Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens
Herausgeber: Association suisse des électriciens
Band: 43 (1952)
Heft: 9

Artikel: Über den Wirkungsgrad bei der thermischen Elektronenemission
Autor: Strutt, M.J.O.
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1057863

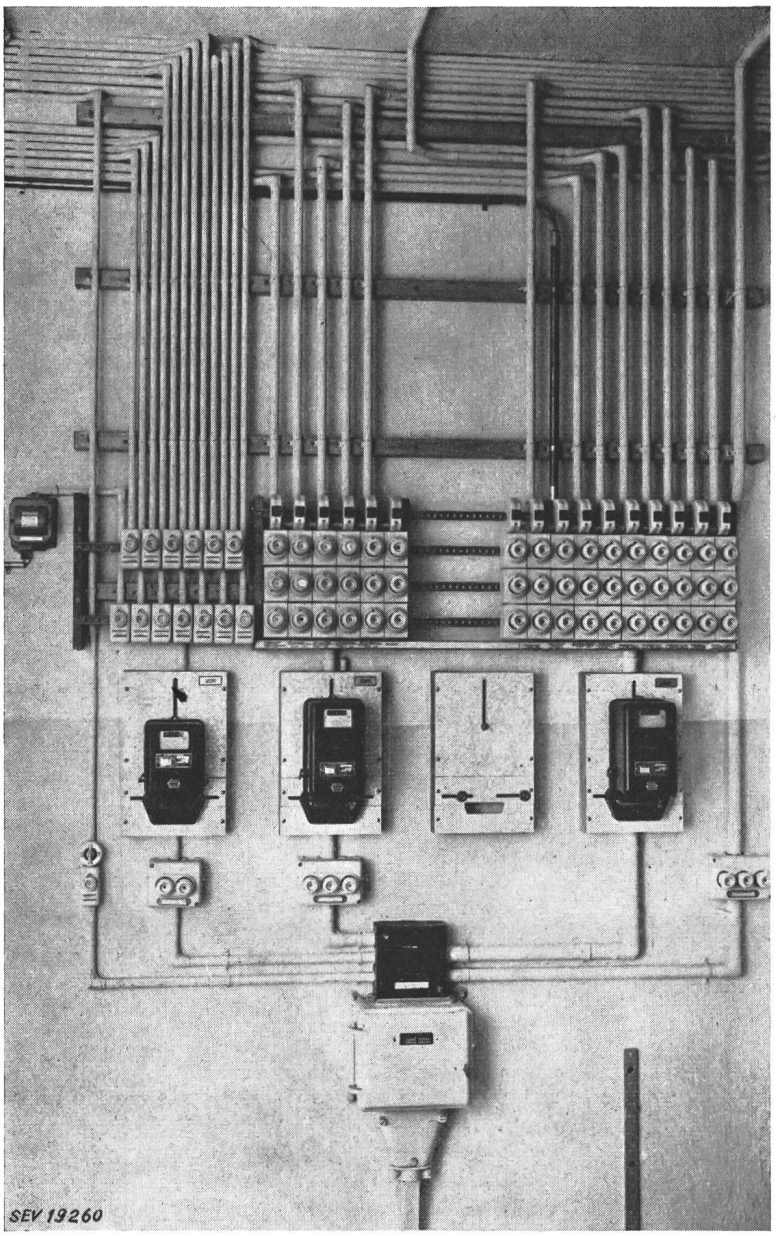
Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. 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: 12.12.2025

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



lors des premières dispositions pratiques et du premier montage. En outre, l'aménagement des premières installations de ce genre prendra probablement beaucoup de temps, mais les difficultés du début seront rapidement surmontées. En s'en tenant strictement aux cinq exigences fondamentales dont nous avons parlé, l'électricien constatera bientôt que le travail est bien plus plaisant et que les nouvelles installations sont plus rapidement aménagées qu'avec l'ancienne méthode, ce qui est également intéressant au point de vue financier. Les installations exécutées selon la nouvelle méthode sont très appréciées par les électriciens, comme par les architectes et les usagers.

Il suffit de démontrer au client les réels avantages de la nouvelle disposition, qui devra être exécutée avec le maximum de soins, car un client satisfait en amène d'autres.

