

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 34 (1943)
Heft: 16

Artikel: Resonanzüberspannungen in Hochspannungstransformatoren
Autor: Goldstein, J.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1061754>

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: 05.02.2026

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

abgegebenen Lichtstrom von ca. 13 600 lm pro Gruppe.

Beleuchtungsstärke an den Schaltstellen im Mittel: vertikal 78 lx, horizontal 54 lx.

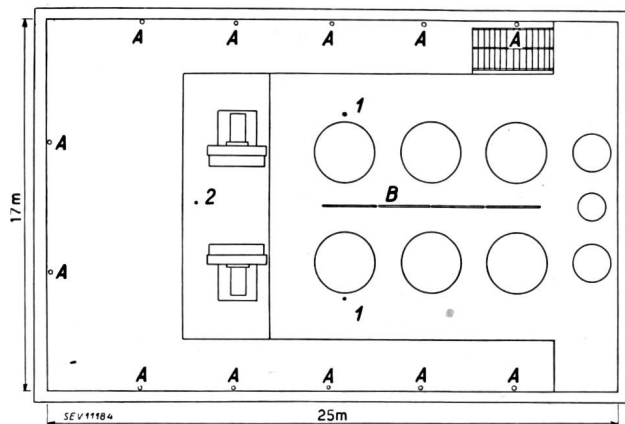


Fig. 2.

Grundriss der Verdampferhalle Ryburg.

- A Lichtgruppe von 5 m Länge, vertikal an den Wänden montiert.
B Lichtgruppe von 10 m Länge, an der Decke montiert.
1, 2 Mess-Stellen.

Verdampferhalle (Fig. 2 und Fig. 3)

Abmessungen: Länge 25,5 m, Breite 17,0 m, Höhe 21,5 m, teilweise 7,75 m.

Reflexionsverhältnisse: Decke und Wände hell, aber viele grosse Fenster mit dunkeln Vorhängen.

Besondere Anforderungen: Gleichmässige und hinreichende Allgemeinbeleuchtung, gute Horizontalbeleuchtung für Instrumenten-Bedienung. Die Anordnung der Beleuchtungsröhren ist aus den Bildern ersichtlich:

A) 12 vertikal zwischen den Fenstern montierte Lichtgruppen von je 5 m Länge, aufgeteilt in je zwei Systeme von 250 cm, dazu 12 Streufeldtransformatoren mit Kernregulierung, luftgekühlt. —

Leistungsaufnahme pro Lichtgruppe 150 W, Lichtstrom ca. 4250 lm.

B) 1 Lichtgruppe an der Decke. Totale Rohrlänge 10 m, aufgeteilt in 4 Systeme von 250 cm.

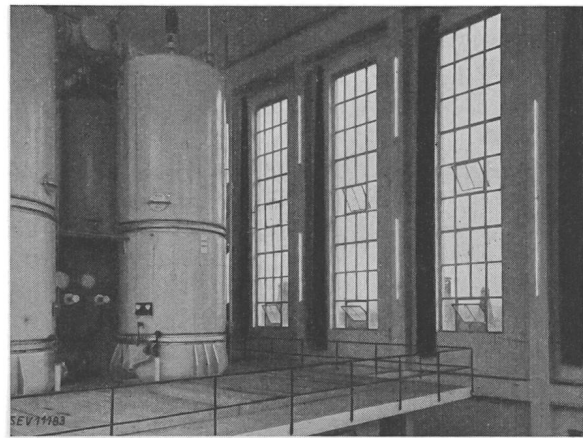


Fig. 3.

Verdampferhalle Ryburg.

(Es steht leider nur eine Tagslichtaufnahme zur Verfügung zur Illustration der Leuchtröhren-Anordnung.)

1 Streufeldtransformator, Zündspannung 6000 V. Regulierung mit Hilfe von Primäranszapfungen (4 Stufen). Leistungsaufnahme 320 W, Lichtstrom ca. 8500 lm.

Beleuchtungsstärke:

- Meßstelle 1: Vertikal 22 lx
Horizontal 33...38 lx
Meßstelle 2: Vertikal 22 lx
Horizontal 27 lx

Nach den Erfahrungen der Betriebsleitung ist die Beleuchtungsstärke in der Verdampferhalle ausreichend zum zuverlässigen Ablesen der Instrumente. In der Kompressorenhalle wird normalerweise nur eine Lichtgruppe eingeschaltet. Die volle Einschaltung erfolgt nur bei Vornahme besonderer Arbeiten an den Maschinen.

