Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens
Herausgeber: Association suisse des électriciens
Band: 32 (1941)
Heft: 9

Artikel: Die progressiv schaltende Schmelzsicherung
Autor: Gantenbein, A.
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1057626

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: 07.08.2025

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

ASSOCIATION SUISSE DES ÉLECTRICIENS

BULLETIN

RÉDACTION:
Secrétariat général de l'Association Suisse des Electriciens et de l'Union des Centrales Suisses d'électricité, Zurich 8

ADMINISTRATION:
Zurich, Stauffacherquai 36 ♦ Téléphone 5 17 42
Chèques postaux VIII 8481

Reproduction interdite sans l'assentiment de la rédaction et sans indication des sources

XXXIIe Année | N° 9 | Vendredi, 9 Mai 1941

Die progressiv schaltende Schmelzsicherung.

Von *A. Gantenbein*, Zürich-Oerlikon.

621.316.923

In Verbindung mit Lasttrennern sowie Schaltern mit begrenzter Abschaltleistung, Schutz von Ueberspannungsableitern usw. gewinnen die modernen Hochleistungssicherungen immer mehr an Bedeutung. Bei den bisher üblichen schnellschaltenden Hochspannungssicherungen tritt im Moment der Verdampfung des Schmelzleiters eine grosse Ueberspannungsspitze auf. Eingehende Versuche führten zur sogenannten progressiv schaltenden Sicherung, bei welcher die gefährlichen Ueberspannungsspitzen vermieden werden können. Der Verdampfungsvorgang mit jeweiligem Durchschlag der isolierend werdenden Teilstücke erfolgt progressiv von der Mitte des Schmelzleiters aus. Die Versuche ergaben im weitern wertvolle Aufschlüsse über den Bau von Sicherungen mit möglichst kleiner Energie-Umsetzung in der Sicherung selbst. Die Abschaltfähigkeit kann dadurch wesentlich gesteigert werden.

Die Einfachheit, Betriebssicherheit, Strombegrenzung, grosse Abschaltfähigkeit, sehr kurze Abschaltzeit und der niedere Anschaffungspreis machen diese moderne Hochspannungssicherung zum idealen Kurzschlußschutz

Les coupe-circuit modernes à grande puissance acquièrent de plus en plus d'importance, en relation avec des sectionneurs capables de couper un circuit sous charge, des disjoncteurs à puissance de coupure limitée, des parasurtensions, etc. Avec les coupe-circuit à haute tension à rupture rapide utilisés jusqu'ici, une forte pointe de surtension se produit à l'instant où le fusible se vaporise. Des essais approfondis ont conduit à la réalisation d'un coupe-circuit à rupture progressive, qui ne provoque plus de pointes de surtension dangereuses. La vaporisation et la rupture des sections du fusible se produisent progressivement à partir du milieu du fusible. Les essais ont également fourni de précieuses indications pour la construction de coupe-circuit dans lesquels la transformation de l'énergie est aussi réduite que possible. Le pouvoir de coupure peut être, de ce fait, sensiblement augmenté.

Leur simplicité, leur sécurité de fonctionnement, leur limitation du courant, leur grand pouvoir de coupure, leur brève durée de déclenchement et leur prix peu élevé font que ces coupe-circuit modernes à haute tension constituent la protection idéale contre les courts-circuits.

Die Schmelzsicherung ist wohl der älteste und zugleich der am meisten angewendete Ueberstromschutz. Trotz ihrer Verwendung seit den Anfängen der Elektrotechnik ist es aber erst in allerletzter Zeit mit Hilfe der neuen technischen Hilfsmittel wie Hochleistungs- und Stossanlage und mit dem Kathodenstrahloszillographen gelungen, den eigentlichen Abschaltvorgang weiter abzuklären. Wer würde z. B. erwarten, dass das blosse Durchschmelzen eines Drahtes in freier Luft, also die erste und primitivste Bauart der Sicherung, ein bezüglich auftretender Ueberspannungen sehr interessanter Vorgang ist. Wer würde auf den ersten Moment glauben, dass mit modernen Sicherungen Abschaltleistungen von mehreren hunderttausend kVA ohne äussere Feuererscheinung bewältigt werden können.

Für die Betriebseigenschaften einer Sicherung sind 3 Grössen von besonderer Bedeutung:

a) Die maximale Stromspitze.

Die modernen Sicherungsarten unterbrechen den Kurzschlußstrom lange bevor er seine erste Amplitude erreicht hat. Der Spitzenwert, den der Strom dabei noch annimmt, ist massgebend für die mechanische Beanspruchung der Sicherung selbst, sowie der im Kurzschlusskreis liegenden Apparate und Leitungsteile. Einesteils wird sie bestimmt durch die Grösse des stationären Kurzschlußstromes im betreffenden Netzpunkt, in dem die Sicherung eingebaut ist und andernteils durch die Lichtbogeneinwirkung der Sicherung selbst. Je nach der verwendeten *Sicherungsart* ist dieser Einfluss sehr verschieden.

b) Die Ueberspannung während des Abschaltvorganges.

Während des Abschaltvorganges treten wie bei jedem Schaltvorgang kurzzeitig Ueberspannungen auf. Der zeitliche Verlauf sowie die Grösse der Ueberspannungsspitzen sind aber wieder stark von der Art der verwendeten Sicherung abhängig.

c) Die Abschaltfähigkeit

ist die Fähigkeit der Sicherung, den entstehenden Kurzschlußstrom sicher zu unterbrechen, ohne dass die dabei freiwerdende Energie die Sicherung zersprengt.

Im folgenden sollen diese 3 Grössen für die hauptsächlichsten Sicherungsarten untersucht werden.

1. Die ursprüngliche Sicherung: Der freie Draht in Luft.

Früher sehr verbreitet, ist sie zufolge der geringen Abschaltleistung im Laufe der Zeit immer mehr verschwunden. Nichtsdestoweniger kann man gerade bei diesem einfachsten Fall einen recht interessanten Vorgang gut beobachten.

