

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 27 (1936)
Heft: 5

Artikel: Les différentes possibilités de réaliser les essais en charge des transformateurs
Autor: Waldvogel, P.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1061475>

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: 17.02.2026

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

Dann finden wir aus den Kurven K sowie A_1 und A_2 folgende Werte des Belastungsfaktors im Tag:

$$\text{Kurve } K: \quad b = \frac{3,8 - 0,2}{11,0 - 0,2} = 0,333$$

$$\text{Kurve } A_1: \quad b = \frac{0,2 + 1,5}{7,0 + 1,5} = 0,200$$

$$\text{Kurve } A_2: \quad b = \frac{-0,8 + 5,5}{13,0 + 5,5} = 0,254$$

Für diese Werte b entnehmen wir nun der Fig. 4 die entsprechenden Mittelwertsgrößen y und finden

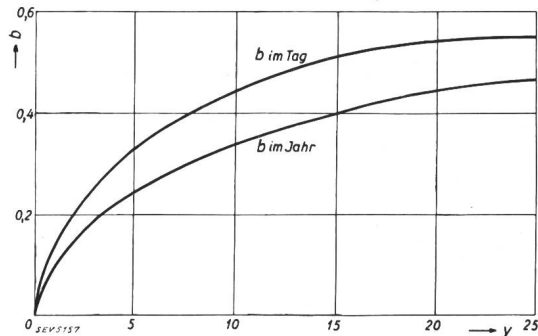


Fig. 4.

Belastungsfaktor über der Mittelwertsgrösse y .

der Reihe nach: $y = 5,0; = 1,9; = 3,0$. Für die weitere Annahme, allen Energieabnehmern eigne die gleiche relative Anschlussdauer: $t_a = \frac{T_a}{H}$, lassen sich dann wegen: $y = t_a \cdot Z$ folgende Relativwerte von Abnehmerzahlen bilden:

Kurve K : $Z = 5000$ Abnehmer

Kurve A_1 : $Z = 1900$ Abnehmer

Kurve A_2 : $Z = 3000$ Abnehmer

Auch die Verschiedenheitsfaktoren v können als Relativwerte angegeben werden, nämlich 0,30 für die Kurve K , sowie 0,50 und 0,39 für die Kurven A_1 und A_2 . Da aber, wie schon gesagt, in jedem Ge-

biete andere Werte der Abnehmer-Anschlussleistung nicht ausgeschlossen sind, ist auch nicht einmal relativ etwas über die Leistungen P und P_{max} der Gebiete angebbar.

Eine besondere Betrachtung haben wir noch der Kurve U der Fig. 2 zu widmen. Da die Bezugsstelle dieser Kurve, ein Unterwerk, sich zwischen extremen Bezugspunkten, d. h. zwischen dem Kraftwerk und den entferntesten Abnehmergruppen befindet, deren Häufigkeitskurven spiegelbildlich unsymmetrisch sind, so ist es naheliegend, dass es zwischen den extremen Bezugspunkten einen Zwischenpunkt mit mehr oder weniger genau symmetrischer Häufigkeitskurve geben muss. Diese kann dann allerdings nicht mehr als Index von Belastungszuständen dienen, weil an der genannten Stelle ein Ausgleich von Spannungsgefällen ($z \cdot I$) durch Regelungen ΔU_r derart stetig vor sich geht, dass sich in der Beobachtungszeit T die Beträge ($z \cdot I$) und ΔU_r statistisch ausgleichen, wobei die resultierende Häufigkeitskurve zur «Fehlerkurve» dieses Ausgleichs wird und als solche symmetrisch ist. Ein solcher Zwischenpunkt kann zufällig sehr wohl in einem Unterwerk ohne Spannungsregulierung anzutreffen sein.

