Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 92 (1974)
Heft: 13: Schweizer Mustermesse Basel, 30. März bis 8. April 1974

Artikel: Der Bau von Grössttransformatoren
Autor: Baehr, Reinhart / Edlinger, Anton
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-72306

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: 15.07.2025

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

Schlussbemerkungen und Ausblick

Die oberirdischen Arbeiten zur Grundlagenvermessung Gotthard-Basis sind heute abgeschlossen. Ganz besonderen Dank gebührt deshalb Prof. Dr. *F. Kobold* für die uneingeschränkte Zeit, die er mir freizügig zur Schaffung der theoretischen Grundlagen und zur Erarbeitung des Vermessungskonzeptes einräumte, und für seine wohlwollende Unterstützung bei der Projektausführung. Weit problematischer und schwieriger wird sich die innere Absteckung des längsten Alpentunnels gestalten. Aber auch hier wird man bei den in [2] vorgesehenen Kreisel- und Winkelzügen den Laser und die Elektronik nicht mehr missen wollen.

Wir hoffen, dass dem geäusserten Wunsche zur Gotthard-Basislinie [9] «Der Worte sind genug gewechselt, lasst uns endlich Taten sehen» mit der oberirdischen Absteckung teilweise wenigstens schon entsprochen wurde.

Riassunto

Mediante uno studio teorico sull'esempio della rete misurata per la galleria ferroviaria alla base del Gottardo, si dimostra che la misura elettroottica di distanze mediante laser permette l'ottimalizzazione della geometria di rete in relazione alla precisione transversale al congiungimento con la contemporanea riduzione del lavoro geodetico. Si accenna inoltre, a un metodo per la valutazione preliminare del progetto di rete e ad alcuni punti di riferimento per l'organizzazione delle misure in superficie.

Résumé

Par l'étude théorique il est démontré que l'application des mesures de distances au rayon laser pour le tunnel de base du St-Gothard permettent une conception de réseau géodésique qui augmente la précision de jonction tout en diminuant le nombre des stations. D'autre part les principes du calcul antérieur et postérieur aux mesures permettant le jugement et la critique du réseau libre ainsi que l'organisation des travaux sont esquissés par quelques résultats.

Summary

With a theoretical study on accuracy it is shown by the example of the geodetic network for the future «Gotthard-Basetunnel» that the Laser distance measuring-system allows an approach to optimal geometry of the outside network conception concerning the inside misclosing error and reduces the geodetic amount. Moreover the main points of the calculation for the improvement at the projecting stage and for the Data-control after the measurements are traced with references to the organization by some results.

Hinweise und Literaturangaben

[1] *W. Rutschmann:* Das Projekt 1971 der Gotthard-Basislinie. «SBZ» *90* (1972) H. 18, S. 415–426.

[2] *P. Gerber:* Vermessungstechnische Beurteilung zum Projekt Basistunnel Gotthard. Bericht an die Bauabteilung der Generaldirektion der Schweizerischen Bundesbahnen, 29. Juni 1971.

[3] *A. Elmiger:* Stollenabsteckung mit Geodimeter-Polygonzügen und Vergleich mit der Methode der Triangulation. «Schweiz. Zeitschrift für Vermessung und Kulturtechnik», 1965, S. 314 und 336.

[4] *P. Gerber:* Die Netzberechnung Strassentunnel Gotthard. Institut für Geodäsie und Photogrammetrie der Eidg. Technischen Hochschule Zürich, Dezember 1968, S. 14, 17 und Beilage 3.

[5] *E. Gotthardt:* Einführung in die Ausgleichsrechnung. Wichmann-Verlag Karlsruhe. 1968, S. 193, 194.

[6] *A. Tarczy-Hornoch:* Zur Fehlertheorie der offenen Polygonzüge. Mitteilungen der berg- und hüttenmännischen Abteilung Sopron, Bd. 6, 1934, S. 291.