Schickt man durch einen in freier Luft gespannten Draht immer grössere Ströme, so wird der Draht zuerst glühend, bis er zum Schmelzen und schliesslich zum Verdampfen kommt. Solange die Ströme nur klein sind, erhitzt sich der Draht verhältnismässig langsam, bis er an einzelnen Stel-

len die Schmelztemperatur erreicht und abschmilzt. Dadurch entstehen kurze Unterbrechungsstellen und es folgt «langsam» ein weiteres Zurückschmelzen des Drahtes bis die nötige Unterbrechungsdistanz erreicht ist. Den Beginn des Durchschmelzens an einzelnen Stellen des Drahtes und die Bildung von Teillichtbogen zeigt Fig. 1 sehr schön.

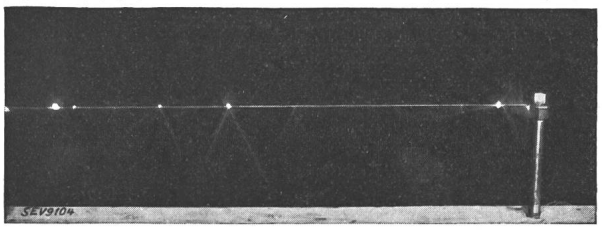

Fig. 1.
Langsames Durchschmelzen des Drahtes, Teillichtbogen an einzelnen Stellen.

Es werden von den einzelnen Durchschmelzpunkten glühende Metalltröpfchen weggeschleudert. Wesentliche Ueberspannungen treten bei diesem Vorgang nicht auf. Wird der Strom grösser, so erhitzt sich der Sicherungsdraht auf der ganzen Länge sehr rasch. Es bleibt zunächst bei der Bildung von Metalltröpfchen. Diese werden aber zufolge des sich bildenden Metalldampfes heftig weggeschleudert. Fig. 2 zeigt einen solchen mit einem Stossgenerator ausgeführten Schmelzvorgang eines 0,2 mm dicken Silberdrahtes. Der nachfolgende Lichtbogen ist hier über die ganze Länge des Drahtes schon mehr oder weniger stark ausgebildet, während in Fig. 1 nur ganz vereinzelte Teil-Lichtbögen sichtbar wurden. Steigert man den Strom weiter, so geht der ganze Vorgang noch rascher

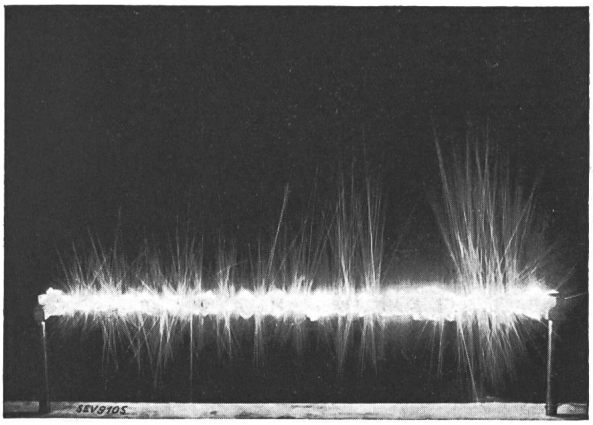

Fig. 2.
Rascher Schmelzvorgang. Lichtbogen über ganze Länge.

vor sich. Die zum Verdampfen nötige Energie ist derart rasch zugeführt, dass sämtliches Schmelzleitermaterial sofort verdampft. Es entstehen gar keine Metalltröpfchen mehr. Fig. 3 ist die photographische Aufnahme eines solchen Vorganges. Bei diesem Schmelz- und Verdampfungsvorgang spielt sich im Stromkreis folgendes ab: Zufolge der Querschnittsverminderung des verdampfenden Drahtes wird ein immer grösser werdender Widerstand in den Stromkreis eingeschaltet. Der entstehende Metalldampf hat zunächst die Verdampfungstemperatur des betreffenden Materials, bei Silber z. B. 2000...2100 °. Nun ist aber Metalldampf bis zu Temperaturen von ca. 3000...3500 ° praktisch ein Isolator. Diese plötzliche Widerstandszunahme und Einschaltung eines isolierenden Metalldampfes in den Stromkreis bedingt nun eine sehr rasche

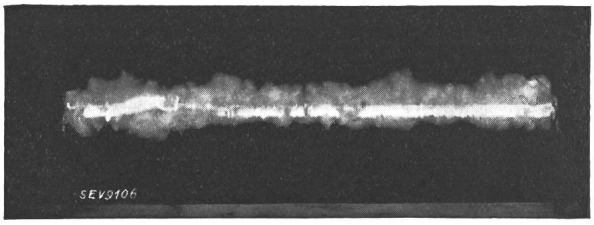

Fig. 3.
Verdampfen des Drahtes.

Abnahme des Stromes und es entsteht an der Induktivität des Stromkreises eine Ueberspannung von der Grösse

$$u_L' = L \cdot \frac{di}{dt}$$

Je grösser die Stromänderung wird, d. h. je rascher die Verdampfung vor sich geht, desto grösser werden die Ueberspannungen. Müsste die in der Induktivität des Stromkreises aufgespeicherte magnetische Energie $\frac{i^2 L}{2}$ vollständig in die Aufladeenergie $= \frac{C \cdot u^2}{2}$ der Leiterkapazität übergeführt werden, so würde die Spannung u ungeheuer gross.[1])

Die an der Sicherung auftretende Ueberspannung ist praktisch durch die Durchschlagspannung der isolierenden Metalldampfsäule bestimmt. Nach dem Durchschlag der Metalldampfsäule entsteht ein Lichtbogen, in dem sich die magnetische Energie der Induktivität vollständig in Wärme umsetzt.

Fig 4 a und 4 b zeigen die Kathodenstrahl-Oszillogramme eines solchen Durchschmelzversuches eines Silberdrahtes von 0,2 mm Durchmesser und 42 cm Länge in freier Luft. Das Oszillogramm 4 a zeigt den Stromverlauf, während das Oszillogramm 4 b die zwischen den Drahteinspannstellen auftretende Spannung wiedergibt. Mit steigendem Strom bleibt die an den Drahtenden auftretende Spannung zunächst praktisch Null. Nach ca. 7 μs (7 Millionstelsekunden) beginnt die Spannung zu steigen. Bei ca. 10 μs hat der Strom das Maximum von ca. 3000 A erreicht und der Draht beginnt ganz plötzlich zu verdampfen. Die Spannung an den Enden des Silberdrahtes steigt sehr schnell auf über 200 kV an. Die Metalldampfsäule ist in diesem Moment ein vollkommener Isolator wie die umgebende Luft. Die Spannung steigt weiter an,

[1]) Siehe Rapport Nr. 131 an die Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques à Haute Tension 1939, «Le processus de la disjonction dans les coupe-circuits et les fusibles à pouvoir de coupure élevé ne provoquant pas de surtensions».

und plötzlich wird die Metalldampfsäule durchschlagen. Es entsteht ein Lichtbogen und die Spannung sinkt plötzlich auf kleine Werte. Das rasche Durchschmelzen eines Drahtes ist also bezüglich der dabei auftretenden Ueberspannung gar nicht ein so harmloser Vorgang wie es auf den ersten

a) Strom.

b) Spannung.

