**Zeitschrift:** Bulletin de l'Association suisse des électriciens

**Herausgeber:** Association suisse des électriciens

**Band:** 47 (1956)

**Heft:** 5

**Rubrik:** Communications ASE

**Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

**Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

**Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

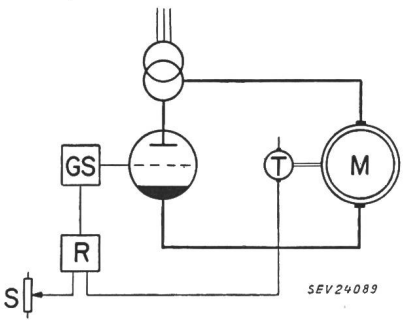
**Download PDF:** 12.12.2025

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

das Motorfeld in kürzester Zeit umzupolen, um den gleichen Mutator für beide Drehrichtungen nutzbar zu machen. Diese spezielle Anordnung für die Motorfeldumkehr ist hier nur soweit am Rande erwähnt, als dies für das Verständnis des Oszillogrammes in Fig. 8 benötigt wird. Dieses Oszillogramm illustriert die Regelvorgänge der beschriebenen kombinierten Strom- und Drehzahlregelung. Betrachten wir einen Umkehrvorgang, der aus der stationären Drehzahl rechts von Punkt *B* vorgenommen wird. Nach dem Eintreffen des Steuerbefehls wird unverzüglich das Motorfeld umgepolt und damit die Voraussetzung für den Wechselrichterbetrieb geschaffen. Bei negativer Ankerspannung regelt nun der Mutator den Strom unverzüglich auf einen konstanten Wert. Unter Energierückgabe an das Netz wird der Motor abgebremst und anschliessend bei umgekehrter Energierichtung erneut beschleunigt. Der Strom wird so lange aufrecht erhalten, bis der Motor die gewünschte, neue Drehzahl erreicht hat. Sodann geht die Stromregelung in eine Geschwindigkeitsregelung zur Konstanthaltung der Drehzahl über. Die Anforderungen an die Raschheit der Gittersteuerung sind dadurch bedingt, dass der Zündwinkel der schnell ändernden Motorspannung folgen muss. Dieser Verschiebung in einem weiten Bereich ist die um eine Grössenordnung kleinere Winkelverschiebung für die Stromregelung überlagert, welche auch bei Änderung der Spannung genau und überschwingungsfrei arbeitet. Dieses Beispiel zeigt die hervorragende Eignung des Rapidgittersteuersatzes zur Lösung der verschiedensten Regelaufgaben, zu der er dank seiner trägheitsarmen Wirkungsweise befähigt ist.

## 4. Elektronische Gittersteuerung für Antriebe höchster dynamischer Regelgüte

Bei gewissen Antriebsproblemen ist es notwendig, selbst die kurze Verstellzeit des magnetischen Steuersatzes von 10...20 ms auszumerzen. Dieser Fall kann beispielsweise vorliegen bei hochwertigen Antrieben für kontinuierliche Walzenstrassen, deren Motoren beim Auftreffen eines Laststosses innert kürzester Zeit auf konstante Geschwindigkeit auszuregeln sind. Die angewandte Schaltung nach Fig. 9 enthält für jeden Motor einen eigenen Mutator. Zur Regelung der Drehzahl wird die Tachometerspannung mit einem Sollwert verglichen und beaufschlagt über einen elektronischen Verstärker den rein elektronischen Gittersteuersatz. Die Vermeidung jeglicher Trägheit führt zu hervorragenden Regeleigenschaften, die im Oszillogramm Fig. 10 wiedergegeben sind. Die Ausregelung eines Vollaststosses, der durch einen versuchsweise angekuppelten Belastungsgenerator eingeleitet wird, erfolgt schwingungsfrei innerhalb der kurzen Zeit von einer Zehntelsekunde. Der vorübergehende Drehzahlabfall innerhalb dieser Ausregelzeit lässt




**Blockschema eines Antriebes für kontinuierliche Walzwerke**
*M* Motor; *T* Tachodynamo; *R* elektronischer Regler; *GS* elektronischer Gittersteuersatz; *S* Drehzahl-Sollwertgeber

sich am besten dadurch veranschaulichen, dass der während der Ausregelzeit entstehende Nacheilwinkel gegenüber einer absolut gleichförmigen Drehung nur etwas mehr als 1° im Winkelmass beträgt und damit die Konstanz der Drehung eines Synchronmotors um eine Grössenordnung übertrifft.

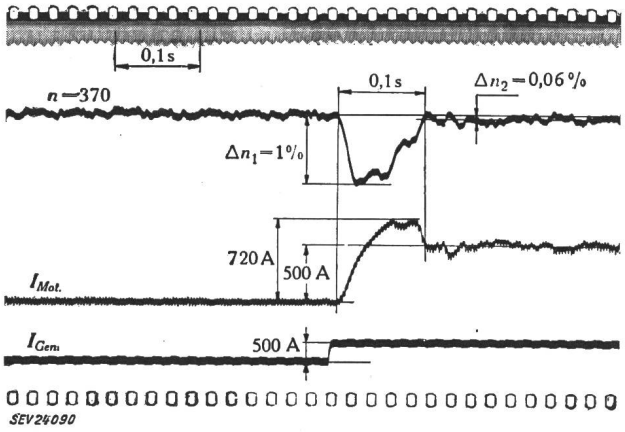



Fig. 10
**Oszillogramm der Ausregelung eines Vollaststosses an einem mutatorgesteuerten Motor für kontinuierliche Walzwerke bei Grunddrehzahl**
$n$ Drehzahl in U./min; $\Delta n_1$ grösste vorübergehende Drehzahlabweichung; $\Delta n_2$ dauernde Drehzahlabweichung; $I_{Mot.}$ Motorstrom; $I_{Gen.}$ Strom des Belastungsgenerators
(Man beachte, dass die Nullinie der Drehzahlaufzeichnung weit ausserhalb des Bildes liegt)

Dass selbst derart hochwertige Regelungen betriebssicher gebaut werden können, beweisen eine grosse Zahl ausgeführter Antriebe dieser Art, welche zum Teil seit Jahren in Betrieb stehen und sich im praktischen Betriebe voll bewährt haben.

