei einem blanken Kabel eine poröse Deckschicht aus, weil in diesem Fall in ganz kurzen Poren eine bedeutende Stromdichte erwartet werden muss.

Aus all den erwähnten Gründen ist es zwar möglich, aus einer Strommessung die Menge des in Lösung gegangenen Materials zu berechnen, aber über die Tiefenwirkung kann praktisch nichts ausgesagt werden. Den Praktiker interessiert aber nicht der Gewichtsverlust seiner Kabel, sondern die Tiefe der tiefsten Korrosionsstelle. Wir haben deshalb weder die Stromstärken (Gleich- und Wechselstrom) noch die Ladungsmengen (Gleichstrom) als Kriterien für die Korrosionsgefährdung genommen, sondern versucht, möglichst genau die grösste Eindringtiefe der erzeugten Anfrassungen zu bestimmen.

Dazu wurden die Kabel zunächst sorgfältig gereinigt. Dann wurden jene Korrosionsstellen, welche einen tiefgehenden Angriff vermuten liessen, aus dem Bleimantel herausgeschnitten. Die kleinen Bleistücklein wurden anschliessend auf dem Mikrotom heruntergeschnitten, wobei immer wieder die Querschnittflächen auf dem Metallmikroskop kontrolliert wurden, um möglichst genau die maximale Eindringtiefe feststellen zu können. Die so erhaltenen Ergebnisse sind in der *Tabelle IV* zusammengestellt.

6. Versuchsergebnisse

Zunächst fällt auf, dass bei den Polycellluxkabeln (Tab. I, Typ e) überhaupt keine Korrosionen auftraten und der Übergangswiderstand nach zwei Monaten immer noch mehr als $1\text{ M}\Omega$ betrug. Bei den übrigen Kabeltypen dagegen waren die Unterschiede in der Korrosionsanfälligkeit nur gering, indem sich der eine Kabeltyp in dieser, ein anderer in jener Versuchsserie günstiger verhielt. In keinem Fall konnte indessen dem Wechselstrom eine korrosionsfördernde Wirkung nachgewiesen werden. Bei den Versuchen mit ausschliesslicher Wechselstrombelastung liessen sich keine Korrosionen feststellen. Eine Wechselspannungsbeeinflussung von 4 V_{eff} , die in der Praxis nur ausnahmsweise vorkommt, hatte also immer noch keine korrosive Wirkung. Mit einer Gleichspannung von nur 100 mV wurden dagegen unter denselben Bedingungen in mehreren Fällen bereits deutliche Angriffe erhalten. Eine Gleichstrombeeinflussung, die eine Potentialverschiebung um 100 mV in positiver Richtung verursacht, ist demnach gefährlicher als eine Wechselspannungsbeeinflussung von 4 V_{eff} . Da aber Potentialverschiebungen um $+100\text{ mV}$ in der Praxis sehr häufig auftreten, beispielsweise durch vagabundierende Gleichströme, galvanische Elemente, geologische Elemente oder lokale

n'avait aucun effet corrosif. Des attaques marquées par contre furent obtenues à l'aide d'une tension continue de 100 mV seulement, dans les mêmes conditions. L'influence d'un courant continu provoquant un décalage de potentiel dans le sens positif de 100 mV est donc plus dangereuse que celle d'une tension alternative de 4 V_{eff} . Etant donné cependant, que des décalages de potentiel de $+100\text{ mV}$, provoqués par des courants continus vagabonds, des éléments galvaniques, géologiques ou des différences locales d'aération sont très fréquents dans la pratique, on peut considérer que l'influence de courants alternatifs de quelques volts constitue un danger minime de corrosion. Il faut cependant relever que ce point de vue n'est valable que lorsque l'électrolyte en présence ne diffère pas trop de l'eau potable de la ville de Berne et que les câbles peuvent être comparés aux échantillons essayés. Dans une autre série d'essais, qui feront l'objet d'une prochaine communication, nous avons constaté par exemple qu'une gaine de plomb allié d'antimoine ($0,7\text{ Sb}$) était déjà corrodée par une tension alternative de 4 V_{eff} , $16\frac{2}{3}\text{ Hz}$. Les essais réalisés dans les mêmes conditions avec une tension de 100 mV ont conduit à une attaque encore plus poussée, si bien que là aussi l'influence de la tension continue est plus forte que celle de la tension alternative. D'autres expériences seront faites pour déterminer s'il en est de même avec des électrolytes différents.

