

**Zeitschrift:** Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins  
**Herausgeber:** Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke  
**Band:** 55 (1964)  
**Heft:** 9

**Artikel:** Problèmes généraux d'équipement de laboratoires pour très hautes tensions, en vue du développement et des essais du matériel 750 kV  
**Autor:** Froidevaux, J.  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-916706>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **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. [Voir Informations légales.](#)

### **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. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 17.03.2025

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

# Problèmes généraux d'équipement de laboratoires pour très hautes tensions, en vue du développement et des essais du matériel 750 kV

Conférence, donnée à l'Assemblée de discussion de l'ASE le 20 janvier 1964 à Zurich, par J. Froidevaux, Genève

621.317.2.027.875

*L'exposé commence par l'examen des caractéristiques de l'équipement et de la disposition d'un laboratoire pour l'essai de matériel à très haute tension. Il se poursuit par l'examen d'une série de problèmes particuliers surgissant à propos des essais de développement et de réception de ce matériel, problèmes qui ont une influence sur les techniques d'essais, l'appareillage et l'équipement qu'ils nécessitent. Ces divers problèmes sont posés plutôt que développés dans tous leurs aspects techniques.*

*Es werden vorerst die Anforderungen an die Einrichtung und die Anlage eines Laboratoriums für Materialprüfungen mit sehr hohen Spannungen behandelt. Dann wird mit der Besprechung einer Reihe besonderer Probleme fortgefahren, die bei der Entwicklung und der Abnahme dieses Materials auftreten, und welche auf die entsprechende Versuchstechnik, auf die Apparate und Ausrüstungen einen Einfluss haben. Dabei werden allerdings die damit zusammenhängenden Fragen mehr nur erwähnt als eingehend technisch behandelt.*

Les problèmes évoqués par le titre de cette conférence ne peuvent être traités de façon complète en un temps restreint. Notre propos se limitera, en conséquence, à l'examen de quelques questions d'intérêt général.

Nous donnerons tout d'abord les caractéristiques principales des appareils devant équiper un laboratoire à très haute tension que, pour fixer les idées, nous imaginerons incorporé à une usine fabriquant des transformateurs et de l'appareillage d'une tension de service allant jusqu'à 750 kV. Nous en déduirons les dimensions principales des locaux et des places de travail indispensables. Les performances de l'équipement d'un tel laboratoire sont à déterminer en tenant compte du fait que, pour des raisons d'économie bien évidentes, ses installations doivent être utilisées aussi bien pour des essais de recherche et de développement que pour des essais de réception du matériel construit par l'usine.

Nous parlerons ensuite de quelques problèmes particuliers qui surgissent au cours des travaux de recherche et des essais relatifs au matériel à très haute tension. Certains de ces problèmes ne seront d'ailleurs qu'énoncés, l'état actuel de nos connaissances ne nous permettant pas d'en donner la solution la meilleure. Ceci nous conduira à nous poser certaines questions nous éloignant apparemment un peu du sujet strict de cet exposé.

Le matériel est nécessaire pour pouvoir effectuer les essais de recherche et de développement relatifs à ce même matériel. Quant à la puissance apparente du transformateur d'essai elle dépend naturellement de la capacité du matériel à essayer. Une puissance propre du transformateur de l'ordre de 2000 kVA constitue une norme raisonnable. Cette puissance est d'ailleurs autant déterminée par des questions de facilité de réglage de la tension et de la puissance apparente des sources d'alimentation que par des considérations d'échauffement du transformateur, les essais étant le plus souvent de faible durée.

Un transformateur d'essai à très haute tension doit être dépourvu d'ionisation interne et externe jusqu'à un niveau de tension voisin de son niveau nominal. Cela pose un problème dont la solution n'est pas immédiate en ce qui concerne l'extérieur du transformateur et ses connexions. Cette solution dépend d'ailleurs du type de transformateur. La fig. 1 montre, par exemple, une cascade de deux transformateurs montés en une seule colonne et pouvant fonctionner sans ionisation externe jusqu'à près de 1000 kV. Nous reviendrons plus loin sur ce sujet à propos des mesures d'ionisation qu'on peut souhaiter effectuer sur le matériel en essai.