**Adresse des Autors:**
Dr. sc. techn. *R. Zwicky*, dipl. El.-Ing. ETH, A.-G. Brown, Boveri & Cie., Baden (AG).

# Technische Mitteilungen — Communications de nature technique

## Die Verwendung von Aluminium in amerikanischen Mittel- und Niederspannungs-Freileitungsnetzen

621.315.14 : 621.315.53

Aluminium wird seit mehr als 50 Jahren für elektrische Übertragungsleitungen verwendet. Während dieser Zeit hat sich dieses Material in jeder Hinsicht, sowohl was Eigenschaften als auch Preis anbetrifft, als so vorteilhaft erwiesen, dass es heute kaum noch jemandem einfällt, für Leitungen hoher Spannungen (über 100 kV) Kupfer zu verwenden. Der gegenüber Kupfer grössere Querschnitt des mit einem höheren spezifischen Widerstand behafteten Aluminiums wird nicht als nachteilig empfunden; im Gegenteil, die bei hohen Spannungen drohenden Koronaverluste und die dabei auf-

tretenden Radiostörungen verlangen geradezu Leiter mit grossem Durchmesser.

Wie liegen nun die Verhältnisse bei Leitungen unter 100 kV? Ein Blick auf die Übersichtskarte des schweizerischen Leitungsnetzes zeigt, dass für den weitaus grössten Teil dieser Leitungen Kupfer verwendet wird. Wir wollen hier nicht den Gründen dafür nachgehen, sondern auf die Entwicklung in Nordamerika in den letzten Jahren hinweisen. Durch Streiks, Knappheit an Bergleuten und wegen der Äufnung von kriegswirtschaftlichen Lagern durch die Regierung der USA entstanden Krisen in der Versorgung mit Kupfer, die den Preis des Metalles natürlich nicht unberührt liessen (Fig. 1). Eine weitere

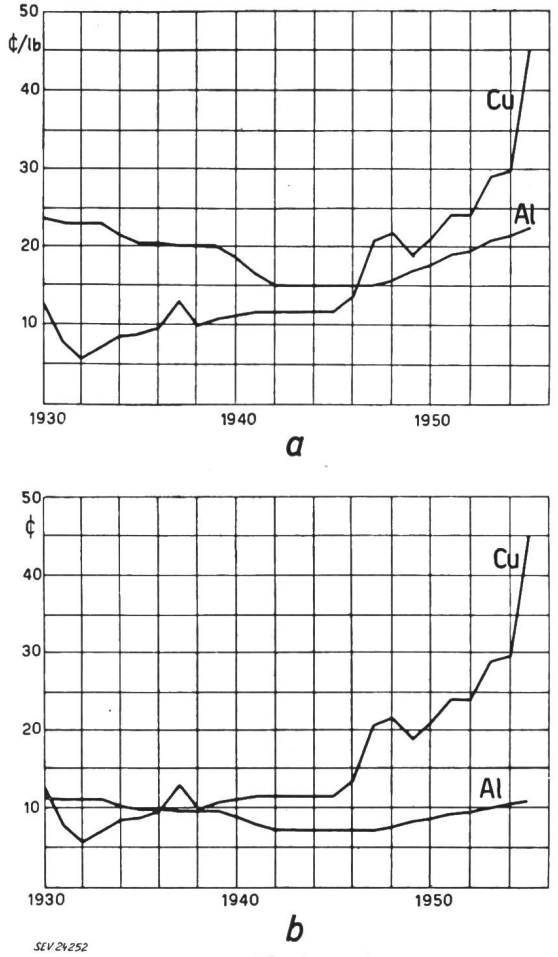



Fig. 1
**Kupfer- und Aluminiumpreise**

*a* Preise für Elektrolytkupfer (Barren) und Reinaluminium (Masseln) in New York

*b* Preise für 1 lb Kupfer (0,454 kg) und die leitwertgleiche Menge Aluminium (0,22 kg)

Preissteigerung ergab sich dadurch, dass allmählich Erzvorkommen abgebaut werden müssen, deren geringerer Cu-Gehalt sich nachteilig auf die Rendite auswirkt. Offenbar haben nun viele amerikanische Gesellschaften der Elektroindustrie und der Elektrizitätsversorgung aus dieser Situation die Konsequenzen gezogen, selbstverständlich mit der bereitwilligen Assistenz der ihre Chance wahrnehmenden Aluminiumindustrie.

Aluminium, das früher unter dem Druck der Kriegseinschränkungen als Ersatzmaterial Verwendung fand, wird jetzt als der gegebene, hochwillkommene neue Werkstoff angenommen, nachdem man weiss, dass er in grösseren Mengen als irgend ein anderes Metall in der Erdrinde vorkommt und dass sein Preis ausserordentlich stabil ist (Fig. 1).

Wie weit die USA in dieser Richtung schon gegangen ist, erkennt man beim Lesen der gedruckt erschienenen Vorträge, die an einer Konferenz des American Institute of Electrical Engineers (AIEE) im März 1955 in Pittsburg gehalten wurden [1]). In Bezug auf Freileitungen wird vor allem über die Verwendung von Aluminium im Mittel- und Niederspannungs-Verteilnetz (Regelleitungen) berichtet. Zusammen mit anderen aus Kanada stammenden Informationen erhält man folgendes Bild:

### *1. Grund für den Übergang zu Aluminium*

Viele Gesellschaften hatten schon vor Jahren erkannt, dass in Anbetracht des hohen Kupferpreises Aluminium wirtschaftlicher wäre. Einige zogen daraus die Konsequenz und begannen die technische Seite des Problems zu untersuchen, während andere erst durch die Einschränkungen während des Koreakrieges dazu gezwungen wurden.

Übereinstimmend kommt aber die Meinung zum Ausdruck, Aluminium auch weiterhin zu verwenden, solange das Preisverhältnis sich nicht zum Vorteil des Kupfers ändert.

### *2. Material*

2,4 bis 33 kV Regelleitungen:
Reinaluminiumseile 85 bis 242 mm² (53 bis 152 mm² Cu) [2])
Stahlaluminiumseile 21 bis 107 mm² (13 bis 67 mm² Cu)
Als Kuriosum für schweizerische Verhältnisse seien auch die isolierten («weatherproof») Stahlaluminiumseile (21 mm² bis 107 mm²) erwähnt, die im 13,5 kV Freileitungsnetz der Stadt Philadelphia verwendet wurden.

