

Zeitschrift:	Bulletin de l'Association suisse des électriciens
Herausgeber:	Association suisse des électriciens
Band:	34 (1943)
Heft:	14
Artikel:	Umänderung von ältern Trockentransformatoren auf Öltransformatoren, verbunden mit einer Leistungs-Steigerung
Autor:	Stoecklin, A.
DOI:	https://doi.org/10.5169/seals-1057739

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: 21.02.2026

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

ten der Fig. 8 vertritt, lassen erkennen, dass der Einfluss der Einschaltphase bereits nach den drei oder vier ersten Einschwingungsperioden ausgeglichen wird.

Die Oszillogramme des unbelasteten zweistufigen KG (Osz. f bis i). Das gemeinsame Merkmal aller Oszillogramme des zweistufigen KG ist eine periodische Auf- und Ab-Bewegung. Die diesbezüglichen Diagramme enthalten durchweg unsymmetrische, geknickte und mehr oder weniger oszillierende Kurven. Die Aufnahmen f, g und h registrieren denselben Vorgang (u^5) bei verschiedener Zeitdehnung. Die einzelnen Kurveneigenschaften kommen erst bei der relativ hohen Kippfrequenz des Bildes h zum Vorschein. Der komplizierte Verlauf von u^4 im Osz. i ist besonders auffällig und bildet in seinen Einzelheiten eine genaue Bestätigung der Theorie (vgl. Fig. 10). In diesem Oszillogramm ist die schrittweise Verbreiterung des stromlosen Betriebszustandes mit der resultierenden Angleichung an die Sinuskurve besonders auffällig.

Das folgende Oszillogramm k des Schaltpunktes P_3 bestätigt, dass die für den mehrstufigen KG charakteristische Oszillation bereits in der untersten Stufe vorhanden ist.

C. Einige Bemerkungen zur Wirkungsweise des belasteten Kaskadengenerators

Eine eingehende Behandlung des belasteten KG liegt außerhalb des Rahmens dieser Arbeit. Wenn im folgenden dennoch diese Frage kurz berührt wird, so geschieht dies deshalb, weil die Ergebnisse von Abschnitt II eine einfache Beschreibung des Grenzzustandes beim belasteten KG zulässt.

Wird der Hochspannungspol P_{2n+1} (Fig. 1) über einen genügend grossen Verbrauchswiderstand (Röntgenröhre, Beschleunigungsrohr usw.) mit der Erde P_0 verbunden, so setzen sich die einzelnen Ladungsschübe zu einem Entladestrom zusammen, der die charakteristische *Welligkeit*¹⁶⁾ der Gleichspannung verursacht. Diese andauernde Entladung verhindert die Ausbildung des *elektrostatischen*

¹⁶⁾ Vgl. ⁹⁾ Bouwers, S. 55.

Gleichgewichtszustandes; der Spannungsaufbau wird nie über ein bestimmtes Einschwingungsstadium hinaus kommen. Die Potentialkurve des im *elektrodynamischen* Gleichgewicht schwingenden belasteten KG befindet sich somit annäherungsweise auch irgendwo im Potentialdiagramm des mit gleicher Einschaltphase einschwingenden *unbelasteten* KG. Es lässt sich also der dynamische Gleichgewichtszustand eines belasteten KG dadurch kennzeichnen, dass man den Periodenindex k einer gleichartig verlaufenden unbelasteten Einschwingungskurve bestimmt.

Als Beispiele mögen die Oszillogramme Fig 12 l bis o dienen.

Oszillogramme des belasteten einstufigen KG (Osz. l und m). Bei einer Eingangsscheitelspannung von $u_s = 60$ V wurde der Schaltpunkt P_3 über einen Widerstand von 3 Megohm mit der Erde P_0 verbunden. Ein Vergleich mit dem entsprechenden Oszillogramm d (annähernd gleiche Einschaltphase) zeigt, dass der dynamische Gleichgewichtszustand von Osz. l schon vor der vierten Leerlaufperiode erreicht wird. Bei der noch grösseren Belastung im Osz. m (Verbrauchswiderstand = 1 Megohm) bleibt der Einschwingungsvorgang bereits in der zweiten und dritten Leerlaufperiode stecken (Vergleich mit Osz. b).