Die Auswertung von Spannungs-Registrierdiagrammen zu Häufigkeitskurven liefert Arbeitsmaterial für die sog. Grosszahlforschung, die auf dem Gebiete des Elektrizitätswerkbetriebes noch mancher wertvoller Anwendung fähig ist. Durch die oben erwähnte englische Arbeit wurden mit den Häufigkeitskurven der Spannungsänderung bemerkenswerte Feststellungen bezüglich der Wirkung von Spannungsänderungen auf die Verbrauchsapparate gemacht. In der vorliegenden Arbeit unternahmen wir den Versuch, diese Häufigkeitskurven unter dem Gesichtspunkt des Belastungsausgleichs in elektrischen Anlagen nutzbar zu machen. Wir möchten unsere Betrachtung abschliessen mit dem Hinweis darauf, dass den Problemen der Grosszahlforschung seitens der Elektrophaxis überhaupt vermehrte Aufmerksamkeit geschenkt werden sollte.

Les différentes possibilités de réaliser les essais en charge des transformateurs.

Par P. Waldvogel, Aix-les-Bains.

621.314.21.0014

Après nous avoir fait remarquer les avantages de la méthode de récupération pour les essais en charge des transformateurs, l'auteur applique la théorie classique du transformateur et de la machine synchrone au circuit constitué par les deux transformateurs et l'alternateur, il en déduit ce qui se passe lors de ces essais. Vu la complexité des phénomènes dans le cas général, l'auteur établit un diagramme qui permet de résoudre toutes les questions qui peuvent se présenter pratiquement.

Nach einem Hinweis auf die Vorteile der Rückarbeitungsmethode bei Belastungsversuchen an Transformatoren wird die klassische Theorie des Transformators und der Synchronmaschine auf den Stromkreis der beiden Transformatoren und des Synchrongenerators angewendet, woraus sich die für den Versuch wichtigen Beziehungen ergeben. Im allgemeinen Fall sind die Verhältnisse sehr kompliziert; der Autor leitet daher ein Diagramm ab, aus dem die Lösung aller praktischen Fragen abgelesen werden kann.

Le fait que, parmi toutes les machines électriques, le transformateur est sans aucun doute celle qui se prête le mieux au calcul, oblige le constructeur à mettre un soin minutieux dans l'exécution des essais destinés à contrôler l'exactitude de ses prévisions. En particulier, la réalisation des

essais d'échauffement n'est pas sans présenter certaines difficultés, à cause même de la précision qu'on leur demande.

La première question qui se pose à ce sujet est celle de réaliser, effectivement ou par un artifice,

la vraie charge du transformateur. Tel est le problème que nous nous proposons d'étudier ici.

La solution la plus simple à envisager consiste à faire simplement débiter au transformateur sa charge sur un certain récepteur (résistance, réactance ou machine synchrone). Cette solution, qui présente peu d'intérêt au point de vue théorique, est d'ailleurs pratiquement fort peu utilisée, car il est rare d'avoir à sa disposition l'impédance de charge désirée.

On trouve également dans la littérature différents montages spéciaux qui permettent à la fois de développer dans le fer les pertes normales et de faire circuler dans les enroulements le courant normal; mais tous ces montages présentent l'inconvénient d'engendrer des champs de fuites anormaux qui font naître des pertes parasites importantes dans la cuve du transformateur. On peut aussi, il est vrai, avoir recours au courant continu pour charger les enroulements. Mais la méthode qui donne de loin les meilleurs résultats et qui est la plus facile à mettre en œuvre est certainement celle de *récupération*. Elle présente malheureusement l'inconvénient d'exiger la disponibilité de deux transformateurs semblables.

Ce sont plus spécialement les phénomènes qui se passent lors d'un essai de ce genre, que nous nous proposons d'examiner de plus près.

Conformément à la figure 1, nous supposons donc que les enroulements primaires de deux transformateurs monophasés semblables soient alimentés par une tension fixe que nous supposons être celle d'un réseau. Les deux secondaires sont couplés en parallèle par l'intermédiaire d'une machine synchrone dont la tension aux bornes est u . Un montage tout à fait analogue peut naturellement se concevoir en triphasé.

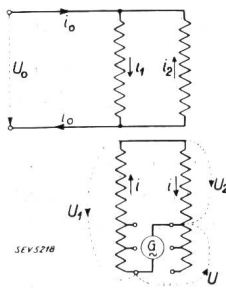


Fig. 1.