115/230 V Verteilleitungen (mit geerdetem Nulleiter):
Reinaluminiumseile 53 bis 107 mm² (33 bis 67 mm² Cu) [2])
Stahlaluminiumseile 53 mm² (33 mm² Cu)
«Weatherproof» Reinaluminiumseil 107 mm² (67 mm²Cu)
«Weatherproof» Stahlaluminiumseil 21 bis 107 mm² (13 bis 67 mm² Cu)

115/230 V Hausanschlüsse (mit geerdetem Nulleiter):
Reinaluminiumseile 33 mm² (21 mm² Cu) [2])
Stahlaluminiumseile 21 bis 53 mm² (13...33 mm² Cu)
«Weatherproof» Reinaluminiumseile 21 bis 67 mm² (13...42 mm² Cu)
«Weatherproof» Stahlaluminiumseile 53 bis 107 mm² (33...67 mm² Cu)

Ein Vergleich der wichtigsten Daten der vier verschiedenen Leitertypen ist in den Tabellen 1 und 2 gegeben. Das Verhältnis G/F ist theoretisch ein Mass für den Durchhang des nur mit seinem Eigengewicht belasteten Seils, wenn angenommen wird, dass für alle Typen die zulässige Seilspannung im selben Verhältnis zur Bruchfestigkeit steht. Prak-

*Leiterseile mit einem Querschnitt, der dem Cu-Querschnitt von 21,15 mm² äquivalent ist*

Tabelle I

| | | Reinaluminium | Stahlaluminium | «Weatherproof» Reinaluminium | «Weatherproof» Stahlaluminium |
|---|---|---|---|---|---|
| Durchmesser | mm | 7,44 | 8,01 | 10,7 | 10,4 |
| Bruchlast F | kg | 621 | 1260 | 511 | 1135 |
| Gewicht G | kg/km | 91,8 | 135,6 | 158 | 208 |
| G/F | | 1,48 | 1,07 | 3,1 | 1,83 |
| Verhältnis | | 1 | 0,72 | 2,1 | 1,23 |

*Leiterseile mit einem Querschnitt, der dem Cu-Querschnitt von 67 mm² äquivalent ist*

Tabelle II

| | | Reinaluminium | Stahlaluminium | «Weatherproof» Reinaluminium | «Weatherproof» Stahlaluminium |
|---|---|---|---|---|---|
| Durchmesser | mm | 13,26 | 14,31 | 16,6 | 17,5 |
| Bruchlast F | kg | 1764 | 3760 | 1500 | 3390 |
| Gewicht G | kg/km | 292,7 | 432,3 | 498 | 602 |
| G/F | | 0,166 | 0,115 | 0,332 | 0,177 |
| Verhältnis | | 1 | 0,7 | 2 | 1,07 |

[1]) "Proceedings of the Conference on the Electrical Utilization of Aluminium", herausgegeben vom American Institute of Electrical Engineers, New York.

[2]) In Klammern ist der leitwertgleiche Cu-Querschnitt angegeben.

tisch wird Stahlaluminium relativ mehr belastet, so dass der Durchhang kleiner wird.

Im allgemeinen wird für grössere Querschnitte Reinaluminiumseil vorgezogen, einerseits, weil mit Rücksicht auf die normalen Tragwerke die höhere Festigkeit von Stahlaluminium nicht ausgenützt werden kann, anderseits der einfacheren Verbinder wegen. Für Regelleitungen ist die mechanische Festigkeit dank des grossen Querschnittes genügend gross, im Gegensatz zu den dünnen, nur aus 7 Drähten bestehenden Seilen, wo es unter Umständen wünschenswert ist, durch eine Stahlseele die Bruchfestigkeit zu erhöhen.

Es fällt auf, dass in Nordamerika ziemlich viel «weatherproof», also isoliertes Seil für Niederspannungsleitungen verwendet wird. Der Grund liegt darin, dass in gewissen Staaten die Vorschrift besteht, Freileitungshausanschlüsse mit isolierten Leitern zu versehen. Darüber hinaus besitzen sie aber gewisse Vorteile: Die Störanfälligkeit durch fallende Äste und fahrlässige Berührung ist kleiner, die Leiterabstände können kleiner gehalten oder, wie bei Verwendung des nachfolgend beschriebenen «Triplex»-Seils überhaupt aufgehoben werden. Auf der andern Seite bestehen gewisse Nachteile, wie bedeutend höherer Preis, höheres Leitergewicht, beschränkte Lebensdauer (25 bis 30 Jahre). Immerhin scheinen mit der Einführung des «Triplex»-Seils aus Aluminium die Vorteile bedeutend zu überwiegen. «Triplex» besteht aus zwei isolierten Phasenleitern, die um einen blanken Nulleiter geschlagen sind. Für die Phasenleiter wird meistens Reinaluminiumseil verwendet, während der Nulleiter, der zugleich als Tragseil zu dienen hat, aus Stahlaluminium besteht. Die Ersparnis gegenüber einem gewöhnlichen 3-Leiter-Anschluss liegt auf der Hand: Nur der blanke Nulleiter wird abgespannt, während die Phasenleiter direkt an den Klemmen der Hauseinführung angeschlossen werden. Die Kosten für Isolatoren und Armaturen sind also bedeutend geringer. Ein weiterer Vorteil liegt darin, dass die bei straff gespannten, blanken Aluminiumdrähten oder -Seilen manchmal einsetzenden Schwingungen und die damit verbundene Lärmentwicklung nicht auftreten.

### 3. *Bau*

Um weder die Leiter isolieren, noch grössere Leiterabstände wählen zu müssen, verwendet eine Gesellschaft in ihren Verteilleitungen Distanzhalter aus Isoliermaterial, welche das Zusammenschlagen der in einem Abstand von nur 200 mm montierten Seile verhindern. Die so gegenüber isolierten Leitern erzielte Ersparnis wird mit $ 22.5 pro Spannweite (45 m) im dreileitrigen 115/230 V Verteilnetz angegeben.

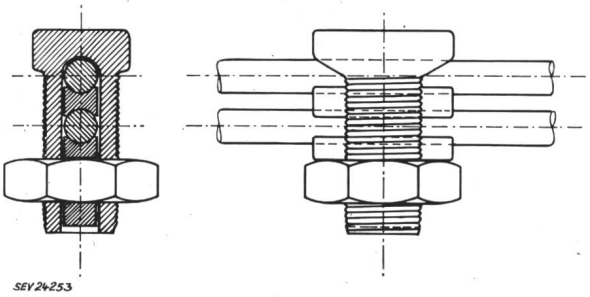



Fig. 2
**«Split-bolt»-Klemme**

Das Einregulieren des Durchhangs wird nach zwei verschiedenen Gesichtspunkten vorgenommen. Einige Gesellschaften regulieren ihre Leitungen unabhängig von Material, Querschnitt oder elektrischer Spannnug nach einer einzigen Durchhangtabelle. Für Aluminium ergeben sich damit für die verschiedenen Querschnitte unter der gesetzlich vorgeschriebenen Zusatzbelastung («heavy loading conditions») Beanspruchungen von 25 bis 35 % der Bruchfestigkeit.

