**Zeitschrift:** Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

**Herausgeber:** Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

**Band:** 42 (1951)

**Heft:** 16

**Artikel:** Elektronische Steuerung von Widerstandsschweissmaschinen

**Autor:** Opprecht, P.

**DOI:** https://doi.org/10.5169/seals-1061011

**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:** 08.08.2025

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

42. Jahrgang Nr. 16 Samstag, 11. August 1951

# BULLETIN

## DES SCHWEIZERISCHEN ELEKTROTECHNISCHEN VEREINS

# Elektronische Steuerung von Widerstandsschweissmaschinen

Von *P. Opprecht*, Unter-Engstringen

621.38:621.791.736

*Mit der Einführung der elektronischen Steuerung für Widerstandschweissmaschinen konnten die bekannten Schweissmethoden sowohl bezüglich Qualität als auch Produktion weitgehend verbessert werden. Anderseits eröffnet diese Steuerung neue Möglichkeiten, so dass die Schweisstechnik heute vielfach in der Lage ist, für sehr schwierige Probleme eine Lösung herbeizuführen.*

*In der Arbeit werden die elektronische Asynchron- und insbesondere die Synchronsteuerung für 1phasigen Netzanschluss behandelt, die für Punkt-, Naht-, Pulsations- und Programmschweissung Anwendung finden kann.*

*Endlich kommt der Autor noch auf den 3phasigen Netzanschluss für Maschinen grösserer Leistung mittels elektronischem Frequenzwandlergerät zu sprechen. Die damit erzielbaren grossen Vorteile wie Belastungssymmetrie, reduzierte Leistungsaufnahme, verbesserter Leistungsfaktor und die vorzüglichen Schweisseigenschaften werden im einzelnen diskutiert.*

*L'introduction de la commande électronique des machines à souder par résistance a permis d'améliorer considérablement les méthodes de soudage, tant au point de vue de la qualité des soudures, que de la capacité de production. Ce mode de commande offre en outre de nouvelles possibilités, de sorte que la technique du soudage peut désormais résoudre des problèmes particulièrement compliqués.*

*Exposé de la commande électronique asynchrone et synchrone pour branchement en monophasé au réseau et de ses applications au soudage par points, à la molette, par pulsations et à programme.*

*Branchement en triphasé de machines à souder de grande puissance, au moyen d'une commande électronique avec transformateur de fréquence, système qui offre de grands avantages, tels qu'une répartition symétrique de la charge, une consommation d'énergie réduite, un meilleur facteur de puissance et des soudures d'une qualité remarquable.*

## I. Einleitung

Die elektrische Widerstandsschweissung hat in der metallverarbeitenden Industrie eine solche Bedeutung erlangt, dass es uns naheliegend erscheint, auf die Gründe dieser revolutionären Entwicklung einzutreten. Diese Schweissmethode ist an und für sich nicht neu, denn die ersten Anfänge gehen auf das Ende des neunzehnten Jahrhunderts zurück. Ihre praktische Anwendung hat sich jedoch ziemlich lange Zeit auf Verbindungen untergeordneter Bedeutung beschränkt. Dort, wo mit höherer Beanspruchung gerechnet werden musste, wurde z. B. die Nietung vorgezogen. Heute hat sich das Bild grundlegend geändert, indem die Widerstandsschweissung Festigkeitswerte ergibt, die im Gebiete derjenigen des Ursprungsmaterials liegen. Sie wird daher mit Erfolg zum Schweissen höchst beanspruchter Teile in Stahl, Nichteisenmetallen und den verschiedensten Legierungen angewendet. Es ist klar, dass die Forderung nach höchster Schweissqualität und Gleichmässigkeit nur durch den Bau modernster Maschinen und Steuerungen erreicht werden konnte.

Bekanntlich sind drei Grössen, Strom, Zeit und Druck, entscheidend für die Güte einer Schweissverbindung. Dem Material entsprechend sind diese Werte in weiteren oder engeren Grenzen aufeinander abzustimmen. Je präziser sie durch die Schweissmaschine während des Arbeitsprozesses eingehalten werden, um so besser und gleichmässiger sind die erzielten Verbindungen. Daraus geht hervor, dass die mechanischen, pneumatischen und elektrischen Eigenschaften der Maschinen Hand in Hand verbessert werden mussten.

Bei modernen Anlagen wickelt sich der Strom- und Druckverlauf zeitlich nach einem zum voraus bestimmten Programm selbsttätig ab. Die einzelnen Phasen eines Prozesses werden meistens durch elektronisch arbeitende Zeitkreise begrenzt, d. h. beim Drucksystem sind elektropneumatische Ventile und im Primärkreis des Schweisstransformators Schützen, oder bei modernen Hochleistungsmaschinen Quecksilberdampfröhren zu betätigen. Diese Schaltelemente, welche im speziellen unter dem Namen Ignitrons bekannt sind, haben im Bau von Steuerungen ganz neue Wege eröffnet. Damit ist ein praktisch trägheitsloses und ausserordentlich leistungsfähiges Schaltelement geschaffen worden, welches keine bewegten Teile, die dem Verschleiss unterworfen sind, aufweist. Diese Röhre hat überdies verhältnismässig kleine Dimensionen, kann daher gut an Lager gelegt und rasch ausgewechselt werden, bei verhältnismässig niederen Anschaffungskosten. Die Möglichkeit, solche Röhren, die bisher in der Schweiz nicht genügend rationell hergestellt werden konnten, zu importieren, hat die einheimische Industrie denn auch veranlasst, die Entwicklung elektronischer Steuergeräte aufzugreifen.

Nach umfassenden Studien und Vorversuchen ist es vor einigen Jahren gelungen, die ersten mit Ignitrons gesteuerten Punkt- und Nahtschweissmaschinen dem Betrieb zu übergeben. Seither wurde intensiv an der Weiterentwicklung und Vervollkommnung dieser Apparate gearbeitet.

Heute steht bereits eine vollständige Typenreihe von Einphasensteuergeräten für verschiedene Schweissfunktionen in einfacher oder kombinierter Ausführung zur Verfügung. Anderseits stehen eine überraschend grosse Zahl solcher Steuerungen schweizerischer Konvenienz im In- und Auslande mit ausnahmslos bestem Erfolg in Betrieb, was bestätigt, dass die Probleme, welche sich bei der Entwicklung solcher Geräte ergeben, einwandfrei gelöst wurden.