Fig. 48
Appareillage de distribution avec dispositifs de mesure pour entreprise commerciale, avec extension ultérieure (ligne foncée)
Installé en 1951 selon la nouvelle méthode

Adresse de l'auteur:
Ad. Bernardsgrütter, chef du département des installations des Forces Motrices Bernoises S. A., 52, Greyerzstrasse, Berne.

Über den Wirkungsgrad bei der thermischen Elektronenemission

Von *M. J. O. Strutt*, Zürich

537.58

Der Wirkungsgrad der thermischen Elektronenemission wird definiert durch das Verhältnis der gesamten, den emittierten Elektronen übertragenen kinetischen Leistung zu der totalen Heizleistung einer Kathode. Unter der Voraussetzung, dass Leistungsverluste nur durch Wärmeabstrahlung entstehen, wird der Wirkungsgrad theoretisch berechnet und sein optimaler Wert bestimmt. Die theoretischen Ergebnisse werden mit den tatsächlichen Werten verglichen und einige Anregungen zur Erzielung eines besseren Wirkungsgrades vermittelt.

Le rendement de l'émission thermique d'électrons est défini comme quotient de la puissance cinétique totale des électrons émis et de la puissance de chauffage de la cathode. Sous condition que les pertes de puissance sont exclusivement dues à la radiation calorifique, le rendement est calculé théorétiquement et sa valeur optimale est évaluée. Les résultats théoriques sont comparés avec les valeurs expérimentales et quelques suggestions de possibilités pour l'amélioration du rendements sont données.

Einleitung

Bei der thermischen Elektronenemission wird gewöhnlich der Emissionsstrom pro Einheit der Heizleistung für die verschiedenen Typen von Kathoden angegeben. Nach des Verfassers Meinung erhält man eine bessere Vorstellung ihrer Güte, wenn man die den emittierten Elektronen übertragene Leistung im Verhältnis zur Heizleistung betrachtet. Dieses Leistungsverhältnis wird «Wirkungsgrad der thermischen Elektronenemission» genannt.

Bei einer absoluten Temperatur von T °K und einer ebenen Emissionsoberfläche beträgt die mittlere Energie der emittierten Elektronen senkrecht zur Kathodenfläche kT, wobei k die Boltzmannsche

Konstante ($1{,}38 \cdot 10^{-23}$ J/°K) bedeutet. In zwei zueinander senkrecht stehenden Richtungen, die tangential zur Emissionsoberfläche verlaufen, beträgt die entsprechende Energie je $\frac{1}{2}\,kT$. Folglich ergibt sich eine Gesamtenergie der emittierten Elektronen von $2\,kT$, entsprechend einer Spannung $2\,kT/e$, wobei e die Ladung eines Elektrons darstellt ($1{,}602 \cdot 10^{-19}$ C). Somit wird die den emittierten Elektronen übertragene Leistung, bei einem Emissionsstrom von I in A:

$$P_e = \frac{2\,k\,T}{e}\,I\,[\mathrm{W}] \tag{1}$$

Das Verhältnis dieser Leistung P_e zur Heizleistung P_h der Kathode stellt den Wirkungsgrad η der thermischen Emission dar:

$$\eta = \frac{P_e}{P_h} \tag{2}$$

Im folgenden soll dieser Wirkungsgrad für einige Spezialfälle näher untersucht werden.

Obige Rechnung fusst auf einer Maxwellschen Geschwindigkeitsverteilung der emittierten Elektronen.

Ideale Kathode

Ist eine Emissionskathode in der einen Richtung genügend lang und befinden sich die Befestigungsstützen an ihren Enden, so wird die Heizleistung hauptsächlich verbraucht durch

a) Leistungsabstrahlung;

b) Elektronenemission.

Der Anteil von P_h, der durch die Verluste der Wärmeleitung in den Stützen verloren geht, möge in diesem Falle vernachlässigbar klein sein. Wir werden diese ideale Kathode betrachten und den Wirkungsgrad mit Hilfe der bekannten Gleichungen der Abstrahlungsleistung und Elektronenemission berechnen.