"Heavy loading conditions" nach den vom National Bureau of Standards (U. S. Dept. of Commerce) herausgegebenen "Safety Rules for the Installation and Maintenance of Electric Supply and Communication Lines":

Radiale Eisdicke 12,7 mm
Horizont. Winddruck 19,5 kg/m²
Temperatur —18 °C

Aus dem englischen Masssystem umgerechnet. Zu den aus diesen Bedingungen errechneten Beanspruchungen in kg/m muss addiert werden:

| | |
|---|---|
| — für blanke Leiter aus Cu, Stahl, Cu-Legierungen, Copperweld und Kombinationen dieser Materialien | 0,43 kg/m |
| — für blanke Leiter aus Aluminium (mit oder ohne Stahlseele) | 0,46 kg/m |
| — für isolierte Leiter | 0,46 kg/m |

Andere Gesellschaften regulieren so, dass die Höchstbeanspruchung unter den ungünstigsten Bedingungen

für Stahlaluminium 60 %
für Reinaluminium 50 %
} der Bruchfestigkeit nicht übersteigt.

Eines der grössten Probleme war offenbar die Frage der Verbinder. Am Anfang traten häufig Störungen auf, die aber alle auf ungeeignete Klemmen oder unsachgemässe Montage zurückzuführen waren. Schliesslich erkannten die meisten Gesellschaften, dass mit den Pressverbindern, die übrigens von den grossen Aluminiumfirmen schon immer propagiert wurden, die besten Resultate erzielt werden. Pressverbinder mögen vielleicht in der Anwendung etwas teurer ausfallen,

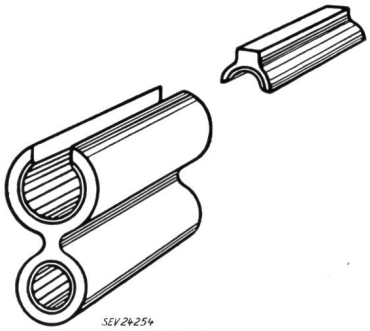



Fig. 3
**Pressabzweigklemme aus Aluminium vor der Montage**

doch sind sie bei vorschriftsgemässer Montage weitaus am sichersten. Für dünne Seile werden Würgverbinder verwendet (auch in der Schweiz in den Leitsätzen für Aluminium-Regelleitungsbau, Publ. Nr. 174 des SEV, beschrieben.

Wo Verbindungen zwischen Aluminium- und Kupferleiter nötig sind, handelt es sich meistens um Abzweigklemmen, z. B. wenn neue Hausanschlüsse mit Aluminium-«Triplex» an bestehende Kupfer-Verteilleitungen angeschlossen werden müssen. Aus preislichen Gründen werden Schraubklemmen vorgezogen und zwar für dünne Seile die sogenannte «Splitbolt»-Klemme, die aus einer geschlitzten Schraube, einem Distanzstück und einer Mutter besteht (Fig. 2). Für dickere

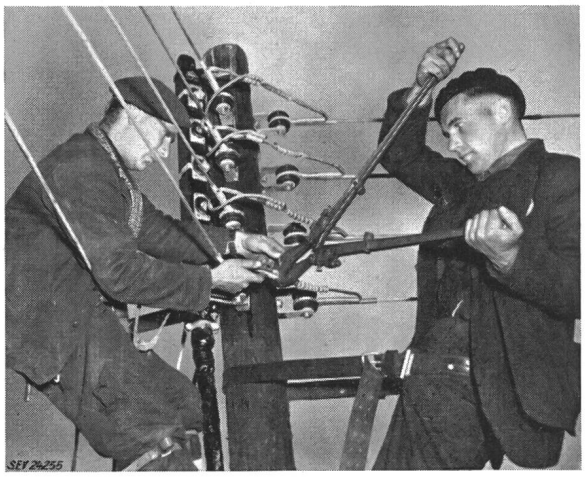



Fig. 4
**Montage der Pressabzweigklemme aus Aluminium**

Seile (ab 53 mm²) kommen Zweischraubenklemmen in Anwendung. Um die Zahl der auf Lager zu haltenden Teile nicht zu vergrössern, werden verzinnte Kupfer- oder Bronzeklemmen verwendet. In bezug auf dauernden, einwandfreien Kontakt sind Pressklemmen (Fig. 3, 4 und 5) allerdings noch zuverlässiger. Die Aluminiumlieferanten bieten ihre Deckelklemmen und Universal-Abzweigklemmen (für Leiter

ungleichen Querschnittes) an, wobei für Al-Cu-Verbindungen, die für Kupfer bestimmte Rille verzinnt ist. Diese Abzweigklemmen, aus einer hochfesten Aluminiumlegierung hergestellt, haben sich ebenfalls sehr gut bewährt. Bei allen

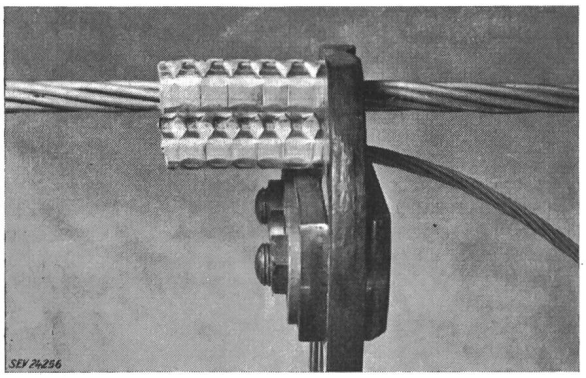



Fig. 5
**Pressabzweigklemme aus Aluminium nach der Montage**

Schraubklemmen, wo der einwandfreie Kontakt zwischen Aluminium und Aluminium gewährleistet sein muss, ist es unerlässlich, die Kontaktflächen nach Bestreichen mit einem leitenden Schutzfett (z. B. Duralox oder Penetrox) mit der Stahldrahtbürste vom Oxydfilm zu befreien.