## 1. L'équipement principal d'un laboratoire pour très hautes tensions

Les normes nationales et internationales n'ont pas encore pris en considération les tensions de service de réseaux voisines de 750 kV. Les tensions d'essai du matériel correspondant ne sont ainsi pas encore fixées et ne peuvent être déterminées pour l'instant qu'en extrapolant les valeurs en usage pour des niveaux de tension plus bas. Nous pouvons compter de cette manière sur des tensions d'essai de l'ordre de 1000 à 1100 kV à la fréquence industrielle et de l'ordre de 2500 kV en ondes de choc. Si l'on considère, pour ce dernier type d'essai, une tension plus élevée encore pour les ondes coupées qu'on utilisera éventuellement, on devra pouvoir disposer de tensions de choc voisines de 3000 kV.

Partant de ceci, on peut définir les caractéristiques du transformateur d'essai et du générateur de choc devant équiper le laboratoire d'essais à très hautes tensions qui nous intéresse:

### 1.1 Transformateur d'essai

La tension maximum de ce transformateur doit être de l'ordre de 1400 à 1500 kV. La marge entre ces valeurs de tension et la tension maximum d'essai prévue pour le ma-

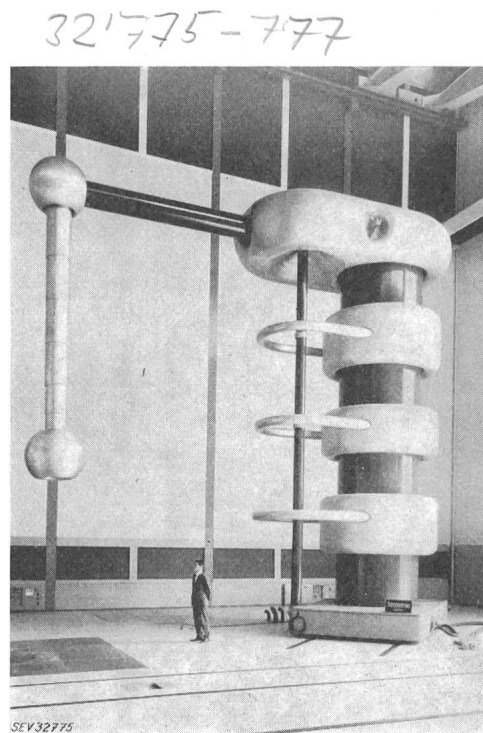


Fig. 1

Transformateur d'essai pour laboratoire à très haute tension  
Deux unités en cascade permettant d'atteindre 1350 kV nominaux

## 1.2 Générateur de choc

Faisant usage des mêmes principes de choix de la tension que pour le transformateur d'essai, nous nous voyons dans l'obligation de prévoir un générateur de choc pouvant délivrer effectivement 3500 kV environ, ce qui impose une tension de charge totale de cet appareil comprise entre 4500 et 5000 kV. Son énergie disponible devrait être au moins voisine de 300 kW, énergie surtout nécessaire lors de l'essai de transformateurs de très grande puissance.

La construction de générateurs de choc à très haute tension pose de nombreux problèmes. Nous ne relèverons que la difficulté que l'on a de mesurer correctement à ces niveaux la forme des tensions de choc par le moyen d'un diviseur de tension, surtout pour des ondes de front très raide ou coupées au voisinage de leur crête. Cette difficulté, existant déjà pour des tensions plus basses, est accrue ici par les énormes dimensions des circuits.

## 1.3 Mesure des tensions

L'éclateur à sphères est l'appareil de mesure de tension agréé par les normes en usage. Des sphères d'un diamètre de deux mètres sont les plus grandes que ces normes considèrent. Elles sont toutefois insuffisantes pour la mesure correcte de tensions de choc dépassant 2000 kV. Des sphères de diamètre plus grand sont onéreuses surtout par la place qu'elles exigent dans un laboratoire pour leur implantation correcte. Il semble en conséquence raisonnable de se limiter à des sphères de deux mètres de diamètre au maximum et de recourir à une méthode d'extrapolation pour la mesure de tensions échappant au domaine normal de l'éclateur. On peut se demander s'il ne serait pas opportun de reposer le problème de la mesure des tensions élevées et d'admettre l'usage de diviseurs de tension étalonnés officiellement et même d'appareils conventionnels spéciaux comme par exemple des chaînes de parafoudres à éclateurs irradiés et calibrés de manière permanente.