Resonanzüberspannungen in Hochspannungstransformatoren

Von J. Goldstein, Zürich

621.3.015.4

Es wird die bekannte Erscheinung der Ueberspannung infolge der Resonanz bei Hochspannungstransformatoren mit grosser Eigenkapazität im Zusammenhang mit der Verzerrung der Spannungskurve an Hand von Versuchen an Höchstspannungstransformatoren besprochen. Es wird gezeigt, wie man mit einer Spannung höherer Frequenz — vorzugsweise der Resonanzfrequenz — die Vorgänge schärfer erfassen kann.

Schliesslich wird die von Bechdoldt angegebene Methode zur Aufnahme von Hochspannungskurven mit Hilfe einer Verstärkerröhre einer Anpassung und Verbesserung unterzogen und über die Resultate von Versuchen an einem AEG-Prüftransformator für 1 Million Volt berichtet.

Einleitung

Die Frage der Resonanzüberspannungen in Hochspannungstransformatoren gehört zu den im Transformatorbau immer wiederkehrenden Problemen. Sie interessiert sowohl den Konstrukteur und Be-

Discussion du phénomène bien connu de la surtension engendrée par la résonance dans les transformateurs à haute tension de grande capacité propre, en corrélation avec la déformation de la courbe de tension, d'après des essais effectués sur des transformateurs à très haute tension. L'auteur montre qu'il est possible de mieux préciser ce phénomène en utilisant une tension de fréquence plus élevée, en particulier la fréquence de résonance.

Adaptation et perfectionnement de la méthode de Bechdoldt pour le relevé de courbes à haute tension à l'aide d'un amplificateur. Résultats obtenus lors d'essais sur un transformateur d'essai AEG pour 1 million de volts.

rechner der Hochspannungstransformatoren, als auch den Laboratoriums- und Prüffeld-Ingenieur, der mit Hochspannungsprüftransformatoren dauernd in Berührung kommt. Es handelt sich in erster Linie um Prüftransformatoren für Höchstspannungen.

Es ist daher verständlich, dass der Verfasser die im Jahre 1921 auf eine Anregung des Oberingenieurs des SEV, des unvergesslichen Fritz Tobler (†), durchgeführten ausführlichen Versuche¹⁾ stets in Erinnerung behielt und in der gleichen Richtung später weitere Versuche und Berechnungen durchzuführen bestrebt war.

In jüngster Zeit wurde die Frage für kleinere Prüftransformatoren (100 kV) erneut von der Praxis gestellt.

Es scheint dem Verfasser von allgemeinem Interesse zu sein, über einige Nachrechnungen und Versuche auf dem Gebiete der Hochspannungs-Prüftransformatoren zusammenhängend zu berichten. Es handelt sich dabei auch um Prüftransformatoren für 500 kV und 1000 kV Spannung, 500 und 1000 kVA Leistung. Die auf diesem Gebiet im Archiv für Elektrotechnik (Jahrgang 1930) veröffentlichte interessante Arbeit von Becholdt konnte durch wichtige Spezialfälle von Prüftransformatoren höchster Spannung (1000 kV) ergänzt werden. Auch in den Untersuchungsmethoden wurde eine Erweiterung erzielt.

Es sei noch bemerkt, dass es sich hier um stationäre Ueberspannungen und um eine Untersuchung des Verhaltens der Uebersetzung handelt.

Schaltvorgänge, wie etwa der plötzliche Kurzschluss der Oberspannungswicklung durch Ueberschläge am Prüfobjekt, gehören nicht zum Gegenstand dieses Aufsatzes. Diese Fragen sind mit den Fragen der Stossfestigkeit von Transformatorenwicklungen verwandt und können nur im Zusammenhang mit dem Verhalten von Wicklungen bei Spannungsstössen behandelt werden.

Ersatzschaltung

Der Resonanzkreis befindet sich in der Oberspannungswicklung. Die Kapazität der Oberspannungswicklung gegen Kern einerseits, die Streuinduktivität des Transformators andererseits, bilden die Elemente eines Schwingungskreises.