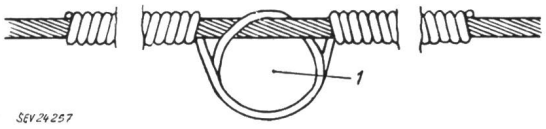



Fig. 6
**Beispiel eines einfachen Seitenbundes**
Windungszahl je nach Seildurchmesser 6 bis 18
Der Isolator ist weggelassen
1 Isolatorachse

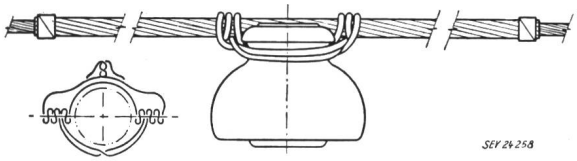



Fig. 7
**Beispiel eines Kopfbundes eines mit «armor-rods» geschützten Seils**

Der bekannte Grundsatz, den Kupferleiter *unter* dem Aluminiumleiter anzuordnen, wird auch in Nordamerika befolgt. Schwierigkeiten wegen Vibration der Leiter treten nicht auf. Auf dem Land, wo die Spannweiten länger sind als in Ortschaften, werden auch bei Regelleitungen die von den grossen Hochspannungsleitungen her bekannten «armor-rods» (um den Leiter verdrillte Aluminiumstäbe) verwendet. Fig. 6 bis 10 zeigen weitere Einzelheiten der amerikanischen Baupraxis.

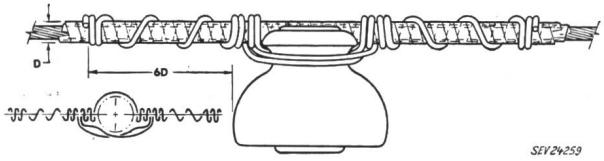



Fig. 8
**Beispiel eines Kopfbundes eines mit Wickelband geschützten Seils**

### 4. *Wirtschaftlichkeit*

Die allgemein unbestrittene Wirtschaftlichkeit der Verwendung von Aluminium ist von der Aluminium Company of Canada anhand eines konkreten Beispiels im einzelnen aufgezeigt worden. Es handelt sich um einen Vergleich der Materialkosten für ein bereits bestehendes Ortsverteilnetz mit Cu-Leitern, basiert auf Angaben der «Ottawa Hydro Electric Commission». Beim Aufstellen der Baukosten des

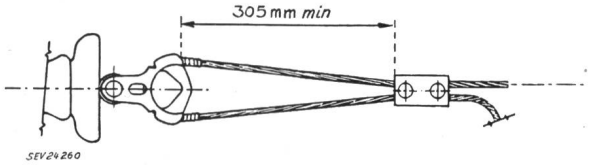



Fig. 9
**Einfache Abspannung für dünne Stahlaluminiumseile,**
wobei an Stelle der Zweischrauben-Deckelklemme eine oder zwei Bügelklemmen (Fig. 10) treten können

Netzes unter Verwendung von Aluminium wurde soweit nur irgendwie möglich, die Linienführung, Anlage und die Art der Zubehörteile des bestehenden Netzes unverändert belassen. In der nachfolgenden Kostenaufstellung sind nur diejenigen Positionen aufgeführt, die für die beiden Bausysteme verschiedene Kosten ergeben. Es handelt sich also nicht um eine Aufstellung, welche die beim Freileitungsbau mit Aluminium mögliche Kosteneinsparung vollständig und in Prozent der totalen Kosten zeigen soll, sondern um einen Vergleich einzelner Posten.

*Vergleich der Leitungsmaterialkosten bei Verwendung von Kupfer oder Aluminium*
Preisbasis: März 1955

Tabelle III

| Pos. | Material | Kostenvergleich in $ Cu | Kostenvergleich in $ Al |
|---|---|---|---|
| | A. *107,2 mm² Cu Primär-Verteilleitung* (4 Leiter pro Strang, gesamte Leiterlänge: 4 Meilen = 6,4 km) | | |
| 1 | Leiterseile | 5 330.00 | 2 520.00 |
| 2 | Verbinder | 7.92 | 3.08 |
| 3 | Bindedraht | 15.03 | 11.00 |
| 4 | Abspannklemmen | 11.65 | 17.32 |
| 5 | Abzweigklemmen | 30.20 | 52.20 |
| | *Total A.* Primär-Verteilleitung | 5 394.80 | 2 603.60 |
| | B. *21,15 mm² Cu Verteilleitungen* (Gesamte Leiterlänge: 7725′ = 2,35 km) | | |
| 6 | Leiter | 4 660.00 | 2 585.00 |
| 7 | Bindedraht | 66.00 | 19.70 |
| 8 | Verbinder | 13.72 | 12.95 |
| | *Total B:* Verteilleitungen | 4 739.72 | 2 617.65 |
| | C. *53,48 mm² isolierte Kupfer-Verteilleitungen* (Gesamte Leiterlänge: 13 600′ = 4,15 km) | | |
| 11 | Leiter | 2 810.00 | 2 025.00 |
| 12 | Bindedraht | 9.32 | 6.05 |
| 13 | Verbinder | 29.90 | 44.70 |
| 14 | Abzweigklemmen | 334.00 | 312.12 |
| | *Total C:* Sekundär-Verteilleitungen | 3 183.22 | 2 387.87 |
| | D. *13,30 mm² isolierte Kupfer-Hausanschlussleitungen* (Total der Leitungslängen: 13 250′ = 4,04 km) | | |
| 15 | Leiter | 2 065.00 | 1 690.00 |
| 16 | Hausisolatoren | 1 152.00 | 348.00 |
| 17 | Abspannklemmen (für Nulleiter) nur für Triplex | — | 53.75 |
| 18 | Verbinder (für Hauseinführung) | 130.00 | 128.00 |
| | *Total D:* Hausanschlüsse | 3 347.00 | 2 255.75 |
| | *Total A, B, C* und *D* | 16 664.74 | 9 864.87 |

Wenn man annimmt, dass das oben aufgeführte Material mit ca. 40 % an den totalen Kosten (ohne Montage) beteiligt ist (die restlichen 60 % für Masten, Durchleitungsrechte, allgemeine Unkosten), so ergibt sich bei diesem Beispiel dank der Verwendung von Aluminium eine Einsparung von ca. 16 % der Leitungsbaukosten. Durch die während des Sommers 1955 eingetretenen Preisänderungen wird das Verhältnis für Aluminium noch günstiger.