## 1.4 Dimensions du laboratoire et emplacement d'essai

Les transformateurs de puissance sont les appareils les plus lourds et souvent les plus encombrants qu'on doive envisager d'essayer dans un laboratoire à très haute tension. Des unités de 500 MVA et plus sont à prévoir ce qui exige un emplacement d'essai supportant des charges de plus de 500 t et mesurant au minimum 20 m de longueur. La hauteur libre exigée par de tels essais est de l'ordre de 20 m également. Ceci donne une idée des dimensions nécessaires du laboratoire qui devrait avoir 80 m de longueur au minimum, 20...30 m de largeur et autant de hauteur, ceci pour faire place au strict minimum en ce qui concerne l'appareillage d'essai. De telles dimensions suggèrent l'examen d'une solution consistant partiellement en un laboratoire à ciel ouvert.

## 2. Problèmes particuliers

Nous aimerions évoquer maintenant quelques problèmes particuliers qui se présentent au cours de l'activité de recherche ou d'essai d'un laboratoire pour très hautes tensions. Ces problèmes sont particuliers au matériel à très haute tension et leur solution en raison de cela même ne peut être identique à celle qui convient pour un niveau habituel de tension.

Nous le disions précédemment, nous n'avons pas la prétention de donner toujours une solution à ces problèmes mais de les énoncer correctement.

### 2.1 Essai de prototypes de transformateurs

La construction et l'essai complet de prototypes de transformateurs revêt souvent une grande importance pour un constructeur désirant fabriquer du matériel d'un niveau de tension de service très supérieur à ceux qu'il a pratiqué préalablement. Ces prototypes sont à la fois très utiles pour les expériences qu'ils permettent de faire et pour la preuve qu'ils apportent de la maîtrise du constructeur dans le domaine. Mais pour cela ces prototypes doivent être assez représentatifs d'une réalisation en vraie grandeur. Il nous semble que deux conditions au moins doivent être satisfaites pour cela. Ils doivent tout d'abord avoir une puissance de dimensionnement suffisante pour que la géométrie de leurs bobinages, leurs formats de fils et la configuration de leurs isolements conduisent à des contraintes voisines de celles qu'on observerait sur un transformateur réel au cours des essais de tension. Il faut ensuite que ces prototypes soient conformes à une disposition constructive réelle. Il est rare qu'un transformateur à très haute tension doive effectuer un transfert d'énergie entre un réseau à basse tension et le réseau à très haute tension auquel il est raccordé. Il est plutôt appelé à relier ce dernier à un réseau lui-même à haute tension, ce qui conduit généralement à adopter pour cette liaison la solution de l'autotransformateur et non celle du transformateur. On aura ainsi par exemple à considérer le cas d'un échange d'énergie entre un réseau à 750 kV et un réseau à 400 kV.

La construction d'un prototype d'autotransformateur destiné à ce service exigera l'étude d'une distance isolante d'extrémité, entre le bobinage et la culasse du circuit magnétique, prévue pour une tension de service de 400 kV. Cette difficulté est évitée du côté 750 kV en faisant entrer la connexion de la borne à mi-hauteur du bobinage, ce qu'on ne peut faire bien évidemment qu'une fois sur une colonne.

L'essai d'un prototype de transformateur à très haute tension nécessite donc l'étude préalable de distances d'extrémités de bobinage à très haute tension. Il est avantageux de réaliser quelques essais sur des maquettes de cet isolement ce qui demande l'usage d'une cuve à huile de dimensions importantes et surtout d'une borne de traversée permettant de pousser ces maquettes jusqu'au claquage.