[7] *P. Gerber:* Grundlagenvermessung Gotthard-Basislinie, Projektbeschreibung mit vorprojektierter Messanlage für Submission vom 1. März 1972. Bauabteilung der Generaldirektion der Schweizerischen Bundesbahnen, Bern.

[8] *K. Linkwitz:* Über die Systematik verschiedener Formen der AR. «Zeitschrift für Vermessungswesen» Nr. 5, 1960, S. 163.

[9] *M. Portmann:* Die Gotthard-Basislinie. «Der Bund», Bern, 30. Nov. 1971, Nr. 280.

W. Schneibel, Operateur bei den Distanzmessungen danken wir für die zeichnerische Gestaltung der Bildvorlagen.

Adresse des Verfassers: *Peter Gerber,* Institut für Geodäsie und Photogrammetrie an der ETH Zürich, Leonhardstrasse 33, 8006 Zürich.

Der Bau von Grössttransformatoren

Von Dr. **Reinhart Baehr** und **Anton Edlinger,** Baden

DK 621.314.21

Unter Grössttransformatoren seien Transformatoren mit Einheitsleistungen von über 500 MVA verstanden. In diesem Leistungsbereich treten die spezifisch leistungsbedingten Probleme der Bemessung, also vor allem jene, die sich aus den starken Streufeldern, den grossen Ableitungsströmen, der Abfuhr der riesigen Verlustwärmemengen aus den Wicklungen und der Kurzschlussfestigkeit ergeben, stark in den Vordergrund. Das Auffinden geeigneter technischer Lösungen wird dabei durch die enggezogenen Grenzen der Transportmöglichkeiten und den Umstand erschwert, dass Transformatoren grosser Leistung in der Regel auch mit hohen Spannungen betrieben werden.

Obwohl der Aktivteil der Grössttransformatoren grundsätzlich aus den bekannten Elementen Eisenkern, Wicklungen und Isolierungen besteht, ergibt sich für die grössten heute ausführbaren Einheiten schon vom Gewicht her eine deutliche Abgrenzung zum übrigen Transformatorenbau. So wiegt beispielsweise der Eisenkern des in Bild 1 gezeigten 1300-MVA-Transformators nicht weniger als 240 t. Für den Eisenkern kommen bei Grössttransformatoren im Falle von Dreiphaseneinheiten Fünfschenkelkerne, bei einphasiger Bauweise Zwei- bis Sechsschenkelkerne in Betracht. Technisch anspruchsvoller sind die Probleme bei den stromführenden und spannungserzeugenden Teilen, den Wicklungen. Je nach den Verhältnissen sind mehrfach- oder doppelkonzentrische, besonders bei Einphasentransformatoren und hohen Spannungen aber auch einfachkonzentrische Anordnungen vorzusehen. Die grosse Leistung wirkt sich besonders bei den Wicklungen erschwerend aus. Hier sei nur darauf hingewiesen, dass zwei Wicklungstypen angewendet werden müssen. Es sind dies Wicklungen für sehr grosse Stromstärken auf der Unterspannungsseite bei Maschinentransformatoren und solche für höchste Spannungen und grosse Ströme als Oberspannungswicklungen. Dagegen können bei der Ausbildung der Hauptisolation die vorhandenen, auf dem Isoliersystem «Papier-Transformerboard-Isolieröl» beruhenden Lösungen übernommen werden. Diese bewährte Isoliertechnik wird in der Form, die sie durch die Weiterentwicklung gewonnen hat, auch im Bereich der ultrahohen Spannungen (geplante Betriebsspannungen oberhalb 1000 kV) Anwendung finden [1].