Die Wirtschaftlichkeit von Aluminium gegenüber Kupfer liegt aber nicht nur in den kleineren Materialkosten. Neben dem Vorteil, billig zu sein, weist Aluminium noch einen Vorteil auf, der sonst an erster Stelle genannt wird, nämlich sein mehr als dreimal kleineres spezifisches Gewicht. Die da-

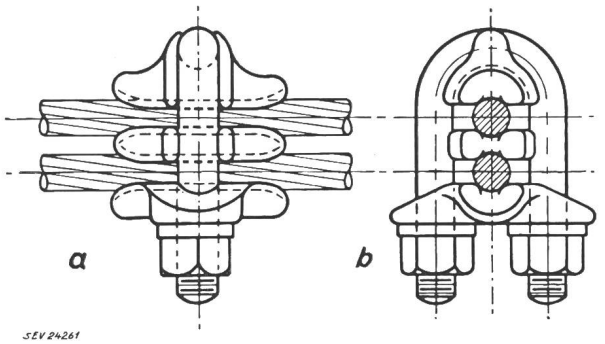



Fig. 10
**Bügelklemme**
*a* Seitenansicht; *b* Ansicht in Leiterachse

durch erzielten Einsparungen an Transportkosten und menschlicher Arbeitskraft sollten ebenfalls in Betracht gezogen werden. *W. G. Geiser*

## Automatische Steuerung und Anzeige bei Stoßspannungsprüfung

621.317.333.8 : 621.316.7.078 : 621.373.43

[Nach *R. F. Saxe:* Automatic Control and Display in Impulse Testing. Proc. Instn. Electr. Engrs. Bd. 102(1955), Part B, Nr. 3, S. 371...374]

Eine automatische Steuerung des Stossgenerators kann die sonst übliche manuelle ersetzen. Die Prüfresultate (Spitzenspannung, Dauer der Welle, Durchschlag) können ohne Zeitverlust von Zeigerinstrumenten abgelesen werden.

Die automatische Steuerung verwendet eine Schaltung von 2 Trioden mit gemeinsamem Kathodenwiderstand. Das Gitter der einen liegt an festem Potential, demjenigen der andern wird über einen Spannungsteiler die Spannung der ersten Stufe zugeführt. Im Ausgangszustand ist die eine Röhre leitend, die andere gesperrt. Wenn die Spannung eine bestimmte gewünschte Höhe erreicht hat, wechselt der Strom von der einen Röhre in die andere. Der Übergang vollzieht sich innerhalb 1 % der Spannung. Ein Relais, das in Serie mit der Anode der einen oder andern Röhre geschaltet ist, löst die Stoßspannung aus.

Zwecks Messung des Spitzenspannungswertes greift man die Welle an einem Spannungsteiler ab und lässt sie über einen Gleichrichter einen Kondensator auf Spitzenspannungswert aufladen. Dieser entladet sich wieder nahezu linear über einen grossen Widerstand, der auf ein Potential führt, das gross ist gegenüber der Spannung am Kondensator. Eine an diesen geschaltete Röhre wird während der Dauer der Ladung gesperrt und erzeugt in der Anode einen Stromstoss. Eine zweite, ähnliche Gleichrichterschaltung ergibt eine Spannung zur Sperrung einer zweiten Röhre, auf welche eine dritte Gleichrichterschaltung folgt. Deren Ausgangsspannung ist proportional zum Spitzenwert der Stoßspannungswelle, dadurch aber, dass die aufeinanderfolgenden Gleichrichterschaltungen zunehmend grössere Zeitkonstanten aufweisen, zeitlich sehr stark gedehnt. Sie wird mittels Röhrenschaltung und Zeigerinstrument gemessen. Die Ablesung kann bei vernachlässigbarem Fehler bis zu einigen Sekunden ausgedehnt werden.

Nach leichter Modifikation kann die beschriebene Schaltung zur Anzeige der Zeit zwischen Stoßspannungsfront und Durchschlag (oder Überschlag) benutzt werden.

Die Schaltungen können kombiniert werden und lassen sich für automatischen Betrieb einrichten, wie: Einzelner Stoss, wiederholte Stösse derselben Spannung, wiederholte Stösse derselben Spannung bis zum Durchschlag.

*M. Morgenthaler*

## Über die maximale Empfindlichkeit von Wheatstone-Brücken

621.317.733

[Nach *P. Jacobs:* Recherche de la précision la plus grande dans les mesures au pont de Wheatstone. Publ. Ass. Ing. Mons Bd. —(1955), Nr. 2, S. 25...36]

Die klassischen Theorien über die Wheatstone-Brücke befassen sich mit der Frage, bei gegebenem Innenwiderstand der Spannungsquelle und gegebener Grösse des zu messenden Widerstandes die optimalen Werte für die drei übrigen Brükkenzweige und für den Galvanometerwiderstand zu bestimmen. Dabei wird aber die wesentliche Voraussetzung gemacht, dass alle in Frage kommenden Galvanometer denselben Wirkungsgrad haben, d. h. dass die kleinste sie durchfliessende Energie, die gerade noch einen merkbaren Ausschlag ergibt, bei allen dieselbe ist. Damit wird die ganze Theorie zu einer blossen Anpassungstheorie, deren Wert rein akademisch ist. Sie versagt bei der Auswahl zwischen zwei konkreten Instrumenten.

Die vorliegende Arbeit gibt die erwähnte Voraussetzung auf und geht von der Stromempfindlichkeit und der Ablesegenauigkeit des Instrumentes aus. Sie gibt Kriterien für die Auswahl aus einer Anzahl Galvanometer.

Die Empfindlichkeit des Instrumentes sei $k = \alpha/i$. ($\alpha$ ist der Ausschlag, in irgend einem Winkelmass, beim Strom $i$. Dieses Winkelmass gilt dann für alle übrigen Winkelangaben.) Zu dieser Empfindlichkeitsangabe gehört der Ablesefehler $1/\nu$, d. h. die Angabe, wieviele Einheiten des Winkelmasses als Ausschlag noch sichtbar sind. Es wird eine Empfindlichkeit des Instrumentes in der Brücke definiert

$$s = \left| \lim_{\Delta R_x \to 0} \frac{\Delta\alpha}{\Delta R_x / R_x} \right|_{\alpha=0} = \left| R_x \frac{\partial\alpha}{\partial R_x} \right|_{\alpha=0}$$

und dazu die relativen Unsicherheiten der Brückenzweige $\varepsilon_n$. Daraus errechnet sich die maximale Unbestimmtheit des zu messenden Widerstandes $R_x$, $\varepsilon_x$, zu

$$\varepsilon_x = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 + 1/\nu\, s$$

Es geht darum, diejenigen Elemente für die Brücke zu wählen, bei denen $\varepsilon_x$ ein Minimum wird. Vorläufig wird angenommen, dass alle verfügbaren Widerstände dieselbe relative Unsicherheit aufweisen, folglich muss $\nu s$ möglichst gross werden.