Die entsprechende Resonanzbedingung lautet:

$$\omega \cdot v = \frac{1}{\sqrt{L_s C}}$$

Hier bedeuten:

- ω Kreisfrequenz bei 50 Hz,
- v Ordnung der Harmonischen,
- L_s Streuinduktivität des Transformators reduziert auf den Oberspannungskreis,
- C Kapazität der Oberspannungswicklung gegen Kern und Unterspannungswicklung (Eigenkapazität).

Wie die Ersatzschaltungen in Fig. 1a, 1b zeigen, fliesst in der Verbindung zwischen Oberspannungswicklung (Nullpunkt) und Kern ein Strom, der mit einem Hitzdrahtamperemeter genau gemessen werden kann. Die Unterspannungswicklung ist dabei mit dem Kern zu verbinden. Der Strom I fliesst bei unbelasteter Oberspannungswicklung zu-

folge des obigen Resonanzkreises. Die Grösse der Streuinduktivität L_s kann rechnerisch nach dem in der Transformatorenberechnung üblichen Verfahren ermittelt werden. Die Ermittlung der Kapazität der Oberspannungswicklung gegen Kern und Unterspannungswicklung kann aus dem in der Verbindung Oberspannungswicklung—Kern gemessenen

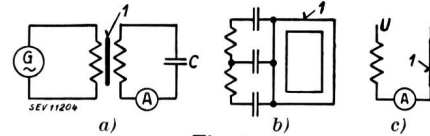


Fig. 1.
Ersatzschaltungen eines Prüftransformators mit
Eigenkapazität
1 Kern

nen Strom erfolgen (siehe Fig. 1c). Die Messung der Oberspannung ist ja ohnehin erforderlich; sie wird in der Regel mit Hilfe der Kugelfunkenstrecke vorgenommen.

Der rechnerisch ermittelte Wert der zylindrischen Kapazität der Oberspannungswicklung gegen die Unterspannungswicklung stimmt nur in grober Annäherung mit dem gemessenen Wert überein.

Versuche

Einen interessanten Einblick in die dargestellten Verhältnisse geben Versuche, die der Verfasser an 500-kV- und 1000-kV-Prüftransformatoren der AEG ausgeführt hat. Es handelte sich im zweiten Fall um einen Prüftransformator mit einer Uebersetzung 2,1/1000 kV in einer Einheit von 1000 kVA Scheinleistung. Die Messung der Oberspannung mit einer Nadelfunkenstrecke bei Erregung auf volle Spannung (950...1000 kV) mit einem 800-kVA-Generator über einen 5000-kVA-Vorschalttransformator zeigte eine interessante Abhängigkeit des Uebersetzungsverhältnisses von der Frequenz. Die Versuche wurden mit einer Teilspannung wiederholt, wobei die Spannung sowohl unterspannungsseitig als auch überspannungsseitig mit Kugelfunkenstrecken in der Anordnung nach Fig. 2

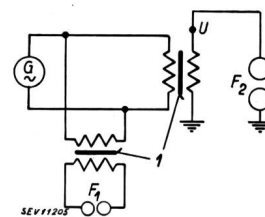


Fig. 2.
Uebersetzungsmessung
mit Hilfe von
Funkenstrecken
1 Kern

gemessen wurde. Durch diese Messanordnung wurde eine Eindeutigkeit in der Feststellung des Uebersetzungsverhältnisses erzielt. Der Verlauf des Uebersetzungsverhältnisses \ddot{u} in Funktion der Frequenz ist in Fig. 3 dargestellt. Wie ersichtlich, hat \ddot{u} im Bereich zwischen 50 und 58 Hz ein Maximum. Die Abweichung vom Uebersetzungsverhältnis der Windungszahlen im Sinne einer Spannungserhöhung beträgt ca. 20 %. Der Verlauf der Kurve lässt die Resonanzwirkung einer fünften Harmonischen vermuten. Es wurde deshalb ein Versuch mit einem 250-Hz-Generator, dessen Drehzahl regu-

¹⁾ Bulletin SEV 1921, Nr. 4.

liert werden konnte, ausgeführt und dabei das Uebersetzungsverhältnis mit Kugelfunkenstrecken in der Anordnung nach Fig. 2 bestimmt.