### 2.2 Essai au choc des autotransformateurs à très haute tension

Pour fixer les idées examinons la question de l'essai au choc d'un autotransformateur 750/400 kV. Comme on le sait le problème relatif à cet essai est de limiter à un niveau raisonnable l'amplitude de l'oscillation de la borne non soumise au choc. Un moyen simple consiste à relier directement cette borne à la terre ou tout au plus par l'intermédiaire d'une résistance de faible valeur. Cette pratique a l'avantage de traduire les conditions approximatives de couplage dans lesquelles se trouve l'autotransformateur en service et de donner lieu aux contraintes les plus sévères pendant l'essai. Elle présente l'inconvénient de provoquer un fort appel de courant au générateur de choc qui doit alimenter le court-circuit créé par cette mise à terre (fig. 2). Il est alors parfois malaisé

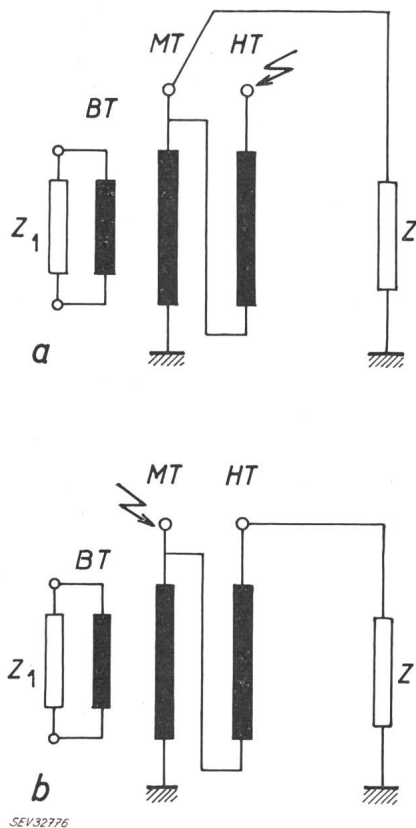


Fig. 2

Impédances couplées aux bornes d'un autotransformateur monophasé, soumis

a à un essai de choc sur sa borne BT; b à un essai de choc sur sa borne MT

BT basse tension; MT moyenne tension; HT haute tension; Z impédance de mise à terre de la borne non soumise à l'essai;  $Z_1$  impédance de fermeture de la basse tension (BT)

de maintenir la forme normalisée de l'onde et le courant de court-circuit dont nous venons de parler agit comme un courant parasite dans l'oscillogramme de courant de neutre puisqu'il ne participe que peu à la détection d'un défaut éventuel. Ces raisons font qu'on peut désirer augmenter la valeur de la résistance de mise à masse de la borne non soumise au choc tout en maintenant l'amplitude de l'oscillation de cette dernière à un niveau inférieur à son niveau de choc nominal. Mais alors apparaît une autre difficulté, le danger d'ionisation et de décharges partielles de la résistance en question qui est soumise à une tension relativement élevée du fait des tensions nominales élevées elles-mêmes de l'autotransformateur. Ces décharges partielles ont pour effet de brouiller les oscillogrammes destinés à la détection des défauts éventuels.

La solution de compromis qu'on adoptera sera fonction du matériel dont on dispose mais devra cependant tendre vers l'abaissement maximum de l'amplitude d'oscillation de la borne non soumise directement à l'essai de choc.

### 2.3 Mesures d'ionisation

On appelle ionisation, d'ailleurs un peu improprement, l'ensemble des phénomènes de microdécharges pouvant se produire dans un isolant ou un complexe d'isolants. La mesure du niveau d'ionisation de l'appareillage et des transformateurs se pratique de plus en plus fréquemment et s'effectue au moyen des méthodes de mesure en usage pour les perturbations radiophoniques. Ces méthodes sont d'ailleurs critiquables lorsqu'on les applique aux transformateurs

car elles ne donnent alors qu'une idée incomplète de ce qui se passe dans le bobinage à une certaine distance du point de mesure, lequel se trouve généralement à une extrémité de ce bobinage. Elles présentent cependant un intérêt qualitatif certain si l'on procède par comparaison entre deux mesures effectuées respectivement avant et après un essai diélectrique.