Dans le cas le plus général, les deux appareils ne seront pas rigoureusement identiques, c'est-à-dire qu'ils ne seront pas couplés sur les mêmes prises, si les enroulements sont prévus avec des prises d'ajustage.

Soient respectivement K_1 et K_2 les rapports des nombres de spires (primaires sur secondaires) des deux appareils, λ leur réactance de fuite rapportée au primaire, ωl leur réactance totale primaire et $\omega l'$ la réactance synchrone de la machine.

En se reportant à la fig. 1 et en se rappelant la théorie classique du transformateur, on peut immédiatement écrire les relations suivantes¹⁾.

$$U_0 = j \cdot \frac{\omega \lambda}{2} \cdot \mathfrak{I}_1 + j \cdot \frac{\omega \lambda}{2} \cdot \frac{\mathfrak{I}}{K_1} + K_1 \cdot U_1 \quad (1)$$

¹⁾ Les lettres gothiques représentent toujours des grandeurs complexes ou des vecteurs. j est le symbole des imaginaires.

$$U_0 = -j \cdot \frac{\omega \lambda}{2} \cdot \mathfrak{I}_2 - j \cdot \frac{\omega \lambda}{2} \cdot \frac{\mathfrak{I}}{K_2} + K_2 \cdot U_2 \quad (2)$$

$$U = U_2 - U_1 \quad (3)$$

$$U_0 - j \cdot \frac{\omega \lambda}{2} \cdot \mathfrak{I}_1 = j \omega l \cdot \left(\mathfrak{I}_1 - \frac{\mathfrak{I}}{K_1} \right) \quad (4)$$

$$U_0 + j \cdot \frac{\omega \lambda}{2} \cdot \mathfrak{I}_2 = j \omega l \cdot \left(\frac{\mathfrak{I}}{K_2} - \mathfrak{I}_2 \right) \quad (5)$$

En outre, on sait que dans une machine synchrone, la tension aux bornes U est égale à la force électro-motrice \mathfrak{E} diminuée de la chute dans la réactance synchrone.

$$U = \mathfrak{E} - j \omega l' \mathfrak{I} \quad (6)$$

L'intensité du vecteur \mathfrak{E} dépend de l'excitation de la machine, et l'angle ϑ qu'il forme avec U représente l'écart angulaire entre la roue polaire et le champ.

De ces 6 équations, on tire en particulier:

$$\mathfrak{I} = j \alpha \cdot \frac{U_0}{X} - j \cdot \frac{\mathfrak{E}}{X} \quad (7)$$

$$2 \mathfrak{I}_0 = \mathfrak{I}_1 - \mathfrak{I}_2 = -j \cdot \frac{4 U_0}{\omega (2l + \lambda)} - \alpha \cdot \mathfrak{I} \quad (8)$$

en posant:

$$X = \omega l' + \omega \lambda \cdot \frac{4l + \lambda}{2l + \lambda} \cdot \left(\frac{1}{2K_1^2} + \frac{1}{2K_2^2} \right) \quad (9)$$

$$\alpha = \frac{2l}{2l + \lambda} \cdot \left(\frac{1}{K_2} - \frac{1}{K_1} \right) \quad (10)$$

Ces deux dernières expressions peuvent d'ailleurs se simplifier, si l'on remarque que λ est petit vis-à-vis de l .

$$X = \omega l' + \omega \lambda \cdot \left(\frac{1}{K_1^2} + \frac{1}{K_2^2} \right) \quad (9')$$

$$\alpha = \frac{1}{K_2} - \frac{1}{K_1} \quad (10')$$

Nous avons maintenant tous les éléments pour étudier dans chaque cas ce qui se passe.

1^{er} cas: Les deux transformateurs sont sur des prises différentes, et il n'y a pas de machine insérée dans le circuit secondaire.

$$K_1 = K_2 \quad E = 0 \quad l' = 0$$

On voit d'après l'équation (7) que le courant I qui circule dans les enroulements, est alors simplement proportionnel à la tension d'alimentation U_0 .

Ce cas de fonctionnement étant parfaitement connu, nous ne nous y attarderons pas davantage.

