Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 43 (1952)
Heft: 11

Artikel: Über das Durchgehen von Wasserturbinen
Autor: Gerber, H.
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1059154

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: 03.10.2025

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

43. Jahrgang Nr. 11 Samstag, 31. Mai 1952

BULLETIN

DES SCHWEIZERISCHEN ELEKTROTECHNISCHEN VEREINS

Über das Durchgehen von Wasserturbinen

Von *H. Gerber*, Zürich

621.24.0046

Das Verhältnis der Durchgangsdrehzahl zur Nenndrehzahl wird bei Wasserturbinen mit steigender spezifischer Schnellläufigkeit immer grösser, was insbesondere für die Konstruktion der Rotoren der Synchrongeneratoren von Bedeutung ist. Nach einer Betrachtung der Turbinencharakteristiken werden einerseits die Möglichkeiten einer Reduktion der Durchgangsdrehzahl diskutiert und anderseits die für eine Steigerung der Sicherheit der Anlage in Betracht fallenden konstruktiven und betrieblichen Massnahmen erwogen.

Le rapport entre la vitesse d'emballement et la vitesse nominale de rotation des turbines hydrauliques augmente de plus en plus, à mesure que la vitesse spécifique de celles-ci est plus élevée. Ce fait est particulièrement important pour la construction des rotors des alternateurs synchrones. Considérant les caractéristiques des turbines, les moyens de réduire la vitesse d'emballement sont examinés, ainsi que les méthodes constructives et d'exploitation, qui entrent en ligne de compte pour accroître la sécurité de fonctionnement de l'installation.

Einleitung

Anlässlich der Behandlung von Ziff. 18 der Regeln für Wasserturbinen [1]) betreffend Durchgangsdrehzahl und Schleuderprobe sind die damit zusammenhängenden Fragen im Fachkollegium 4 des Schweizerischen Elektrotechnischen Komitees (CES) eingehend besprochen und vom Autor als Protokollführer in einem besonderen Résumé zusammengefasst worden. Nachdem an dieser Stelle unter dem gleichen Titel [2]) vor kurzem die theoretische Seite eingehend betrachtet und mit Versuchsergebnissen an Modellturbinen verglichen wurde, ist es sicher angezeigt, auf die daraus resultierenden praktischen Schlussfolgerungen näher einzugehen.

Die Erzielung der nötigen Sicherheit für den rotierenden Teil einer Wasserturbine bereitet im allgemeinen auch bei ihrem Durchgehen keine besonderen Schwierigkeiten; etwas heikler ist meistens ihre Lagerung, vor allem bei den Spurlagern. Dagegen hat die Kritik von Seiten der Generatorkonstrukteure vor allem beim Aufkommen der spezifisch raschlaufenden Wasserturbinen eingesetzt. Die hohen Durchgangsdrehzahlen dieser Typen, die bei variabeln Gefällen sogar den dreifachen Wert der Nenndrehzahlen erreichen und überschreiten können, würden zu einer unzulässigen Verteuerung der Generatoren führen. Die Generatorfirmen verlangen deshalb immer wieder wirksame Sicherheitseinrichtungen, welche unter allen Umständen das Durchgehen der Turbinen verhindern sollen.

Die in Frage kommenden zusätzlichen Sicherheitseinrichtungen zum Regulator, wie Schnellschlüsse, Notregulierung mit Hilfe der Laufschaufeln von Kaplanturbinen, Schnellschluss-Schützen usw. können zweifellos die Sicherheit steigern, sind aber keine unfehlbaren Mittel zum Verhindern des Durchgehens einer Gruppe. Auch die von verschiedenen Turbinenkonstrukteuren entwickelten Sicherheitseinrichtungen, wie Bremsflügel vor oder nach dem Laufrad, sind konstruktiven oder betrieblichen Unzulänglichkeiten unterworfen. Im folgenden soll auf die einzelnen Gesichtspunkte näher eingetreten werden.

[1]) Regeln für Wasserturbinen, 1. Aufl. v. 12. 4. 47 der Publikation Nr. 178 des SEV.

[2]) siehe *Dubs, R.*: Über das Durchgehen von Wasserturbinen. Bull. SEV Bd. 42(1951), Nr. 11, S. 377...384.

Allgemeine Turbinencharakteristiken

Jede Wasserturbine hat bei einer bestimmten Drehzahl den günstigsten Wirkungsgrad, und es wird bei der Projektierung danach getrachtet, die Nenndrehzahl der Turbine in diesen Bereich zu legen. In Fig. 1 ist für die gebräuchlichsten Turbinentypen der ungefähre prozentuale Verlauf der Leistung in Abhängigkeit der Drehzahl aufgetragen, wie er an Hand vieler Modellversuche festgestellt werden konnte. Aus diesem Diagramm geht folgendes hervor: Je kleiner die spezifische Drehzahl einer Wasserturbine ist, um so beschränkter ist grundsätzlich ihr Verwendungsbereich, d. h. die zulässige Abweichung von der Nenndrehzahl bzw. der hinsichtlich Wirkungsgrad günstigsten Drehzahl. Anders ausgedrückt: Bei einmal gegebener Nenndrehzahl ($n = 100\ \%$) steigt die zulässige prozentuale Gefällsschwankung um so höher, je grösser die spezifische Schnelläufigkeit n_s ist.

a) Bei den *Freistrahlturbinen* (Kurve *1*) ist trotz der etwas flacheren Kurven der Verwendungsbereich eher kleiner als bei Francis-Langsamläufern (Kurve *2*) und zwar wegen der Tropfenschlaggefahr und dem Schlupf bei Drehzahlen, die zu stark über der günstigsten Nenndrehzahl liegen. Die Freistrahlturbine besitzt eine Durchgangsdrehzahl, die, von besonderen Fällen abgesehen, im allgemeinen etwa 80 % über der Nenndrehzahl liegt. Höhere Werte können bei starken Gefällsschwankungen auftreten. Das Maximum wird bei gut ausgebildeten Gehäusen meistens bei voll offener Düse erreicht.

b) Noch günstiger verhalten sich die *langsam laufenden Francis-Turbinen* für höhere Gefälle,

welche in Spiralen mit Stützschaufeln eingebaut werden. Hier liegt die höchste Durchgangsdrehzahl gelegentlich nur 60...70 % über der Nenndrehzahl, und deren 1,8facher Wert wird auch bei erheblichen Gefällsschwankungen nur selten überschritten.

c) Bereits die *schnellaufenden Francis-Turbinen* weisen jedoch höhere Durchgangsdrehzahlen auf, die den zweifachen Wert der Nenndrehzahl erreichen können. Bei Gefällsschwankungen, die für diese Turbinentypen schon in erheblichem Umfang zulässig sind, können Durchgangsdrehzahlen bis zum 2,2fachen Wert der Nenndrehzahl ohne weiteres auftreten.