Les mesures se font habituellement en couplant le mesureur de perturbations radiophoniques à l'objet par l'intermédiaire d'un condensateur à haute tension exempt lui-même d'ionisation. La fig. 3a est tirée des normes NEMA et illustre le procédé. Il est souvent désirable de poursuivre les mesures d'ionisation jusqu'à une tension dépassant la tension nominale du matériel. Un laboratoire équipé pour les essais jusqu'à un niveau de tension de service de 750 kV doit ainsi disposer d'une source de tension exempte d'ionisation jusqu'à des tensions de l'ordre 600 kV et plus ainsi que d'un condensateur de couplage correspondant. Le problème le plus difficile à résoudre est celui des connexions reliant l'appareillage de mesure à l'objet mesuré et ce dernier à la source de tension. Ces connexions doivent être parfaitement polies et d'un diamètre suffisant qui, pour ces tensions, est voisin du demi-mètre. Une solution apparemment intéressante consiste à enrober ces connexions dans un isolant d'épaisseur assez faible. Le papier encollé de résine, divers isolants organiques ou vernis peuvent convenir à cet usage.

La mesure d'ionisation, pour les transformateurs de puissance, est faite pendant l'essai de tension induite. On supprime ainsi l'usage d'une source de haute tension exempte

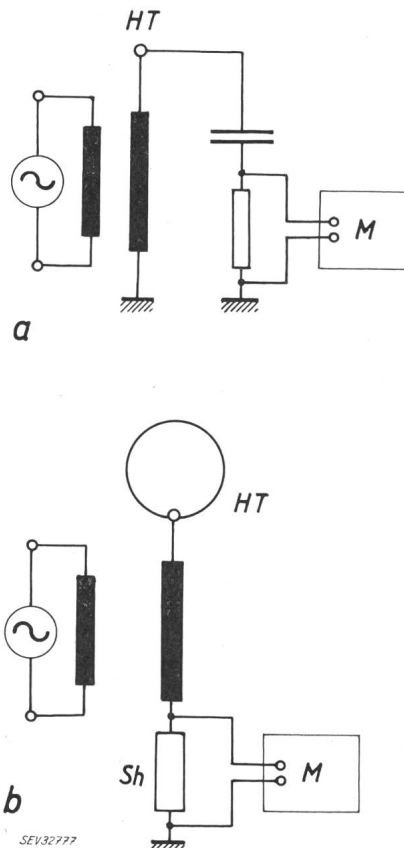


Fig. 3

Schéma pour la mesure de l'ionisation interne d'un transformateur lors de l'essai par tension induite

a mesure à la borne sous tension; b mesure au neutre; M mesureur de perturbations radiophoniques; Sh shunt ou quadripôle  
Autres explications voir fig. 2

d'ionisation. Il est avantageux de supprimer également le condensateur de couplage haute tension. Cela est rendu possible par l'insertion d'un shunt ou d'un quadripôle de mesure entre la borne de neutre du transformateur et la terre, l'appareillage de mesure étant couplé à ce dispositif. La fig. 3b donne le schéma ainsi réalisé. On pourrait également imaginer utiliser un autre enroulement du transformateur, une armature de répartition de potentiel de la traversée haute tension ou tout autre partie métallique convenablement située pour remplacer le condensateur de couplage.

Remarquons encore que les mesures d'ionisation effectuées sur l'appareillage et surtout les transformateurs revêtent d'autant plus d'importance que les tensions de service sont élevées, aucune ionisation ne pouvant avoir lieu en service pour du matériel à basse et moyenne tension. Pour les très hautes tensions de service les tensions d'essai sont proportionnellement beaucoup plus basses que pour les tensions de service inférieures et l'on pourrait légitimement craindre que le matériel à très haute tension puisse plus facilement être le siège d'une ionisation néfaste en service. On peut même penser utile de prévoir pour les transformateurs en particulier un essai consistant en une mise sous tension prolongée à une valeur légèrement supérieure à la tension de service. Divers contrôles pourraient être faits à cette occasion en plus d'une mesure soignée de l'ionisation interne de ces appareils. De telles possibilités d'essai doivent en tous cas être prises en considération dans l'élaboration d'un projet de laboratoire pour très hautes tensions.

#### 2.4 Essai en tension induite des transformateurs

Evoquons encore deux problèmes liés à l'essai en tension induite des transformateurs ou des autotransformateurs de puissance.