Bei Maschinen grösserer Leistung bestehen sehr oft Anschlußschwierigkeiten, da jene durch ihre stossartige, unsymmetrische Belastung bei schlechtem Leistungsfaktor unliebsame Verbraucher sind und in Lichtnetzen Spannungs- und Lichtschwankungen verursachen. Auch diesbezüglich wurden Mittel und Wege gesucht, eine befriedigende Lösung zu finden, was dann auch durch die Entwicklung einer neuartigen Steuerung für Drehstromanschluss gelungen ist. Sie ermöglicht eine vollständig symmetrische Belastung des Drehstromnetzes bei gleichzeitig verbessertem Leistungsfaktor.

## II. Elektronische Steuergeräte von Widerstandsschweissmaschinen mit einphasigem Netzanschluss

Bei elektronischen Steuerungen werden an Stelle von mechanisch betätigten Kontakten im allgemeinen Quecksilberdampfröhren als Schaltmittel angewendet, welche im Primärstromkreis des Schweisstransformators eingeschaltet sind. Solche Röhren sind im Handel unter der Bezeichnung

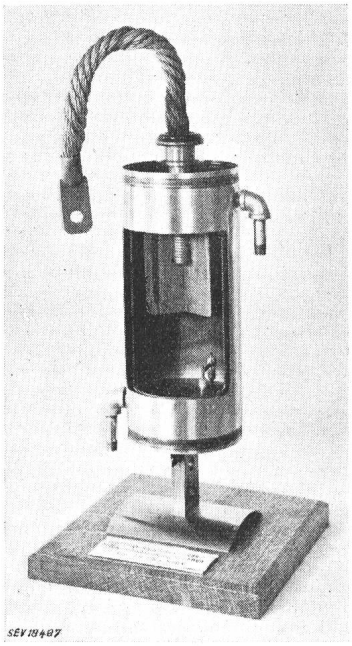


Fig. 1
**Ignitron Schaltröhre**
Maximale Schaltleistung 1200 kVA

«Thyratron» bekannt, falls es sich um eine gasgefüllte Röhre mit Glühkathode und Steuergitter handelt. Diese Röhren werden für Ströme bis ca. 70 A gebaut und eignen sich besonders für kleinere Anlagen. Für grössere und grösste Maschinenleistungen kommen fast ausschliesslich Ignitrons in Frage mit einem Schaltvermögen von einigen Tausend A (Fig. 1).

Das Ignitron besteht aus einem evakuierten Stahlzylinder, welcher mit einem Wassermantel umgeben ist. Der Boden des Gefässes ist als Quecksilberkathode ausgebildet, in die ein Zündstift aus einem Halbleitermaterial eintaucht. Oben ist die Graphit-Anode isoliert eingeführt. Sobald bei positiver Anode ein kurzzeitiger Stromimpuls über den Zündstift geleitet wird, bildet sich an dessen Eintauchstelle ein Kathodenfleck und der Entladevorgang setzt ein. Da der Strom nur in einer Richtung die Röhre passiert, sind für Wechselstrommaschinen zwei solche Röhren erforderlich, welche im Primärstromkreis des Schweisstransformators in Gegenparallelschaltung angeordnet sind.

Das Gebiet einphasiger, elektronischer Steuerungen lässt sich unterteilen in:

1. Asynchronsteuerungen,
2. Synchronsteuerungen.

### 1. Asynchronsteuerungen

Die Asynchronsteuerung ist in ihrer Wirkung gleichwertig der üblichen Steuerung mit Schalt-

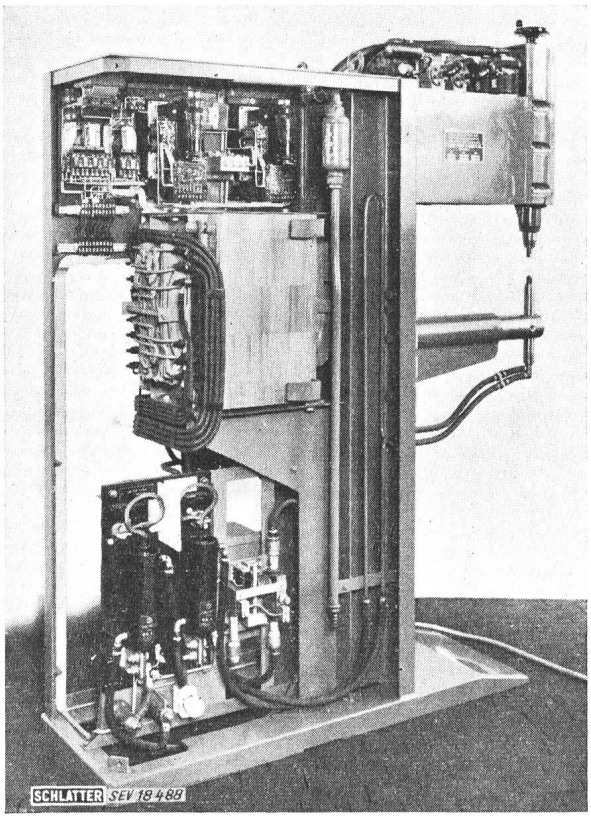


Fig. 2
**Punktschweissmaschine für Einzelpunkt- und Repetitionsschweissung mit Ignitronkontaktor**

schützen, da für phasenrichtige Schaltung keine speziellen Vorkehrungen getroffen sind. Der einzige Vorteil einer solchen Apparatur besteht darin,

dass selbst grosse Leistungen bei schlechtem Leistungsfaktor mühelos abgeschaltet werden, und dass das bei grösseren Schalthäufigkeiten zu Störungen Anlass gebende Schütz durch ein zuverlässiges Schaltelement ohne bewegte Teile und ohne Verschleiss ersetzt ist.

Die Asynchronsteuerung ist wesentlich einfacher und billiger als eine Synchronsteuerung und kann für Maschinen, wo vorwiegend Eisen verarbeitet wird und an die Schweissqualität und Gleichmässigkeit keine höheren Anforderungen gestellt werden, mit Vorteil angewendet werden (Fig. 2).

### 2. Synchronsteuerungen

Die Synchronsteuerung unterscheidet sich von der Asynchronsteuerung darin, dass Mittel vorgesehen sind, welche die phasenrichtige Einschaltung des Schweißstromes ermöglichen. Dadurch werden die bei Einschaltvorgängen von Transformatoren auftretenden Stromstösse vollständig eliminiert. Die absolut trägheitslos arbeitenden Zeitkreise gewährleisten eine sehr präzise Steuerung der Schweisszeit. Solche Steuergeräte werden sowohl für Einzweck- als auch für kombinierte Maschinen gebaut und zwar für folgende Schweissfunktionen:

Punktschweissung,
Nahtschweissung,
Pulsationsschweissung,
Punktschweissung mit Vor- und Nachwärmprogramm,
Pulsationsschweissung mit Vor- und Nachwärmprogramm.