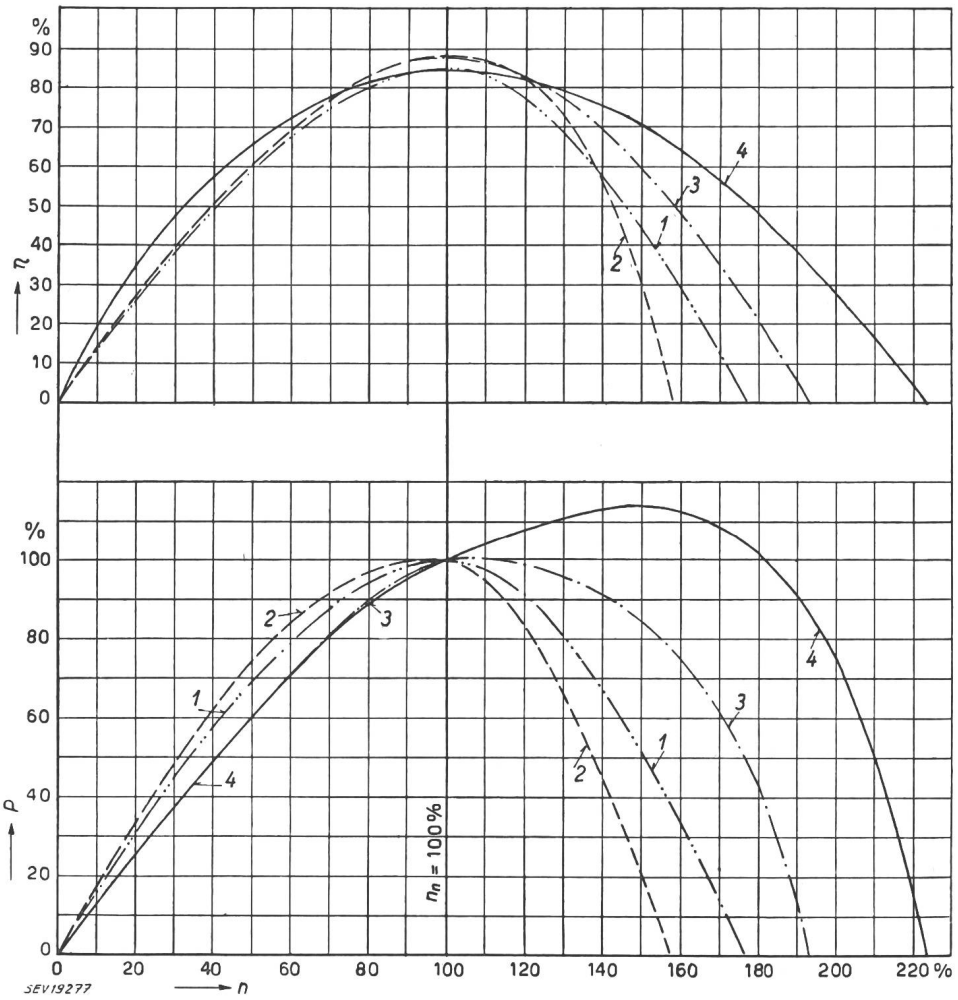

Fig. 1
Verlauf des Wirkungsgrades η und der Leistung P über der Turbinendrehzahl n für konstantes Gefälle und geöffnete Turbine

1 Freistrahl-Turbine
2 Francis-Hochdruck-Langsamläufer
3 Francis-Niederdruck-Schnelläufer
4 Kaplan- und Propellerturbine

Für den Verlauf der Durchgangsdrehzahl ergibt sich demnach ein ähnliches Bild, wie für den Verlauf der Wirkungsgrade bei verschiedenen Propellerstellungen. Wesentlich ist vor allem, dass gleich wie bei den Wirkungsgraden auch die Durchgangsdrehzahl *nicht bei voll offener Propellerstellung* den maximalen Wert erreicht, sondern bei einer ziemlich geschlossenen Stellung; im vorliegenden Fall etwa bei —6°. Bei dieser Propellerstellung ist auch der spezifische Wasserdurchlass nicht mehr abnorm hoch, sondern liegt etwa bei der Grössenordnung des normalen maximalen Wasserdurchlasses, bei Nenndrehzahl und offener Turbine.

d) Beträchtlich ungünstiger werden diese Verhältnisse noch bei einfach regulierten *Propellerturbinen* und bei Kaplanturbinen mit festem Leitapparat. Als Kurve 4 ist ebenfalls der Verlauf der Leistung eines Propellerlaufrades dargestellt, welches bei Ausführung mit beweglichen Laufschaufeln auch für die Kaplan-Turbine bei Vollast Gültigkeit hat. Für eine mittlere spezifische Umfangsgeschwindigkeit kann für vierschauflige Typen die Durchgangsdrehzahl ungefähr den 2,3fachen Wert der Nenndrehzahl erreichen.

e) Doppelt regulierte Kaplanturbine. Bei der Kaplanturbine, die sich bekanntlich aus einer Vielzahl von Propellerturbinen (d. h. einer Vielzahl von verschiedenen Stellungen der Schaufeln des gleichen Kaplanlaufrades) zusammensetzt, ergibt sich auch für jede dieser Propellerstellungen eine ganz bestimmte Durchgangsdrehzahl. In Fig. 2 sind auf Grund von Laboratoriumsversuchen die Durchgangsdrehzahlen eines normalen vierschaufligen Kaplanlaufrades und die zugehörigen Leitapparatstellungen für mehrere Propellerstellungen in Funktion des spezifischen Wasserdurchlasses beim Durchgehen aufgetragen worden. Die Nenndrehzahl und die normale Vollastwassermenge bei Nenndrehzahl dieses Laufradtypes entsprechen 100 %.