### *Untersuchung von s*

In der nach Fig. 1 bezeichneten Brücke fliesst der Galvanometerstrom $i = E\,(R_1 R_x - R_2 R_3)/Z$, wobei $Z$ eine Funktion aller Brückenparameter ist. Der Abgleich ist gegeben durch $\alpha = 0$, $i = 0$, $R_1 R_x - R_2 R_3 = 0$. Durch Differentiation ergibt sich

$$s = \left| R_x \frac{\partial\alpha}{\partial R_x} \right| = \left| k\, R_x \frac{\partial i}{\partial R_x} \right| =$$

$$= \left| k\, E\, R_x \; \frac{Z R_1 - (R_1 R_x - R_2 R_3) \dfrac{\partial Z}{\partial R_x}}{Z^2} \right|_{\alpha=0}$$

Bei $i = 0$ entfällt der zweite Teil des Zählers, es bleibt

$$s = \left| kE \frac{R_1 R_x}{Z_0} \right| \quad \text{wobei } Z_0 = Z \text{ bei } i = 0.$$

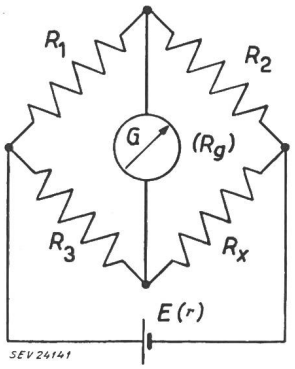



Fig. 1
**Wheatstonesche Brücke**
*E* Spannungsquelle mit dem Innenwiderstand *r*; *G* Galvanometer; $R_1$, $R_2$, $R_3$ gegebene Brückenwiderstände; $R_g$ Innenwiderstand des Galvanometers; $R_x$ unbekannter Brückenwiderstand

Von jetzt an wird nur noch die Brücke im Gleichgewicht betrachtet, und man setzt mit Vorteil $R_2 = mR_x$, $R_3 = nR_x$, $R_1 = mnR_x$, $R_g = gR_x$, $r = pR_x$. Damit wird $s = kE/R_x N$,

worin $N = mn + m(p+1) + n(g+1) + 2(g+p) + pg + 1 + \frac{g}{n}(p+1) + \frac{p}{m}(g+1) + \frac{pg}{mn}$ bedeutet. Man sucht die maximalen Werte von $m$ und $n$ indem man setzt $\partial s/\partial m = \partial s/\partial n = 0$. Als Resultate erhält man:

$$m = \sqrt{p\,\frac{g+1}{p+1}}, \text{ d. h. } R_2 = \sqrt{r\,R_x\,\frac{R_g+R_x}{r+R_x}}$$

$$n = \sqrt{g\,\frac{p+1}{g+1}}, \text{ d. h. } R_3 = \sqrt{R_g R_x\,\frac{r+R_x}{R_g+R_x}}$$

$$mn = \sqrt{p\,g}, \quad \text{d. h. } R_1 = \sqrt{R_g\,r}$$

Wenn die optimalen Werte von $m$ und $n$, die nur von $p$ und $g$ abhängig sind, in $N$ eingesetzt werden, erhält man als maximales $N$ einen Ausdruck, der nur noch von $g$ und $p$ abhängt, so dass

$$s_{max} = E\,k/R_x\,N_{max} = E\,k/\{R_x f(g,p)\}$$

$$f(g,p) = [\sqrt{g} + \sqrt{p} + \sqrt{(g+1)(p+1)}]^2$$

$$f(g,0) = [\sqrt{g} + \sqrt{g+1}]^2 \text{ (wenn } p \ll 1,\ p \ll g).$$

Bei gegebener Spannungsquelle $(E, p)$ und gegebenem $R_x$ hängt nun $s_{max}$ nur noch von dem durch das Galvanometer gegebenen Ausdruck $k/f(g,p)$ ab. Für $f(g,p)$ kann eine Kurvenschar gezeichnet werden, anhand derer für jedes zur Verfügung stehende Galvanometer die maximal erreichbare Brückenempfindlichkeit vorausgesagt werden kann. Das Problem ist theoretisch gelöst.

Die Schwierigkeiten beginnen erst hier, weil sich die Frage stellt, ob die errechneten optimalen Brückenzweige mit den zur Verfügung stehenden Mitteln auch wirklich gut realisiert werden können. Vielleicht ergeben sich so kleine Werte, dass sich Kontaktwiderstände schon allzu sehr bemerkbar machen, oder der passende Widerstand hat zufällig eine grössere relative Unbestimmtheit oder eine kleinere Belastbarkeit als ein anderer, etwas weniger günstiger.

Um ein Bild zu erhalten von der Auswirkung «falsch» gewählter Brückenzweige auf die Empfindlichkeit der Schaltung soll $s$ für $n = m = 1$ berechnet werden (also für den Fall, dass alle Widerstände dem zu messenden gleich gewählt werden). Im Ausdruck $s = kE/R_x N$ wird nun $N(1,1,p,g) = 4(p+1)(g+1) = \varphi(g,p)$. Es lässt sich nun zeigen, dass dieser Wert $\varphi(g,p)$ stets grösser ist als der ideale Wert $f(g,p)$, aber höchstens um einen Faktor 4. Wenn man also alle Brükkenzweige gleich wählt, statt optimal, verringert man die Brückenempfindlichkeit um höchstens diesen Faktor 4, was in den allermeisten Fällen zulässig sein dürfte. Das geeignetste Galvanometer ist jetzt dasjenige, für welches $k/(g+1)$ am grössten wird.

Die Spannungsquelle kann in diesem vereinfachten Falle leicht bestimmt werden: innerhalb der Belastbarkeitsgrenzen der Widerstände sucht man $E/(p+1)$ möglichst gross zu machen.

Im allgemeinen Fall müsste schrittweise approximiert werden: die Wahl von $p$ erst ergibt die Werte für die Brückenzweige, diese schreiben durch ihre Belastbarkeit $E$ vor, wodurch $p$ wieder beeinflusst wird.