Le nombre des essais exécutés est suffisamment grand pour permettre, mis à part les résultats généraux déjà mentionnés, une interprétation plus détaillée. A l'exception de ceux obtenus pour le câble gainé au Polycellux, très résistant à la corrosion, tous les résultats des expériences ont été portés dans la *figure 2* afin d'établir une relation entre l'étendue et la profondeur des corrosions et la tension continue appliquée. L'influence de la tension alternative, n'ayant pu être démontrée, est laissée de côté. La représentation montre clairement qu'un décalage de potentiel supérieur à 300 mV n'a comparativement qu'un effet minime sur le développement de la corrosion. Par contre, la différence entre $+100\text{ mV}$ et $+300\text{ mV}$ est très importante. Un décalage de potentiel de 100 mV ne représente cependant en aucune façon le seuil de déclenchement d'une corrosion. C'est pourquoi la valeur limite admissible doit être fixée beaucoup plus bas, et la tension de 20 mV recommandée par le CCITT [7] devrait correspondre à la réalité.

7. Genre de corrosions

Nous avons déjà signalé à maintes reprises que, lors d'essais de corrosion pour lesquels la sortie du courant n'était pas arbitraire, la forme de la corrosion n'était souvent pas celle attendue d'un cratère, caractéristique d'une attaque électrolytique. On décèle au contraire une attaque intercrystalline [1, 2]. Lors de ces essais, il n'en fut pas

Belüftungsunterschiede, dürfen Wechselstrombeeinflussungen von einigen Volt als eine geringe Korrosionsgefahr angesehen werden. Einschränkend muss aber beigefügt werden, dass dies zunächst nur für Elektrolyte gilt, die nicht zu stark vom Berner Wasser abweichen, und auch nur für Kabel, die mit den untersuchten Typen vergleichbar sind. In einer anderen Versuchsreihe, über die später berichtet werden soll, haben wir zum Beispiel festgestellt, dass ein antimonlegierter Bleimantel (0,7 Sb) bei $4 V_{eff}$ (16 2/3 Hz) bereits deutlich korrodiert wurde, wobei aber die gleichzeitig durchgeführten Korrosionsversuche mit $100 mV=$ noch deutlich stärkere Angriffe bewirkten, so dass auch in diesem Fall $4 V_{eff}$ weniger korrosiv wirkten als $+ 100 mV=$. Ob dies auch für andere Elektrolyte gilt (etwa bei Zementwasser), werden erst weitere Versuche zeigen.

Die Zahl der durchgeführten Versuche ist gross genug, um abgesehen von den bereits erwähnten allgemeinen Ergebnissen, eine weitergehende Auswertung zu gestatten. In *Figur 2* wurden die Ergebnisse aller Versuche, ausgenommen jene mit dem sehr widerstandsfähigen Polycelluxkabel (Tab. II, Typ e), zur Herstellung einer Beziehung zwischen der Eindringtiefe und der Grösse der Gleichspannungsbeeinflussung benützt. Der Einfluss der Wechselstrombelastung wurde, weil nicht nachweisbar, als nicht vorhanden betrachtet. Die Darstellung zeigt deutlich, dass eine Potentialverschiebung um mehr als $+ 300 mV$ den Korrosionsfortschritt nur noch vergleichsweise wenig beeinflusst. Der Unterschied zwischen $+ 100 mV$ und $+ 300 mV$ ist dagegen sehr gross. $100 mV$ Potentialverschiebung sind aber noch keineswegs der Schwellenwert für die Auslösung einer Korrosion. Deshalb muss der zulässige Wert einer Beeinflussung deutlich tiefer angesetzt werden, und der vom CCITT [7] empfohlene Wert von $20 mV$ dürfte dem Sachverhalt gut entsprechen.