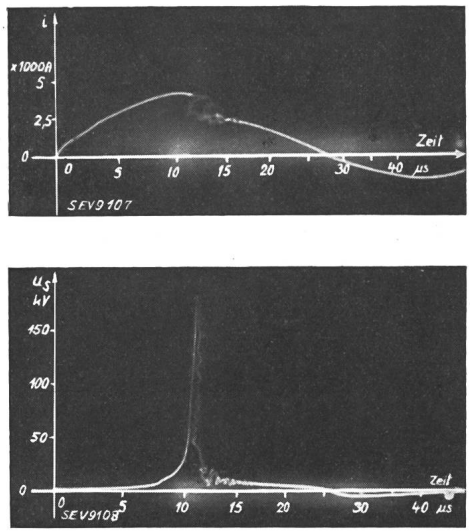

Fig. 4.
Oszillogramme des Verdampfens eines Drahtes von 0,2 mm ∅ und 42 cm Länge.

Moment scheinen mag. Das Wiederzünden eines Lichtbogens in der Metalldampfsäule lässt sich in der photographischen Aufnahme sehr gut festhalten. In Fig. 3 ist in der Metalldampfsäule ein helleres Band sichtbar, das von dem nachfolgenden Lichtbogen erzeugt wird. Auch in der Farbe unterscheidet sich der Lichtbogen von der Metalldampfsäule deutlich.

Es ist klar, dass, sobald eine solche Wiederzündung eingesetzt hat und der Lichtbogen brennt, für die Löschung nur die Brennspannung des Lichtbogens massgebend ist. Diese ist aber verhältnismässig klein und wird zufolge der negativen Charakteristik des Lichtbogens mit wachsendem Strome kleiner, so dass also die Abschaltfähigkeit dieser Sicherung beschränkt bleiben musste. Man ging daher über zu der sogenannten

2. Schaltersicherung.

Durch Schmelzen eines sehr kurzen, zwischen zwei Schalterkontakten gespannten Drahtes wird ein Lichtbogen eingeleitet, welcher durch eine mechanische Auseinanderbewegung der Kontakte auf die zur Unterbrechung nötige Länge ausgezogen wird. Die Löschung erfolgt dabei wie bei einem Schalter im natürlichen Stromnulldurchgang. Eine *Begrenzung des Kurzschlußstromes* findet nicht statt, da die Lichtbogenspannung sehr klein ist. Der von der Sicherung abzuschaltende Strom entspricht somit dem Kurzschlusstrom des Netzes. Bezüglich auftretender *Ueberspannung* beim Abschaltvorgang verhält sich diese Sicherung wie ein Leistungsschalter. Die wiederkehrende Spannung kann, wenn man von Dämpfung und Lichtbogenspannung absieht, maximal auf den doppelten Amplitudenwert aufschwingen. Die Steilheit des Ansteigens der wiederkehrenden Spannung ist durch die Eigenfrequenz des Netzes gegeben. Die *Abschaltfähigkeit* ist sehr beschränkt, auch wenn der Lichtbogen nur eine Halbwelle, d. h. bei 50 Per./s ca. $^1/_{100}$ s brennt.

3. Sicherung mit gasabgebenden Stoffen.

Die ursprüngliche Form ist die Röhren- oder Auspuffsicherung. Das Rohr, in welchem der Schmelzdraht in freier Luft gespannt ist, besteht aus gasabgebenden Stoffen, z. B. Fiber, Hartgummi etc. Später wurden diese Rohre noch mit Stoffen, die unter der Lichtbogeneinwirkung Gas abscheiden, z. B. mit Kreidemehl, Borax etc. gefüllt. Beim Durchschmelzen mit grossen Strömen entstehen die in Abschnitt 1 beschriebenen Ueberspannungen. Da aber die Drahtlänge normalerweise kurz ist, ist auch die Durchschlagspannung der Metalldampfsäule entsprechend kleiner, so dass die Ueberspannung in mässigen Grenzen bleibt. Die Lichtbogenspannung ist auch bei dieser Sicherung klein. Der Strom steigt daher nach dem Verdampfen des Drahtes weiter an und erlöscht erst im natürlichen Nulldurchgang. Eine *Begrenzung des Kurzschlußstromes* findet damit *auch hier nicht* statt. Die beim Löschen des Stromes auftretende Ueberspannung entspricht der normalen Sicherung, wie unter Abschnitt 2 beschrieben. Die Abschaltleistung ist begrenzt, beträgt aber doch schon einige 10 000 kVA. Charakteristisch für diese Sicherung sind zwei kritische Stromgrenzen. Die eine liegt bei zu kleinem Strom, wo der Lichtbogen infolge der geringen Gasentwicklung nur schlecht löscht, die andere bei zu grossem Strom, wo infolge der starken Gasentwicklung der Druck zu gross wird und das Rohr platzt.