Wie Fig. 2 ferner zeigt, kann die Durchgangsdrehzahl bei ganz geöffnetem Leit- und Laufrad etwa noch 70 % des maximal möglichen Wertes betragen; dies hängt vom Ausnützungsgrad der Turbine und auch von den Einbauverhältnissen ab. Der maximale Wasserdurchlass bei voll offenem Leit- und Laufrad dagegen kann beim Durchgehen ohne weiteres den doppelten Wert des normalen Wasserdurchlasses erreichen. Alle Schliessorgane, insbesondere Schnellschluss-Schützen usw. müssen folglich auch bei diesem gesteigerten Wasserdurchlass mit Sicherheit schliessen können. (Im Gegensatz hiezu tritt bekanntlich bei langsam laufenden Francis-Turbinen infolge der Rückwirkung der Zentrifugalkraft beim Durchgehen eher eine Verminderung des spezifischen Wasserdurchlasses ein.

Bei einer spezifischen Schnelläufigkeit von n_s = 200...250 ist der Wasserdurchlass beim Durchgehen ungefähr gleich wie bei Normalbetrieb.)

Reduktion der maximalen Durchgangsdrehzahl

In jedem konkreten Fall wird natürlich immer wieder über die Möglichkeiten einer Reduktion der Durchgangsdrehzahl diskutiert, die aus den besonderen örtlichen Verhältnissen eintreten können, aber nicht eintreten müssen. Diese Möglichkeiten sollen nachstehend kurz behandelt werden.

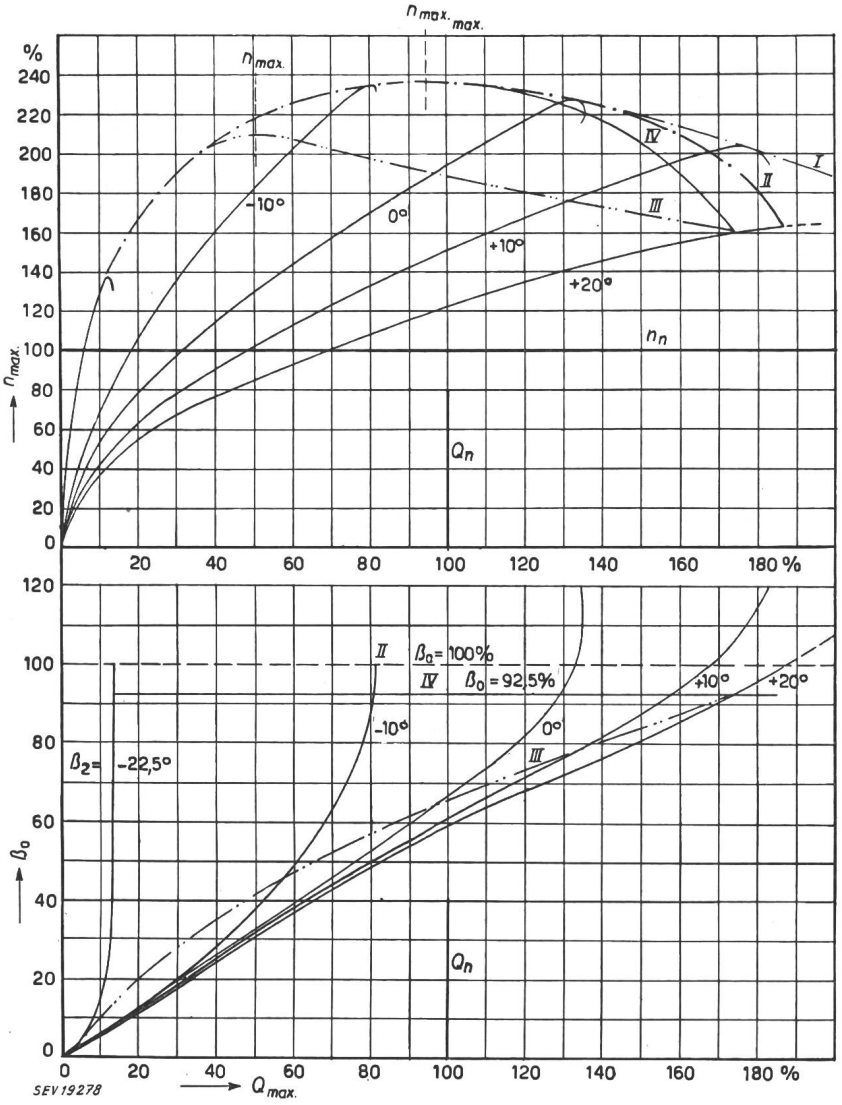

Fig. 2

Verlauf der Durchgangsdrehzahl n_{max} und der Turbinenöffnung β_0 über dem Wasserdurchlass Q_{max} für eine Kaplanturbine, bei 4 verschiedenen Stellungen der Laufradschaufeln

I Hüllkurve der n_{max}; *II* Begrenzungskurve für β_0 = 100 %; *III* n_{max} mit Steuerzusammenhang für günstigste Turbine; *IV* n_{max} bei gestörtem Steuerzusammenhang mit konstantem β_0 = 92,5 %

a) Gefälle. Sofern es sich um ein Kanalwerk handelt und nur eine Gruppe vorhanden ist, besteht die Möglichkeit, dass infolge des gesteigerten Wasserdurchlasses bei Kaplanturbinen der Oberwasserspiegel sinkt und der Unterwasserspiegel ansteigt. Damit sinkt auch das Gefälle und die Durchgangsdrehzahl kann infolgedessen nicht den vorausberechneten Wert erreichen. Auch die Druckverluste im Rechen und, wenn vorhanden, in der Rohrleitung bewirken eine Reduktion des wirksamen Gefälles an der Turbine. Wie schon früher angeführt, trifft diese Möglichkeit jedoch nur bei schnellaufenden Francis-Turbinen und Propellerturbinen zu. Bei langsam laufenden Francis-Turbinen nimmt ja der Wasserdurchlass beim Durchgehen eher ab und bei Kaplanturbinen ist der Wasserdurchlass in der ungünstigsten Stellung ungefähr gleich wie im normalen Betrieb, so dass eine merkbare Herabsetzung des Gefälles aus diesem Grunde nicht zu erwarten ist.