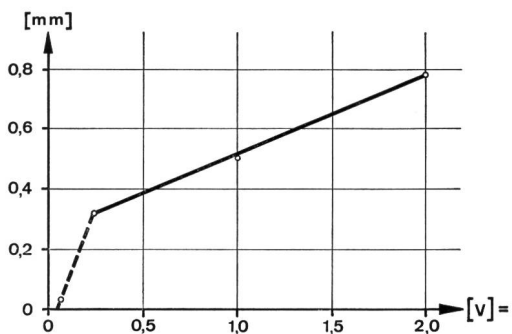


Fig. 2
Beziehung zwischen der Grösse der anodischen Belastung und der maximalen Eindringtiefe der dadurch erzeugten Korrosionen
Relation entre la valeur de la charge anodique et la profondeur des corrosions provoquées

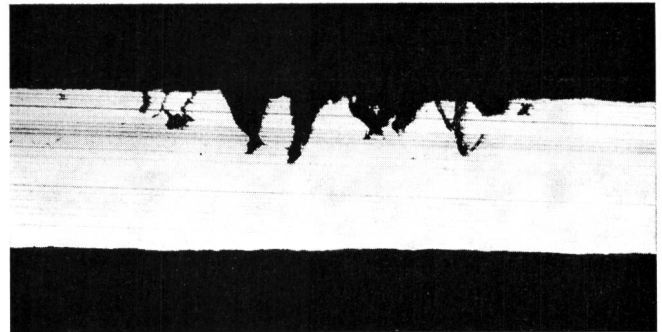


Fig. 3
Versuch Nr. 9 (2 V=). Querschnitt durch den 1,6 mm dicken Bleimantel mit sehr starker interkristalliner Korrosion
Essai No 9 (2 V =). Coupe à travers une gaine de plomb de 1,6 mm d'épaisseur. Corrosion très fortement intercrystalline

autrement et souvent les corrosions intercrystallines étaient à tel point majoritaires dans les coupes observées qu'il n'était plus possible de reconnaître la formation de cratères (*fig. 3*). Dans d'autres cas, la forme en cratère était reconnaissable, mais l'on pouvait remarquer, surtout au fond de la corrosion, la présence d'attaques cristallines (*fig. 4, 7*). Les formes en cratères pures ne sont le fait que de corrosions peu profondes (*fig. 5*).

Le résultat des essais avec les gaines de plomb nu (câble type a) est particulièrement intéressant. La partie médiane des échantillons était en contact avec les bacs contenant l'électrolyte (*fig. 1*), le reste plongeant de toutes parts dans le bain. Alors que les extrémités étaient, à la fin de l'expérience, recouvertes d'une croûte et ne présentaient pas de traces d'attaque, les portions de câbles en contact avec le fond des bacs étaient fortement corrodées. Il y a lieu de penser qu'en ces endroits la diffusion était suffisamment lente pour que la concentration en ions de plomb, nécessaire à la corrosion, puisse se for-

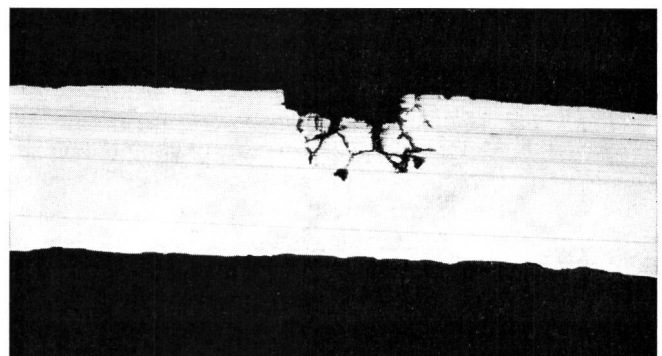


Fig. 4
Versuch Nr. 41 (2 V=). Querschnitt durch einen Elektrolysekrater, der am Grund durch interkristalline Korrosion tief zerklüftet ist. Bleimanteldicke: 1,7 mm
Essai No 41 (2 V =). Coupe d'un cratère électrolytique, dont le fond est particulièrement tourmenté par la présence de corrosion intercrystalline. Epaisseur de la gaine de plomb 1,7 mm