Diese Apparate sind verwandt in ihrem Aufbau und weisen folgende Gliederung auf:

a) Elektronische Schalter,
b) Phasenschieber zur Stromregulierung,
c) Zeitkreise zur Dosierung der Schweisszeit beim Punktschweissen, bzw. für die Festlegung der Schweiss- und Pausenzeit beim Nahtschweissen usw.

#### *a) Einphasen-Synchronsteuerung*

Fig. 3 zeigt das Schaltschema einer elektronischen Synchronsteuerung für Einphasen-Anschluss. Man erkennt, dass an Stelle des bisher üblichen

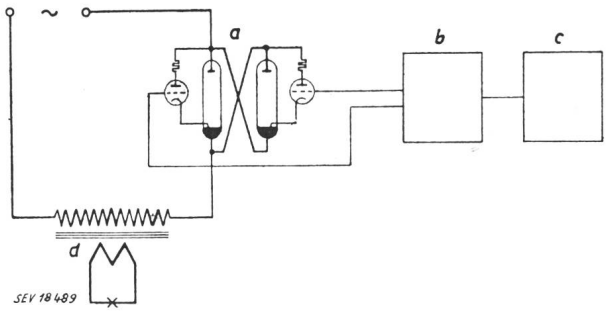


Fig. 3
**Prinzipschema einer elektronischen Synchronsteuerung**
*a* elektronischer Schalter; *b* Phasenschieber für Stromregulierung; *c* Zeitregler zur Einstellung der Schweisszeit beim Punktschweissen bzw. der Schweiss- und Pausenzeit beim Nahtschweissen; *d* Schweisstransformator

mechanischen Schaltschützen zwei Schaltröhren in Gegenparallelschaltung getreten sind, so dass jeder Stromrichtung des Wechselstroms sinngemäss eine Röhre zugeordnet ist. Als Schaltelemente kommen, wie schon erwähnt, meistens Ignitrons zur Anwendung. Der Entladevorgang wird durch einen sehr kurzzeitigen Stromimpuls (ca. 0,0001 s) von 20...30 A so eingeleitet, dass an der Eintauchstelle des Zündstiftes ins Quecksilber ein Kathodenfleck gebildet wird. Ist im Moment des Zündens die Anode positiv, dann setzt der Anodenstrom ein und brennt so lange, als diese positiver ist als die Kathode. Bei Einphasenschaltung ist die Brenndauer eine Halbperiode und nach jeder Halbperiode muss neu gezündet werden. Durch die Wahl der Zündimpulszahl kann die Brenndauer der Ignitrons und damit die Schweisszeit bestimmt werden. Diese Zündimpulse werden durch Thyratrons gesteuert, welche kurzzeitig die erwähnten Stromspitzen führen können. Durch Verschiebung der Gitterspannungsimpulse der Thyratrons zu der Netzspannung mit einer geeigneten Schaltung [1]) können die Zündimpulse und damit die Einsatzpunkte des Schweissstromes verzögert werden.

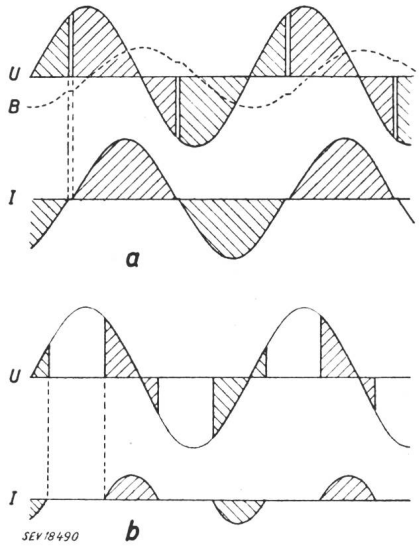


Fig. 4
**Spannungs- und Stromverhältnisse der Einphasen-Synchronsteuerung**
*a* Schweißstrom 95 %
*b* Schweißstrom 30%
*U* Spannung am Schweisstransformator; *I* Schweißstrom; *B* Induktion

Fig. 4a zeigt die Spannungs- und Stromverhältnisse am Schweisstransformator, sowie die Steuer- und Zündimpulse bei auf 95 % ausreguliertem Strom. In voll ausreguliertem Zustand (100 %) hat man einen lückenlosen, sinusförmigen Verlauf, mit der durch die Schweissmaschine bedingten Phasenverschiebung. Die Schweissleistung erreicht bei dieser Einstellung ihr Maximum. Durch eine Zündverspätung von ca. 60...70 Grad kann der Schweißstrom bis auf 30 % herabreguliert werden; damit geht die Schweissleistung auf $^1/_{10}$ der Maximalleistung zurück. Der Schweißstrom fliesst in diesem Fall nicht mehr zusammenhängend, sondern lückenhaft, wie aus Fig. 4b deutlich hervorgeht. Zwischen diesen beiden Extremwerten kann durch einen Drehknopf stufenlos reguliert werden.

[1]) Z. B. durch Verschieben der Bürsten eines synchron rotierenden Kollektors oder durch Verändern des Widerstandes eines statischen Phasenschiebers.

Die Schweisszeitregulierung kann durch ein Kondensator-Widerstandsglied erfolgen, wobei die beiden Elemente sowohl in Serie als auch parallel geschaltet werden können, je nachdem ob man nach dem Lade- oder Entladeprinzip arbeiten will. Durch Veränderung des Widerstandes oder der Kapazität wird die Zeitkonstante des Kreises verändert, und damit ist die Einstellmöglichkeit der Schweisszeit gegeben. Dank der Tatsache, dass die Zeitfunktion ohne bewegte Kontakte gesteuert wird, arbeitet die Schaltung trägheitslos, so dass sehr kurze und genau reproduzierbare Schweisszeiten gewährleistet sind. Die präzise Einstellmöglichkeit von Schweisszeit und Schweißstrom hat sich besonders für die Schweissung von Leichtmetallen und Legierungen als notwendig erwiesen; es ist die Voraussetzung für qualitativ hochwertige Verbindungen.