b) Kavitation. Längere Zeit wurde angenommen, dass beim Durchgehen der Turbine und bei dem gesteigerten Wasserdurchlass Kavitationserscheinungen auftreten würden, welche die Durchgangsdrehzahl merklich herabsetzen. Bei vollständig ausgebildeter Kavitation, d.h. bei Ablösung, wird tatsächlich eine Reduktion der Durchgangsdrehzahl eintreten. Bei beginnender Kavitation kann umgekehrt, wie entsprechende Modellversuche gezeigt haben (Fig. 3), infolge der geringeren Zähigkeit des Wassers sogar ein erheblicher Anstieg der Durchgangsdrehzahl eintreten, wie dies auch hinsichtlich des Wirkungsgrades bekannt ist. Je nach der Sicherheit, die bei Nennbetrieb gegenüber dem kritischen Kavitationspunkt vorhanden ist, kann folglich beim Durchgehen unter σ_{Anlage} die Durchgangsdrehzahl gleich, höher oder tiefer sein, als wie sie am Modell bei kavitationsfreiem Betrieb gemessen wurde. Auch diese Möglichkeit fällt demnach bei eingehender Behandlung des Problems zum voraus selten in Betracht.

c) Mechanische Verluste des Generators. Eine gewisse Reduktion der Durchgangsdrehzahl erfolgt zweifellos durch die gesteigerten Ventilations- und Reibungsverluste des starr gekuppelten Generators. Diese Reduktion wird jedoch von seiten der Generatorlieferanten ganz allgemein zu hoch eingeschätzt. Wie Fig. 1 zeigt, fallen die Leistungskurven gegen den Durchgangspunkt hin relativ steil ab, und bei Kurve 4 würde ein Generatorverlust von 30 % der Nennleistung nur eine Reduktion von 7 % in der Durchgangsdrehzahl bewirken. Untersuchungen auf Grund des wenigen vorliegenden Zahlenmaterials haben gezeigt, dass im allgemeinen mit einer Re-

duktion von 2 bis höchstens 4 % gerechnet werden kann, was naturgemäss die Festigkeitsrechnung des Generator-Rotors nur unwesentlich beeinflussen wird. Überdies sind verbindliche Angaben der Generatorlieferanten über die beim Durchgehen zu erwartenden mechanischen Verluste nur schwer erhältlich. Die Reibungsverluste verlaufen ungefähr

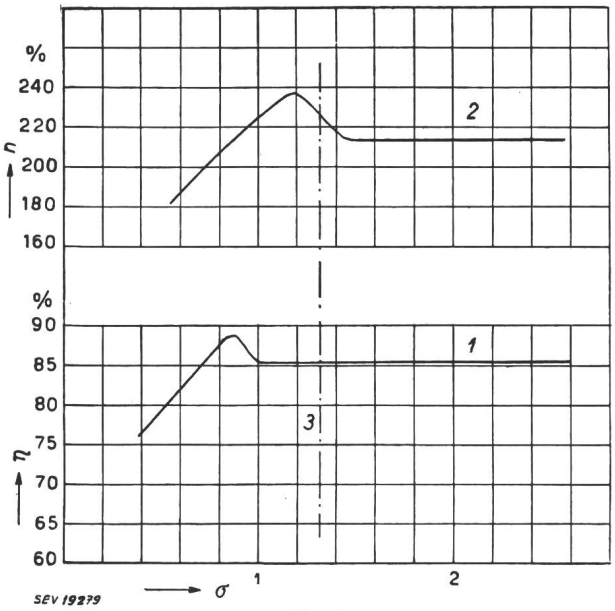

Fig. 3
Einfluss des Kavitationsbeiwertes σ auf Durchgangsdrehzahl n_{max} (Kurve 2) und Turbinenwirkungsgrad η (Kurve 1)
3 σ der Anlage

mit der 1,5. Potenz, die Ventilationsverluste ungefähr mit der 3. Potenz der Drehzahl. Bei den Schleuderversuchen der Generatoren des Kraftwerkes Rupperswil-Auenstein benötigte das unverschalte Polrad des 22 000-kVA-Dreiphasen-Generators der MFO eine Antriebleistung von 2850 kW bei der Schleuderdrehzahl von 280 U./min. Beim allseitig verschalten Rotor des 25 000-kVA-Einphasen-Generators von BBC sank diese Leistung auf ungefähr 400 kW. Die Werte der Antriebleistung verhielten sich demnach ungefähr wie 7 : 1. Es ist wahrscheinlich, dass sich die glatte Bohrung des Stators eher wie eine Verschalung verhalten wird [3]). Trotzdem die Schleuderversuche der Generatoren Rupperswil mit dem 2,8fachen Wert der Nenndrehzahl durchgeführt wurden, betrug also die Antriebleistung des verschalten Generators nur rund 400 kW, was natürlich die Durchgangsdrehzahl dieser grossen Gruppe nur unwesentlich herabsetzen wird.

d) Steuerkurve. Bei doppelt regulierten Kaplanturbinen hat man gelegentlich unter dem Druck der von den Generatorlieferanten vorgebrachten Kritik an den hohen Durchgangsdrehzahlen während einiger Zeit auch diejenige Durchgangsdrehzahl n_{max} angegeben, die unter Beibehaltung des Steuerzusammenhanges zwischen Leitapparat und Laufrad zur Erreichung des besten Wirkungsgrades eintreten kann. Im Fall von Fig. 2 würde sich nach Kurve *III* eine Reduktion von ungefähr 12 % ergeben.