Oszillogramme des belasteten zweistufigen KG (Osz. n und o). Die im Oszillogramm n registrierte Potentialkurve u^5 (Verbrauchswiderstand = 3 Megohm) würde bei Leerlauf bereits in der achten Periode durchlaufen (Vergleich mit Osz. h). Das nächste Oszillogramm (o) zeigt den Spannungsverlauf u^5 bei einem Widerstand von 1 Megohm auf verkürzter Zeitachse. Bei dieser hohen Belastung sinkt die Ausgangsspannung auf die Hälfte des Leerlaufwertes, und die Welligkeit erreicht bereits den dritten Teil der effektiven Gleichspannung.

Herrn Prof. Dr. H. Greinacher, auf dessen Anregung diese Arbeit im Physikalischen Institut der Universität Bern ausgeführt wurde, möchte ich für eine Reihe wertvoller Hinweise, sowie für das Interesse, das er diesen Untersuchungen entgegenbracht hat, bestens danken.

Umänderung von ältern Trockentransformatoren auf Oeltransformatoren, verbunden mit einer Leistungs-Steigerung

Von A. Stoecklin, Sissach

621.314.21

Es wird an einem günstigen Beispiel gezeigt, dass es bei den heutigen Verhältnissen vorteilhaft sein kann, Trockentransformatoren in Oel zu stellen, um deren Leistung zu erhöhen. Beim konkreten Beispiel kann die Leistung auf diese Art ohne weiteres verdoppelt werden, wobei die Aenderung in einen Oeltransformator nur 68 % des Preises eines aequivalenten neuen Oeltransformators kostet.

Bei den Trockentransformatoren treten bei verhältnismässig niedriger Leistung Schwierigkeiten in der Wärmeabfuhr auf, weil die Wärme abgebende Oberfläche nicht beliebig vergrössert werden kann. Speziell die Kupferverluste machen sich stark bemerkbar. Das ist auch der Grund, warum der Trok-

Il peut être actuellement avantageux de loger des transformateurs à sec dans un bain d'huile, afin d'augmenter leur puissance. Un exemple concret prouve que la puissance peut ainsi être doublée. Le coût de la transformation n'atteint que le 68 % du prix d'un nouveau transformateur à bain d'huile de même puissance.

kentransformatoren schon bei relativ niedriger Leistung im Wettbewerb mit dem Oeltransformator ausscheidet. Zu hohe Temperatur gefährdet die verwendeten Werkstoffe. Mit zunehmender Temperatur wird auch die Isolationsfestigkeit stark in Mitleidenschaft gezogen. Die Temperatur steigt so

lange an, bis der stationäre Zustand erreicht ist. Anfänglich steigt die Erwärmung rasch, weil vorerst der Transformator sich selbst aufheizt und beinahe keine Wärme an die Umgebung abgibt. Bei steigender Temperatur nimmt die Wärmeabgabe nach aussen zu, die Temperatur steigt langsamer und nähert sich asymptotisch dem stationären Zustand.

Für die Endtemperatur ergibt sich folgende Gleichung:

$$t = \frac{\text{Wärmeerzeugung (Leerlauf + Wicklungsverluste)}}{\text{aktive Oberfläche des Transformators}} \cdot k$$

wo k den Koeffizienten der Wärmeabgabe bedeutet

Es ist Aufgabe des Konstrukteurs, den Koeffizienten k möglichst klein zu halten, z. B. durch richtig dimensionierte und wirksame Luftkanäle; auch andere Möglichkeiten stehen offen. Aber allen diesen Massnahmen sind Grenzen gezogen, d. h. je grösser die Leistung des Trockentransformators wird, um so weniger kann das aktive Material ausgenutzt, bzw. belastet werden.

Günstigere Verhältnisse ergeben sich, wenn der Transformator in Oel gestellt wird. Dieses holt die Wärme viel leichter aus allen Teilen des Transformators heraus. Das Oel soll möglichst dünnflüssig sein, damit die Wärme durch die Zirkulation des Oeles leichter an die Oberfläche des Oelkessels gebracht werden kann. Ausserdem ist das Oel ein ausgezeichnetes Isoliermittel. Deshalb kann, wie im folgenden an einem für die heutige Zeit besonders interessanten Beispiel gezeigt wird, das Material ganz wesentlich besser ausgenutzt werden.

In einem städtischen Elektrizitätswerk wurde eine Anzahl gut erhaltener Trockentransformatoren zufolge Spannungsänderung und zu geringer Leistung ausgebaut; deren technische Daten sind:

Leistung	120 kVA
Primärspannung	2650 V
Sekundärspannung	340 V bei Vollast und $\cos \varphi = 1$
Schaltung	Dreieck-Dreieck
Gewicht des Eisenkernes	1030 kg
Gewicht der Kupferwicklung	503 kg
Sättigung in Säulen und Jochen	6300 Gauss
Verluste in Eisen	772 W
Verluste im Kupfer	1320 W
Spez. Belastung der Primärwicklung	1,09 A/mm ²
Spez. Belastung der Sekundärwicklung	0,88 A/mm ²

Aus diesen Daten geht hervor, dass sowohl das Eisen als auch das Kupfer nur ausserordentlich niedrig beansprucht werden durfte, um schädliche Erwärmung zu vermeiden.