²⁾ Ces relations ont été établies sans tenir compte des pertes, simplification que l'on peut tolérer pour une étude qualitative. D'ailleurs on pourrait, si on le désirait, affecter λ et l d'un argument $e^{-j\psi}$ correspondant respectivement aux pertes cuivre et aux pertes fer.

2^e cas: Les deux transformateurs sont sur la même prise.

$$K_1 = K_2 = K$$

Pour fixer les idées, nous supposons que la tension U_0 est fournie par un réseau, tandis que la tension U est fournie par un alternateur qui serait entraîné par ex. par un moteur à courant continu. On trouve alors:

$$X = \omega l' + \omega \lambda \cdot \frac{4l + \lambda}{2l + \lambda} \cdot \frac{1}{K^2} \cong \omega l' + \frac{2\omega\lambda}{K^2}$$

$$\alpha = 0$$

$$\mathfrak{F} = -j \cdot \frac{\mathfrak{G}}{X}$$

$$2 \mathfrak{F}_0 = -j \cdot \frac{4 \mathfrak{U}_0}{\omega (2l + \lambda)} \cong -j \cdot \frac{4 \mathfrak{U}_0}{2\omega l}$$

On constate donc que le courant I_0 fourni par le réseau ne dépend que de la tension U_0 de ce dernier, et que le courant I débité par l'alternateur ne dépend que de l'excitation E de celui-ci.

On peut donc dire en toute rigueur que le réseau fournit l'énergie réactive nécessaire pour magnétiser les deux circuits des deux transformateurs ainsi que les pertes qui y sont engendrées, et que l'alternateur fournit l'énergie réactive correspondant au champ de fuites ainsi que les pertes dans le cuivre.

Cette propriété s'explique aisément par le fait que, lorsque l'alternateur n'est pas excité ($E=0$), les deux transformateurs sont à vide ($I=0$) et qu'au contraire, lorsque la tension du réseau n'est pas appliquée ($U_0=0$), les deux transformateurs se trouvent en court-circuit ($U_0=0$).

Une question intéressante à soulever est celle de la synchronisation de l'alternateur sur le réseau. Y a-t-il réellement un couple synchronisant, ou bien l'alternateur est-il libre de tourner à une fréquence différente de celle du réseau?

Il est aisé de se rendre compte que c'est cette seconde alternative qui se produit, car le réseau n'impose nullement sa tension (et partant sa fréquence) aux bornes de l'alternateur. C'est ce que traduit mathématiquement le fait que I ne dépend que de E et nullement de U_0 .

L'expérience confirme d'ailleurs pleinement ces conclusions et l'on peut tout au plus maintenir la fréquence de l'alternateur voisine de celle du réseau.

Pour se représenter d'une façon simple comment varient les différentes grandeurs électriques qui nous occupent, on peut admettre que la pulsation de la force électromotrice \mathfrak{G} est bien la même que celle du réseau, mais que la phase de cette dernière varie lentement avec le temps et d'une façon continue.

On conçoit aisément alors que la phase du courant \mathfrak{F} puisse varier de 180° , c'est-à-dire que ce dernier puisse circuler dans un sens ou dans l'autre.

En d'autres termes, chacun des deux transformateurs fonctionne la moitié du temps en élévateur et la moitié du temps en abaisseur.

Il s'ensuit qu'en moyenne les pertes sont rigoureusement les mêmes pour les deux appareils.

C'est précisément un des avantages de cette méthode, que celui de permettre de faire l'essai d'échauffement simultanément sur deux appareils identiques.

3^e cas: Les deux transformateurs sont sur des prises différentes:

$$K_1 = \frac{K}{1 + \xi}$$

$$K_2 = \frac{K}{1 - \xi}$$

et l'alternateur débite sur les enroulements secondaires. On trouve alors:

$$X = \omega l' + \omega \lambda \cdot \frac{4l + \lambda}{2l + \lambda} \cdot \frac{1}{2K^2} \cdot [(1 + \xi)^2 +$$

$$(1 - \xi)^2] \cong \omega l' + \frac{2\omega\lambda}{K^2} \cdot (1 + \xi^2)$$

$$\alpha = -\frac{2l}{2l + \lambda} \cdot \frac{1}{K} \cdot 2\xi \cong -\frac{2}{K} \cdot \xi$$