[3]) siehe Bull. Oerlikon Bd. —(1944), Nr. 252, S. 1637...1638, u. Brown Boveri Mitt". Bd. 31(1944), Nr. 12, S. 404...405.

Bei dieser Angabe musste man sich jedoch ihres illusorischen Wertes bewusst sein, denn ein Durchgehen der Gruppe findet ja gerade dann statt, wenn die Regulierung nicht mehr normal funktioniert und dann ist auch ein Einhalten des Steuerzusammenhanges zwischen Leitapparat und Laufrad nicht mehr mit Sicherheit anzunehmen. Aus diesem Grunde wird heute ganz allgemein neben dieser reduzierten, fiktiven Durchgangsdrehzahl immer derjenige maximale Wert angegeben, welcher tatsächlich bei ungünstigster Stellung von Leitapparat und Laufrad, d. h. bei gelöstem Steuerzusammenhang auftreten kann. Dieser Wert ist zweifellos der technisch einzig richtige, und er muss dem Generatorlieferanten und dem Besteller mitgeteilt werden.

e) Notregulierung. In vielen Kaplanturbinenanlagen besteht eine besondere Notregulierung, welche beim Versagen der normalen Leitradregulierung unter Umgehung des Regulators direkt auf die Laufschaufeln wirkt und von einem drehzahlabhängigen Apparat ausgelöst wird. Auch wenn der Steuerzusammenhang nach Kurve *III* beim Durchgehen erhalten bleibt, so würde sich, wie Kurve *IV*, Fig. 2, zeigt, praktisch genau der maximal mögliche Wert einstellen. Würde beispielsweise bei 92,5 % Leitapparatöffnung die Turbine durchgehen und der Leitapparat stehen bleiben, so würde auch mit der Notregulierung die höchste Durchgangsdrehzahl erreicht, wenn das Laufrad geschlossen wird. Auch von dieser Seite her ist folglich keine Reduktion der Durchgangsdrehzahl zu erwarten, im Gegenteil wird im Falle von Gefahr beim Schliessen des Laufrades von der offenen Stellung her die Durchgangsdrehzahl zunächst ganz erheblich weiter ansteigen.

Weiter hat sich gezeigt, dass gegen die Durchgangsdrehzahl hin das zum Beherrschen der Laufradschaufeln benötigte Drehmoment ganz gewaltig ansteigt und wohl den 2,5fachen Wert des Drehmomentes bei Nenndrehzahl erreichen kann. Für den gleichen Servomotor ergibt sich sofort ein hoher Öldruck, mit entsprechenden Problemen der Abdichtung, vor allem bei den Öleinführungen (z. B. bei 24 kg/cm² normalem Regulierdruck muss die Notölpumpe für rund 60 kg/cm² ausgelegt werden!). Als unmittelbare Folge davon werden die Beanspruchungen im Reguliergestänge innerhalb der Laufradnabe ausserordentlich hoch. Auch bei Verwendung bester Stähle kann deshalb die Laufrad-Notregulierung, je nach Nabengrösse, höchstens für Gefälle bis etwa 30 m angewendet werden.

Konstruktive Massnahmen

Immer wieder ist versucht worden, durch konstruktive Massnahmen das Durchgehen der Gruppe zu verhindern. Währenddem, wie oben angeführt, die Notregulierung die maximale Drehzahl kaum herabsetzt, sie aber zeitlich begrenzt, ist auch der am Regler vorgesehene Schnellschluss Unzulänglichkeiten unterworfen. Diese Apparate werden häufig jahrelang nicht benützt, so dass sie bei Gefahr nicht mehr ansprechen. Die gleichen Nachteile weisen die von verschiedenen Turbinenkonstrukteuren ent-

wickelten Gegenflügel auf [4]). Auch diese Flügel werden erst bei einer gewissen Drehzahl ausgelöst, und diese Auslösung kann versagen. Die Gegenflügel haben überdies den grossen Nachteil, dass sie teilweise nach ihrem Funktionieren eine längere Stillsetzung der Gruppe verursachen, damit sie wieder in die Ruhelage zurückgebracht werden können. Unseres Wissens wurden sie darum auch nur in verschwindend wenigen Fällen angewendet. Häufig werden auch sogenannte *Schnellschlußschützen* vorgesehen, welche ähnlich wie die Notregulierung von einem unabhängigen Sicherheitspendel oder einem dem gleichen Zwecke dienenden Apparat ausgelöst werden. Da aber bei Wegfallen der Last und bei Versagen der Regulierung die Durchgangsdrehzahl in ausserordentlich kurzer Zeit erreicht wird (10...20 s), werden sie auch bei richtigem Funktionieren zu spät kommen. Sie können folglich nur den Zweck haben, die Dauer des Durchgehens auf ein Minimum zu reduzieren und gleichzeitig den Wasserzufluss abzusperren.

Künstliche Belastung

Vor allem bei Kanalwerken, wo es gilt, unzulässige Spiegelschwankungen bei plötzlichem Ausfallen der Maschinen zu verhindern, verwendet man seit einiger Zeit künstliche Belastungen in Form von Wasserwiderständen, auf welche automatisch bei einer von aussen kommenden raschen Entlastung umgeschaltet wird. Bei richtiger Dimensionierung und Einstellung vollzieht sich der Übergang ohne merkbare Änderung in der Wasserströmung. Nach erfolgtem Umschalten kann die Gruppe beliebig langsam entlastet werden.

Solche Widerstände sind zweifellos geeignet, zusätzlich die Sicherheit gegen ein allfälliges Durchgehen zu erhöhen.

Hochsaugung

Bei grösseren Niederdruckanlagen mit kleinen Gefällen wird gelegentlich zur Vermeidung unverhältnismässig tiefer Fundationen die Turbine so aufgestellt, dass die Unterkante des Leitapparates über dem Oberwasserspiegel liegt; zur Inbetriebsetzung muss zuerst die Spirale evakuiert werden [5]). *Geeignete Belüftungsventile* in der Spiraldecke können beim Durchgehen (oder schon bei einer gewöhnlichen Abschaltung) rasch geöffnet werden, worauf das Wasser in der Einlaufspirale sehr rasch absackt und ein zu hoher Drehzahlanstieg vermieden wird. Aber auch hier können der Auslöseapparat oder die Ventile selbst im kritischen Moment versagen.