4. Sicherung mit nicht gasabgebenden Stoffen.

Als Löschmittel wird ein nicht gasabgebender Stoff, z. B. Quarzsand, Zirkon-, Aluminium-Oxyd etc. verwendet. Die erste Ausführung dieser Sicherung ist die bekannte Stöpselsicherung für Niederspannungen. Diese wurden im Verlaufe der Zeit für Hochspannung weiterentwickelt. Das, was diese Sicherung von den früher genannten Sicherungsarten ganz wesentlich unterscheidet, ist die in der Sicherung entstehende hohe Lichtbogenspannung, die den Stromverlauf massgebend beeinflusst. Der Strom steigt daher nach dem Verdampfen des Drahtes nicht mehr weiter an. Die maximale Stromspitze erreicht also nur den Wert, auf den der Strom bis zum Verdampfen des Schmelzleiters ansteigen kann. Wir nennen ihn daher auch kurz Verdampfungsstrom. Er ist meist viel kleiner als die Amplitude des stationären Kurzschlusstromes, wodurch nicht nur die Anlage vor starken dynamischen Stromwirkungen geschützt, sondern auch die in der Sicherung freiwerdende Energie begrenzt wird. Dadurch lassen sich mit dieser Sicherung auch viel grössere Schaltleistungen bewältigen als mit den vorher beschriebenen. Der weitere

Vorzug, dass die ganze Abschaltung ohne äussere Feuererscheinung vor sich geht, veranlasste die Konstrukteure, sich in der Hauptsache nur noch dieser schnellschaltenden Sicherung zuzuwenden.

Der erste Vorgang beim Durchschmelzen des Sicherungsdrahtes ist praktisch derselbe wie beim freien Draht in Luft. Bei einem Kurzschluss steigt der Strom zunächst an bis der Draht schmilzt und verdampft. Wir nennen diese maximale Stromspitze kurz «Verdampfungsstrom». Es entsteht die bereits früher beschriebene hohe Ueberspannungsspitze, die die Metalldampfsäule durchschlägt. Der entstehende Lichtbogen brennt nun aber nicht mehr in freier Luft, sondern in den Hohlräumen des umgebenden Löschmittels. Infolgedessen wird der Lichtbogen stark «gequält». Seine Brennspannung ist entsprechend gross, der Strom nimmt dauernd ab, und im nächsten Nulldurchgang erlöscht der Lichtbogen. Da der Lichtbogenwiderstand gross ist, entspricht der Spannungsverlauf in diesem Moment einer Wechselstrom-Abschaltung mit vorwiegend ohmschem Widerstand, d. h. cos $\varphi = 1$. Bei dieser Sicherungsart tritt die grösste Ueberspannung im Moment des Verdampfens des Sicherungsdrahtes auf. Im Löschmoment findet ein ganz harmloser, praktisch stetiger Uebergang in die normale Spannung statt.

Wir wollen hier nun kurz auf die drei charakteristischen Betriebsgrössen dieser Sicherung etwas näher eingehen.

a) Maximale Stromspitze.

Die maximale Stromspitze berechnet sich aus der Differentialgleichung für die Erwärmung des Schmelzdrahtmetalles:

$$\int_{\vartheta=0}^{\text{Verdampfung}} \frac{dQ}{\varrho} = \frac{1}{q^2} \int_{i=0}^{i_v} i^2 \cdot dt$$

Der Ausdruck $\frac{dQ}{\varrho}$ bedeutet die dem Metall pro Gewichtseinheit zugeführte Wärme, dividiert durch den spez. Widerstand bei der jeweils herrschenden Temperatur. Sein Integral von der Ausgangstemperatur 0 bis zur Verdampfung kann für ein gegebenes Metall ohne grosse Schwierigkeit berechnet werden. Auf der rechten Seite ist der zeitliche Verlauf des Stromes i durch die Spannung und die Impedanz des Kurzschlusskreises sowie dem Schaltmoment gegeben. Der Verdampfungsstrom i_v, der als obere Grenze des Stromintegrals auftritt, ist die einzige Unbekannte der Gleichung und kann somit aus ihr berechnet werden. Für die Einschaltung im Spannungsmaximum, d. h. in dem für die Sicherung ungünstigsten Einschaltmoment, errechnet sich der Verdampfungsstrom zu:

$$i_v = 155 \cdot q^{2/3} \cdot \sqrt[3]{f \cdot I_k}$$

für 50 Per./s wird:

$$i_v = 570 \cdot q^{2/3} \cdot \sqrt[3]{I_k}$$

Darin bedeuten:

i_v die maximale Stromspitze, kurz Verdampfungsstrom genannt,
q den Querschnitt des Schmelzdrahtes oder der Schmelzdrähte in cm²,
f die Frequenz des Wechselstromes,
I_k den Effektivwert des Kurzschlußstromes, der ohne Sicherung im betreffenden Netzpunkt erreicht würde.

Diese Formel gilt nur solange, als i_v klein gegenüber I_k ist. Der Verdampfungsstrom i_v steigt also nur mit der dritten Wurzel des Kurzschlussstromes an, d. h. er nimmt mit grösserer Netzleistung nur sehr wenig zu. Zur besseren Darstellung dieses Zusammenhanges ist in Fig. 5 der grösste erreichte Verdampfungsstrom i_v in Abhängigkeit des Kurzschlußstromes I_k, aufgetragen.

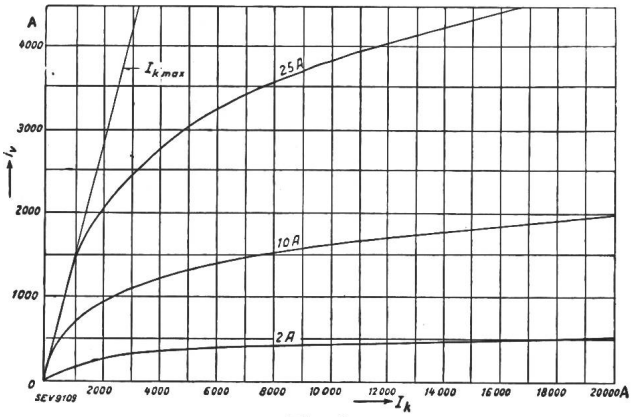

Fig. 5.
Verdampfungsstrom i_v in Abhängigkeit vom Effektivwert des Netz-Kurzschlußstromes I_k.

Für eine 2-A-Sicherung steigt beispielsweise in einem 10-kV-Netz, mit einer Kurzschlussleistung von 300 000 kVA, der Verdampfungsstrom nicht höher als auf ca. 520 A. Der Vorteil der Sicherung gegenüber dem Schalter tritt dadurch klar hervor. Die vielen durchgeführten Versuche ergaben, dass die berechneten Werte mit den gemessenen sehr gut übereinstimmen.

b) Ueberspannungsspitze.