Le premier est celui des distances isolantes qu'on doit ménager entre l'électrode coiffant la borne portée au potentiel maximum et les diverses masses se trouvant à proximité. Si nous nous référons à la littérature spécialisée et à diverses mesures que nous avons pu effectuer nous-mêmes, nous pouvons admettre qu'une distance de l'ordre de quatre à cinq mètres serait suffisante pour des tensions d'essai de l'ordre

de 1100 kV alternatif. Une telle distance serait toutefois trop faible pratiquement en raison de l'instabilité du phénomène d'aigrettes se produisant à l'électrode d'extrémité de la borne de traversée. On peut même craindre que ne se produisent de temps à autre des claquages intempestifs sur des distances bien supérieures, comme cela se produit parfois pour les très hautes tensions continues. Les dimensions de l'espace réservé aux essais dans un laboratoire pour très hautes tensions doivent être déterminées en tenant compte de ce phénomène.

Le second des problèmes dont nous aimerions parler est celui des difficultés de réglage de la tension qui peuvent apparaître lorsqu'on essaie en tension induite des transformateurs de puissance et de tension très élevées. Un transformateur est en effet alors assimilable à un circuit oscillant parallèle dont la fréquence propre se situe autour de 200 Hz pour des puissances unitaires de l'ordre de 100 MVA. Cette fréquence propre tend à diminuer avec l'augmentation de la puissance de l'appareil. On cherche à se placer à la résonance lors des essais, de manière à diminuer le courant absorbé par le transformateur et afin d'obtenir un réglage stable de la tension. Si la fréquence propre du circuit en essai devait descendre au-dessous de 130 Hz environ, on ne pourrait se placer à la résonance sans saturer le circuit magnétique du transformateur au-delà des valeurs nominales. On devrait en conséquence travailler à une fréquence plus élevée ce qui placerait le générateur alimentant l'appareil en essai dans une zone d'auto-excitation capacitive. La stabilité du réglage de tension en serait affectée. Le générateur et son réglage doivent donc de toutes façons être conçus en fonction de ce service spécial.

Les quelques problèmes particuliers évoqués au cours de cet exposé, bien que demandant une attention spéciale, ne constituent pas des difficultés majeures dans le domaine des essais de développement et de réception du matériel à très haute tension, domaine pour lequel il est sans autre possible de prévoir un laboratoire doté de l'équipement adéquat.

#### Adresse de l'auteur:

J. Froidevaux, lic. ès sc., ing., chef du département de Recherches, S. A. des Ateliers de Sécheron, Genève.

## Leistungstransformatoren für 500...750 kV

Vortrag, gehalten an der Diskussionsversammlung des SEV vom 20. Januar 1964 in Zürich,  
von H. Lutz, Zürich

621.314.21.027.85

Die bis heute gebauten Leistungstransformatoren sind für Spannungen von höchstens 400 bzw. 525 kV ausgelegt worden. 400-kV-Einheiten sind auch in der Schweiz aufgestellt und stehen seit einiger Zeit im Betrieb [1] <sup>1)</sup>. Mittlerweile haben aber Studien für die Energieübertragung mit noch höheren Spannungen, vor allem in den Vereinigten Staaten, zum Bau von Prototyp-Transformatoren mit Oberspannungen von etwa 650...750 kV geführt [2; 3], und die europäischen Transformatoren-Fabrikanten sahen sich deshalb veranlasst, ihre Entwicklungstätigkeit auch auf dieses Gebiet auszudehnen. Es sei hier gleich vorweggenommen, dass der Übergang von 400 auf 750 kV intensive Studien und Detailversuche erfordert, auch wenn sich die Transfor-

matoren für diese extrem hohen Spannungen in ihrer grundsätzlichen Konzeption nicht wesentlich ändern. So werden denn in den nachfolgenden Ausführungen diejenigen Gesichtspunkte in den Vordergrund gerückt, denen der Konstrukteur eine besondere Beachtung schenken muss.

### 1. Arten und Leistungen der Transformatoren

Schon bei Netzen mit 400 kV steht der Autotransformator im Vordergrund, und dies gilt in noch vermehrter Masse bei 600 oder 700 kV. Der Grund liegt bekanntlich darin, dass ein Kraftwerk allein heute noch kaum eine so grosse Leistung produziert wie es für eine wirtschaftliche Übertragung bei diesen hohen Spannungen erforderlich ist. Die Energie verschiedener Elektrizitätswerke wird darum vorerst

<sup>1)</sup> Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.