Praktische Erfahrungen

Die Praxis lehrt immer wieder, dass es unmöglich ist, durch Überlegungen allein alle Verkettungen von Umständen vorauszusehen, die das einwandfreie Funktionieren von Einrichtungen zur Verhütung von unzulässigen Drehzahlsteigerungen beeinträchtigen können. Es hat sich daher gezeigt, dass die notwendige Sicherheit nur dadurch erreicht wird, dass die Generator-Rotoren für die volle Durchgangsdrehzahl berechnet und auch einem Schleuderversuch unterworfen werden. Bei Niederdruckanlagen ohne Einlaufschützen gilt dies ganz besonders. Im Hinblick auf die relativ immer noch erhebliche Streuung der Festigkeitswerte der für den Bau der Polräder verwendeten Materialien ist die Schleuderprobe als notwendig zu erachten. Der geringe Sicherheitsfaktor, der einerseits in der Zugrundelegung der Maximaldurchgangsdrehzahl der Turbine (ohne Reserve) und anderseits in der spezifischen Beanspruchung der Werkstoffe im Polrad bis rund $^2/_3$ ihrer Streckgrenze liegt, wird z. B. bei einem allfälligen späteren Höherstau der Werkanlage noch weiter herabgesetzt. Solche Sicherheitswerte können mit den bei Bauwerken üblichen Faktoren von über 4 kaum mehr verglichen werden.

Die Erfahrung zeigt aber, dass mit nachträglichen Stauerhöhungen bei den meisten Stauwerkanlagen gerechnet werden muss. Es gibt Werke, wo das Gefälle schrittweise unter vier Malen erhöht wurde. Ausserdem ist zu beachten, dass bei Entlastungen, besonders bei Kanalwerken, vorübergehend auch erhebliche Gefällserhöhungen eintreten können. Ein unter solchen Verhältnissen erfolgtes Durchgehen einer Maschinengruppe könnte das Gefahrenmoment weiter erhöhen.

Der Energieinhalt eines Polrades der Generatoren Rupperswil beispielsweise erreicht bei der Drehzahl von 280 U./min den Betrag von $74 \cdot 10^6$ kgm, ein Arbeitsvolumen, über dessen katastrophale Wirkungen in einem Kraftwerk man sich nur im Vergleich mit dem Energieinhalt von Geschossen ein Bild machen kann. Es liegen zwar verhältnismässig wenig praktische Erfahrungen über die Höhe der Durchgangsdrehzahl von Wasserturbinen vor, und glücklicherweise sind die Fälle von eingetretenen Schäden recht selten. Beobachtete Schadenfälle haben jedoch gezeigt, dass die an den Modellturbinen gemessenen Durchgangsdrehzahlen tatsächlich erreicht werden. Ferner zeigte sich, dass die betreffenden Schäden jeweils einen beträchtlichen Umfang annahmen und auf alle Fälle die Kosten einer reichlichen Konstruktion und der Durchführung von Schleuderversuchen wesentlich überstiegen.

Fig. 4 und 5 zeigen das «Ergebnis» des Durchgehens einer Gruppe mit zwei links und rechts vom Generator angeordneten Francis-Spiralturbinen. Bei $^8/_{10}$ Öffnung hatte der Generator Kurzschluss, der Hauptschalter fiel heraus, und die Turbine stieg in der Drehzahl. Da griff das Betriebspersonal am Regulator ein, vermutlich auf die falsche Seite, denn nach dem Unglück war der kaum beschädigte Regulator, der während Jahren bis dahin immer anstandslos gearbeitet hatte, auf $^{10}/_{10}$ Öffnung!

Die Frage der Durchgangsdrehzahl ist u. a. auch von *Kanaan* (Firma Voith) in der Publikation «30 Jahre Kaplanturbine» (Wasserkraft und Wasserwirtschaft, 39. Jahrgang, Heft II vom 15. 2. 44, Seite 39) eingehend behandelt worden. Nach allseitiger Betrachtung des Problems kommt der Verfasser zu den gleichen Schlussfolgerungen, d. h. nur das Dimensionieren der Rotoren auch für die vollen Durch-

[4]) US-Patent Nr. 2 407 454, 1946: Bremsflügel oberhalb des Kaplanlaufrades; English Electric Co.
Schweizer Patent Nr. 178 314, 1935: Bremsflügel unterhalb des Kaplanlaufrades; A.-G. Th. Bell & Cie., Kriens.

[5]) Die staatlichen Wasserkraftwerke Schwedens. Wasserkraft u. Wasserwirtsch. Bd. 28(1933), Nr. 19, S. 225...228.

gangsdrehzahlen und das Schleudern mit diesen Drehzahlen schafft die unumgängliche Sicherheit gegenüber allen Betriebsvorkommnissen.

Wenn auch in vielen Lieferverträgen immer wieder festgelegt ist, dass der Versuch mit der durchgehenden Maschine an der fertig montierten Gruppe