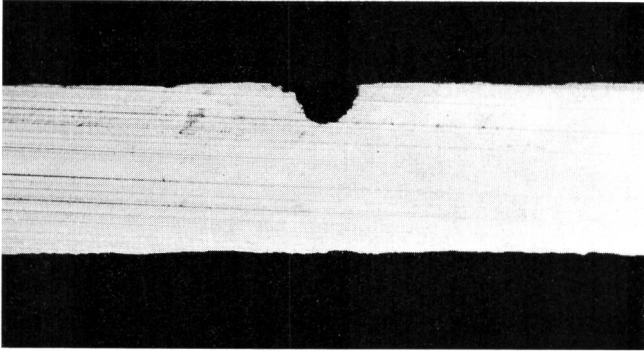


Fig. 5
Versuch Nr. 17 (2 V=). Seltener Fall eines glattrandigen Elektrolysekraters. Bleimanteldicke 1,8 mm
Essai No 17 (2 V =). Cas rare d'un cratère électrolytique à bords lisses. Epaisseur de la gaine de plomb 1,8 mm

7. Art der Korrosionen

Es wurde bereits mehrfach darauf hingewiesen, dass bei Versuchen mit erzwungenen Stromaustritten oft nicht die erwarteten, für Elektrolyseangriffe als typisch geltenden Kraterformen auftreten, sondern eindeutig interkristalline Angriffe [1, 2]. Auch bei diesen Untersuchungen war es nicht anders, und oft überwiegen im Querschnitt (Fig. 3) die interkristallinen Formen derart stark, dass man die Kraterbildungen nicht mehr erkennen kann. In andern Fällen ist zwar die Kraterform noch erkennbar, aber besonders am Grund der Anfrassungen sind deutlich Korngrenzenangriffe zu beobachten (Fig. 4, 7). Reine Kraterformen zeigen stets nur wenig tiefe Anfrassungen (Fig. 5).

Besonders aufschlussreich sind die Ergebnisse der Versuche mit den blanken Bleimänteln (Kabeltyp a). Die Versuchskabel berührten nur in der Mitte die Elektrolytbehälter (Fig. 1), sonst wurden sie überall vom Elektrolyten frei gespült. Während die umspülten Flächen verkrusteten, aber keinen Lochfrass aufwiesen, entstanden an den Berührungstellen mit dem Glasboden starke Korrosionen (Fig. 6). Offenbar war an diesen Stellen die Diffusion genügend gehemmt, so dass sich die zur interkristallinen Korrosion nötige Bleiionenkonzentration [8] bilden konnte. Sogar beim Versuch mit einer Zellenspannung von nur 300 mV=, die sich ungefähr gleichmässig auf Anode und Kathode verteilte (Verschiebung am blanken Versuchskabel, also nur +150 mV), entstanden tiefe Anfrassungen (Fig. 7). Es ist noch zu bemerken, dass dieses Ergebnis in der Tabelle IV (Versuch Nr. 3 u. 7) und der Figur 2 unter 300 mV eingereiht wurde, also entsprechend der Zellenspannung. Aber es zeigt ebenfalls deutlich, wie gefährlich Potentialverschiebungen in der Grössenordnung von +100 mV= sein können. Um so erfreulicher ist der Befund, dass Wechselspannungen von einigen Volt im allgemeinen noch nicht gefährlich sind.

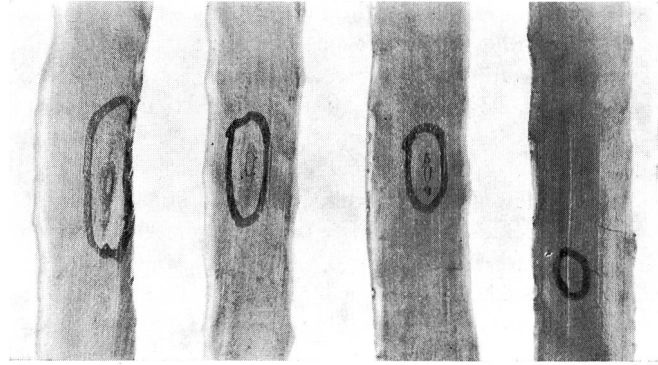


Fig. 6
Versuche Nr. 55...58 mit (von links nach rechts) blanken Kabelmantelstücken als Anoden und Gleichspannungen von 2, 1, 0,3 und 0,1 V. Die Berührungsflächen der Anoden mit dem Gefässboden sind eingekreist. Breite der aufgeschnittenen und geglätteten Proben etwa 3 cm