Bei Grössttransformatoren ist vor allem auf die Tatsache hinzuweisen, dass die befriedigende Lösung der Auslegeprobleme einen wesentlichen Fortschritt in der Technik voraussetzt. Dementsprechend hat die Firma Brown, Boveri im Hinblick auf den seit Jahren bestehenden Trend zu grössten Spannungen und Leistungen umfangreiche Entwicklungsarbei-

Tabelle 1 Grenzleistungen und elektrische Daten von grössten Einphasentransformatoren

	Netztransformator (Autoschaltung)	Maschinentransformator
Bankleistung	≈ 3000 MVA	≈ 2000 MVA
Nennspannungen	1200/525 kV	24/1200 kV
Kurzschlussspannung	≈ 16 %	≈ 18 %
Prüfspannungen der Oberspannungswicklung:		
Stossspannung 1,2/50	2300 kV	
Schaltstossspannung	1900 kV	
Induzierte Wechselspannung	1040 kV	

ten durchgeführt. Die Arbeiten umfassen konstruktive und technologische Verbesserungen sowie die systematische Fortentwicklung und Erweiterung der Bemessungsmethoden.

Bauleistung und Transport

Die ausführbare Bauleistung ist bei gegebenen elektrischen Bedingungen, wie Isolationsniveau, Kurzschlussspannung, Erwärmungsgarantien, Regelbarkeit usw., durch die Transportverhältnisse begrenzt. Beim heute vorherrschenden Bahntransport ermöglicht bekanntlich der Schnabelwagen die beste Ausnützung des Ladeprofils. Die erzielbare Bauleistung hängt dabei von der Tragfähigkeit und der möglichen Einhängelänge (Transformatorkastenlänge) des verwendeten Wagens ab. Der unseres Wissens zurzeit leistungsfähigste Wagen im europäischen Raum ist ein 32achsiges Fahrzeug der Deutschen Bundesbahn mit 450 t Nutzlast und 13 m maximaler Einhängelänge; die Länge dieses Wagens beträgt etwa 60 m. Welche Grenzleistungen sind nun damit möglich? Dreiphasen-Maschinentransformatoren mit 400 kV Nennspannung können bis zu etwa 1000 MVA Einheitsleistung gebaut werden. Bei der wesentlich höheren Betriebsspannung von 1200 kV, wo selbstverständlich nur Einphasentransformatoren in Frage kommen, erscheinen Grenzleistungen nach Tabelle 1 noch ausführbar. Die Angaben beziehen sich auf 50 Hz und gelten ohne Spannungsregelung. Beim Netztransformator ist eine Tertiärwicklung für 900 MVA berücksichtigt. Die Leistung der Tertiärwicklung ist durch die Forderung nach Kurzschlussfestigkeit bestimmt.

Da das Bahnprofil bereits voll ausgenützt ist, so ist eine weitere Steigerung der Bauleistung bei Bahntransport nur noch durch eine Vergrösserung der Einhängelänge denkbar.

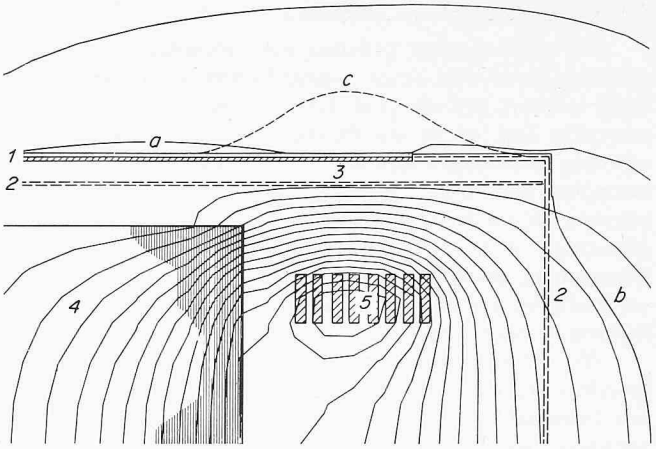


Bild 2. Magnetfeld einer Hochstromabteilung. Computerausgabe

1 Kessel magnetisch
2 Kessel unmagnetisch
3 Kupferschirm
4 Joch
5 Hochstromableitung

a Wirbelstromdichte im magnetischen Kesselblech
b Wirbelstromdichte im unmagnetischen Kesselblech
c Wirbelstromdichte im Schirm