Die Ueberspannungsspitze entsteht, wie bereits erwähnt, beim raschen Verdampfen des Schmelzdrahtes. Die entstehende Ueberspannung $u_L = L \cdot \frac{di}{dt}$ wird sehr gross, so dass sie praktisch durch die Durchschlagspannung der Metalldampfsäule gegeben ist. Sie kann deshalb auch nicht berechnet werden, sondern lässt sich nur durch Versuche bestimmen. Wir haben nun mit Hilfe des Kathodenstrahl-Oszillographen untersucht, wie die Höhe der Ueberspannungen von den verschiedenen Grössen abhängt. Den wesentlichsten Einfluss spielt wohl die Länge des Schmelzleiters, und zwar nimmt mit grösserer Drahtlänge die Ueberspannung proportional zu. Es wäre deshalb erwünscht, die Sicherung mit möglichst kleiner Drahtlänge zu bauen. Nun ist aber die Schmelzleiterlänge durch die Forderung der grossen Abschaltleistung nach unten

begrenzt. Die Drahtlängen müssen derart bemessen werden, dass die entstehenden Ueberspannungen auf das Mehrfache der Betriebsspannung ansteigen. Fig. 6 zeigt das Schleifen- und Kathodenstrahloszillogramm einer solchen Abschaltung. Im Moment 1 beim Schleifen-Oszillogramm 6 a wird

a) Schleifen-oszillogramm

b) Kathoden-strahloszillo-gramm

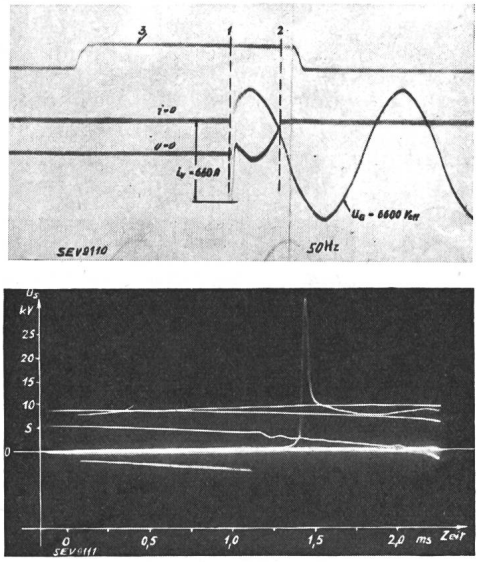

Fig. 6.
Abschaltung durch Sicherung.

der Kurzschluss eingeleitet. Der Verdampfungsstrom i_v erreicht den Wert von 660 A und sinkt dann rarsch wieder auf weniger als die Hälfte ab. Im Moment 2 erfolgt die definitive Löschung des Stromes. In der Spannungskurve ist im Löschmoment praktisch keine Unstetigkeit zu sehen.

Fig. 6 b zeigt das zugehörige Kathodenstrahl-Oszillogramm. Alle Kathodenstrahl-Oszillogramme sind, ausser bei Stossversuchen, mit linearem Zeitmaßstab so aufgezeichnet, dass der schreibende Strahl mehrmals nacheinander von links nach rechts verläuft. Man hat sich übereinanderliegende Kurvenstücke von links nach rechts aneinandergereiht vorzustellen. Aus dem Oszillogramm 6 b erkennt man, dass die Grösse der Ueberspannungsspitze ca. 37 kV ist, wobei die Scheitelspannung des Wechselstromes ca. 10 kV beträgt. Die Steilheit des Spannungsanstieges der Ueberspannungsspitze ist sehr gross. Die theoretisch grösstmögliche Steilheit des Anstieges der Spannung beim Verdampfen des Sicherungsdrahtes ist gegeben durch die Eigenfrequenz des Kurzschlusskreises und die Grösse der Spannung, die beim Aufladen der Netzkapazität C entstehen würde. Dies ist dann der Fall, wenn die Sicherung plötzlich isolierend wird. Der Strom i_v fliesst dann zufolge des grossen Spannungsanstieges durch die Kapazität C, parallel zur Sicherung, welche durch die Leiterteile gebildet wird. Der Verdampfungsstrom i_v würde dabei gleich dem Kapazitätsstrom $i_C = C \cdot \frac{du}{dt}$. Bei den praktisch vorkommenden Netzkapazitäten ist aber der Spannungsanstieg an der Sicherung durch die Raschheit der Widerstandszunahme des Schmelzleiters bedingt. Wir haben unter dieser Voraussetzung die Steilheit des Spannungsanstieges $\frac{du}{dt}$ berechnet und gefunden, dass sie abhängig ist von der Netzspannung U und von der dritten Potenz der erreichten Spannungshöhe. Das Ziel beim Bau von Sicherungen muss also in erster Linie die Bekämpfung dieser Ueberspannungsspitze sein.

c) Abschaltfähigkeit.

Nach dem Durchschlag der Metalldampfsäule beginnt der eigentliche Lichtbogenvorgang. Der Strom ist auf den sogenannten Verdampfungsstrom angestiegen, und der weitere Stromverlauf ist nun durch die Lichtbogenspannung selbst bedingt. Soll der Strom nicht mehr weiter ansteigen, dann muss die Lichtbogenspannung mindestens gleich gross wie die treibende Spannung u_G sein. Es gilt in jedem Moment die Gleichung:

$$u_G = u_L + u_S$$

u_G Generatorspannung
u_L Spannung an der Induktivität L
u_S Spannung an der Sicherung.

Die totale in der Sicherung freiwerdende Energie während der Brennzeit des Lichtbogens ist

$$W = \int_{t_1}^{t_2} i \cdot u_S \cdot dt = \int_{t_1}^{t_2} i \cdot u_L \cdot dt + \int_{t_1}^{t_2} i \cdot u_G \cdot dt$$

d. h. gleich der magnetischen Energie plus der Generatorarbeit während der Lichtbogendauer.

t_1 Beginn des Lichtbogens
t_2 Ende des Lichtbogens.

Der erste Teil des Integrals:

$$\int_{t_1}^{t_2} i \cdot u_L \cdot dt = \frac{i_v^2 U_L}{2}$$

ist die zu Beginn des Lichtbogens in der Induktivität aufgespeicherte Energie und somit unabhängig von der Schaltdauer.