Essais Nos 55...58. De gauche à droite, tronçons de gaines de plomb nu, tensions d'essai 2, 1, 0,3, 0,1 V. Les surfaces des anodes ayant été en contact avec le fond des bacs sont encerclées. Largeur des échantillons découpés et aplatis, environ 3 cm

mer [8]. L'essai avec une tension d'élément de 300 mV= seulement, tension qui se répartissait à peu près régulièrement sur l'anode et la cathode (le décalage de potentiel pour l'échantillon de câble nu n'était donc que de 150 mV=) a également conduit à des corrosions profondes (fig. 7). Remarquons que ce résultat est porté dans le tableau IV (essais nos 3 et 7) et la figure 2, sous 300 mV, soit conformément à la tension par élément appliquée. Cela montre clairement combien les décalages de potentiel de l'ordre de grandeur de +100 mV= peuvent être dangereux. Le fait que l'on ait pu reconnaître que des tensions alternatives de quelques volts ne sont en général pas encore dangereuses est d'autant plus réjouissant.

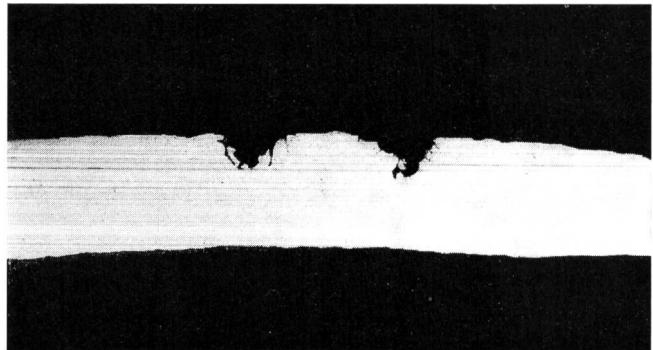


Fig. 7
Querschnitt durch den Bleimantel von Versuch Nr. 57 (0,3 V=, wirksame Potentialverschiebung etwa +150 mV) innerhalb der Berührungsstelle mit dem Gefässboden. Die Kraterwände sind deutlich interkristallin weiterkorrodiert
Coupe à travers la gaine de plomb de l'essai No 57 (0,3 V =, décalage de potentiel actif environ +150 mV =), dans la zone de contact avec le fond du bac. La corrosion des parois des cratères a clairement continué sous forme interkristalline

Bibliographie

- [1] *Vögli K.* Probleme der Bleikabelkorrosion (14. Mitteilung): Potentialverschiebung und interkristalline Bleikorrosion. Problèmes de la corrosion des câbles sous plomb (14^e communication): Décalage de potentiel et corrosion intercrystalline du plomb. Techn. Mitt. PTT 40 (1962), S. 324 ff.
- [2] *Vögli K.* Bleimantelkabel, Bleikorrosion und Korrosionsschutz. Câbles sous gaine de plomb, corrosion du plomb et protection contre la corrosion. Techn. Mitt. PTT 48 (1970), S. 25 ff.
- [3] *Galimberti C. E.* Corrosion of Lead by Alternating Current. Corrosion 20 (May 1964), pp. 150.
- [4] *Vögli K.* Durch Wechselstrom bedingte Korrosionen von Aluminium. Les corrosions de l'aluminium dues aux courants alternatifs. Techn. Mitt. PTT 48 (1970), S. 466 ff.
- [5] *Editorial.* Is There Such a Thing as A-C Corrosion? Corrosion 17 (March 1961), p. 7.
- [6] *Letters to the Editor.* Majority Opinion Favors Belief A-C Corrosion Problem Insignificant. Corrosion 17 (March 1961), pp. 60.
- [7] *C. C. I. T. T.* Recommandations concernant la protection des câbles souterrains contre la corrosion. New Delhi 1960, Chap. IX, p. 9 (Ed. 1970).
- [8] *Vögli K.* Probleme der Bleikabelkorrosion (13. Mitteilung): Unter welchen Bedingungen wird Blei interkristallin angegriffen? Problèmes de la corrosion des câbles sous plomb (13^e communication): Dans quelles conditions l'attaque intercrystalline du plomb se réalise-t-elle? Techn. Mitt. PTT 40 (1962), S. 213 ff.

Buchbesprechungen – Bibliographie – Recensionen

Fördermittelkatalog 1971. Rationeller Güterumschlag – Lagertechnik. Laufenburg, Verlag Max Binkert & Co., 1971. 212 S. Preis Fr. 9.—.