Die Abstrahlungsleistung pro Oberflächeneinheit (in cm²) einer Kathode ist gegeben durch:

$$P_r = c_n\,T^n; \qquad n \geqq 4 \tag{3}$$

Der Koeffizient c_n und der Exponent n dieser Gleichung hängen von der Art der Kathodenoberfläche ab. Im Idealfall der sog. «Abstrahlung des schwarzen Körpers» ist, in Übereinstimmung mit dem Stefan-Boltzmannschen Gesetz, $n = 4$ und $c_4 = 5{,}75 \cdot 10^{-12}$ W/cm² (°K)⁴. Die Abstrahlung der bekannten Kathodenoberflächen ist bei jeder erreichbaren Temperatur beträchtlich geringer als jene des schwarzen Körpers. Wenn wir daher die Abstrahlung des schwarzen Körpers betrachten, so werden wir einen resultierenden Wirkungsgrad erhalten, der tiefer liegt als bei den praktisch vorkommenden Kathoden.

Der Emissionsstrom I in A pro Oberflächeneinheit (cm²) der Kathode ist gegeben durch das Gesetz von Richardson:

$$I = A\,T^2 \exp\left(-\frac{e\,\Phi}{kT}\right) \tag{4}$$

Die Theorie liefert für die Konstante A den Wert 120, er kann jedoch für wirkliche Kathoden zwischen 10^{-2} und 10^2 variieren. Der Wert von Φ (in V) ist kennzeichnend für jedes Emissionsmaterial und liegt für gebräuchliche Kathoden zwischen 1 und 5 V. Die Leistung $P_e = 2\,I\,kT/e$ kann mit Hilfe von Gl. (4) berechnet werden.

Somit beträgt der Wirkungsgrad der thermischen Elektronenemission:

$$\left.\begin{aligned} \eta &= \frac{P_e}{P_e + P_r} = \frac{1}{1 + P_r/P_e} = \frac{1}{1+r} \\ r &= \frac{c_n\,T^n}{2\,\dfrac{k}{e}\,A\,T^3 \exp\left(-\dfrac{e\Phi}{kT}\right)} \end{aligned}\right\} \tag{5}$$

Optimaler Wirkungsgrad

Wenn das Verhältnis r in der Gl. (5) ein Minimum erreicht, dann wird der Wirkungsgrad optimal. Die einzige Variable im Ausdruck r ist bei gegebener Kathodenoberfläche die Temperatur T. Daher setzen wir:

$$\frac{\partial\,r}{\partial\,T} = 0 = c_n\,(n-3)\,T^{n-4} - c_n\,T^{n-3}\,\frac{e\,\Phi}{kT^2}$$

Aus dieser Gleichung erhalten wir die Temperatur, die einem minimalen Wert von r entspricht:

$$kT = \frac{e\,\Phi}{n-3} \tag{6}$$

Durch die Berechnung des zweiten Differentialquotienten von r nach T kann ohne weiteres gezeigt werden, dass diese optimale Temperatur T, die durch Gl. (6) bestimmt wird, einem minimalen Wert von r und somit einem maximalen Wert von η entspricht. Einsetzen von Gl. (6) in (5) ergibt:

$$r_{min} = \frac{\sqrt{c_n\,\Phi^{n-3}}\left(\dfrac{e}{k}\right)^{n-2}}{2\,A\,(n-3)^{n-3}\exp(3-n)} \tag{7}$$

Im Falle der Abstrahlung des schwarzen Körpers erhalten wir mit $n = 4$ und $A = 120$:

$$\underset{n=4}{r_{min}} = 0{,}88 \cdot 10^{-5}\,\Phi$$

Offensichtlich führt dieser Wert im wesentlichen zu einem Wirkungsgrad $\eta = 1$, wenn der Wert von Φ zwischen 1 und 5 V liegt. Leider kann die entsprechende Temperatur $T = e\,\Phi/k$ für kein Emissionsmaterial erreicht werden, ohne dass die Kathode infolge Verdampfung zerstört wird. Daher ist dieser maximale Wert nur theoretisch interessant.