Die Charakteristik eines Zeitreglers geht aus Fig. 5 hervor. Sie wird mit Vorteil so gewählt, dass im untern Bereich eine sehr feine und im obern

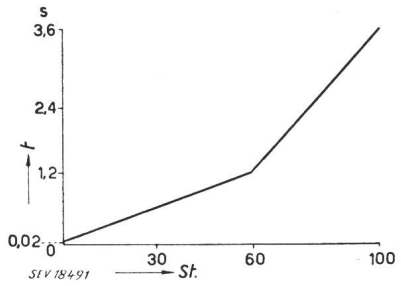


Fig. 5
**Charakteristik des Schweisszeitreglers**
*t* Zeit; *St.* Stufen

Bereich eine gröbere Abstufung besteht. Im weiteren sind Vorkehrungen getroffen, dass jede eingestellte Schweisszeit immer einem ganzzahligen Vielfachen einer Periode entspricht. Dadurch wird die Transformator-Remanenz beim Schaltvorgang im günstigen Sinne ausgenützt, so dass selbst bei hohen Induktionen keine Sättigungserscheinungen und Einschaltstromstösse auftreten. Es ist verständlich, dass bei dieser präzisen Steuerung die Schweissenergie immer konstant bleiben wird. Daraus resultiert eine sonst nicht erreichbare Qualität und Gleichmässigkeit der Schweissungen, sowie eine ganz wesentliche Produktionssteigerung.

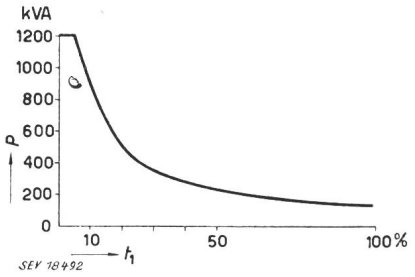


Fig. 6
**Schaltleistung zweier Ignitrons in Gegentaktschaltung in Funktion der Einschaltdauer**
Grenzleistung = 1200 kVA, 380 V
$t_1$ Einschaltdauer (Integrationszeit = 8 s); *P* Leistung

Die Charakteristik in Fig. 6 zeigt die grosse Leistungsfähigkeit der Ignitron-Schaltröhren. Als Basis für die angegebene, prozentuale Einschaltdauer dient die Integrationszeit, welche z. B. für Ignitrons mit einer Grenzleistung von 1200 kVA bei 380 V 8 s beträgt. Demnach ist z. B. bei 30 % Einschaltdauer die Maximalleistung 370 kVA und die maximale Schweisszeit 2,4 s.

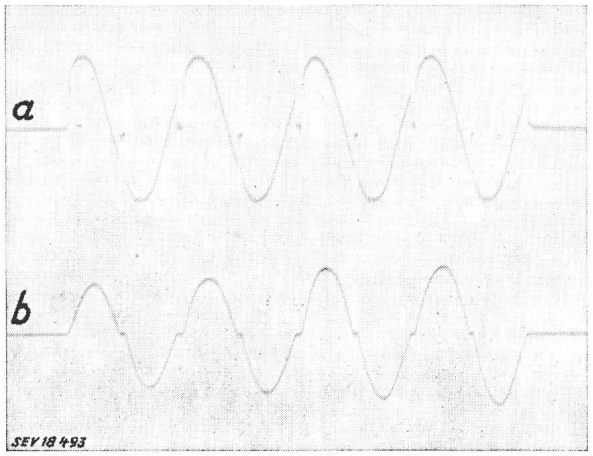


Fig. 7
**Oszillogramm des Schweißstromes und der Spannung am Transformator beim Punktschweissen mit einer Schweisszeit von 0,08 s**
*a* Spannung; *b* Strom

Fig. 7 zeigt eine oszillographische Aufnahme der Spannung und des Stromes bei elektronischer Synchronsteuerung. Man beachte vor allem den gleichmässigen Verlauf des Primärstromes des Schweisstransformators, dem keine Einschaltströme überlagert sind. Dies wird vor allem durch den praktisch symmetrischen Feldaufbau ermöglicht, der im speziellen bei voller Aussteuerung durch die Remanenz im Eisen begünstigt wird. Kurve B in Fig. 4a deutet den Verlauf der Induktion im Transformatorkern bei 95 % ausgesteuertem Strom an.

### *b) Synchronsteuerung für Nahtschweissung*

Bei Nahtschweissung können die einzelnen Schweisspunkte in dichter Folge aneinander liegen. Die zu verschweissenden Bleche werden zwischen zwei rotierende Rollen gepresst und fortbewegt, wobei der Strom entsprechend der gewünschten Punktfolge ein- und ausgeschaltet wird. Folgen sich die einzelnen Stromimpulse in kurzen Abständen, dann überlappen sich die einzelnen Schweisslinsen und es entsteht eine Dichtnaht, wie das für den Behälterbau nötig ist. Zwischen der Vorschubgeschwindigkeit, der Punktzahl pro Sekunde und dem Punktabstand besteht folgende Beziehung:

$$v = 0{,}06\, z\, a$$

Darin bedeuten

$v$ Vorschubgeschwindigkeit m/min,
$z$ Punktzahl pro s,
$a$ Punktabstand in mm.

Der Punktabstand ist durch die zu verschweissende Blechdicke bestimmt und beträgt z. B. für eine Dichtnaht bei Eisenblech von 2 × 1 mm zirka 1,5...2 mm. Eine angenommene Schweisszeit von 0,02 s und eine Pausenzeit von ebenfalls 0,02 s ergeben eine Punktzahl von 25 pro s. Die Vorschubge-

schwindigkeit beträgt somit 2,25...3 m/min. Um eine maximale Produktion bei absolut dichter Schweissnaht zu erzielen, ist demnach ein Unterbrecher für den Schweißstrom notwendig, welcher hohe Punktzahlen pro Sekunde bei hoher Schalt-

