

Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 115/116 (1940)
Heft: 26

Artikel: Tensator für drei Millionen Volt
Autor: Grossmann, K.H.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-51198>

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: 08.01.2026

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

INHALT: Verbesserung der Wärmewirtschaft mit Gegendruck- und Entnahme-Kolbendampfmaschinen. — Tensator für drei Millionen Volt. — Schweissgerechte Formgebung. — Die Heizung im Radio-Studio Zürich. — Pfarrhaus in Zürich-Wipkingen. — Mitteilungen: Zugfestigkeit und

Schmelzwärme. Die Berner Fluggesellschaft ALPAR. Türbänder aus Holz. Lichtentzug durch Nachbarbauten. Ausbildung von Maschineningenieuren für den Eisenbahndienst. — Nekrologe: Rudolf Eppler. — Literatur. — Mitteilungen der Vereine. — An unsere Abonnenten.

Verbesserung der Wärmewirtschaft mit Gegendruck- und Entnahme-Kolbendampfmaschinen

Mit der Ausbreitung der Hochdruckdampfanlagen von 50 at und mehr, und der Schaffung von Dampfmaschinen, die grosse Druckgefälle auch bei verhältnismässig kleinem Dampfdurchsatz wirtschaftlich verarbeiten, ist der Kolbendampfmaschine in den letzten Jahren wieder ein beträchtliches Absatzgebiet eröffnet worden. Im Bereich der kleineren und mittleren Leistungen tritt sie erfolgreich mit der Dampfturbine in Wettbewerb; besonders geeignet ist sie zum direkten Antrieb von verhältnismässig langsam laufenden Maschinen, Transmissionen u. a. Die Notwendigkeit einer rationellen Wärmewirtschaft hat ihr denn auch in Industrieanlagen bis zu etwa 1500 PS vielfach Eingang verschafft,

und zwar insbesondere als Gegendruck- und Entnahmedampfmaschine. Während früher der Dampf für Wärmezwecke meist unmittelbar dem Kessel entnommen und derjenige für Maschinenantrieb nach der Arbeitsleistung ins Freie ausgestossen oder kondensiert wurde, hat man es heute als zweckmässig erkannt, den Dampf mit höherem Druck zu erzeugen, ihn dann zuerst in einer Kraftmaschine expandieren zu lassen und nachher den Wärmeverbrauchstellen zuzuführen. Vom Gesamtwärmeinhalt des Frischdampfes werden dann in der Regel ungefähr 10% zur Krafterzeugung entzogen, sodass 110% Abdampf gewicht zur Deckung des Wärmebedarfes erforderlich sind, wenn 100% Frischdampfmengen ohne vorgesetzte Kraftmaschine ausreichen würden. Somit fällt nur derjenige Brennstoff zu Lasten der Antriebsleistung, der die Erzeugungswärme des Mehrverbrauches zu liefern hat. Darum ist es möglich, dass z. B. bei einer Dampfmaschine mit Elektrogenerator nur 150 bis 200 gr Kohle pro kWh erforderlich sind. Um diesen Wirtschaftsfaktor voll ausnützen zu können, haben einzelne Unternehmen mit grösseren Elektrizitätswerken Vereinbarungen getroffen, wonach sie im Sommer bei verminderter Heizdampfbedarf für den Antrieb z. T. Strom vom Werk beziehen und dann im Winter bei grossem Wärmebedarf Strom zurückliefern. Aus solchen Wechselbeziehungen erwachsen beiden Seiten Vorteile. Wenn es gelingt, allen Dampf einer Anlage zuerst unter Leistungsabgabe in einer Dampfmaschine expandieren zu lassen, um ihn dann als Abdampf den Wärmeverbrauchstellen zuzuführen, so erreicht die Wärmekraftanlage Wirkungsgrade von etwa 80%, womit sie sich allen andern Wärmekraftmaschinen gegenüber als weit überlegen erweist.

Die Firma Gebrüder Sulzer A. G., die seit Mitte des letzten Jahrhunderts auf dem Gebiete der Dampfmaschinen führend ist, hat für die genannten Zwecke besondere Hochdruck-Gegendrucktypen entwickelt, deren Konstruktion auch den mit dem Höchstdruck kombinierten hohen Ueberhitzungstemperaturen Rechnung trägt. Wo der Bedarf an Wärme gegenüber der erforderlichen Antriebleistung geringer ist, verwendet die Firma Sulzer ihre Verbunddampfmaschine mit Zwischendampfentnahme. Hier durchströmt der Dampf zunächst den Wechselstrom-Hochdruckzylinder und gelangt dann in einen Ausgleichbehälter, dem der Heizdampf durch Anzapfung entnommen wird. Was an Dampf noch übrig bleibt, kommt dann in einem Niederdruck-Gleichstromzylinder zur weiteren Entspannung bis auf Kondensatordruck. Der Sulzer-Dampfdruckregler hält den Entnahmedruck bei allen Leistungen und Entnahmemengen konstant, indem er auf die Steuerung des Niederdruckzylinders einwirkt und nötigenfalls ein Frischdampfzusatz- oder aber auch ein Abblaseventil öffnet. Vermittelst eines Geschwindigkeitsregulators wird die Füllung des Hochdruckzylinders der Leistung angepasst. In reinen Kraftanlagen schliesslich greifen Gebrüder Sulzer zu ihrer bewährten Gleichstrom-Kondensationsmaschine, die mit einem Höchstmass von Wirtschaftlichkeit das aus dem Dampf herauholte, was ohne Abdampfausnutzung möglich ist.