Der zweite Teil:

$$\int_{t_1}^{t_2} i \cdot u_G \cdot dt$$

ist die vom Generator in den Lichtbogen gelieferte Arbeit und somit von der Schaltdauer abhängig. Um diese Arbeit auf ein Minimum zu reduzieren, sollte der Strom rascher abnehmen als dem normalen Stromverlauf entspricht. Die Lichtbogenspannung muss daher stets grösser als die Generatorspannung sein. Die Brennspannung wird nun aber durch das Füllmittel und die Länge des brennenden Lichtbogens stark beeinflusst. Wird die Drahtlänge gross gemacht, so wird auch die Lichtbogenspannung gross, dafür nimmt aber die Ueberspannungsspitze im Moment des Ver-

dampfens zu, was wieder unerwünscht ist. Bei den bisher verwendeten Sicherungen handelt es sich daher stets darum, einen Kompromiss zwischen der auftretenden Ueberspannungsspitze und der Energie-Umsetzung in der Sicherung zu finden. Das eigentliche Problem der Verbesserung besteht aber darin, durch zweckmässige Steuerung des Widerstandsverlaufes während des Verdampfungs- und Lichtbogenvorganges in der Sicherung, *beides zu reduzieren.* Die Lösung führt zur sogenannten

5. progressiv schaltenden Sicherung.

Wie man sah, entsteht die Ueberspannungsspitze beim gleichzeitigen Verdampfen des Schmelzleiters über dessen ganze Länge. Man kann nun die Ueberspannung dadurch herabsetzen, dass man den Schmelzleiter nicht auf der ganzen Länge gleichzeitig verdampfen lässt, sondern kontinuierlich von einer Stelle aus. Man kommt daher zu einem Schmelzleiter, der in Fig. 7 gezeigt ist. Er besteht aus einem dünnen Silberband, das von der Mitte nach beiden Enden breiter wird.

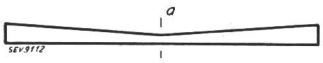

Fig. 7.
Schmelzleiter der progressiv schaltenden Sicherung.

Die Verdampfung erfolgt dann zuerst an der schwächsten Stelle «*a*» und damit die Zündung nur eines kurzen Lichtbogens. Darauf schreitet die Verdampfung längs des Schmelzleiters nach den beiden Enden fort, und die Lichtbogenlänge nimmt kontinuierlich zu. Wir haben *die progressiv schaltende Sicherung* vor uns. Ausgesprochene Ueberspannungsspitzen entstehen überhaupt nicht mehr.

a) Schleifenoszillogramm

b) Kathodenstrahloszillogramm

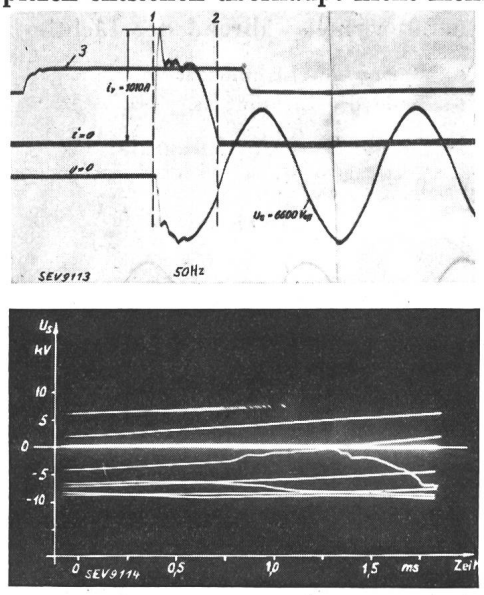

Fig. 8.
Abschaltung durch progressiv schaltende Sicherung.

Fig. 8 zeigt das Schleifen- und Kathodenstrahl-Oszillogramm einer solchen progressiv schaltenden Sicherung. Die Netzkonstante war genau dieselbe wie bei der in Fig. 6 gezeigten Abschaltung mit gewöhnlichem Schmelzleiter. Im Moment 1 (Fig. 8 a) beginnt der Kurzschlußstrom, im Moment 2 ist die Abschaltung vollständig beendet. Fig. 8 b gibt das Kathodenstrahl-Oszillogramm wieder. Der Scheitelwert der Wechselspannung wird nirgends überschritten. Das Oszillogramm zeigt wieder die praktisch rein ohmsche Abschaltung im Nulldurchgang des Stromes. Strom und Spannung sind in Phase. Eine idealere Abschaltung ist nicht denkbar.

Wir haben diese progressiv schaltende Sicherung auch bei grossen Stoßströmen untersucht. Der Unterschied der gewöhnlichen Sicherung gegenüber der progressiv schaltenden Sicherung geht

a) Strom

b) Spannung

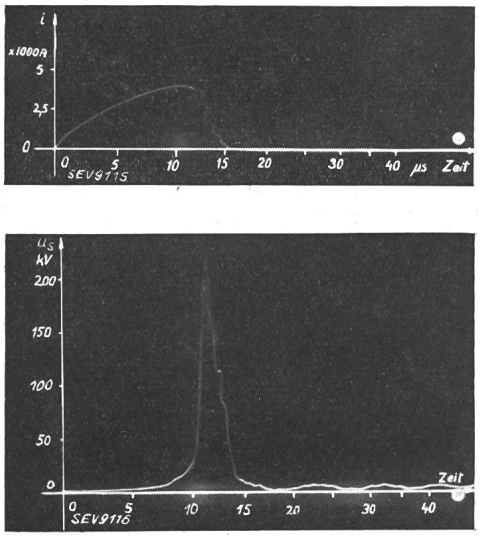

Fig. 9.
Kathodenstrahloszillogramme eines Durchschmelzversuches eines Silberdrahtes in Quarzsand bei Stoss.

sehr deutlich aus den beiden Kathodenstrahl-Oszillogrammen der Fig. 9 und 10 hervor. Fig. 9 a gibt den Stoßstrom-, Fig. 9 b die an der Sicherung auftretende Spannung wieder. Der Schmelzleiter war ein in Quarzsand eingebetteter Silberdraht. Die Ueberspannungsspitze, d. h. die Durchschlagspannung der Metalldampfsäule ist praktisch dieselbe wie beim freien Draht in Luft. Die Brennspannung des Lichtbogens ist aber recht gross, und die gesamte Stossenergie wird in der Sicherung vernichtet. Der Strom wird in wenigen Millionstelsekunden von ca. 3300 A auf Null herabgedrückt. Der Zusammenhang zwischen der Ueberspannungsspitze, bedingt durch die grosse Stromänderungsgeschwindigkeit gemäss der Beziehung $u = L \cdot \frac{di}{dt}$, geht aus diesen Oszillogrammen sehr schön hervor. Fig. 10 a und 10 b zeigen das Durchschmelzen eines Silberbandes der progressiv schaltenden Sicherung in freier Luft. Man erkennt, dass die Spannung an der Sicherung lange nicht mehr so hoch ansteigt. Eine eigentliche Ueberspannungsspitze tritt überhaupt nicht mehr auf.