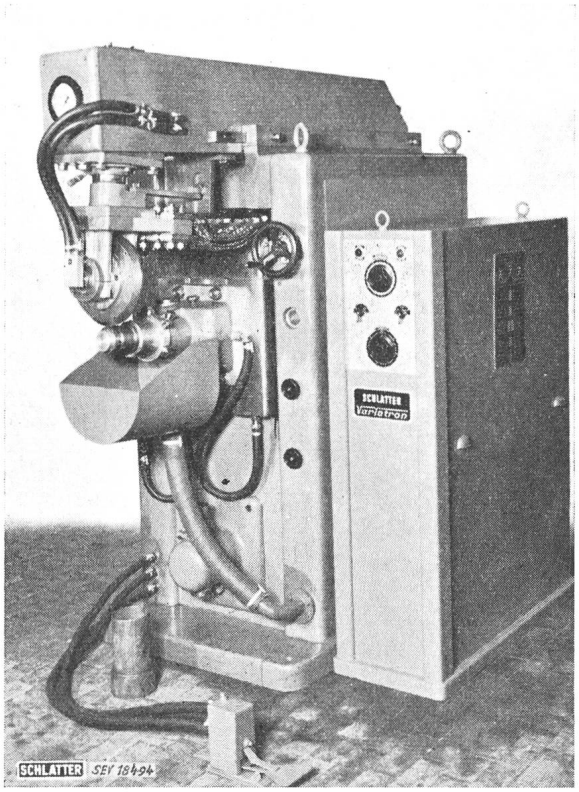


Fig. 8
**Nahtschweissmaschine mit elektronischer Synchronsteuerung**
Schweissleistung 120 kVA

leistung ermöglicht und überdies den Schweißstrom synchron mit der Netzfrequenz schaltet. Fig. 8 zeigt eine 120-kVA-Nahtschweissmaschine mit elektronischer Synchronsteuerung. Solche Steuergeräte stehen schon mehrere Jahre in der schweizerischen Industrie im Dauerbetrieb. Zusammenfassend sind folgende Vorteile zu erwähnen:

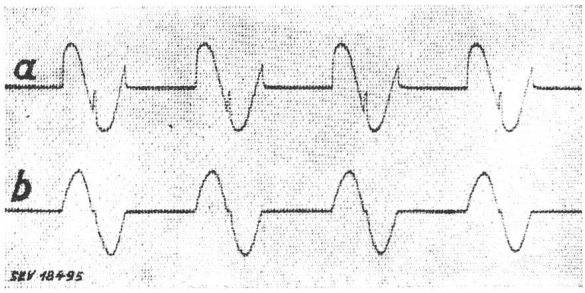


Fig. 9
**Oszillogramm einer Nahtschweissung**
Schweisszeit = 1 Periode; Pausenzeit = 1 Periode
*a* Spannung; *b* Strom

a) Präzise und frequenzsynchrone Schaltfunktion bei Schweisspunktzahlen bis 100 Punkte pro s und Leistungen bis 800 kVA.

b) Bequeme, direkte Einstellmöglichkeit der Nahtschweissprogramme, durch Drehknopf.

c) Stufenlose Regulierung des Schweißstromes im Bereiche von 30...100 %.

d) Absolute Betriebssicherheit dank einfachem, übersichtlichem und robustem Aufbau.

Die einstellbaren Nahtschweissprogramme sind so gewählt, wie sie die Praxis erfordert, wobei aber Programme, welche Gleichstromkomponenten ergeben, vermieden wurden.

Fig. 9 zeigt z. B. das Oszillogramm einer Nahtschweissung mit einer Schweisszeit von 2 Halbwellen und der Pausenzeit von 2 Halbwellen. Die Einschaltdauer beträgt in diesem Falle 50 %, die maximale Schaltleistung mit Ignitrons von 1200 kVA Grenzleistung 235 kVA.

### *c) Synchronsteuerung für Pulsationsschweissung*

Unter Pulsationsschweissung versteht man ein Verfahren, bei welchem der Schweißstrom bei Punkt- oder Projektionsschweissung innerhalb der gewünschten Schweisszeit nicht kontinuierlich, sondern pulsierend fliesst. Der Strom wird ähnlich wie beim Nahtschweissen in einstellbarem Rhythmus ein- und ausgeschaltet. Die Pulsationsprogramme können durch einen Drehknopf direkt eingestellt werden. Die totale Pulsationszeit wird durch

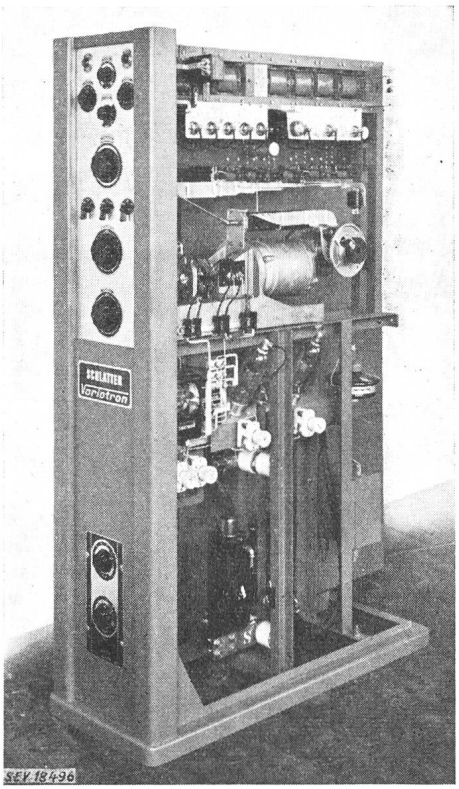


Fig. 10
**Kombinierte Steuerung für Punkt-, Naht-, Programm- und Pulsationsschweissung**

einen Zeitregler, ähnlich wie beim Punktschweissen, begrenzt. Die momentane Leistungsaufnahme ist höher als beim Punktschweissen ohne Pulsation. Dadurch kann in der Schweisslinie eine höhere Stromdichte und damit eine vollkommenere Schweissung erzielt werden. Die zwischen den einzelnen Stromimpulsen liegenden Pausen verhindern

eine Überhitzung des Werkstückes und der Elektroden und damit das Verspritzen von geschmolzenen Metallteilchen. In manchen Fällen ist es erwünscht, die Schweißstellen mit reduziertem Strom vorzuwärmen, oder bei legierten Stählen die Schweisslinse, welche durch zu rasches Erkalten hart und spröde werden kann, nachzuglühen.

Mit der kombinierten elektronischen Steuerung nach Fig. 10 lässt sich beispielsweise die Modulation des Stromes bei Pulsationsschweissung mit Vor- und Nachwärmstrom vollziehen. Im weiteren ist dieser Apparat geeignet zum Nahtschweissen und zum Punktschweissen mit oder ohne Vor- und Nachwärmprogramm. Die Vor-, Nachglüh- und Schweißströme können dabei unabhängig von einander, d. h. mit getrennten Phasenschiebern eingestellt werden. In gleicher Weise werden die Vorglüh-, Schweiss- und Nachglühzeiten mit drei getrennten Zeitkreisen festgelegt. Fig. 11 zeigt den zeitlichen Verlauf des Stromes bei einer Punktschweissung mit Wärmprogramm bzw. einer Pulsationsschweissung mit Wärmprogramm.