Anwendung für gebräuchliche Emissionsmaterialien

Der Wert r_{min} liegt bei tieferen Temperaturen T bei gleichem Φ, wenn n erhöht wird. Wäre $n = 13$ und $\Phi = 1$, so würden wir eine Temperatur T_{max} entsprechend einem r_{min} erhalten von

$$T_{max} = \frac{e}{10\,k} = 1{,}16 \cdot 10^3\ °\mathrm{K}$$

welche in einigen Fällen erreicht wäre ohne übermässige Verdampfung der Kathodenoberfläche. Es ist augenfällig, dass Oberflächen, die einem hohen

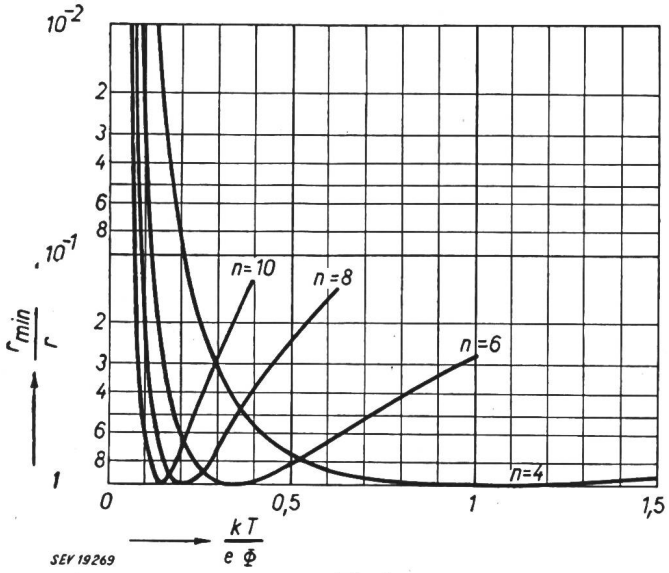


Fig. 1
Verhältnis r_{min}/r entsprechend Gl. (8) in Abhängigkeit von $kT/e\phi$
k Boltzmannsche Konstante; T Kathodentemperatur in °K; e Elektronenladung; ϕ Austrittspotential

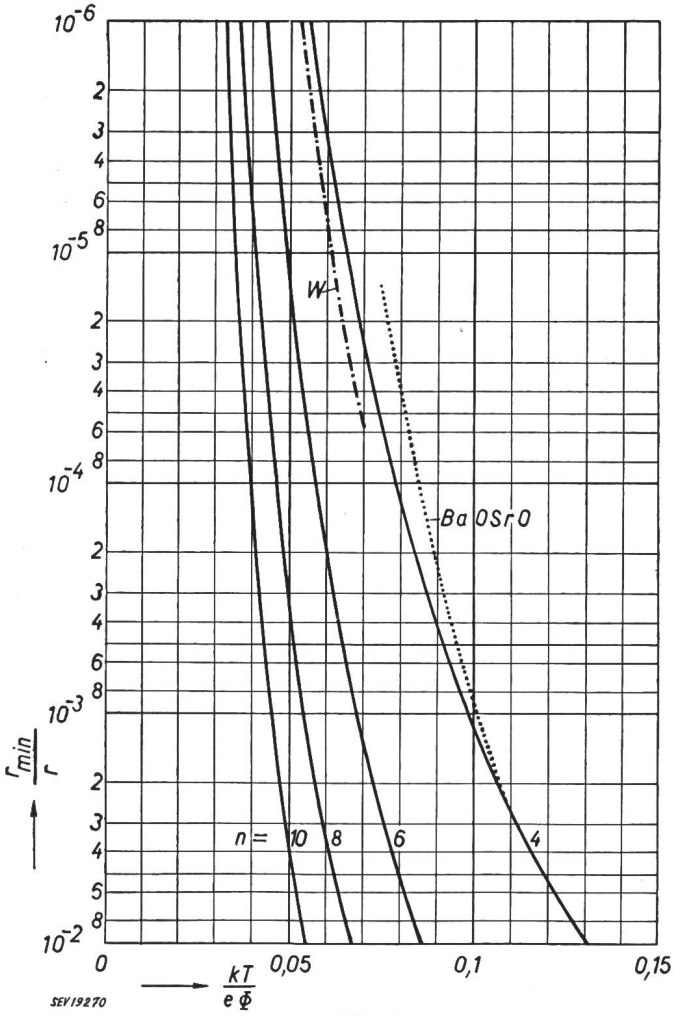


Fig. 2
Fortsetzung von Fig. 1
Die strichpunktierte Kurve entspricht einer Wolframkathode ($n \approx 4{,}75$) und die punktierte Kurve einer Barium-Strontium-Oxydschicht auf einer Platin-Iridium-Kathode

Wert von n entsprechen, Vorteile vom Standpunkt des Wirkungsgrades der thermischen Elektronenemission bieten würden.