E. Hablützel

Tensator für drei Millionen Volt

 Der von der Micafil A. G., Zürich, gebaute «Tensator», ein Gleichspannungserzeuger zur Atomzertrümmerung, der in der Hochspannungshalle der LA stand, und gegenwärtig an seinem Bestimmungsort, dem Physikalischen Institut der E. T. H., eingebaut wird, ist in den «Micafil-Nachrichten» vom Juli 1939 von A. Imhof, dem technischen Leiter der Firma, beschrieben. Wir reproduzieren daraus in Abb. 1 das konstruktive Schema, in Abb. 2 ein Montagebild. In einem durch eine Pumpenanlage auf 10^{-4} bis 10^{-5} Torr evakuierten, 6 m hohen Porzellanrohr, dem «Strahlrohr» (Abb. 1, [6] und Abb. 3), erzeugt der Tensator eine Reihe von Spannungskatarenken. Abb. 3 stammt aus der

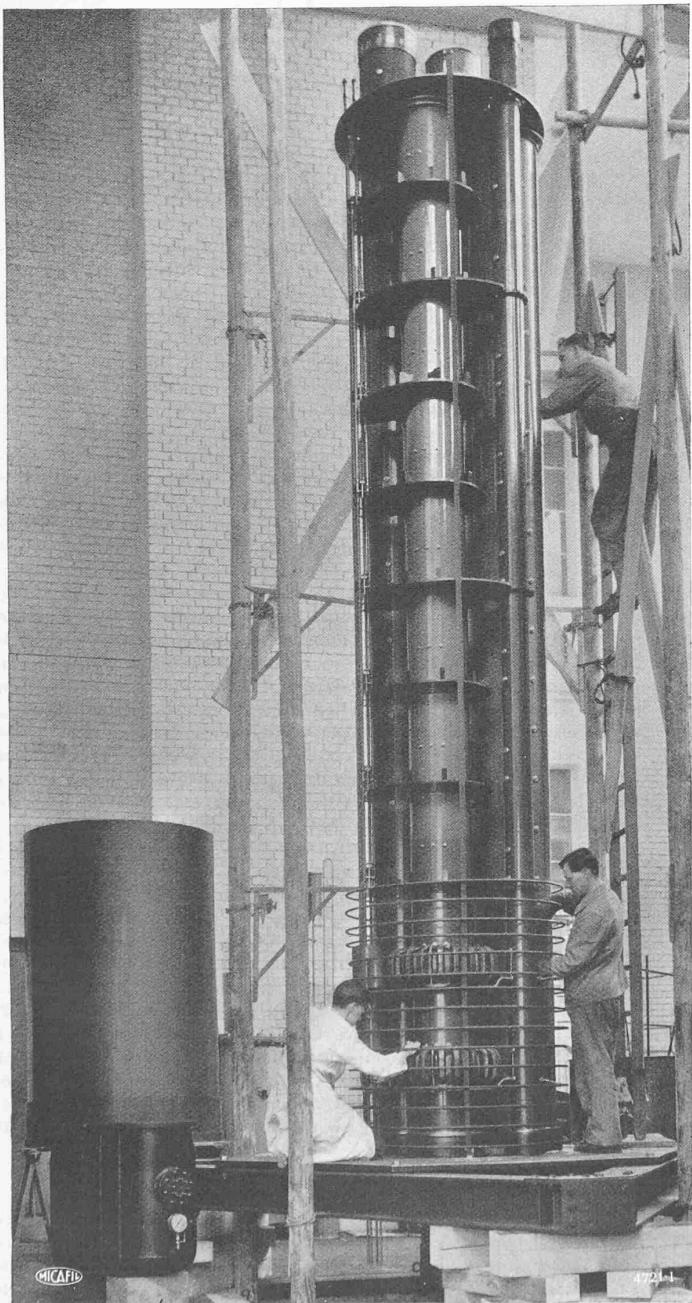


Abb. 2. Montagebild des Tensators der Micafil A.-G., Zürich

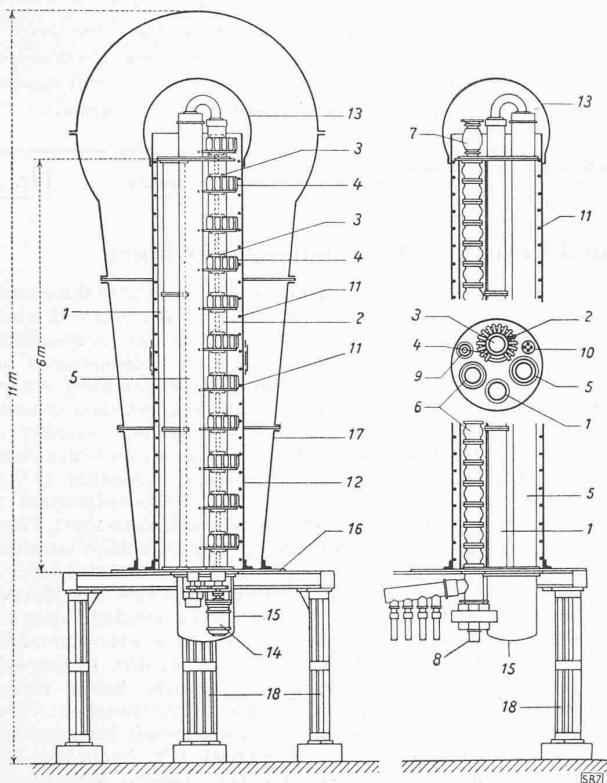


Abb. 1. Aufriss, Seitenriss und Querschnitt des Tensators

1 Kondensator in Säulenform, 2 Säule für Synchrongeneratoren und Hochspannungstransformatoren, 3 Synchrongeneratoren, 4 Hochspannungstransformatoren, 5 Säule für Synchrongenachscher in Pressgas, 6 Kanalstrahlrohr, 7 Ionisierungskammer, 8 Austrittsende des Kanalstrahlrohrs, 9 Erregerdynamos, 10 Spannungsregler und Polwender, 11 Potentialringe, 12 Resocel-Zylinder, 13 Aluminiumkugel, 14 Antriebemotor für Generatoren und Umschalter, 15 Druckkessel, 16 Grundplatte, 17 geerdeter Kessel, 18 Gestell

Beschreibung des Strahlrohrs in den «Helv. Phys. Acta»¹⁾ von H. Wäffler (Physikalisches Institut der E.T.H.), nach dessen Angaben das Rohr ausgestaltet wurde. In seinem oberen Ende, der Ionisierungskammer (Abb. 1 [7]), wird ein in feinem Strahl eingeblasenes Gas zwischen zwei Elektroden (Abb. 4: I, II), die einem periodisch wiederkehrenden Spannungsimpuls von $50 \pm 60 \text{ kV}$ ausgesetzt sind, in positiv geladene Teilchen (z. B. Protonen) und negativ geladene