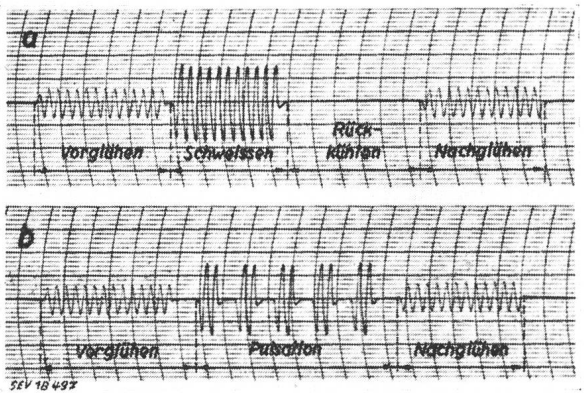


Fig. 11
**Oszillogramm des Schweißstromes mit Vor- und Nachwärmstrom**
*a* bei Punktschweissung; *b* bei Pulsationsschweissung

Dieses kombinierte Steuergerät lässt sich ohne weiteres mit einer Punktschweissmaschine mit Druckprogrammsteuerung vereinigen.

Durch die Kombination der erwähnten Strom- und Druckprogrammsteuerung ist die Möglichkeit gegeben, sowohl den Strom, als auch den Druck nach einem zum voraus festgelegten Programm selbsttätig zu verändern, und zwar in sehr rascher und genauester zeitlicher Folge. Damit ist man in der Lage, sehr schwierige Schweissprobleme, welche bis vor kurzem als unlösbar erachtet wurden, in unerreichter Qualität und Gleichmässigkeit zu verwirklichen. Diese letzten Errungenschaften im Bau moderner Steuerungen kommen vor allem der Schweissung von Leichtmetallen sowie hochlegierten, härtbaren und zundrigen Stählen zugute. So werden z. B. bei Automobilradnaben aus hochlegiertem Stahl die Gewindebolzen nach dem Pulsationsschweissverfahren mit der Scheibe verbunden. Bei diesem Beispiel werden höchste Anforderungen an Schweissqualität, Festigkeit und Gleichmässigkeit gestellt, und nur eine neuzeitliche Maschine mit elektronischer Strom- und Druckprogrammsteuerung lässt die verlangten Resultate erreichen.

## III. Elektronische Steuergeräte für dreiphasigen Netzanschluss

Alle bisher behandelten Steuerungen sind für einphasigen Anschluss geeignet, d. h. die Schweissanlage wird meistens durch eine oder zwei Phasen des Drehstromnetzes gespiesen. Daraus resultiert für das Netz eine unsymmetrische Belastung. Ist ein genügend starkes Netz vorhanden oder wird eine verhältnismässig kleine Leistung gefordert, so bestehen keine Anschlußschwierigkeiten. Anders liegen die Verhältnisse, wenn aus dem Netz grosse Leistungen entnommen werden sollten. Dann treten in den belasteten Phasen Spannungsabfälle auf, welche sich besonders auf Lichtnetze störend auswirken können. Die beim Nahtschweissen oder bei Punktschweissung auftretenden Spannungsabfälle müssen demnach in zulässigen Grenzen gehalten werden. In den letzten Jahren sind in Amerika und auch in der Schweiz elektronische Geräte gebaut und in Betrieb genommen worden, welche die von Natur aus einphasige Belastung der Schweissmaschine symmetrisch auf die drei Phasen des Industrienetzes verteilen. Diese Lastausgleichgeräte arbeiten nach dem bekannten Frequenzwandlerprinzip. Der Drehstrom mit einer Frequenz von 50 oder 60 Hz wird durch wechselseitige Gleichrichtung in Einphasenstrom von wählbarer, reduzierter Frequenz umgeformt. Fig. 12 zeigt das Oszillogramm des Schweißstromes, wie es bei Lastausgleichgeräten in Erscheinung tritt.

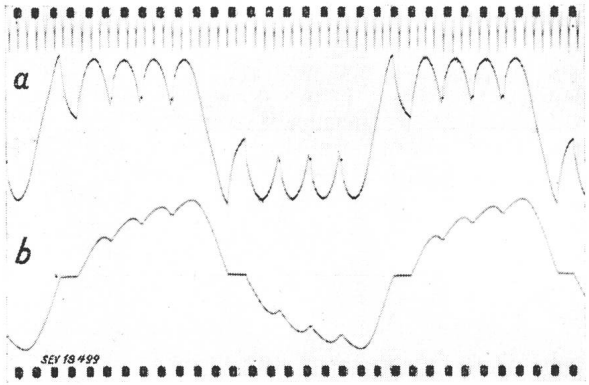


Fig. 12
**Oszillogramm des Ausgangsstromes eines Frequenzwandlers**
(Frequenz f = 13 Hz)
*a* Spannung; *b* Strom

Schweissmaschinen für Anschluss an 50-Hz-Netze haben je nach Konstruktion und Ausladung Leistungsfaktoren, welche von 0,3...0,6 variieren können. Die induktive Komponente der Maschinenimpedanz ist frequenzabhängig und wird daher beim Anschluss an das Frequenzwandlergerät in dem Masse verkleinert, als die Frequenz reduziert wird.

Das Diagramm in Fig. 13 gibt angenähert Auskunft über Leistung und Leistungsfaktor einer

Schweissmaschine bei Anschluss an ein 50-Hz-Wechselstromnetz einerseits oder an ein Frequenzwandler- und Lastausgleichgerät anderseits. Dabei wird. vorausgesetzt, dass die Nutzleistung in beiden Fällen dieselbe sei, die Netzfrequenz 50 Hz und die Ausgangsfrequenz des Wandlers 13 Hz betrage. Die Leistungsaufnahme der Maschine wird mindestens auf die Hälfte reduziert und der Leistungsfaktor von 0,4 auf mehr als 0,8 erhöht. Um ein umfassendes Bild der grossen Vorzüge des Dreiphasen-

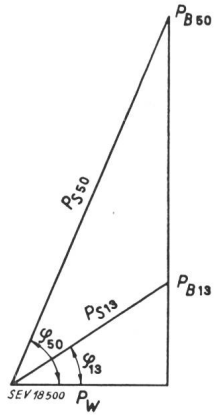


Fig. 13
**Leistung und Leistungsfaktor einer 1-Phasenmaschine 50 Hz und einer 3-Phasenmaschine 13 Hz bei gleicher Nutzleistung**

$P_{B\,50}$ = 230 kVA; $P_{B\,13}$ = 65 kVA;
$P_{S\,50}$ = 250 kVA; $P_{S\,13}$ = 118 kVA;
$\cos\varphi_{50}$ = 0,4; $\cos\varphi_{13}$ = 0,85;
$P_W$ = 100 kW

Anschlusses mittels Frequenzwandler zu geben, werden in Tabelle I die wichtigsten Daten einer Maschine mit Frequenzwandler der üblichen Einphasenmaschine gleicher Nutzleistung gegenübergestellt.