In den Fig. 1 und 2 ist der Wert r_{min}/r in Abhängigkeit von $kT/e\,\Phi$ für $n = 4$, 6, 8 und 10 aufgezeichnet. Die zugehörige Gleichung lautet:

$$\frac{r_{min}}{r} = \frac{\left(\frac{e\,\Phi}{kT}\right)^{n-3} \exp\left(-\frac{e\,\Phi}{kT}\right)}{(n-3)^{n-3} \exp(3-n)} \tag{8}$$

Der Wert von r_{min}, den man aus Gl. (7) erhält, ist in Fig. 3 in Abhängigkeit von A und Φ für den Fall $n = 4$ dargestellt. Im weiteren weist Fig. 2 eine punktierte Kurve für eine Barium-Strontiumoxydkathode mit einer Platin-Iridiumverbindung als

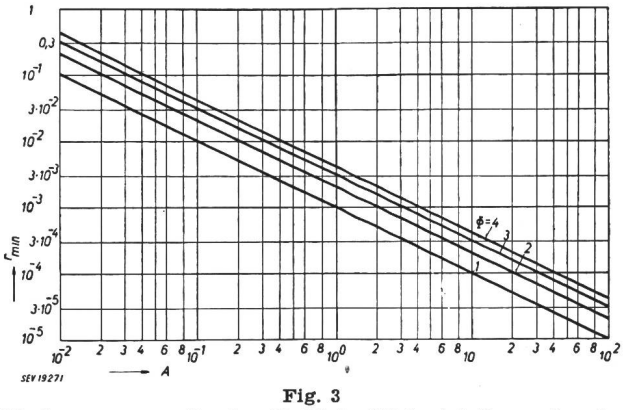


Fig. 3
Wert von r_{min} gemäss der Gl. (7) in Abhängigkeit von A und ϕ für den Fall, dass $n = 4$ (Strahlung des schwarzen Körpers)

Grundmetall auf, wobei A den Wert von 10^{-2} und Φ den Wert von 1 V haben. Die strichpunktierte Kurve der Fig. 2 entspricht einer Wolframkathode ($A = 100$; $\Phi = 4{,}54$ V). Die n-Werte betragen ungefähr 3,98 für die punktierte und 4,75 für die strichpunktierte Kurve. Beide Kurven sind durch Versuche ermittelt worden[1][2]). Berechnet man den Wirkungsgrad η mit Hilfe dieser experimentell gefundenen Werte, so findet man für die mit einer Oxydschicht überzogene Kathode bei 1300 °K: $\eta = 3{,}5$ % und für die Wolframkathode bei 2500 °K: $\eta = 1{,}8$ ‰. Also besitzt jene Kathode einen nahezu 20mal so hohen Wirkungsgrad wie die zuletzt erwähnte. Die angegebenen Temperaturen sind so gewählt, dass in beiden Fällen ungefähr der gleiche Dampfdruck vorhanden ist.

Tabelle I gibt Auskunft über die Werte von r_{min} und η_{max}, wo $A = 100$ und $c_n T^n = \frac{1}{2} c_4 T^4$ bei $T = 2000$ °K vorausgesetzt werden.

Zusammenstellung der Werte von η_{max} und r_{min}
Tabelle I

n	6	6	10	10
Φ	1	4	1	4
r_{min}	$4{,}9 \cdot 10^{-5}$	$3{,}13 \cdot 10^{-3}$	$9{,}6 \cdot 10^{-5}$	1,58
η_{max}	≈ 1	≈ 1	≈ 1	0,39

[1]) *H. A. Jones* and *I. Langmuir*, Gen. El. Rev., vol. 30 (1927), p. 310.
[2]) *R. W. King*, Bell Syst. techn. J., vol. 2 (1923), n° 4.