Elektronen aufgespalten. Das zeitlich möglichst konstante Feld im Rohrrinnen ist, auf 20 Zwischenräume zwischen den in Abb. 3 dargestellten zylindrischen Stahlelektroden, d. h. auf 20 beschleunigende und zugleich zentrirende Stufen zu je maximal 150 kV verteilt, willkürlich nach ab- oder aufwärts orientierbar. Je nachdem werden die positiven oder die negativen Partikel nach unten, gegen das Austrittende (Abb. 1 [8]), getrieben, insgesamt also durch maximal $20 \times 150 = 3000 \text{ kV}$. In der Metallkammer, in die das Austrittende mündet, werden die eingeschleusten Stoffe, deren Zerfall studiert werden soll, dem Anprall der herausausenden Geschosse ausgesetzt.

Die Zahl $\pm 3 \times 10^6 \text{ V}$ hinschreiben ist eines; diesen Spannungsabfall gegen Erde in und längs einem Porzellanrohr dauernd, zuverlässig, überschlagsicher erstellen, ein anderes. Wie dies im Tensator bewerkstelligt wird, zeigt das (wie die weiteren Abbildungen den «Micafil-Nachrichten» entnommene) Schaltschema Abb. 4. Die Anregung zu dieser, einmal gewählt und erprobt, fast trivial anmutenden Lösung gab die Greinacher'sche Spannungs-Verdoppelungsschaltung²⁾. Dieses schlichte Mittel, aus einer Wechselspannung vom Scheitelwert S eine Gleichspannung vom Betrag $2S$ zu gewinnen, war den Technikern schon seit 1914 bekannt; erst Prof. Imhof merkte, dass sich so nicht blos eine Verzwei-, sondern allgemeiner eine Ver-2 n -fachung von S erreichen lässt, und handelte darnach. Statt der von Greinacher verwendeten Ventilzellen benützte er erstmals mechanische Umschalter (Nadelkontakte) in Pressgas.

Im Tensator rotieren drei Wellen aus Isoliermaterial. Deren zwei, erstens für $n+1$ Einphasen-Synchrongeneratoren (Abb. 4 und 1), zweitens für $2n+1$ radiale, zu zweit aufeinander senk-

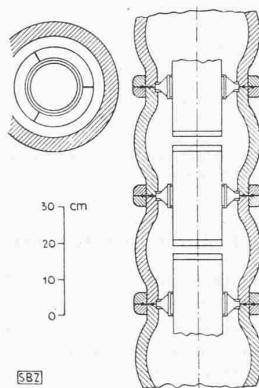
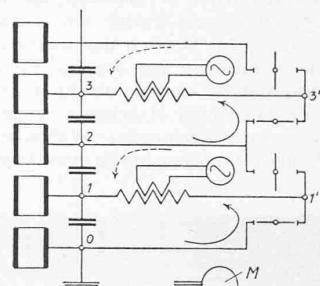
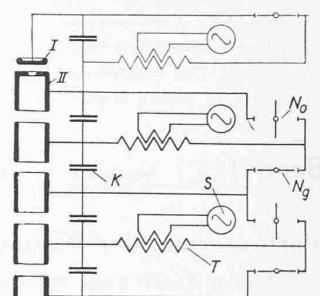