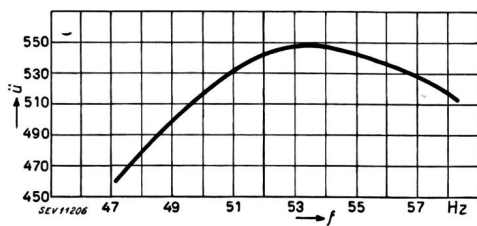


Fig. 3.

Die Uebersetzung \ddot{u} in Funktion der Frequenz

Schon das Einschalten des unerregten Generators mit einer Drehzahl entsprechend einer Frequenz von ca. 300/s ergab auf der Oberspannungsseite Spannungen von 30 kV. Der Verlauf der Kurve des Uebersetzungsverhältnisses in Funktion der Frequenz in diesem Frequenzgebiet ist in Fig. 4 dargestellt. Man beachte den ausgesprochenen Resonanzcharakter dieser Kurve. Die Verschiebung aus dem Resonanzband, welches über dem Wert von

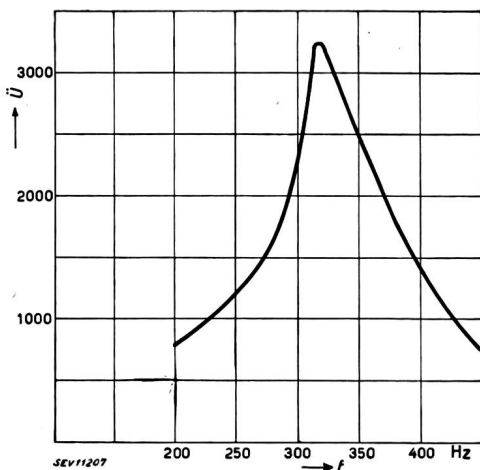


Fig. 4.

Die Uebersetzung \ddot{u} in Funktion der «Resonanzfrequenz»

250 Hz zu erwarten war, dürfte zum Teil auf Messungenauigkeit, zum Teil auf die Wirkung noch höherer Harmonischer zurückzuführen sein, welche sich wegen der Verzerrung der Spannungskurve der Maschine bemerkbar machen.

Die rechnerische Untersuchung ergab folgendes: Streuinduktivität des Transformators (aus der Kurzschlussmessung):

$$L_s = 249 \text{ H}$$

Kapazität dieser Wicklung gegen Kern

$$C = \frac{1}{71} \cdot 10^{-7} \text{ F}$$

Nach der Resonanzgleichung ergibt sich:

$$\omega v = \frac{\sqrt{7 \cdot 10^7}}{\sqrt{249}} = 1660; \text{ hieraus } v = 5,3$$

Es kommt also in diesem Falle nur die fünfte Harmonische in Frage.

Für Prüftransformatoren von 100...200 kV liegen die Verhältnisse anders.

Sowohl die Grösse der Eigenkapazität, als auch diejenige der Streuinduktivität, insbesondere die zweite, sind wesentlich geringer als beim untersuchten 1000-kV-Transformator. Dadurch ergibt sich für Prüftransformatoren mässiger Oberspannung im Leerlauf eine wesentlich höhere Ordnungszahl der höheren Harmonischen, bei welcher eine Resonanz theoretisch möglich wäre. Nun ändern sich die Verhältnisse bei kleineren Prüftransformatoren durch die Belastung sehr stark. Die Resonanzgleichung ändert sich bei Belastung, indem zur Eigenkapazität des Transformators noch die Belastungskapazität hinzukommt. Wenn diese mit C_b bezeichnet wird, so lautet die Resonanzgleichung

$$\omega v = \frac{1}{\sqrt{L_s (C + C_b)}}$$

Dazu kommt noch, dass Prüftransformatoren kleinerer Leistung zusammen mit kleineren Generatoren oder kleineren Induktionsreglern Verwendung finden. Solche Aggregate sind sehr kurvenunbeständig, indem die Rückwirkung der Belastung starke Kurvenverzerrungen zur Folge hat. In solchen Prüfanlagen ist die oszillographische Aufnahme der Ströme für das Herausfinden der Resonanzgebiete sehr wertvoll.