*Vergleich der Belastungsverhältnisse bei dreiphasigem Anschluss mit Lastausgleich und dem üblichen Einphasenanschluss gleicher Nutzleistung*

Tabelle I

| | Einphasenanschluss 50 Hz | Dreiphasenanschluss mit Frequenzwandler |
|---|---|---|
| Nutzleistung . . . . . | 100 kW | 100 kW |
| Scheinleistung der Maschine . | 250 kVA | 118 kVA |
| Leistungsfaktor cos $\varphi$ . . . | 0,4 | 0,85 |
| Belastungsströme der 3 Phasen | $R=S=658$ A<br>$T=0$ | $R=S=T=$<br>200 A |
| Netzbelastung . . . . . | 250 kVA<br>unsymmetr. | 132 kVA<br>symmetrisch |

In vorigem Beispiel ist die Anfangsfrequenz zu 13 Hz angenommen. Diese Frequenz kann jedoch im Bedarfsfalle durch entsprechende Vorkehrungen in der Steuerung verändert werden. Massgebend für die Festlegung der Frequenz sind die Maschinenleistung und der Verwendungszweck, wobei auch die Anlagekosten berücksichtigt werden müssen. Vom schweisstechnischen Standpunkt aus ist es vielfach vorteilhaft, mit kleiner Frequenz zu arbeiten. Auch gestalten sich die Leistungs- und Anschlussverhältnisse günstiger, da sich der Leistungsfaktor dem Werte 1 und die Maschinenleistung der Nutzleistung nähert. Mit abnehmender Frequenz steigen jedoch das Transformator- und Maschinenvolumen und natürlich auch die Gewichte und Preise, so dass aus kommerziellen Gründen ein Kompromiss geschlossen werden muss. Die wirtschaftliche Frequenz liegt im Gebiete von 9...13 Hz.

Der erwähnte Vorteil schweisstechnischer Natur ist vor allem darin begründet, dass der Anstieg des Stroms bei der Dreiphasenmaschine viel sanfter ist als bei 50 Hz, wodurch das Spritzen bei Eisen und das Anlegieren bei Aluminium wesentlich vermindert wird. Das Verhältnis von Scheitelwert zu Effektivwert beträgt bei sinusförmigem Strom gleich $\sqrt{2}$, bei Dreiphasenmaschinen nähert sich dieses Verhältnis mit abnehmender Frequenz dem Werte 1.

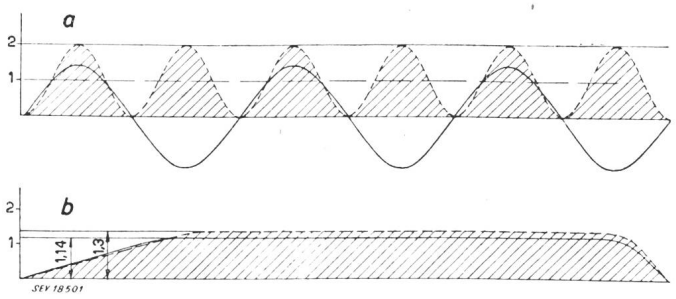


Fig. 14
**Vergleich des zeitlichen Verlaufs des Schweißstromes I und der Wärmeleistung $I^2R$ bei gleicher Schweissenergie**
(Oberwellen vernachlässigt)
*a* 50-Hz-Schweissmaschine; *b* Frequenzwandler-Schweissmaschine; *R* Widerstand an der Stromübergangsstelle
——— Schweißstrom
- - - - - Wärmeleistung $I^2R$

Fig. 14 zeigt den Verlauf der Wärmeleistung $I^2R$ bei sinusförmigem Schweißstrom der Einphasenmaschine bzw. beim Stromverlauf der Dreiphasenmaschine. Im Fall *a* entspricht der Verlauf der Wärmeleistung einer Sinusquadratfunktion und der Scheitelwert ist gleich dem doppelten Mittelwert. Diese Spitzen verursachen speziell bei schlechten Kontaktverhältnissen (z. B. Oxyd- oder Zunderschicht) Metallspritzer sowie Anlegieren der Elektroden bei der Aluminiumschweissung und allgemein erhöhten Elektrodenverschleiss. Bei der Dreiphasenschweissung fallen diese Spitzen weg, das heisst man hat einen gleichstromähnlichen Verlauf der Wärmeleistung mit sanftem Anstieg. Bei gleichem $I^2R$ während einer bestimmten Zeitdauer, d. h. bei gleicher Schweissenergie müssen die beiden schraffierten Flächen einander inhaltsgleich sein. Daraus resultiert im Beispiel ein Amplitudenverhältnis des Produktes $I^2R$ von 2:1,3 = 1,55, d. h. man hat beim Dreiphasensystem ausser dem wesentlich sanfteren Stromanstieg bei gleicher Wärmeleistung ihre Amplitude um mehr als 50 % reduziert. Dadurch ist die Gefahr des Spritzens weitgehend gebannt, die Schweissqualität verbessert, das Anlegieren der Elektroden bei Aluminiumschweissung und der Elektrodenverschleiss im allgemeinen reduziert. Ein weiterer grosser Vorteil liegt darin, dass beim Eintauchen von ferromagnetischen Werkstoffen in die sekundäre Fensteröffnung der Maschine praktisch kein Stromrückgang auftritt, so dass auch dicke Eisenteile bei grosser Ausladung einwandfrei verschweisst werden können. Lastausgleich- und Frequenzwandlergeräte können für die verschiedensten Zwecke Anwendung finden wie für Punkt-, Naht-, Programm-, Pulsations-, Stumpf- und Abschmelzschweissmaschinen sowie auch für Glühöfen und andere Verwendungszwecke. Fig. 15 zeigt eine doppeltwirkende Ab-

schmelzschweissmaschine mit Lastausgleichgerät. Die Schaltfunktion des Schweißstroms sowie die stufenlose Stromregulierung im Bereich von