Abb. 3. Strahlrohr im Schnitt

Abb. 4 (rechts) Schaltschema bei Leerlauf

K Kondensator,
No Nadelumschalter offen,
Ng Nadelumschalter geschlossen,
T Transformator,
E Strahlrohr-Elektrode,
S Synchrongenerator,
M Motor,
I, II Ionisierungs-Elektroden



rechte Kontaktstiften (Abb. 4 u. 5), treibt der 20 PS-Drehstrommotor 14, Abb. 1, zugleich an. Die dritte, für $n+1$ Gleichstrom-Erregerdynamos 9, Abb. 1, zur Einzel-Fremderregung der Generatoren, wird von einem besonderen Motor angetrieben. Erlaufen.

Der überzählige (oberste) Generator liefert die eingangs erwähnte Folge gleichsinniger Spannungsimpulse zur Ionisierung des Gases. Sehen wir von ihm und seiner Zubehör — Erregermaschine, Transformator, Kapazität und Umschalter — vorerst ab und denken wir uns, um grosso modo die Aufladung der übrigen $2n$ Kondensatoren zu verfolgen, sie alle zunächst auf Erdpotential, entladen. Der Motor 14 werde in Gang gesetzt: Die einander in Aufbau, Stellung und Schaltung genau wiederholenden, vierpoligen 900 VA-Generatoren laufen um; in der Sekundärwicklung jedes der zugeordneten Transformatoren 4 (Abb. 1), d. h. zwischen den Punkten 1 und 1, 3 und 3', usw., Abb. 4, wird eine nach Taktgabe der steigenden Drehzahl ihre Richtung wechselnde EMK e induziert, deren Scheitelwert s bald die der stationären Drehzahl (2900 U/min) entsprechende, von e in der Sekunde 97 mal angenommene Grösse S erreicht. Jedesmal, wenn wieder $e = \pm s$ ist, ergäbe eine Momentaufnahme eines Generator-Polrades das gleiche äussere Bild; elektromagnetisch zerfallen diese Polradstellungen jedoch in zwei Klassen, sagen wir α und β : In den Läuferstellungen α nehmen die (z. B. positiven) Pole Nr. 1 und 3 die in den Stellungen β durch die (negativen) Pole 2 und 4 besetzten Plätze ein. Jede α -Stellung liefert eine EMK vom gleichen Betrag s wie jede β -Stellung, aber von entgegengesetztem Vorzeichen. Ueber dieses entscheidet die Stellung der auf einer weiteren Isolierwelle sitzenden Polwender 10, Abb. 1: Ein Umschalten dieser Welle, d. h. der Polarität aller Erregerdynamos und damit der Pole, vertauscht die Klassen α und β zugeordneten Vorzeichen der EMK.

a) Idealisierter Vorgang: In jeder α -Stellung schliesst die mit der Generatorwelle zwangsläufig gekuppelte Kontaktgeberwelle (Abb. 5) durch die gleichzeitige Verbindung der Punkte 0 und 1, 2 und 3'... (Abb. 4, « α -Kontakt») n Stromkreise (deren zwei in Abb. 4 durch ausgezogene Pfeile angegedeutet), nämlich den 1., 3., 5.... Stromkreis; da eine Verdrehung der Generatorwelle um eine Polteilung einer Vierteldrehung der Kontaktgeberwelle entspricht, sind hingegen in jeder β -Stellung der 2., 4., 6.... Stromkreis geschlossen (gestrichelte Pfeile, Abb. 4, β -Kontakt) — beides jeweils nur für einen Augenblick, der aber, immerzu wiederkehrend, genügt, um die in diesen Stromkreisen befindlichen Kondensatoren aufzuladen. Beim Anlaufen entstehen sonach mit dem ersten, beispielsweise α -Kontakt die Potentialdifferenzen

$$u_1 - u_0 = u_3 - u_2 = \dots = u_{2n-1} - u_{2n-2} = \pm s$$

$$u_2 - u_1 = u_4 - u_3 = \dots = u_{2n} - u_{2n-1} = 0$$

Während der darauf folgenden Vierteldrehung der Kontaktgeberwelle bleiben, da jetzt sämtliche Stromkreise unterbrochen sind und daher kein Ladungsausgleich stattfinden kann, diese Potentialunterschiede erhalten; beim Durchgang durch den nächsten, einen β -Kontakt aber rückt die zweite Zeile sofort nach:

$$u_2 - u_1 = u_4 - u_3 = \dots = u_{2n} - u_{2n-1} = \pm s$$

¹⁾ Bd. 12 (1939), S. 289.

²⁾ H. Greinacher: Ueber einen Gleichrichter zur Erzeugung konstanter Gleichspannung. «Berichte der Deutschen Phys. Ges.» 1914, S. 320.