Aufnahme der Oberspannung mit Hilfe einer Röhrenschaltung

Es liegt nahe, eine Veränderung der Kurvenform auf der Oberspannungsseite infolge des Resonanzkreises zu vermuten. Jedenfalls ist eine Nachprüfung erwünscht, ob der Oberwellenstrom des Resonanzkreises eine Deformation der Kurvenform der Oberspannung zur Folge hat. Klar ist, dass die Höhe des Resonanzstromes von der Höhe der in der aufgedruckten Spannung enthaltenen höheren Spannungsharmonischen gleicher Ordnung abhängt, denn in der Spannungsreihe

$$e = \sum_{v=1}^{\infty} E_v \sin v \omega t$$

ist das betreffende Glied E_v die treibende EMK für diesen Resonanzstrom. Es war deshalb wichtig, die Spannungskurve auf der Primärseite mit derjenigen auf der Oberspannungsseite zu vergleichen. Eine Möglichkeit, die Spannungskurve auf der Oberspannungsseite über einen Spannungswandler aufzunehmen, besteht nicht, da es Spannungswandler für derart hohe Spannungen nicht gibt. Eine Belastung des Transformators überspannungsseitig, ganz gleich, ob es sich um eine Ohmsche oder kapazitive Belastung handelt, ist wegen der hohen Spannung umständlich. Auch die direkte Entnahme des Oberspannungstromes für die Oszillographenschleife ist unerwünscht, und man wird anstreben müssen, die Spannungskurve überspan-

bis auf den Verluststrom des Prüftransformators entlastet und diese Entlastung trägt wesentlich dazu bei, die aufgedrückte Spannung sinusförmig zu erhalten. Die Drosselspule war mit Anzapfungen versehen, wodurch bei einer variablen Belastung des Transformators durch Prüfobjekte eine richtige Kompensation des Blindstromes ermöglicht wurde. Die primär und oberspannungsseitig mit Hilfe des Messgerätes aufgenommenen Oszillogramme sind in Fig. 8 dargestellt.

Um die Kurven besser vergleichen zu können, wurden die Amplituden der Kurven durch Ohmsche Vorschaltwiderstände auf gleiche Höhe gebracht. Wie ersichtlich, sind die Kurven kaum zu unterscheiden und auch phasengleich. Die Spannungsmessung durch Funkenstrecke wies nur ge-

ringe Abweichungen vom Uebersetzungsverhältnis auf (innerhalb 5 %).

Der Fall dürfte für die behandelte Frage von allgemeinem Interesse sein, da sich aus diesem Fall nützliche Rückschlüsse und Anregungen ableiten lassen.

Chauffage par récupération de l'Emetteur de Sottens

Par R. Pièce, Sottens

621.396.615—71 : 697

Description du chauffage de l'émetteur national de Sottens par récupération des chaleurs perdues dans les lampes d'émission. L'eau de refroidissement de ces lampes cède sa chaleur dans un échangeur, à un système de chauffage central spécialement installé. Expériences faites en hiver 1942/43 avec ce nouveau système de chauffage. Il n'a pas été nécessaire d'avoir recours au chauffage électrique, d'où une économie de 60 000 kWh.

Der Verfasser beschreibt die Heizung des Landessenders Sottens unter Ausnützung der Verlustwärme, die in den Senderöhren entsteht. Das durch die Senderöhren zirkulierende Kühlwasser gibt seine Wärme in einem Wärmeaustauscher an das System der besonderen Warmwasser-Zentralheizung ab. Die im Winter 1942/43 mit der neuen Heizanlage gemachten Erfahrungen werden angegeben. Die früher benutzte elektrische Heizung musste nie in Betrieb genommen werden, so dass 60 000 kWh eingespart werden konnten.

Il est bien connu des radio-techniciens qu'une notable partie de l'énergie appliquée à l'anode d'une lampe de TSF est transformée en chaleur, donc perdue. Un refroidissement s'impose pour éviter que l'électrode en question ne prenne une température dangereuse et que le tube ne soit rapidement mis hors d'usage.

radiateurs en nids d'abeilles R_1 . L'eau qui circule en circuit fermé retourne ensuite aux réservoirs. A l'entrée et à la sortie des lampes des serpentins en porcelaine isolent les triodes de la tuyauterie constituée entièrement en tubes de cuivre. Trois groupes de ventilateurs de 7,5 kW chacun assurent le refroidissement du liquide. La température maxi-

Fig. 1.