Dazu müsste allerdings das Traggerüst des Transformatorkastens, der bei dieser Transportart Tragfunktionen zu übernehmen hat, dem höheren Gewicht und der grösseren Einhängelänge entsprechend, verstärkt werden. Da nun aber diese Verstärkung einer Profileinschränkung gleichkommt, so ist es gegenwärtig noch fraglich, ob beim Schienentransport in Zukunft Transportmittel zur Verfügung gestellt werden können, die es gestatten, über die heute erreichbaren Grenzleistungen noch wesentlich hinauszugehen. Eine solche Leistungserhöhung ist jedoch heute schon in jenen Fällen möglich, wo am Liefer- und Aufstellungsort ungehinderte Zufahrt zum Wasser besteht und somit Schiffstransport in Frage kommt. Auch der Strassentransport kann höhere Einheitsleistungen ermöglichen, sofern der Transport nicht durch Höhen- oder Gewichtsbeschränkungen beeinträchtigt wird.

Streufeldprobleme

Das Streufeld des Transformators hat ausser dem Spannungsabfall zwei höchst unerwünschte Wirkungen zur Folge:

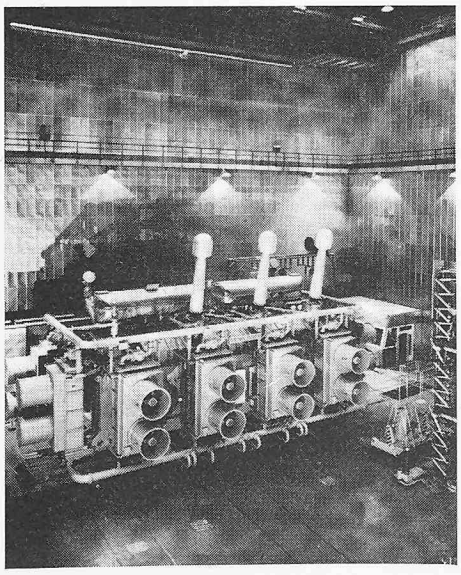
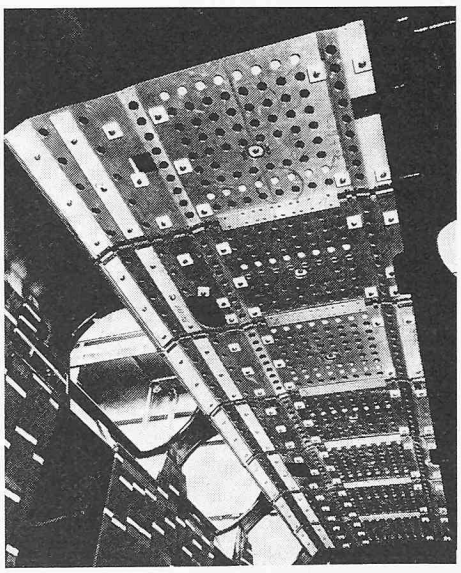


Bild 1 (links). 1300-MVA-Maschinentransformator, 24,5/345 ± 5 % kV; 60 Hz, Ydll; Oberspannungsseite: BIL 900 kV. Diese Einheit, die für das Kernkraftwerk «Donald C. Cook» der AEP geliefert wurde, ist der bisher grösste Dreiphasentransformator der Welt.

(Photos Brown Boveri)

Bild 3 (rechts). Magnetische Abschirmung des Kessesdeckels durch einen Aluminiumschirm. Blick in die Kesselhaube eines 1300-MVA-Transformators