Par conséquent I tout comme I_0 dépend dans ce cas aussi bien de la tension du réseau (U_0) que de l'excitation de l'alternateur (E). On peut écrire:

$$\mathfrak{F} = \frac{-\alpha \mathfrak{U}_0 + \mathfrak{G}}{j \cdot X}$$

Or, on remarque que $-\alpha \mathfrak{U}_0 = 2\xi \cdot \frac{\mathfrak{U}_0}{K}$ n'est pas autre chose, que la différence des tensions secondaires à vide ou, si l'on veut, la f. é. m. produite dans le circuit secondaire par le réseau.

Par conséquent, les f. é. m. secondaires produites par le réseau et par l'alternateur sont exactement compensées par le passage du courant I dans la réactance X : celle-ci est elle-même constituée par la réactance synchrone de la machine et par les réactances de fuite des deux transformateurs. Quant au courant $2\mathfrak{F}_0$, il peut s'écrire:

$$2 \mathfrak{F}_0 = \frac{2 \mathfrak{U}_0}{j \omega (l + \frac{\lambda}{2})} + 2 \xi \cdot \frac{\mathfrak{F}}{K}$$

Il se compose donc premièrement des deux courants à vide des deux appareils, et en outre de la différence des deux courants de charge primaires. Un cas particulier qui n'est pas sans intérêt est celui où les deux enroulements primaires ne sont pas fermés sur un réseau puissant: on a alors $I_0 = 0$, c'est-à-dire:

$$\frac{\mathfrak{U}_0}{j \omega (l + \frac{\lambda}{2})} \cdot K = -\xi \cdot \mathfrak{F}$$

En d'autres termes: le courant magnétisant du côté secondaire est égal à $\xi \cdot I$. Par conséquent on peut, tout en faisant circuler dans les enroulements se-

$$\frac{OA_1}{OA_2} = \frac{A_1 X_1}{A_2 Y} = \frac{\lambda}{\lambda + l'K^2}$$

D'autre part, on peut remarquer que:

$$\frac{OX_1}{X_1 Y} = \frac{A_1 X_1}{A_1 X_1 + A_2 Y} \quad \text{D'où: } OX_1 = E \cdot \frac{\lambda}{\lambda + l'K^2}$$

Si nous supposons que l'excitation de notre machine reste constante nous devons considérer dans notre diagramme E comme une constante. Le paramètre se trouve alors être la puissance fournie (ou prise) à la machine synchrone, c'est-à-dire dans notre diagramme la phase du vecteur \mathfrak{E} .

Il résulte immédiatement des considérations précédentes que le point X se déplace sur un cercle de centre 0 et de rayon $E \cdot \frac{\lambda}{\lambda + l'K^2}$.

Notre diagramme permet alors très simplement de suivre la variation des différentes grandeurs qui nous intéressent. Ainsi le courant de circulation I des deux transformateurs est représenté par le vecteur $\vec{A_1 X_1} = -j \cdot \frac{\omega \lambda}{K^2} \cdot \mathfrak{E}$. Il est facile également de trouver une représentation de la puissance P fournie (ou absorbée) par la machine synchrone.

$$\begin{aligned} P &= \text{projection de } I \text{ sur } U = \text{projection de } \frac{\vec{X_2 Y}}{j \omega l'} \\ &\text{sur } \vec{X_1 X_2} = \text{projection de } \frac{\vec{X_2 X_1} + \vec{X_1 Y}}{j \omega l'} \text{ sur } \vec{X_1 X_2} = \\ &\text{projection de } \frac{\vec{X_1 Y}}{j \omega l'} \text{ sur } \vec{X_1 X_2} = 2 \cdot X_1 C \cdot X_1 O \cdot \\ &\frac{\lambda + l'K^2}{\lambda} \cdot \frac{1}{\omega l'} \cdot \sin \widehat{CX_1 O} \\ &= 2 \cdot \frac{\lambda + l'K^2}{\lambda} \cdot \frac{1}{\omega l'} \cdot CO \cdot HX_1 \end{aligned}$$

si H est le pied de la perpendiculaire abaissée de X_1 sur $A_1 A_2$.