Die 3. Ausgabe des Fördermittelkataloges wird eingeleitet mit einem Artikel «Aufgabe und Tätigkeit der Studiengesellschaft für rationellen Güterumschlag (SSRG)». Zentralsekretär Dr. A. Nellen zeigt auf, wie der Personalmangel Industrie- und Dienstleistungsbetriebe zwingt, die Materialbewegungen sowohl inner- wie ausserbetrieblich weiter zu rationalisieren und entsprechende technische Mittel einzusetzen. Für das innerbetriebliche Förderwesen steht ein grosses Sortiment zweckmässiger Hilfsmittel zur Verfügung. Bei den Stetigförderern ist festzustellen, dass die Automation auch hier vermehrt zum Zuge kommt. Im Zusammenhang mit den Paletten gehen die Bestrebungen, das Ladegut zu normieren (Normpackungen), weiter. Andere Aufsätze über Integration im Förderwesen (Innerbetrieb/Schiene/Strasse), Nutzfahrzeuge, Transport und Lagerplanung ergänzen den redaktionellen Teil.

Der Dokumentationsenteil ist zweckmässig gegliedert. Im Kapitel «Krane – Hebezeuge – Aufzüge» kommt der vielseitige Einsatz der Warenaufzüge etwas zu kurz. Die Hebezeuge, wie die Stetigförderer, Flurfördermittel und Lagereinrichtungen, werden durch in- und ausländische Firmen

für sehr viele Anwendungsbereiche angeboten. Der Zubehöriteil zeigt die Vielseitigkeit der innerbetrieblichen Transporttechnik. Ein Sach- und Bezugsquellenregister sowie ein Inserentenverzeichnis ergänzen das Handbuch.

Es war kaum die Absicht des Verlages, eine umfassende Dokumentation zu veröffentlichen. Für den praktischen Betriebsplaner, der für Materialbewegungen und -lager zweckmässige Einrichtungen einsetzen will, stellt der Fördermittelkatalog ein gutes Nachschlagewerk dar. Durch den interessanten Textteil wird er über ein Firmenverzeichnis hinausgehoben.

H. R. Lerch

Steinbuch K. Automat und Mensch. = Heidelberger Taschenbücher. Band 81. 4. neubearbeitete Auflage. Berlin, Springer-Verlag, 1971. VII + 266 S., 131 Abb. Preis DM 16.80.

Auf Steinbuchs «Automat und Mensch» ist an dieser Stelle bereits früher einlässlich hingewiesen worden (vgl. Technische Mitteilungen PTT 1962, S. 75 und 1964, S. 227). Inzwischen ist eine Überarbeitung als Band 81 der «Heidelberger Taschenbücher» erschienen. Für diese vierte Auflage des verständlich und kompetent geschriebenen, vorzüglich illustrierten Werkes – das über das wohlfeile Taschenbuch zweifellos wei-

tere Kreise erreichen wird – hat der Autor einzelne Kapitel neu verfasst, andere überarbeitet und soweit nötig aktualisiert. Geblieben ist der Grundgedanke des Buches, den der Autor wie folgt umschreibt: «Was wir an geistigen Funktionen beobachten, ist Aufnahme, Verarbeitung, Speicherung und Abgabe von Informationen. Auf keinen Fall scheint es erwiesen oder auch nur wahrscheinlich zu sein, dass zur Erklärung geistiger Funktionen Voraussetzungen gemacht werden müssen, welche über die Physik hinausgehen.» So konfrontiert er den Leser gleich eingangs mit einer kybernetischen Anthropologie, in der er diese Gedanken erläutert. Weitere Kapitel sind u. a. Signal und Information, der Informationstheorie, der logischen Verknüpfung und Zuordnung, der Informationsverarbeitung und der Zeichenerkennung gewidmet. Lernenden Automaten, Lernmatrix, Sprechen und Hören sowie Aufnahme und Verarbeitung von Informationen durch den Menschen sind weitere Kapitel überschrieben. Mit «Automat und Mensch im Weltraum», im Kapitel über ein hypothetisches cognitives System und die Kybernetik in der Organisation und bei der Presse behandelt der Autor (teils künftige) Anwendungsmöglichkeiten. Ein umfangreiches Literatur- und ein Sachverzeichnis beschliessen diese Taschenbuchausgabe, die durch ihre Beschränkung auf das Wesentliche besticht. Chr. Kobelt