Nun stellt sich die Frage, wie diese Transformatoren nutzbringend verwertet werden können. Sollen sie als Altmaterial verkauft werden, was zur Zeit einen Erlös von ca. 1000 Fr. pro Stück ergeben würde, oder sollen sie in Anbetracht der heutigen Verhältnisse doch auf die neue Spannung umgebaut werden?

Die verlangten neuen Daten sind folgende:

Primärspannung	2800 V
mit einer Anzapfung bei	2700 V
Sekundärspannung	396/228 V bei Leerlauf
Schaltung	Dreieck-Stern mit Nulleiter

Nun war es naheliegend, zu untersuchen, wie sich die Verhältnisse gestalten würden, wenn die Transformatoren in ein Oelbad gestellt werden. Die Nachrechnung ergab in diesem Fall unerwartet günstige Resultate.

Es kommt nun eine Spannungserhöhung von 2650 V auf 2800 V in Frage. Ausserdem wird die Windungszahl der Primärwicklung soweit reduziert, dass die Eisen-Verluste einem Transformator moderner Konstruktion gleichkommen; es wurde somit eine Induktion von 7100 Gauss, statt bisher 6300 Gauss, gewählt.

Bei der Sekundärwicklung ist der Kupferquerschnitt auch bei der neuen Schaltung (Stern statt Dreieck), selbst unter Berücksichtigung einer höheren Leistung stark genug bemessen. Es ergibt sich hieraus, dass die durch die neue Schaltung bedingte, um $\sqrt[3]{3}$ geringere Windungszahl noch ca. 90 kg Kupfer pro Transformator frei werden lässt, was zur Zeit von grossem Wert ist.

In der folgenden Tabelle sind die technischen Daten für die drei in Frage kommenden Leistungen von 200, 220 und 240 kVA zusammengestellt. Der aktive Teil ändert sich nicht, wohl aber die Oberfläche des Oelkessels und das Oelquantum.

Tabelle I.

	In Oel gestellter Trockentransformator			Zum Vergleich: Alter Trocken- transformator
Leistung kVA	200	220	240	120
Kupferverluste bei Vollast und $\cos \varphi = 1$ W	3900	4750	5560	1320
Eisenverluste W	920	920	920	772
Wirkungsgrad %	97,59	97,43	97,3	98,2
Preis der Aenderung im Verhältnis zum Preis eines neuen Transfor- mators unter Berücksichti- gung des Altmateri- wertes %	73	71	68	—

Aus dieser Zusammenstellung kann man für das vorliegende Beispiel folgende Schlüsse ziehen:

1. Die Leistung des Trockentransformators kann maximal auf das Doppelte gesteigert werden, wenn dieser in einen entsprechend dimensionierten ölfüllten Kessel gestellt wird. Bei kleineren Typen¹⁾ wäre allerdings eine so bedeutende Leistungssteigerung nicht möglich.

2. Trotz dieser Leistungserhöhung bleiben die Eisen- und Kupferverluste in den Grenzen eines modernen Transformatoren; speziell die geringen Eisenverluste sind zu beachten.

3. Es kann der bestehende Kupferquerschnitt der Wicklungen belassen werden (dies wurde zur Bedingung gemacht, um möglichst wenig Arbeit zu verursachen) und es werden pro Transformator ausserdem noch ca. 90 kg Kupfer frei.

4. Das Altmaterial kann beinahe restlos verwendet werden.

Als Nachteil kann das hohe Gewicht in Frage kommen, denn dieses ist um ca. 75 % höher als dasjenige eines modernen Transformatoren, das Oel inbegriffen.

Dem kann entgegengehalten werden, dass nicht einmal alles Material des aktiven Teils des Transformators zur Verwendung kommt. Neu zu beschaf-

¹⁾ Bull. SEV 1939, Nr. 18, S. 572.

fen sind nur der Kessel, das Oel, die Durchführungs-Isolatoren und sonstiges Kleinmaterial.