Fortan ist also

$$u_2 n - u_0 = \pm 2 n s$$

Indem s den Wert S erreicht, erklimmt $u_2 n - u_0$ den Wert $\pm 2 n S$, das sind maximal $\pm 2 \times 10 \times 150 = \pm 3000$ kV, da der Scheitelwert S sich stetig bis auf 150 kV regulieren lässt. Dies durch gleichzeitiges, ferngesteuertes Verstellen von in die Hauptstromkreise der Erregerdynamos geschalteten Drehwiderständen 10, Abb. 1, vermittelst einer gemeinsamen Isolierwelle.

b) Eine genauere Betrachtung der Abb. 5 zeigt, dass der Vorgang in Wirklichkeit etwas anders verlaufen muss: Zwar lassen sich Paare von rechtwinkligen Nadeln unterscheiden, doch sind alle Nadelpaare gegeneinander mehr oder weniger versetzt, sodass keine zwei Kontakte genau im selben Augenblick geschlossen werden. Vielmehr wechseln, getrennt durch regelmässige Pausen, zwar sehr kurze, aber endliche Zeitintervalle miteinander ab, in denen sich der Reihe nach entweder $\alpha)$ die Kontakte Nr. 1, 3, 5 ..., oder $\beta)$ Nr. 2, 4, 6 ... schliessen. Dies zur Erlangung einer möglichst geringen «Welligkeit» der durch Addition der 20 Stufen entstehenden Gesamtspannung.

Nach dieser Erläuterung versteht sich das Funktionieren der vorhin ausser Acht gelassenen obersten (für sich regelbaren) Apparatur für die Ionisierungskammer (mit öligeckühlten Elektroden) von selbst. Ist damit das Prinzip des leerlaufenden Tensators erklärt, so bietet er, belastet mit 6 kW, d. h. mit 2 mA, der normalen (durch Messwiderstand, Mikroamperemeter und Skalenprojektion feststellbaren) Stromstärke des Kanalstrahls, bei positivem Strahl nach jeder Halbperiode abwechselnd das Strombild a oder b der Abb. 6: Die sich ständig entladende Kondensatortorreihe wird immerfort, einmal die ungeraden, dann die geraden Nummern, wieder aufgeladen; im Betrieb haben die Nadelkontakte der Kontaktgeberwelle also Ströme von der Gröszenordnung des mA zu unterbrechen.

Die Gröszenverhältnisse der Kondensatoren, im Leerlauf für die Erreichung der 3000 kV ohne Belang, ergeben sich aus elektrodynamischen Ueberlegungen; die gewählte Gleichheit der Kapazitäten gewährleistet eine gleichmässige Leistungsverteilung auf alle Generatoren. Die zunächst zu Kreiszylindern gewickelten, sodann plattgequetschten Oelpapier-Kondensatoren zu je $0,04 \mu F$ bilden, aufeinandergeschichtet, zusammen eine schlanke Säule, von der Abb. 7 ein Drittel wiedergibt.

Das damit angeschnittene Kapitel der konstruktiven Ausgestaltung der Grundidee und ihren Konsequenzen kann hier nur gestreift werden. Es galt, aus nach vornehmlich elektrischen Forderungen entwickelten und ausgewählten Baustoffen, zumal Isoliermaterial, einen gedrungenen, leichten, aber in allen Teilen nicht blos elektrisch, sondern auch mechanisch festen, vorbildlosen Turm aus dem Kopf zu entwerfen und ohne lange Versuche (zu denen es bis zum Ausstellungsbeginn an Zeit ge-