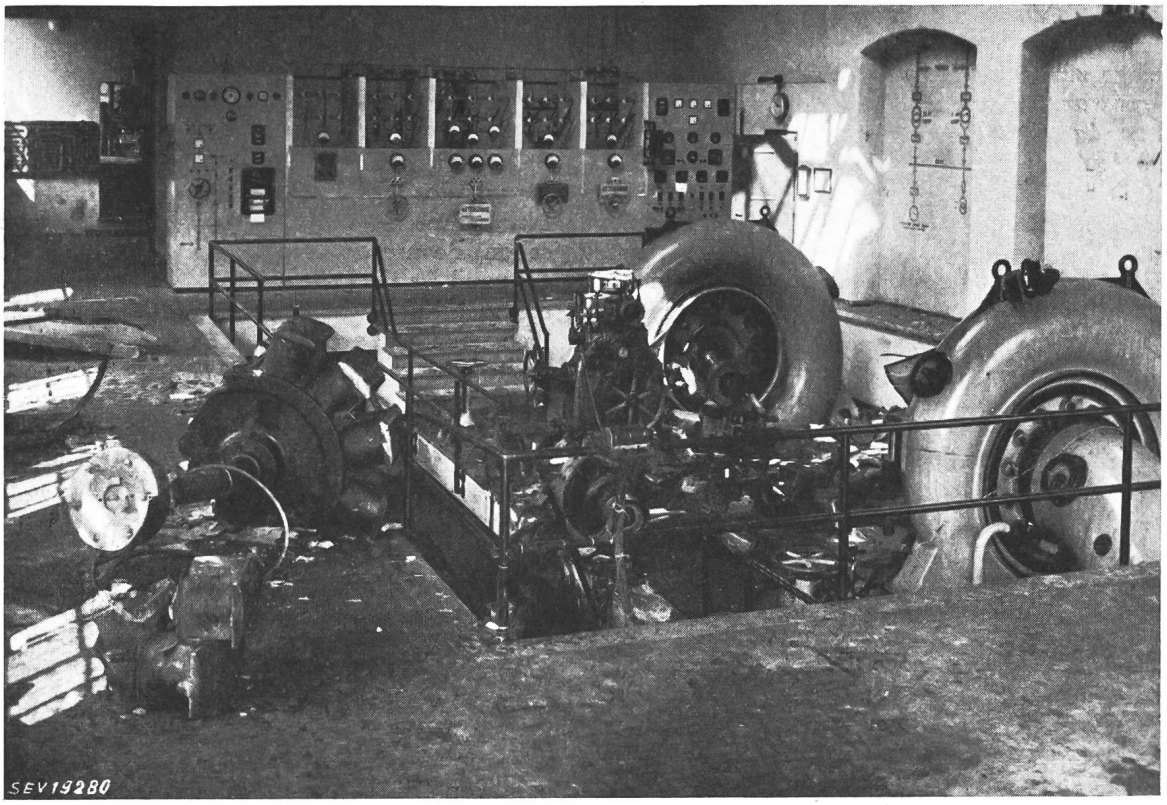

Fig. 4

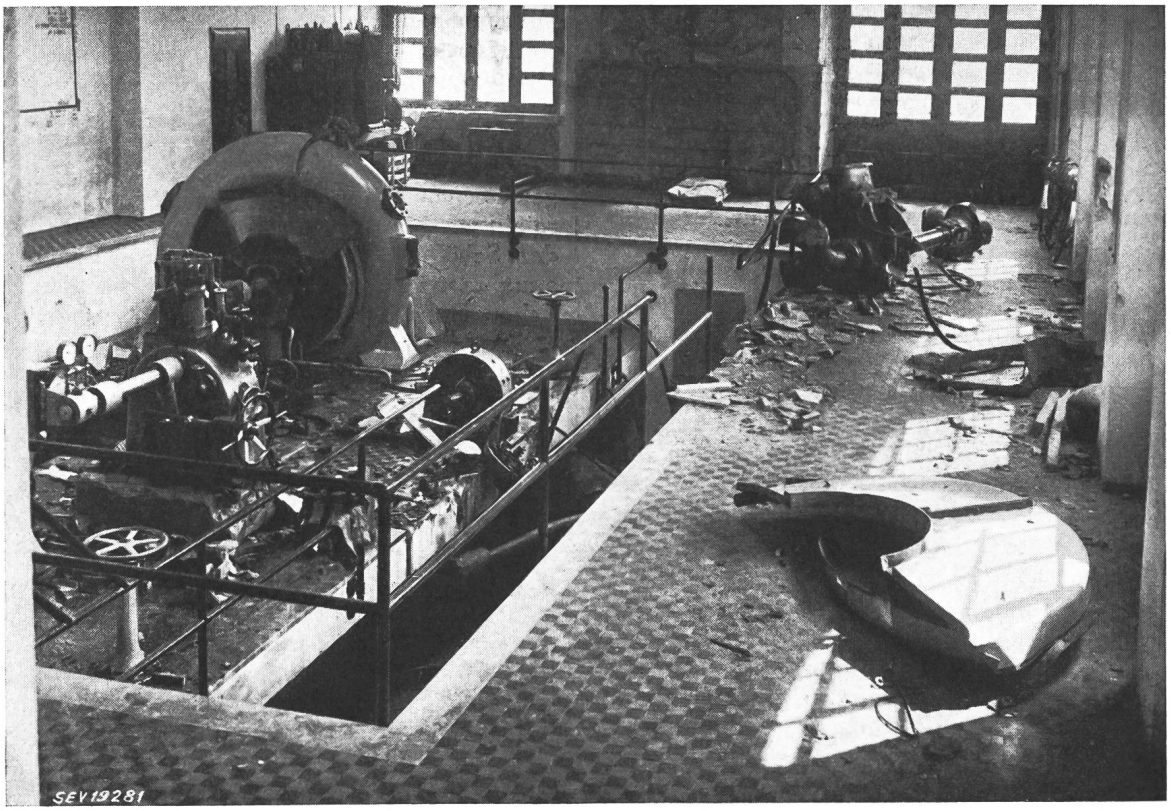

Fig. 5

Fig. 4 und 5
Schäden als Folge des Durchgehens einer Zwilling-Francis-Turbinengruppe in einem Wasserkraftwerk

durchgeführt werden muss, so ist in den letzten Jahrzehnten sozusagen ausnahmslos schliesslich darauf verzichtet worden. Die Kundschaft hat davon Abstand genommen, sobald die Frage der Verantwortung zur Sprache kam, wobei die an sich richtige Überlegung mitspielte, dass dieser Versuch eine ganz überflüssige Beanspruchung der Maschine bedeuten würde. Um so wichtiger ist es folglich, dass der Generatorrotor für die maximal mögliche Drehzahl konstruiert und mit derselben geschleudert wird.