En remplaçant CO par sa valeur, on a en définitive:

$$P = E_0 \cdot 2 \xi K \cdot \frac{\lambda + l'K^2}{2\lambda + l'K^2} \cdot \frac{H X_1}{\omega \lambda}$$

La puissance P est donc directement donnée par la distance HX_1 .

On voit déjà que le demi-cercle supérieur correspond au fonctionnement en générateur et le demi-cercle inférieur au fonctionnement en moteur.

D'autre part, on sait que si l'on tend à augmenter la vitesse de rotation de l'alternateur, c'est-à-dire, si l'on décale en avant sa roue polaire, la puissance débitée doit augmenter pour que le régime soit stable.

En d'autres termes, sur notre diagramme, lorsque X_1 se déplace sur le demi-cercle supérieur en sens inverse des aiguilles d'une montre, il faut que HX_1 augmente. On en conclut que seul le quadrant de droite du demi-cercle supérieur correspond à un fonctionnement stable du générateur. On verrait pareillement que seul le quadrant de droite du demi-cercle inférieur correspond à un fonctionnement stable du moteur.

Il est aisé, en se basant sur le diagramme que nous venons d'établir, de résoudre toutes les questions qui peuvent se présenter pratiquement. Par exemple, on se rend compte que, pour une excitation donnée, le courant de circulation qui traverse les transformateurs sera d'autant plus grand que l'on fera débiter ou absorber par l'alternateur une puissance plus grande. Il existe toutefois un maximum qu'on ne saurait dépasser faute de quoi la machine tomberait hors du synchronisme.

D'autre part, si la machine synchrone tourne simplement à vide sans être entraînée par un moteur auxiliaire, le point du cercle caractérisant un tel fonctionnement est celui du diamètre horizontal qui se trouve à droite. On voit immédiatement que l'insertion de la machine synchrone a dans ce cas pour effet une diminution du courant de circulation qui serait provoqué par le simple écart des prises, à moins que l'excitation de la dite machine ne soit très forte.

Nous avons d'ailleurs eu plusieurs fois l'occasion de vérifier expérimentalement ce fait.

Stabilisator grösserer Stromstärke bei stetig veränderlicher Sekundärspannung.

Von G. Fejér und R. Sängler, Zürich.

621.316.722 : 621.385.5

Es wurde ein Gerät entwickelt, welches eine Entnahme von maximal 150 mA Gleichstrom gestattet bei beliebiger Wahl der Spannung von 0 bis 1500 Volt. Der Spannungsverlust über die Stabilisatorröhre beträgt 650 Volt, so dass die Primärspannung um diesen Betrag höher als die maximale Sekundärspannung sein muss. Das Gerät arbeitet mit einer Triode, einer HF-Pentode, einer Trockenbatterie von 40 Volt und 6×2 Volt-Akkumulatoren. Einer Schwankung der Primärspannung um ± 100 V entspricht eine Schwankung der Sekundärspannung um $\pm 1/5$ Volt. Die Arbeit wurde im Physikalischen Institut der Eidg. Techn. Hochschule in Zürich ausgeführt.

Les auteurs ont développé un appareil qui donne au maximum 150 mA de courant continu, sous une tension variable à volonté entre 0 et 1500 V. La chute de tension dans le tube stabilisateur s'est de 650 V, de sorte que la tension primaire doit être supérieure d'autant à la tension secondaire maximum. L'appareil comporte une triode, une pentode HF, une pile sèche de 40 V et six accumulateurs de 2 V. A une variation de la tension primaire de ± 100 V correspond une variation de la tension secondaire de $\pm 1/5$ V. Les travaux ont été exécutés à l'Institut de Physique de l'Ecole Polytechnique Fédérale à Zurich.

Zur Durchführung mancher physikalischer Messungen sind Spannungen grosser Konstanz von meh-

reren hundert bis tausend Volt nötig. Die Verwendung von Akkumulatorbatterien ist zu kostspielig.