Sehr interessant sind auch die mechanischen Wirkungen des raschen Verdampfens des Silberdrahtes auf den Quarzsand. Dieser wird in der nächsten Umgebung des Drahtes direkt pulverisiert.

Aus diesen Versuchen können wertvolle Schlüsse bezüglich der mechanischen Beanspruchung der Sinterraupe und des günstigen Aufbaues der Sicherung für grosse Abschaltleistungen gezogen werden.

a) Strom

b) Spannung

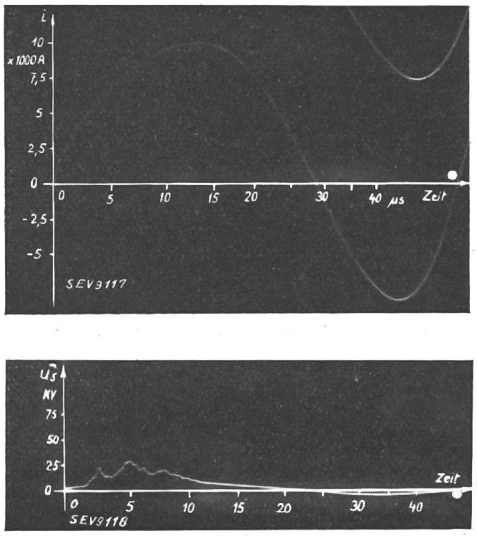

Fig. 10.
Kathodenstrahloszillogramme eines Durchschmelzversuches einer progressiv schaltenden Sicherung in freier Luft bei Stoss.

Bei Sicherungen für kleine Stromstärken ist die Konstruktion mit Schmelzbändchen mit kontinuierlich veränderlichem Querschnitt aus mechanischen Gründen nicht mehr ausführbar. In diesem Fall wird der dünne Schmelzdraht an einzelnen Stellen mit anderm Metall legiert, so dass die Schmelz-, bzw. Verdampfungstemperatur nicht mehr über der ganzen Schmelzleiterlänge dieselbe ist. Der Draht schmilzt dann ebenfalls nicht mehr auf der ganzen Länge gleichzeitig durch.

Im weitern kann die Lichtbogenspannung durch entsprechende Dimensionierung der Schmelzleiterlänge, bzw. Wahl des Füllmittels so gesteuert werden, dass die in der Sicherung freiwerdende Energie ein Minimum wird.

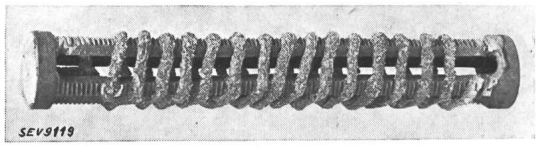

Fig. 11.
Schmelzraupe.

Diese Sicherungen beherrschen eine Abschaltleistung von mehreren 100 000 kVA einwandfrei. Da das Füllmittel kein Gas abgibt, entsteht auch kein nennenswerter Druck in der Sicherung. Die frei werdende Energie bringt den Quarzsand zum Schmelzen und zum Zusammensintern. Es bleibt daher nach der Abschaltung an Stelle des Schmelzleiters eine sogenannte Schmelz-, bzw. Sinterraupe zurück. Fig. 11 gibt eine solche Schmelzraupe wieder. Der Schmelzdraht war spiralförmig auf einen keramischen Träger aufgewickelt, um die nötige Länge in kleinem Raum unterzubringen. Betrachtet man eine solche Schmelzraupe mit dem Mikroskop, so erkennt man die zusammengeschmolzene Quarzmasse mit unendlich vielen kleinen Hohlräumen, in denen ganz fein das geschmolzene Silber in kolloidaler Form eingebettet ist.

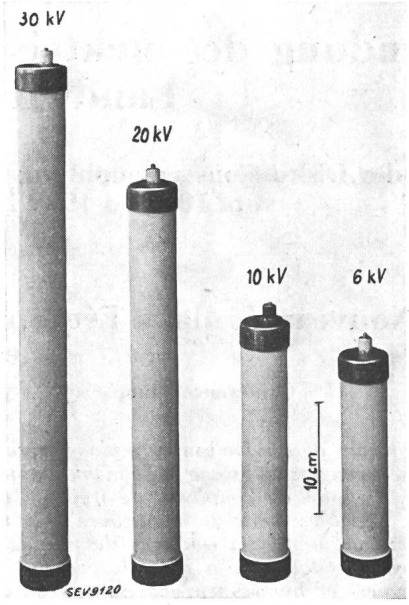

Fig. 12.
Progressiv schaltende Sicherungen für 25 A Nennstrom.

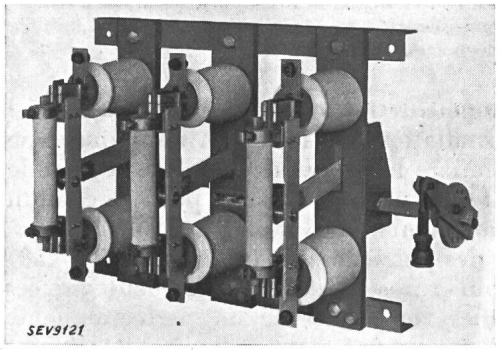

Fig. 13.
Progressiv schaldende Sicherungen als Trennsicherung.

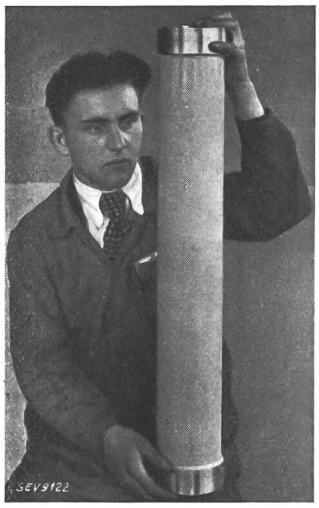

Fig. 14.
Progressiv schaltende Sicherung 100 A, 15 kV.