Wenn $R_x$ sehr klein ist, kann es wünschbar werden, $n$ und $m$ sogar grösser als 1 zu wählen. Das resultierende $s$ muss dann aus den am Anfang der Arbeit aufgeführten Ausgangsgleichungen direkt berechnet werden.

### *Praktische Gesichtspunkte*

Falls eines der Galvanometer gleichzeitig von allen das grösste $k$ und das kleinste $R_g$ aufweist, dann ist es in jedem Falle das geeignetste.

Die Widerstände wählt man zunächst alle gleich gross wie $R_x$ und bestimmt $s$ für das beste (oder, falls dieses noch nicht bekannt ist, für das vermutlich beste) Galvanometer. Häufig wird $vs$ sofort so gross, dass die Messgenauigkeit nur noch durch die relativen Ungenauigkeiten der Brückenzweige beschränkt ist. In diesem Falle wird man eher nach den definiertesten Widerständen greifen.

Genügt $s$ nicht, dann untersucht man, immer noch für $m = n = 1$, ob ein anderes Galvanometer einen günstigeren Wert von $k/(g+1)$ aufweist, genauer gesagt, man sucht das beste Galvanometer. Für dieses errechnet man wieder $s$.

Erst wenn auch auf diese Weise die Empfindlichkeit nicht ausreicht, empfiehlt es sich, für die Brückenzweige die optimalen Werte einzusetzen. Dabei muss die Suche nach dem geeignetsten Instrument wiederholt werden, diesmal nach den exakten Formeln. Mit Glück kann man auf diese Weise zu einer höchstens viermal grössern Empfindlichkeit kommen.

### *Bemerkungen des Referenten*

Führt auch dies nicht zum Ziel, so bleibt die Möglichkeit zu erwägen, ob nicht ein Satz weniger guter, aber dafür stärker belastbarer Widerstände für die Brückenzweige die Wahl einer grössern Spannung und dadurch die Erzielung eines grössern $s$ erlaubt.

*P. Koch*

---

## Oberflächenvorbehandlung und Lackierung von Blechen in der industriellen Blechverarbeitung

621.79.02 : 669-415

[Nach *W. Anders:* Oberflächenvorbehandlung und Lackierung von Blechen in der industriellen Blechverarbeitung. Metalloberfläche B Bd. 9(1955), Nr. 8, S. 116...118]

Für die Haltbarkeit von Farbanstrichen auf Metallen ist eine absolut saubere Oberfläche — frei von Korrosionsstellen oder Fett und Schmutz — Voraussetzung. Mit dem Rheemcote-Verfahren [nach der Rheem Mfg. Co., South Gate, California, benannt] können dicke Bleche bedruckt und nachher zu Stahltrommeln von 200...250 l Inhalt verarbeitet werden, ähnlich wie dies für die Fabrikation von Konservendosen und dergleichen aus Dünnblechen bereits üblich ist. Die Weichstahlbleche durchlaufen verschiedene Prozesse der Vorbehandlung wie Sandstrahlen, Planwalzen, Reinigen und Phosphatieren. Der Lackfilm wird durch Bedrucken aufgebracht und kann bis zu $^1/_{1000}$ Zoll genau eingestellt werden. Nach dem Einbrennen werden die Bleche verformt, geschweisst, die Schweißstellen phosphatiert und nachlackiert.

Im Gegensatz zum soeben beschriebenen Verfahren behandeln die englische Rotodip-Methode sowie die Methode nach *King* bereits verformte Blechkörper. Durch ständige Rotation der Werkstücke ist die Vorbehandlung auch an den entlegensten Stellen möglich. Während im ersten Fall eine normale Reinigung erfolgt, gelangt im zweiten Fall noch eine Kaltphosphatierung zur Anwendung, welche auch für angerostete Bleche möglich ist. Neuerdings wird versucht, Grundierungen zu verwenden, die beiz- und antikorrosive Wirkung in sich vereinigen und somit eine separate Phosphatierung erübrigen. Auf Aluminium hat man bereits gute Resultate erzielt.

Die säurehärtenden Lacke und die für deren Herstellung in Frage kommenden Harze (Harnstoff-, Melamin-, modifizierte Harnstoff- und Melamin-Alkydharze sowie reine Phenol-Formaldehydharze) sind untersucht worden. Mit verschiedenen Säuren wurde in Gemischen von 10% Säure (100%ig), 17,8% Wasser und 72,2% Sprit die Katalysatorwirkung gegenüber alkydmodifizierten Harnstoffharzen getestet. Ermittelt wurden die Gelierzeit, Staubtrocknung und Filmhärte. Die Beschleunigung der Härtung durch Infrarotbestrahlung, die auch durch *Brügel* untersucht wurde, ergab eine Strahlungsausbeute von 50...60%, wobei im Hellstrahler die Hauptmenge in der Eisenunterlage, beim Dunkelstrahler im Lackfilm selbst adsorbiert.

Für Behälterauskleidungen sind von *Hartmann* Versuche mit Eponlacken durchgeführt worden. Bei Zugabe geeigneter Katalysatoren werden bezüglich Haftfestigkeit, mechanischer Widerstandsfähigkeit und Chemikalienbeständigkeit Resultate erzielt, welche mit den bisherigen Lacken nicht möglich sind. Die Schichtdicken von 0,75...8 mils (1 mil = $^1/_{1000}$ Zoll) werden je nach Auskleidung bei 120...260 °C eingebrannt. Je nach Blechbeschaffenheit ist vor dem Lackauftrag ein Beizen, Sandstrahlen oder Phosphatieren notwendig.

Die Lackierverfahren für Eisenblechfässer sind heute weitgehend auf automatischen Betrieb eingestellt. Nach *Oswand* erfolgt die Vorreinigung und Passivierung in einer 5stufigen Anlage. Die National-Steel Container Corp. prüft die Fässer auf Dichtigkeit, reinigt sie alkalisch, bespritzt sie mit 70 °C warmer Rostschutzlösung und behandelt sie anschliessend mit Chromsäurelösung. Die Lackierung erfolgt, während sich die Fässer in Rotation befinden. Für die Lacktrocknung wird eine Zeit von 10 min bei 150 °C benötigt.

Je nach dem Verwendungszweck sind die Anforderungen an Innenlackierungen von Blechbehältern recht verschieden.

***Fortsetzung des allgemeinen Teils auf Seite 177***
Es folgen «Die Seiten des VSE»