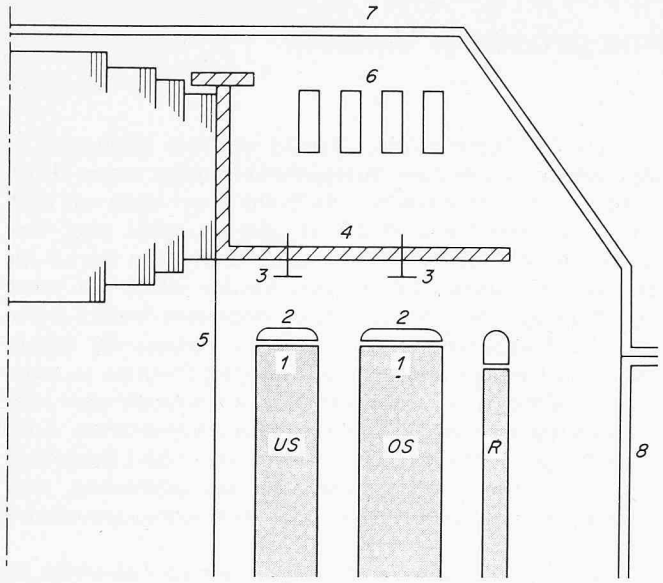


Bild 4. Kritische Stellen für Ueberhitzungen durch Streufelder

1 Wicklungsstirn
2 Potentialringe
3 Presselemente, Zugstangen
4 Jochendblech
5 Kern
6 Hochstromableitungen
7 Kesseldeckel
8 Kesselwand
OS Oberspannungswicklung
US Unterspannungswicklung
R Regelwicklung

es verursacht das Auftreten hoher Kraftwirkungen im Kurzschluss [2], und es erzeugt durch Wirbelstrombildung zusätzliche Verluste, die starke Überhitzungen bewirken können. Für die Ermittlung und die gezielte Verringerung dieser Zusatzverluste ist die Kenntnis des Streufeldverlaufes Voraussetzung. In den vergangenen Jahren wurden auf dem Gebiet der Feldberechnung unter Anwendung von digitalen Rechenanlagen erhebliche Fortschritte erzielt. Ausser der Fortentwicklung der vorhandenen Programme, die auf der Auswertung analytischer Lösungsverfahren beruhen und das Feld in jedem Feldpunkt nach Komponenten bzw. die Teilflüsse in vorzugebenden Gebieten liefern, wurden für Detailuntersuchungen auf der Basis numerischer Lösungsverfahren [3] Programme entwickelt, die auch bei komplizierten Randbedingungen unter Berücksichtigung von Nichtlinearitäten und Rückwirkungen ausgezeichnete, durch Messungen bestätigte Ergebnisse liefern.

In Bild 2 ist das Feld einer Hochstromableitung dargestellt, die parallel zum Joch und zum Kesseldeckel verläuft. Die Wirkung des in diesem Beispiel über dem Joch angebrachten elektromagnetischen Schirms ist aus dem Feldlinienverlauf gut zu erkennen. Ausserdem ist die Wirbelstromdichte im Deckel und im Schirm gezeigt. Die Ausführung eines derartigen Schirms ist in Bild 3 dargestellt. Die Auswahl von Massnahmen zur Reduzierung von Zusatzverlusten richtet sich nach dem Typ des Streufeldes. Zu unterscheiden sind:

a. Felder mit eingeprägtem Fluss und
b. Felder mit eingeprägter magnetischer Spannung bzw. Feldstärke.

Nur beim Typ a können die Verluste dadurch reduziert werden, dass gefährdete Teile durch magnetisch gut leitende Schirme geschützt werden, die das Feld unter geringen Verlusten kurzschliessen. Die Abschirmung der Kesselwand ist ein Beispiel dafür. Bei eingeprägter magnetischer Spannung bedeutet ein derartiger magnetischer Kurzschluss, zum Beispiel einer Luftstrecke, jedoch eine Verstärkung des Gesamtflusses und damit weitere Verluste durch Sättigung des Kurzschlusspfades. Einzig wirksam ist in diesem Falle eine elektromagnetische Abschirmung, die durch Wirbelstrombildung Gegen-Ampèrewindungen erzeugt, so dass das Feld abgedämpft wird. Dabei treten zwar im Schirm Wirbelstromverluste auf, in der Summe werden aber die Zusatzverluste verringert. Die Grösse der Verluste im Schild richtet sich nach den Abmessungen und nach der Wahl der elektrischen Leitfähigkeit. Bei grossflächigen Schirmen wird mit Vorteil Aluminium oder Kupfer wegen seiner guten Leitfähigkeit verwendet.