Schéma de principe.

A Réservoir d'eau de pluie.
E Echangeur.

L Lampe émettrice:
1 Anode, 2 Grille,
3 Filament.

P_1 Pompe eau de refroidissement.

P_2 Pompe eau de chauffage.

R_1 Radiateur de refroidissement.

R_2 Radiateur de chauffage.

S Serpentin isolant.

V_1, V_2 Vannes de réglage.

V_3 Vanne d'alimentation.

W Eau d'alimentation.

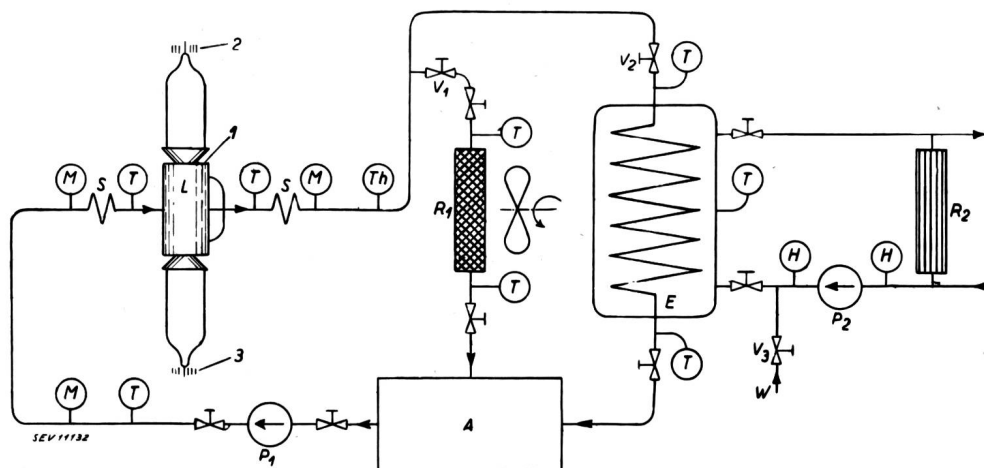
Instruments de mesure:

H Hydromètre.

M Manomètre.

T Thermomètre.

Th Thermostat de commande du ventilateur.



Pour des lampes de petite puissance un refroidissement naturel par l'air ambiant suffit mais, dès que l'on a affaire à des tubes de quelques kW, un refroidissement énergique de l'anode par ventilation forcée ou par circulation d'eau devient nécessaire.

Il est à noter que l'eau ordinaire ne convient pas; elle contient en effet des sels en dissolution qui la rendent plus ou moins conductrice et qui se déposeraient dans les conduites par électrolyse. On utilise de l'eau de pluie ou de l'eau de source déminéralisée par des procédés spéciaux.

La partie de gauche de la fig. 1 représente schématiquement l'installation de refroidissement des lampes à l'émetteur de Sottens. L'eau de pluie (environ 15 000 l) est conservée dans des réservoirs en tôle galvanisée A après avoir été récoltée par le toit; une pompe centrifuge P_1 la propulse autour des anodes des triodes L, puis dans des

num tolérée est de 50° à la sortie des lampes. Des thermomètres et des manomètres, T et M, permettent le contrôle du dispositif qui est en outre pourvu de tout un système d'alarme et de sécurité.

Chaque groupe de radiateurs est prévu pour une puissance de refroidissement de 86 000 kcal/h pour un débit de 230 l/min.

Jusqu'en automne 1942 les locaux de l'émetteur étaient chauffés électriquement (chauffage linéaire), la puissance totale installée étant de 70 kW. La pénurie d'énergie électrique qui s'est manifestée exigeant de sévères restrictions de courant, l'idée nous est venue de récupérer cette chaleur perdue et de l'utiliser pour chauffer les locaux ou tout au moins une partie et réaliser ainsi une économie sensible de courant et une réduction notable des frais de chauffage.

En collaboration avec les Etablissements J. Hunziker à Lausanne nous avons étudié cette possibilité