Erwähnt sei noch, dass die Dimensionen, trotz des grossen Gewichtes, diejenigen einer modernen Ausführung nicht wesentlich übersteigen. Wenn ferner eine Mehrarbeit für die Neubewicklung des Transfornators mit den vorhandenen Kupferquerschnitten in Kauf genommen würde, so könnte die

Kupfereinsparung um weitere 35 kg erhöht werden. Diese Einsparung wird möglich durch die Reduktion der Wicklungskühlkanäle sowie durch Wegfall der Kanäle im Eisenkern. Diese sind bei Oelkühlung nicht mehr nötig. Die in Tabelle I angegebenen Kupferverluste würden sich entsprechend reduzieren, desgleichen wird die Kurzschlußspannung kleiner.

Technische Mitteilungen — Communications de nature technique

Technische Merkmale der Schiffahrtsstrasse Basel—Bodensee

621.311.21 : 627.4 (494)

Bei anderen durch stufenweise Einstauung schiffbar gemachten Flüssen, wie am Main oder Neckar, waren die Wasserkräfte viel weniger wertvoll, so dass ihr Ausbau erst in Frage kam, als die Schiffahrtsstrasse gebaut wurde, als die Wasserstrassenverwaltung die Stauwehre bezahlte und die Kraftwerke im wesentlichen nur noch die Baukosten der Maschinenhäuser zu tragen hatten. Die Wasserstrasse konnte dadurch freier, einheitlicher und zweckdienlicher projektiert werden. Die Stauwehre wurden so gelegt, dass die danebenliegenden Schleusen lange Einfahrtsgeraden erhielten, und der Fluss so hoch angestaut, dass die Schiffahrt keine stärkere Strömung als etwa 1 m/s zu überwinden hat und folglich mit bescheidener Maschinenkraft auskommen kann.

Am Rhein dagegen waren die Kraftwerke das Primäre und die Schiffbarmachung eine Art Nebenprodukt. Als die ersten grossen Flusskraftwerke mit beweglichen Wehren entstanden waren, schien es sehr verlockend, auf diese Weise unsere gefällsreichen Flüsse in schiffbare Gewässer zu verwandeln. Die Kraftwerke konnten ihre Energie so gut verkaufen, dass man ihnen nicht nur den Bau der Stauwehre überlassen, sondern auch noch andere Leistungen zugunsten der Schiffahrt, wie Schleusenbau- oder Schleusenbedienungskosten überbinden konnte. Da es aber an einem einheitlichen und ausgereiften Schiffahrtsprojekt fehlte, so waren die Schiffahrtsforderungen an die Kraftwerke sehr verschieden und oft etwas improvisiert.

Beim ersten Rheinkraftwerk, *Rheinfelden*, 1899, wurden noch keine Schiffahrtsforderungen geltend gemacht. Heute handelt es sich darum, neben der Schiffbarmachung dieser Stufe auch das Kraftwerk zu vergrössern und fast vollständig umzubauen, was einerseits durch die Bodensenkungen infolge der Salzgewinnung und anderseits dadurch erschwert wird, dass die Schiffahrt ein gut fahrbares Unterwasser verlangt. Nach Mutzner sind die Untersuchungen noch nicht abgeschlossen und es ist über die Art des Ausbaues noch keine Entscheidung gefallen. Am einfachsten wäre wohl, die beiden Stauwehre von Rheinfelden und Ryburg-Schwörstadt durch einen gemeinsamen südlichen Seitenkanal mit drei Schleusen oder einem Hebework von 20 m Hubhöhe zu überwinden. Es bleibt dann aber noch die Frage, wie über dem felsigen Flusslauf unterhalb dieses Kanals bis zum Stau von Augst-Wyhlen, also an der Altstadt vorbei, ein gutes Fahrwasser geschaffen werden kann.

Beim zweiten Kraftwerk, *Augst-Wyhlen*¹⁾, wurde die Konzession erteilt, bevor der NOS-Schiffahrtsverband gegründet war. Hinter dem schweizerischen Maschinenhaus wurde aber eine Grossschiffahrtsschleuse von 12 m Breite, 90 m Länge und mit geböschten Seitenwänden gebaut, aber nicht auf Kosten des Kraftwerkes, sondern durch besondere staatliche Mittel finanziert. In seiner jugendlichen Begeisterung verpflichtete sich der Nordostschweizerische Schiffahrtsverband zu einem jährlichen Beitrag an die Schleusenbedienung, der heute noch 1300 Franken beträgt. Die Schiffahrt nach Rheinfelden ist für die Propaganda wichtig, lohnt sich aber scheinbar infolge der starken Strömung so knapp, dass ihr die Schleusenbedienung nicht aufgebunden werden kann. Die Schleusenabmessungen würden für die nach dem Bodensee vorgesehenen 1200-t-Kähne genügen. Vor der unteren Einfahrt soll sich aber eine so schwer zu beseitigende Kiesbank abgelagert haben, dass schon für den «ersten Ausbau» mit einer

neuen Schleppzugschleuse 130 × 12 m am badischen Ufer gerechnet werden muss.