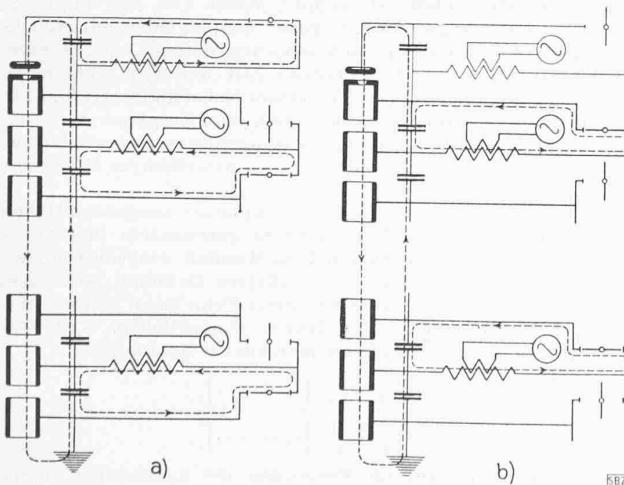


Abb. 6. Strombilder: a) für $e = s$, b) für $e = -s$

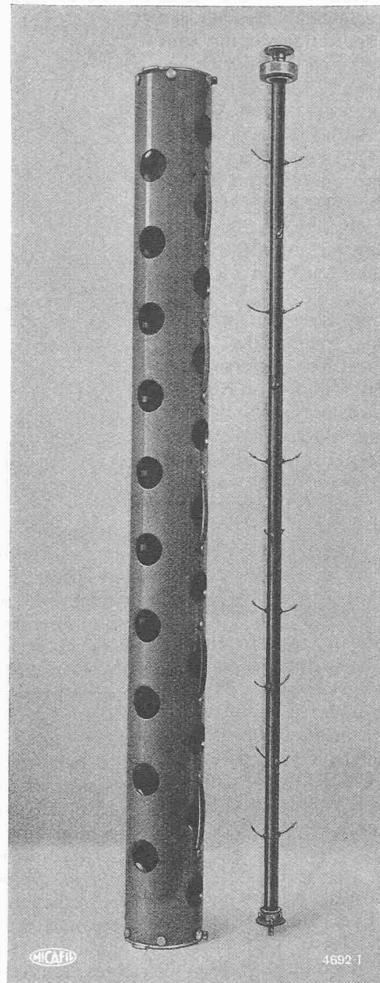


Abb. 5. Synchronumschalter,
halbe Welle und Kontaktträgerrohr

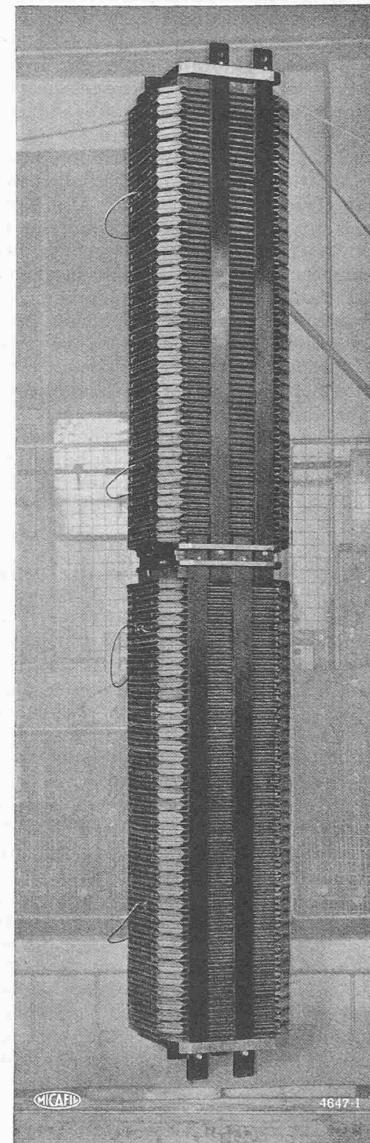


Abb. 7. Ein Drittel der Kondensatorschäule

brach) erstmalig aufzustellen — ein Bauwerk, das neben seinem speziellen Verwendungszweck ein Muster der gegenwärtigen Isolierkunst und Beherrschung des elektrischen Feldes bilden sollte.

In welchem Maasse dies gelungen ist, lässt schon ein Blick auf Abb. 2 zum Teil erkennen, wo z. B. die zierlichen 400/150 000 V Hochspannungstransformatoren auffallen, deren aus Eisenband gewickelter Kernring³⁾ den zugehörigen Generator konzentrisch umgibt, von ihm durch den isolierenden Mantel der Generatorschäule getrennt. Diese, wie auch die Hartpapiersäule für die Erregerdynamos und jene für die Kontaktgeber, sind, zur Vermeidung der Isolierabstände, mit Pressgas von 3 atü gefüllt, das, durch ein Turbogetriebe mit rd. 4 m/s Geschwindigkeit umgewälzt, von einem wasser durchströmten Kühler im Kessel 15, Abb. 1, vor Ueberhitzung bewahrt wird.

Wenn die zweiteilige, schlante Isolierwelle der Kontaktgeber, Abb. 5, gleichfalls mit 2900 U/min, rotiert, so streckt die Zentrifugalkraft die Kontaktstifte, ruhend aufwärts gekrümmte Federn, gerade: 97 mal in der Sekunde überprüfen deren fein gebüschelte Enden die Ladung jedes Kondensators. Ist hier die Zentrifugalkraft zur Herstellung schonender Kontakte benutzt, so waren anderseits die gefährlichen Wirkungen dieser Kraft zu unterbinden: Eine geeignete Lagerung der Welle drückte die ausgeprägten kritischen Drehzahlen sämtlich unter 2900 U/min herab. Zwischen je zwei übereinanderliegenden, rd. 30 cm voneinander entfernten Kontakten des (halben) Kontaktträgerrohrs⁴⁾, Abb. 5, besteht im Betrieb eine Spannung von 300 kV; die resultierende Kriechspannung war selbst in Pressgas nur durch eine besondere Ausbildung dieser Kontakte zu beherrschen.

³⁾ Vgl. unsere Mitteilungen «Gewickelte Eisenkerne für Transformatoren» in Bd. 114, Nr. 19, S. 228 und Bd. 115, Nr. 1, S. 11.

⁴⁾ Es ist aus Montagegründen durchlöchert.

Oelgefüllte Hartpapierzylinder umschließen das Strahlrohr und die Kondensatorenäule. Wie aus Abb. 1 ersichtlich, sind außer diesen beiden Säulen auch die Welle für Spannungsregler und Polwender, sowie die Säulen der Erregerdynamos und der Generatoren samt der Transformatorenreihe innerhalb eines Käfigs aus feldausgleichenden Aluminium-Potentialringen ([11] und Abb. 2) und eines Resocel-Zylinders [12] in isolierendes Mineralöl getaucht. Die abschließende Aluminiumkugel [13] von $1,5\text{ m}$ Ø birgt die Ionisierungsapparatur. Ein birnenförmiger, ölfüllter Eisenmantel umhüllt das Ganze. Alle beweglichen Teilapparate sind nach unten demontierbar. Ohne das Strahlrohr ist der Tensator zur Gleichspannungsprüfung von Kabeln, oder, mit einer Röntgenröhre, für Durchstrahlungen zu medizinischen Zwecken oder zur Materialprüfung¹⁾ verwendbar.