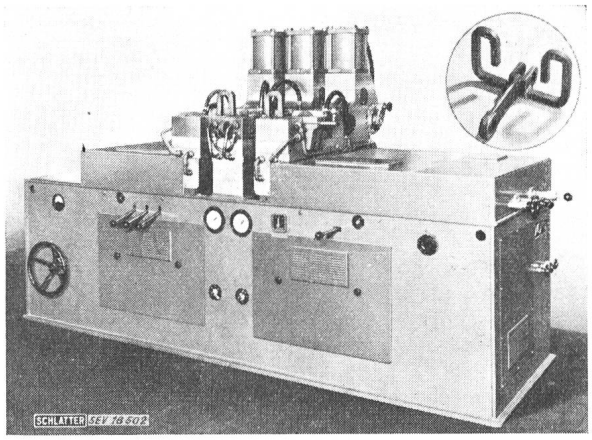


Fig. 15
**Doppeltwirkende Abschmelzschweissmaschine, gespiesen durch ein 3-Phasen-Lastausgleichgerät**

50...100 % wird durch das Lastausgleichgerät getätigt.

Selbst unter erschwerten Betriebsverhältnissen, wie dies beim Abschmelzprozess der Fall ist, arbeitet der elektronische Lastausgleich einwandfrei. Die Belastung aller drei Netzphasen ist symmetrisch, so dass der Anschluss von Stumpf- und Abschmelzschweissmaschinen grösserer Leistung ermöglicht ist.

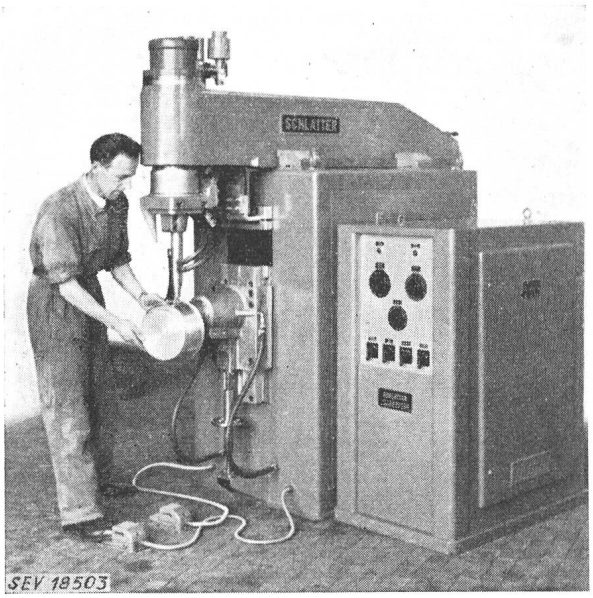


Fig. 16
**Kombinierte 3-Phasen-Punkt- und Nahtschweissmaschine**
Maximalleistung 300 kVA

Bei Punkt-, Naht-, Programm- und Pulsationsschweissmaschinen mit Dreiphasen-Lastausgleichgerät werden die entsprechenden Schaltfunktionen des Stroms durch die gleichen Schaltelemente getätigt, welche ohnehin für die Frequenzumformung erforderlich sind. Dazu kommen zusätzlich die entsprechenden Zeitkreise, welche eine synchrone Schaltung des Stroms bewerkstelligen. In allen Steuergeräten ist ein Phasenschieber eingebaut, welcher eine stufenlose Stromregulierung von 50...100 % ermöglicht. Fig. 16 zeigt eine kombinierte Anlage für Punkt- und Nahtschweissung mit einer maximalen Punktschweissleistung von 300 kVA bei 13 Hz. Verschweisst wird mit dieser Maschine Reinaluminium bis zu 2 × 3,5 mm und einem Linsendurchmesser von 10 mm. Die Schweisszeit kann von 0,04...0,8 s und die Schweissleistung von 20...300 kVA variiert werden. Damit besteht auch die Möglichkeit, Eisen und rostfreien Stahl zu schweissen.

## IV. Schlussbemerkungen

Wenn es dem Verfasser gelungen ist, den Leser in eines der neuesten, aber wohl auch der interessantesten Gebiete der Schweisstechnik einzuführen, dann ist der Zweck dieses Artikels erfüllt. Verständlicherweise würde es zu weit führen, auf die vielen Einzelprobleme, welche sich beim Bau solcher Steuerungen ergeben, einzutreten. Es kann jedoch darauf hingewiesen werden, dass mit der gesamten Typenreihe von elektronischen Steuergeräten sowohl im In- als auch im Ausland sehr positive Betriebsergebnisse vorliegen. Im vergangenen Jahr wurden schon einige Anlagen für dreiphasigen Anschluss mit Erfolg in Betrieb genommen. Damit ist die Entwicklung noch keineswegs abgeschlossen, denn es werden die bestehenden Typen weiter vervollkommnet und neue Schweissmethoden entwickelt werden. Dank der erzielten Fortschritte ist man heute in der Lage, die meisten Anschlussprobleme bezüglich der Netzbelastungsverhältnisse in idealer Weise zu lösen und gleichzeitig eine wesentliche Verbesserung der Schweissqualität und der Produktion zu erzielen.

**Adresse des Autors:**
*P. Opprecht*, Hintere Rietstrasse, Unter-Engstringen (ZH).

# Aluminium im Freileitungsbau

Vortrag, gehalten am Aluminium-Kongress vom 8. bis 11. Mai 1951 in Zürich,

von *R. Vögeli*, Baden

621.315.53

*Der Vortrag gibt einen Überblick über die Verwendung von Freileitungsseilen aus Aluminium. Betriebserfahrungen mit solchen Leitern, sowie einige Richtlinien, welche beim Projektieren zu berücksichtigen sind, werden erwähnt. Die wirtschaftlichen Vorteile von Aluminium-Leitern für die verschiedenen Spannungsklassen bis 380 kV werden dargelegt.*

*La conférence donne un aperçu sur l'emploi de câbles aériens en aluminium et mentionne les expériences d'exploitation faites avec ces conducteurs. Elle indique quelques directives qu'il faut prendre en considération lors de l'établissement de projets de lignes, mettant en évidence les avantages économiques résultant de l'utilisation de conducteurs en aluminium pour des tensions allant jusqu'à 380 kV.*