Schlussfolgerungen

Die auf Grund der dargestellten Verhältnisse und Tatsachen sich aufdrängenden Schlussfolgerungen sollen nachstehend kurz zusammengefasst werden:

a) Die an Modellturbinen gemessenen Durchgangsdrehzahlen werden mit grosser Wahrscheinlichkeit an den Grossausführungen erreicht und durch die in den Anlagen vorhandenen Verhältnisse und durch Ventilationsverluste der damit gekuppelten Maschinen nur unwesentlich verändert. Im Gegenteil ist, ähnlich wie bei den Wirkungsgraden, sogar mit einer gewissen Erhöhung der Durchgangsdrehzahl zu rechnen, als Folge der Verringerung der hydraulischen Verluste infolge höherer Reynoldscher Zahlen und der kleineren relativen Rauhigkeit bei Grossausführungen.

b) Bei doppelt regulierten Kaplanturbinen muss auf alle Fälle die maximal mögliche Drehzahl mitgeteilt werden, die sich bei ungünstigster gegenseitiger Lage des Leitapparates und der Laufschaufeln und bei dem höchsten vorkommenden Gefälle einstellt.

Bei einfach regulierten Kaplanturbinen mit festem Leitapparat ist die Durchgangsdrehzahl nur wenige Prozent niedriger, als bei doppelt regulierten Turbinen.

c) Alle konstruktiven Massnahmen zur Verhinderung des Durchgehens erhöhen die Sicherheit, können jedoch nach längerem Nichtgebrauch versagen.

d) Alle Sicherheitseinrichtungen, wie Notregulierung, Schnellschlußschützen usw. werden auch bei richtigem Funktionieren zu spät kommen, da die Durchgangsdrehzahlen erfahrungsgemäss in relativ kurzer Zeit erreicht werden. Sie können folglich nur den Zweck haben, die Dauer des Durchgehens auf ein Minimum zu reduzieren.

Die Turbinenkonstrukteure sind sich dessen wohl bewusst, dass man mit den Beanspruchungen in den Generatorrotoren an einer Grenze angelangt ist, so dass die Unterbringung der für die Stabilität der Regulierung notwendigen Schwungmassen zu einem Problem wird. Diese Schwungmassen könnten herabgesetzt werden, wenn bei Vollabschaltungen höhere Drehzahlausschläge, d. h. 50 % und mehr, zugelassen, und wenn als Folge davon auf eine zu starre Spannungshaltung nach der Abschaltung verzichtet würde. Bei erheblicher Erhöhung der vorübergehenden Statik könnte wohl trotzdem die gewünschte Stabilität beibehalten werden.

Unser menschliches Tun ist unvollkommen, und deshalb können im kritischen Augenblick auch die besten Sicherheitseinrichtungen versagen. Wird daher bei Wasserkraftgeneratoren ohne zwingenden Grund unterlassen, den Rotor für die maximal mögliche Durchgangsdrehzahl zu konstruieren, und ihn einer Schleuderprobe zu unterwerfen, so bedeutet dies nichts anderes als den Versuch einer Abschiebung der Verantwortung von Lieferant und Besteller auf die verantwortliche Betriebsführung, und dieses Vorgehen dürfte sicher im Grunde genommen nicht haltbar sein.

Adresse des Autors:
Prof. *H. Gerber*, Rebbergstrasse 49, Zürich 10/49.

Zur Verhütung von Unfällen an elektrischen Starkstromanlagen

Von *E. Sprecher*, Zürich

614.825

An Hand einiger Tabellen wird die Zunahme der Starkstromunfälle in der Schweiz während 20 Jahren gezeigt. Aus den vom eidgenössischen Starkstrominspektorat veröffentlichten Unfallbeschreibungen werden die Ursachen der Unfälle ermittelt, die typischen Fälle herausgegriffen und die Massnahmen, die für die Unfallverhütung in Frage kommen, besprochen.

Les statistiques montrent que les accidents dus au courant fort ont augmenté en Suisse durant ces 20 dernières années. En se basant sur les descriptions d'accidents publiées par l'Inspectorat fédéral des installations à courant fort, les causes des accidents sont déterminées, les cas typiques sont mis en évidence et les mesures aptes à prévenir les accidents sont discutées.

A. Allgemeines

Das Eidg. Starkstrominspektorat veröffentlicht jedes Jahr im Bulletin des Schweiz. Elektrotechnischen Vereins eine Statistik über die Unfälle, die sich im Vorjahr an elektrischen Starkstromanlagen in der Schweiz ereignet haben. Der Verlauf vieler Unfälle wird darin ausführlich beschrieben, so dass man sich ein Bild über die Ursachen machen und Massnahmen zur Verhütung solcher Unfälle überlegen kann. Das macht diese Statistik sehr wertvoll. Sie wird deshalb von manchen Werken in Sonderabzügen ihrem Personal zum Studium übergeben und, was sehr zu begrüssen ist, auch durch Veröffentlichung in andern Zeitschriften weitern Kreisen zugänglich gemacht. Aber wenn auch in der Statistik jedes Jahr auf die begangenen Fehler hingewiesen wird, so muss man doch feststellen, dass die Zahl der Unfälle von Jahr zu Jahr ansteigt, wenn auch nicht stetig, und dass die gleichen Unfälle sich jedes Jahr wiederholen. Der Zweck dieser Arbeit ist, an Hand der in der Statistik beschriebenen Unfälle dieser Erscheinung nachzugehen und zu untersuchen, was getan worden ist und eventuell noch getan werden kann, um die Zahl der Unfälle zu vermindern.

Als Unterlagen für diese Untersuchung wurden die Unfallstatistiken und -berichte über einen Zeitraum von 20 Jahren benützt, und zwar für die Jahre 1929 bis 1948. Während dieser Zeit haben sich, wenn wir von den Unfällen beim Bahnbetrieb absehen, die in dieser Statistik nicht enthalten sind, 3019 Starkstromunfälle ereignet, wobei 563 Personen ums Leben gekommen sind. Über die Zunahme der Unfälle gibt am besten ein Vergleich der Mittelwerte aus den ersten 5 Jahren (1929—1933) und aus den letzten 5 Jahren (1944—1948) ein Bild.