Erst das dritte Kraftwerk, *Laufenburg*, wurde mit der Konzessionerteilung dazu verpflichtet, gleichzeitig mit dem Stauwehr eine Schleuse daneben zu bauen von 12 m Breite und 36 m Länge, die vorerst der Kleinschiffahrt dienen, und nachher zu einer Grossschiffahrtsschleuse verlängert werden sollte. Heute wird jedoch die Lage dieser Schleuse als unzweckmässig erkannt und mit einer neuen, weiter landeinwärts gelegenen gerechnet. Für die Kleinschiffahrt allein hätte aber eine wesentlich billigere Anordnung auch genügt.

Das vierte Kraftwerk, *Eglisau*, musste wiederum auf eigene Kosten eine «Kleinschiffahrtsschleuse» von 12 m Breite einbauen, aber nur noch mit 18 m Länge. Ihre Verlängerung zur Grossschiffahrtsschleuse ist auch heute noch vorgesehen. Aber solche Schleusenverlängerungen sind schwierig. Zweckmässiger wäre es auch hier gewesen, den ganzen Schleusenbau der Zukunft zu überlassen und sich für die Kleinschiffahrt mit kleineren Mitteln zu behelfen.

Das fünfte Rheinkraftwerk, *Ryburg-Schwörstadt*²⁾, wurde nur noch dazu verpflichtet, am linken Ufer Platz für zwei Schleusen zu reservieren und beim Zustandekommen der Schiffahrt die Baukosten der ersten zu tragen.

Weitaus am schlechtesten kam das sechste Kraftwerk, *Kembs*, weg, das zu den bereits erwähnten zwei Schleusen von je 25 m Breite und grossen weiteren Mehrkosten zugunsten der Schiffahrt verurteilt wurde.

Dass aber die Forderung, die Schiffahrt so weit als möglich im natürlichen Flusslauf zu belassen, auch oberhalb Basel nicht immer gleich konsequent gehandhabt wurde, zeigt das siebente Kraftwerk, *Albruck-Dogern*, an dem die Rheinisch-Westfälischen Elektrizitätswerke mit 77, der Kanton Aargau mit 22 und das Badenwerk mit 1 Prozent beteiligt sind. Hier sollte man nun ein normales Flussstauwerk mit dem Maschinenhaus auf der einen und der Schleuse auf der andern Seite des Stauwehres für die gegebene Lösung halten. Dass dagegen ein langer rechtsufriger Seitenkanal bevorzugt und darin eine Strömung von 1,9 m/s genehmigt wurde und das Maschinenhaus so quer darüber gestellt werden durfte, dass man nun mit einer Schleuse kaum mehr daran vorbeikommen kann und von einer Mitbenützung des Werkkanals durch die Schiffahrt absehen muss, stimmt mit dem von der schweizerischen Schiffahrtspropaganda immer wieder behaupteten grossen Interesse Deutschlands an der Schiffahrt nach dem Bodensee nicht ganz überein.

Auch der Vorschlag, kurz oberhalb des Maschinenhauses ein zweites Wehr zu erstellen, die ganze Hubhöhe in zwei Schleusen von je 6 m Hub zu unterteilen und die Zwischenhaltung als Winterhafen zu benützen, wurde vom Amt für Wasserwirtschaft verworfen und eine einzige Schleuse von 12 m Höhe neben dem Stauwehr bevorzugt, an die sich ein dem schweizerischen Ufer angelehnter, tief unter das alte Rheinbett eingeschnittener Unterwasserkanal anschliesst. So ist man nun zu der höchst unbefriedigenden Lösung von drei parallelen Wasserwegen gekommen.

Bemerkung der Redaktion. Die obigen Ausführungen sind dem Buche von *A. Eggenschwyler*, «Die Wirtschaftlichkeit der Rheinschiffahrt Basel-Bodensee» (Schaffhausen 1943) entnommen. Die Veröffentlichung an dieser Stelle gilt in keiner Weise als Stellungnahme des SEV zu den Fragen der Binnenschiffahrt und Wasserkraftnutzung.

¹⁾ Bull. SEV 1937, Nr. 24, S. 613.

²⁾ Bull. SEV 1932, Nr. 18, S. 461.