Die äusseren Abmessungen dieser Sicherungen werden bis zu Stromstärken von ca. 25 A recht bescheiden, wie dies Fig. 12 zeigt. Sie lassen sich, wie aus Fig. 13 zu ersehen ist, sehr gut als Trennsicherung kombinieren, wobei die Sicherung mittels Isolierzange ausgewechselt werden kann.

Es ist im weitern bemerkenswert, dass

sich dieselbe Sicherungsart mit Erfolg von 100 bis 100 000 Volt verwenden lässt. Auch bei der bisher üblichen Niederspannungs-Sicherung von 200...500 Volt lässt sich die Uebergangsspitze mit der progressiv schaltenden Sicherung vermeiden.

Den weiteren Fortschritt im Bau von Sicherungen für grosse Stromstärken zeigt Fig. 14. Es ist dies eine Sicherung für 100 A und 15 000 V Nennspannung.

Anwendung des elektrischen Antriebes in Industrie, Gewerbe, Landwirtschaft und Haushalt.

Bericht

über die Diskussionsversammlung des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins (SEV) vom 10. Juni 1939 in der Eidg. Techn. Hochschule in Zürich.

(Fortsetzung von Seite 174 und Schluss.)

Nouveautés dans l'équipement électrique d'installations de levage et de manutention.

Conférence donnée lors de l'assemblée de discussion de l'ASE du 10 juin 1939

par *G. Rochat*, Baden.

621.34 : 621.86

Les conditions de service toujours plus sévères auxquelles sont soumis les engins de levage et de manutention nécessitent entre autre l'emploi de couplages de freinage électrique et d'appareils réglables pour la manœuvre des freins mécaniques. L'auteur étudie un couplage de freinage mis sur le marché il y a quelque temps déjà, le couplage de freinage combiné hyper- et hypo-synchrone, sans position de chute libre. Ce nouveau couplage, combiné avec l'emploi du contrôleur à cames et du vérin électro-hydraulique — qui sont également décrits brièvement — permet d'améliorer la capacité horaire des installations de manutention tout en augmentant leur sécurité de service et en réduisant leurs frais d'entretien au minimum.

Die immer strengeren Betriebsbedingungen, denen die Hebezeuge unterworfen werden, nötigen u. a. zur Anwendung von Bremsschaltungen und von regelbaren Apparaten für die Betätigung der mechanischen Bremsen. Der Autor beschreibt eine Bremsschaltung, die bereits vor einiger Zeit auf den Markt gekommen ist, nämlich die kombinierte über- und untersynchrone Bremsschaltung, die keine Freifallstellung enthält. Diese neue Schaltung, die mit der Verwendung von Kurvenscheibenkontroller und elektrohydraulischem Drücker — beides ebenfalls kurz beschrieben — kombiniert ist, gestattet, die Umschlagsleistung der Hebezeuge zu vergrössern bei gleichzeitiger Steigerung der Betriebssicherheit und Reduktion der Unterhaltskosten.

L'augmentation constante de la capacité horaire des installations de levage et de manutention, due en première ligne à la nécessité de réduire le temps d'escale des navires dans les ports, a conduit à une forte augmentation des puissances installées. De nos jours, des puissances de levage de 150 à 250 kW ne sont plus rares et il est bien évident que ces fortes puissances ont nécessité un perfectionnement des dispositifs de freinage et de sécurité. A titre d'exemple, je voudrais mentionner que les installations d'extraction dans les mines travaillent aujourd'hui couramment à des vitesses atteignant 25 m/s, c'est-à-dire 90 km/h. Ce chiffre seul permet de se faire une idée des dispositifs de freinage et de sécurité nécessaires.

Si, dans le domaine des engins de levage, les vitesses ne sont pas aussi grandes, le service est, par contre, beaucoup plus chargé et la fréquence des manœuvres atteint plusieurs centaines à l'heure. La charge doit pouvoir être conduite avec une sécurité parfaite au-dessus de navires, de wagons, de places de stock, etc. Le temps accordé à l'entretien de l'engin devient toujours de plus en plus court. Seule, la commande électrique, simple, élégante et sûre, permet de remplir des conditions de service aussi sévères.

A l'aide d'une figure, je voudrais décrire un engin de levage à grande puissance, en service dans le port du Rhin à Bâle, et exposer grâce à quels moyens la commande électrique permet de remplir les conditions de service que je viens de mentionner.

La fig. 1 montre une grue pivotante à flèche mobile, montée sur un semi-portique roulant. Ce

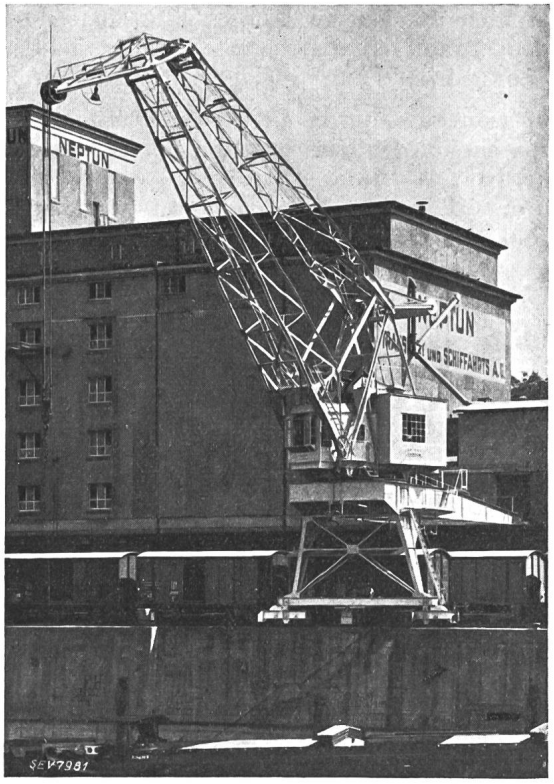

Fig. 1.
Grue pivotante à portique dans le port du Rhin à Bâle.