Zusammenfassung

Unter den Voraussetzungen, dass die Wärmestrahlung einer Kathode nach dem Gesetz $c_n T^n$ erfolgt und der Energieverbrauch nur in der Elektronenemission und der Wärmestrahlung besteht, erhält man den maximalen Wirkungsgrad der thermischen Elektronenemission bei einer Temperatur $T = e\,\Phi/k\,(n - 3)$, wobei e die Elektronenladung, Φ das Austrittspotential in Volt und k die Boltzmannsche Konstante bedeuten. Der entsprechende Wirkungsgrad würde im wesentlichen 1 betragen. (Verhältnis der den emittierten Elektronen übertragenen Leistung zur Heizleistung der Kathode). Bei gebräuchlichen Kathoden, wobei n ungefähr den Wert 4 annimmt, kann dieser maximale Wirkungsgrad nie erreicht werden, weil die Kathodenoberfläche bei der in Frage stehenden Temperatur verdampfen würde. Wirkungsgradzahlen sind zu $1{,}8 \cdot 10^{-3}$ für Wolfram, bzw. mit $3{,}5 \cdot 10^{-2}$ für Oxydschichten auf Platin-Iridium-Verbindungen ermittelt worden. Kathodenoberflächen mit höheren Werten von n könnten vielleicht zu besseren Wirkungsgradzahlen führen.

Adresse des Autors:
Prof. Dr. *M. J. O. Strutt*, Institut für höhere Elektrotechnik der ETH, Gloriastrasse 35, Zürich 6.

Technische Mitteilungen — Communications de nature technique

Besuch bei den Maggiawerken

621.311.21(494.55)

Ein Besuch bei den Baustellen des Maggiawerkes ist dieses Frühjahr für den Sachverständigen so interessant, dass es sich rechtfertigt, darüber kurz zu berichten.

An der Baustelle des *Kraftwerkes Verbano*, einige 100 m westlich von Porto Ronco, an der Strasse nach Brissago, ist zunächst von aussen an neuen Bauten nicht viel zu sehen. Für die Ausführung der Ausbrucharbeiten und speziell für die Schonung des Landschaftsbildes wirkt es sich besonders günstig aus, dass das Ausbruchmaterial nicht auf eine Deponie, sondern direkt in den (an dieser Stelle sehr tiefen) See gebracht und versenkt werden konnte; die dafür nötige Brücke ist etwas abseits der Baustelle noch zu sehen. Bureaux, Wohn- und Schlafbaracken sind an den Hängen aufgestellt; seeseitig der Strasse sieht man das in der Hauptsache fertige, gegen den See noch durch eine Betonwand abgeschlossene Auslaufbauwerk des Kraftwerkes. Eine Standseilbahn und parallel dazu eine Luftkabelbahn führen von der Strasse bergwärts zu der Baustelle des Wasserschlosses, die 300 m über dem See gelegen eine prächtige Aussicht auf den Lago Maggiore mit seinen Inseln und auf das Dorf Ronco bietet. Auf der Standseilbahn wurden eben ca. 15 mm dicke Bleche in Zwölftel-Segmenten der Schachtpanzerung für den Vertikalschacht des *Wasserschlosses* transportiert. Durch einen über 100 m langen Stollen gelangt man zum oberen Ende des Wasserschlosses, wo die erwähnte Verschalung zusammengeschweisst wird. In dem 15 m im Durchmesser und 80 m in der Höhe messenden Vertikalschacht werden bereits im untern Teil diese Panzerbleche elektrisch angeschweisst; eine grosse, sorgfältige und nicht ganz ungefährliche Arbeit, die von oben nach unten vorwärtsschreitet und in wenigen Wochen der Vollendung entgegensieht.

Neben dem Vertikalschacht, diesen windschief schneidend, ist der verhältnismässig sehr steile Druckstollen bereits baulich fertiggestellt und z. T. ausgepanzert; auf der Maggiaebene, vor Ascona, lagen eine Anzahl dieser Schachtpanzerrohre von 2,7...2,85 m Durchmesser, die nur noch zu montieren sind. Diese ganze, natürlich unterirdische Baustelle bietet einen recht imposanten Einblick in die grosse und rasch vorwärts getriebene Arbeit.

Am Fuss des Wasserschlosses mündet der 8 km lange Stollen von Palagnedra ein, der schon seit einiger Zeit durchgeschlagen ist und nun unter Überwindung eines nicht unbedeutenden Wasserandranges ausbetoniert wird.

Wieder auf der Seestrasse angelangt, stellt man nach einigem Suchen die Ausmündung der drei zum eigentlichen Kraftwerk führenden Stollen fest, wozu als vierter der unter der Strasse durchgehende Auslauf der Turbinen kommt. Von Westen nach Osten gesehen kommt zuerst der Zugangsstollen zu der Schieberkammer, gleichzeitig Montagezugang zur bereits einbetonierten Verteilleitung, dann der Hauptzugangsstollen und schliesslich der Kabelstollen zur Aufnahme der 220-kV-Kabel, der wohl gleichzeitig zur Belüftung dient.