Der Tensator ist aus einem glücklichen Zusammentreffen von Einfall und Gestaltungsgabe entstanden. Prof. Imhof hatte die Idee, und ihre Verwirklichung lag in seinen Händen. Der Vergleich seines eleganten Gebildes mit anderen modernen Höchstspannungserzeugern, deren mächtige Abmessungen noch mehr imponieren als die damit erreichten Spannungen²⁾, bestätigt, dass es bei einer technischen Neuschöpfung weniger auf die Grösse der Mittel einer Firma ankommt, als auf den Einzelnen, dem sie diese zur Verfügung stellt.

K. H. Grossmann

Schweissgerechte Formgebung

Von Dipl. Ing. ERNST AMSTUTZ, Mitarbeiter von Prof. Dr. F. Stüssi, E. T. H., Zürich.

Kaum ist das Echo auf den Einsturz der geschweißten Brücke von Hasselt³⁾ verklungen, so hört man aus Belgien von zwei neuen Verlusten⁴⁾. Ende Januar 1940 zersprangen in einer scharfen Kälteperiode an verschiedenen Stellen die Hauptträger der Brücken von *Hérentals-Oolen* und von *Kaulille* (Abb. 1) über den Albert-Kanal, beides geschweißte Vierendeelträger von ähnlichen Typ wie die Brücke von Hasselt. Der Einsturz wurde nur durch die Längsträger der Fahrbahntafel verhindert, die die Aufgabe der gerissenen Untergurte übernahmen.

Bei näherer Betrachtung scheinen mir zwei Umstände bemerkenswert zu sein:

1. Sechs von den insgesamt neun augenfälligen Rissen gehen von Schweißnähten in einspringenden Ecken beim Anschluss der Querträger, bzw. der Halbrahmen-Lamelle an den unteren Flansch des Untergurtes aus (Abb. 2). Die übrigen drei können leicht als sekundäre Folge von Ueberlastungen im gerissenen Tragwerk erklärt werden. Es ist bekannt, dass an solchen Stellen plötzlicher Querschnittsveränderung hohe Spannungsspitzen auftreten (Abb. 3), die umso grösser sind, je schroffer der Uebergang, je kleiner also der Kerbradius ist.

2. Zur Zeit der Katastrophen trugen die Brücken keine Verkehrslast sondern lediglich ihr Eigengewicht.

Da also äusserste Ueberbelastung ausgeschlossen war, können nur innere Spannungen — Schrumpfspannungen — den Bruch verursacht haben. Temperaturspannungen haben wohl kaum ein gefährliches Mass erreicht (die Fahrbahnplatte besitzt Dilatationsfugen), die Kälte hat wohl eher durch Versprödung des Schweissgutes den letzten Anstoß zum Bruch gegeben.

Schrumpfspannungen sind besonders in den Knoten zu erwarten (Abb. 3). Die Pfostenlamellen bringen durch ihre Schrumpfung beim Aufschweißen auf den Gurt starke exzentrische Druckkräfte in den Untergurt, also Zugspannungen in seinen unteren, gekerbten Flansch. Schon bei der Brücke von Hasselt konnten starke Zugspannungen in den abgebogenen Pfostenlamellen festgestellt werden; dort führten sie zum Bruch an der Ansatzstelle A der Lamelle (Abb. 3).

Merkwürdig scheint der Verlauf der Rissform a (Abb. 2), die nur bei der Brücke von Kaulille, deren Untergurte aus Breitflanschträgern bestehen, vorkommt. Sie kann jedoch aus dem geringen Verformungsvermögen des Stegmaterials in Querrichtung, wie es der Walzvorgang mit sich bringt, erklärt werden und besitzt daher hier keine weitere Bedeutung.

Ich habe schon früher⁵⁾ die Ansicht vertreten, dass nur die einfachsten Konstruktionsformen für die Schweisung gerade

³⁾ Ueber die Durchstrahlbarkeit und die Fehlererkennbarkeit von Stahl bei Röhrenspannungen bis 1 Million Volt vgl. «Stahl und Eisen» Bd. 60 (1940), Nr. 16, S. 339.

⁴⁾ So ist der hier (im laufenden Band, Nr. 10, S. 117) und ausführlich in «ETZ» 1940, H. 20 beschriebene Kaskadenspannungszeuger für 1000 kV und 5 mA der Bestrahlungsanlage Hamburg-Barmbeck rd. 7 m hoch und 4,5 m breit; die selbe Bauhöhe erreichen, bei einer Nennspannung gegen Erde von 1500 kV, die beiden Kaskadengeneratoren des Kaiser Wilhelm-Institutes für Physik in Berlin-Dahlem.

⁵⁾ «SBZ», Bd. 112, S. 80* (13. August 1938).

⁶⁾ «L'Ossature Métallique», Februar 1940.