Wenn irgend möglich, wird man die Anwendung von Abschirmungen vermeiden und versuchen, durch Einsatz elektrisch nichtleitender Werkstoffe oder, wo metallische Werkstoffe nicht zu umgehen sind, durch Unterteilung der Wirbelstrombahnen die Verluste zu begrenzen. Noch wesentlicher als die absolute Grösse der Zusatzverluste ist ihre die Betriebstüchtigkeit des Transformators beeinflussende, örtlich unterschiedliche Konzentration, die zu starken Überhitzungen führen kann, wenn nicht geeigente Massnahmen ergriffen werden. Bild 4 zeigt einige der Bereiche, die bei Transformatoren grösster Leistung besondere Beachtung erfordern.

Kühlung

Die hohe Leistungsdichte und die notwendigerweise kompakte Ausführung der Wicklungen erfordern eine intensive innere Kühlung, wie sie nur mit erzwungenem Ölfluss durch die Wicklungen zu erreichen ist. Die Vorteile dieser Kühlungsart sind bekannt; sie liegen in der Verbesserung des Wärmeübergangs und der gleichmässigeren Kühlung des Wicklungsblocks. Dabei vermindert sich die Übertemperatur am heissesten Punkt der Wicklung sowie der Gradient Kupfer-Öl.

Die optimale Ausschöpfung dieser Vorteile setzt voraus, dass alle Wicklungen und gegebenenfalls der Kern optimal mit kaltem Öl versorgt werden. Vom prinzipiellen Aufbau des Transformators her sind alle konzentrisch angeordneten Wicklungen im hydraulischen Parallellauf, so dass sich eine parallele Anspeisung mit Öl anbietet. Die Aufteilung der Ölmenge richtet sich nach der hydrodynamischen Charakteristik der Parallelwege. Die Charakteristik kann nach Typ und Aufbau der Wicklungen sehr unterschiedlich sein, besonders augenfällig zum Beispiel beim Vergleich von Lagen- und Spulenwicklungen. Man entgeht dieser Schwierigkeit durch die hydraulische Reihenschaltung der einzelnen Stränge. In diesem Fall ist zwar die gleichmässige Ölverteilung gesichert, die in Reihe geschalteten Wicklungen werden jedoch mit Kühlmitteln unterschiedlicher Temperatur versorgt. Ausserdem wird der Leistungsbedarf der Pumpe infolge des höheren Druckabfalls grösser.

Die genannten Nachteile beider Varianten können dadurch vermieden werden, dass man bei Paralleleinspeisung in den parallelen Strängen Stellorgane vorsieht, die eine kontinuierliche und präzise Einstellung der Ölmengen weitgehend unabhängig voneinander zulassen. Diese Einstellung kann, sofern erforderlich, noch nach der Fertigstellung des Transformators vorgenommen werden.

Literaturverzeichnis

[1] *R. Baehr, A. Edlinger:* Dimensioning and design of transformers with extra high ratings. CIGRE 1972, Bericht Nr. 12–11.

[2] *G. Rogé, E. Pirktl:* Probleme der Kurzschlussfestigkeit grosser Transformatoren. "Brown Boveri Mitt.", 1972, *59* H. 8, S.400–409.

[3] *K. Reichert:* Über ein numerisches Verfahren zur Berechnung von Magnetfeldern in elektrischen Maschinen. Habilitationsschrift TH Stuttgart, 1968.

[4] *E. Pirktl:* Digitale Berechnung von elektromagnetischen Feldern in Transformatoren. "Brown Boveri Mitt.", 1965, *52*, H. 11/12, S. 813–820.

[5] *J. Dobša:* Die Kühlung der Grosstransformatoren. "Brown Boveri Mitt.", 1965, *52*, H. 11/12, S. 831–837.

Adresse der Verfasser: Dr. *Reinhart Baehr* und *Anton Edlinger*, AG Brown, Boveri & Cie., 5401 Baden, Postfach.