Durch den 80 m langen Seitenzugangsstollen, der gleichzeitig den Entlastungsstollen für den Fall eines Rohr- oder Schieberbruches bildet, gelangt man in die *Schieberkammer*, die baulich fertig erstellt ist; die Verteilleitung ist einbetoniert, so dass davon nur noch die Rohrenden zu sehen sind. Der erste Kugelschieber ist bereits eingebaut, und die folgenden sind zur Montage bereit. Die Anordnung ist ähnlich, wie bei den andern neuen Maschinenhäusern (Handeck II, Innertkirchen usw.). Als «Fortschritt» ist zu konstatieren, dass nur noch *ein* Kugelschieber benötigt wird, der nach einer neuen Konstruktion als Doppelschieber wirkt, so dass die doppelte Sicherheit bei Reparaturarbeiten an der Turbine gewahrt ist. Auch die übliche Venturidüse zur Wassermessung ist mit dem Kugelschieber vereinigt, so dass sich eine sehr gedrängte, wenig Platz und Aushub bedingende Anordnung ergibt.

Der auch etwa 80 m lange, weite Hauptzugangstunnel führt in die im vollen Ausbau begriffene Kaverne des eigentlichen Kraftwerkes. Dort ist der Ausbruch schon längere Zeit, trotz nachträglichen Änderungen, vollendet, Hauptgewölbe und Seitenwände sind betoniert. Man ist eben daran, die inneren Mauern, welche den Maschinensaal von den Transformatorenzellen und den übrigen Nebenräumen trennen, zu betonieren und vor allem die dringend benötigte Kranbahn zu schaffen. Um aber Zeit zu gewinnen für die Inbetriebsetzung des Werkes, hatte die Bauleitung den eigentlich recht kühn anmutenden Beschluss gefasst, mit der Turbinenmontage zu beginnen, bevor der Kran zur Verfügung steht, was gewiss ein Kuriosum ist und an die örtliche Bau- und Montageleitung und an die Lieferfirmen besondere Anforderungen für die erschwerte Montage stellt. Mit Hilfe eines provisorischen Bockkrans und elektrischer Flaschenzüge ist es aber bereits gelungen, die Saugrohrpanzerung der ersten Turbine an Ort und Stelle zu bringen, zu verschweissen und einzubetonieren. Auch die Lieferung der Turbinenspirale ist auf die zweite Hälfte April in Aussicht gestellt; sie soll gleich nach Ankunft ebenfalls montiert werden.

Bekanntlich wurden für dieses Kraftwerk Francis-Turbinen gewählt, und zwar trotz dem für diese Turbinenart etwas extrem liegenden Gefälle von rund 300 m, mit Rücksicht auf den stark variierenden Stand des Unterwassers, des Niveaus des Langensees und wohl auch, um für die grosse Leistung von 30 000 kVA auf eine hohe Drehzahl und günstigere Generatorenabmessungen zu kommen.

Eine besondere Anlage bildet der *Unterwasserkanal*, d. h. der Auslauf aus den Turbinen bis zum See, wo wiederum eine recht umfangreiche Expansionskammer zwischengeschaltet werden musste, die auch bedeutenden Ausbruch im Fels verlangte. Die ganze Anordnung gestattet die restlose Ausnützung des Gefälles bei praktisch allen Seeständen, was bei der wertvollen Energie des Maggiawerkes besonders wichtig ist.

Für das Auge und Gefühl des Elektro-Maschineningenieurs sieht diese Baustelle nicht gerade schön aus und die Montage, deren Präzision durch die primitiven Verhältnisse nicht leiden darf, stellt an das Montagepersonal inmitten des benachbarten Baubetriebes mit Betontransport, Schalungen, Zement, Wasser, recht hohe Anforderungen, die aber bisher offenbar heroisch überwunden wurden, damit schon diesen Herbst unserer immer noch nicht glänzend versorgten Energiewirtschaft durch das neue Kraftwerk Verbano ein Zuschuss gegeben werden kann. Der ganze vielseitige Betrieb, mit den im Anfangsstadium rauh erscheinenden Arbeitsvor-