⁷⁾ «Neuere Probleme der Schweisung im Stahlbau», «SBZ», Bd. 113, S. 256* (27. Mai 1939).

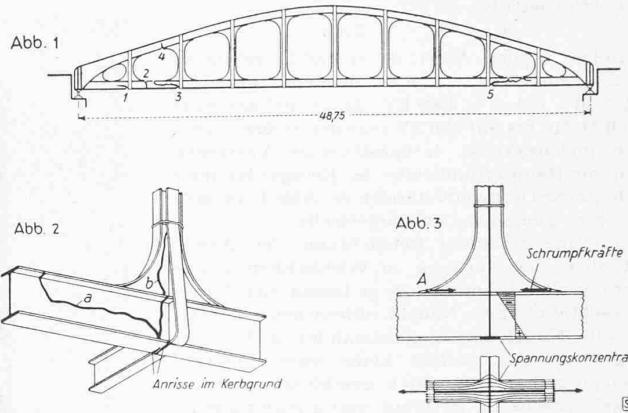


Abb. 1. Rissbildungen in der Brücke von Kaulille

Abb. 2. Typische Rissformen

Abb. 3. Schrumpfspannungen im Knoten und Spannungsverlauf im Unterflansch

gut genug sind. Einerseits vermeidet man dadurch übersteife, statisch unbestimmte Konstruktionsteile, die der Schrumpfung der zuletzt gezogenen Nähte nicht zwanglos zu folgen vermögen. Anderseits wird durch Vermeidung von Kerben ein flüssiger Spannungsverlauf erreicht. Ohne den amtlichen Untersuchungen voreignen zu wollen, darf doch wohl die Schuld an den Brücken-Katastrophen in Belgien der Nichtbeachtung dieser Grundsätze zugeschrieben werden; bedeutende Schrumpfungen, durch Kerbwirkung vielfach vergrössert, haben bereits drei Brücken zerstört und weitere könnten noch folgen.

Ein lehrreicheres Schulbeispiel, wie die scheinbar unbeschränkten Gestaltungsmöglichkeiten des Schweissverfahrens zu Fehlkonstruktionen führen können, als die Knotenausbildung bei den belgischen geschweißten Vierendeelträgern können wir uns kaum vorstellen. Wenn der Konstrukteur mit sicherem Erfolg schweißen will, muss er sich von überlieferten Ansichten frei machen. Er muss sich immer vor Augen halten, dass geschweißte Konstruktionen zu sprödem Verhalten neigen; auf einen Kräfteausgleich wie bei genieteten Bauteilen kann er daher nicht rechnen. Mit dem Hinweis auf Spannungsausgleich dürfen daher die Probleme der Schrumpfspannungen und der Spannungsspitzen nicht bagatellisiert werden. Wir können nicht ungernstraft die Vorteile der Schweisung ausnutzen und ihre Nachteile geflissentlich übersehen. Entweder suchen wir den Weg zu schweissgerechtem Konstruieren, das ist der Weg des Fortschrittes, oder wir verzichten auf das Schweissverfahren, das wäre der Weg der Bequemlichkeit.

Das mindeste, was vom Konstrukteur verlangt werden muss, ist die Beachtung einiger Kunstregeln:

Keine übersteifen Konstruktionsformen (behinderte Schrumpfung!);

Keine Kerben (Spannungsspitzen!).

Bei beiden Problemen ist die quantitative Voraussage noch schwierig. Eine Theorie der Schrumpfspannungen ist noch nicht aufgestellt und es ist fraglich, ob eine zuverlässige Berechnung je möglich sein wird. Die Spannungsberechnung von gekerbten Körpern ist zwar grundsätzlich durch die Elastizitätstheorie (Scheibentheorie) gelöst, sie konnte jedoch erst auf einige der einfachsten Fälle angewendet werden; man ist daher auf Modellmessungen (z. B. mit der photoelastischen Methode) angewiesen. Dem Konstrukteur, der in kürzester Zeit und mit einfacheren Mitteln den Spannungsverlauf in einem Konstruktionsteil annähernd feststellen will (namentlich etwa zum Vergleich verschiedener Lösungen), steht in der Ausmessung selbstverfertigter Gummimodelle ein zwar primitives aber zuverlässiges Mittel zur Verfügung.

Ein mit Tusch auf die aus Gummiplatten ausgeschnittenen Modelle aufgezeichnetes Netz wird in gespanntem und ungespanntem Zustand mit gewöhnlichem Maßstab ausgemessen, sodass man für jede Netzeite die mittlere Dehnung berechnen kann. Die treppenförmig aufgetragenen Dehnungen werden flächengleich durch eine stetige Kurve ausgeglichen. Aus dem Dehnungszustand $\varepsilon_x, \varepsilon_y$ schliesst man auf die Spannungen σ_x, σ_y :

$$\sigma_x = \frac{E}{1 - \nu^2} (\varepsilon_x + \nu \varepsilon_y)$$

$$\sigma_y = \frac{E}{1 - \nu^2} (\varepsilon_y + \nu \varepsilon_x)$$

Da es uns lediglich auf die Verteilung der Spannungen, nicht aber auf ihre Grösse ankommt (diese ergibt sich aus den Gleich-