

Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 71 (1953)
Heft: 12

Artikel: Sicherheit, Zuverlässigkeit und Lebensdauer von Turbogeneratoren
Autor: Martin, O.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-60520>

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: 30.01.2025

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

Sicherheit, Zuverlässigkeit und Lebensdauer von Turbogeneratoren

Von Dr.-Ing. O. MARTIN, Zürich

DK 621.165.004

Omnia enim orta occidunt
et aucta senescunt. Seneca

Der schaffende Ingenieur — ganz gleich, ob er Brücken baut, Fahrzeuge oder Maschinen — steht immer in der Antinomie von Oekonomie und Existenzrisiko. Er hat stets einen Kompromiss zu suchen zwischen der Wirtschaftlichkeit seines Bauwerks und dessen Sicherheit. Bei Hochbauten und Brücken versteht man unter «Sicherheit» die Eigenschaft, eine bestimmte maximale Verkehrslast zusammen mit einer bestimmten aussergewöhnlichen Windbelastung zu ertragen, ohne dass während längerer Zeit — 10, 20 oder 50 Jahre — bleibende Verformungen an den Konstruktionsteilen eintreten. Bei Maschinen ist der Sicherheitsbegriff mit der Existenzsicherheit des sie benützenden und bedienenden Menschen zu verbinden. Eine Maschine möge als «betriebs sicher» gelten, wenn sie ihre Aufgabe (den vom Besteller beabsichtigten Betriebszweck) während einer gewissen Zeit bei der «gewerbeüblichen» Aufsicht und Pflege erfüllt, ohne dass zufällige Störungen in ihrem Getriebe Stillsetzungen erzwingen und Reparaturen zur Wiedererfüllung des Betriebszweckes notwendig machen. Der Sicherheitsbegriff kann bei Maschinen weiter unterteilt werden: z. B. betriebs sicher, unfallsicher, narrensicher. Jeder dieser Begriffe hat allgemein den Charakter einer «Wahrscheinlichkeits-Aussage»; absolute Sicherheit gibt es in dieser Welt nicht.

Im allgemeinen ist die Betriebssicherheit eines technischen Erzeugnisses — einer Maschine im besonderen — umso höher, je niedriger die Beanspruchungen in ihren Bauteilen gewählt werden. Niedrige Beanspruchungen bedeuten aber hohen Aufwand an Material und an bearbeiteten Oberflächen, also hohe Herstellungskosten. Niedrige Beanspruchungen bedeuten zugleich auch höheres Gewicht, was bei ortsfesten Maschinen und Bauwerken gewöhnlich nicht so wichtig ist, bei Fahrzeugen aber von entscheidendem Einfluss auf den Energieaufwand für eine bestimmte Verkehrsleistung sein kann.

A. Der wirtschaftliche Rahmen

Die Volkswirtschaft stellt den Raum dar, in welchem sich zwei aufeinander angewiesene Partner, beide Nutzniesser der Technik, begegnen: Die Hersteller technischer Erzeugnisse einerseits und die Benützer oder Betreiber andererseits. Das Aufsuchen des «richtigen» Kompromisses zwischen den einander widerstrebenden Forderungen der höchstmöglichen Wirtschaftlichkeit und Betriebsicherheit auf der einen Seite und den günstigsten Einkaufsbedingungen für den Erwerb eines solchen technischen Erzeugnisses auf der anderen ist ein höchst sinnreiches Spiel — das Zusammenspiel der freien Wirtschaft —, für welches eine ganze Reihe Regeln bestehen, teils ungeschriebene Gesetze des Handels, teils geschriebene des Staates, dazu besonders vereinbarte der Berufsgruppen, Wirtschaftsverbände und ähnlicher Organisationen. Unter günstigsten Einkaufsbedingungen ist nicht nur der niedrigste Preis zu verstehen. Kurze Lieferzeit und eine prompte Bedienung bei unvorhergesehenen Zufällen — die «menschliche», nicht in Zahlen zu fassende Seite des Geschäftes — spielen ebenfalls eine Rolle neben einer Reihe nach- bzw. über- oder untergeordneter Faktoren.

Jedes grössere technische Bauwerk, sei es eine Brücke, ein Schiff, ein Verkehrsflugzeug oder ein elektrisches Kraftwerk, stellt das Ergebnis der Arbeit einer grossen Anzahl von Leuten dar, welche in ganz verschiedener Weise gewisse Einzelleistungen zum Zustandekommen dieses Bauwerks beisteuern. Diese Leistungen pflegt man — grob gesehen — in zwei Schichten einzuteilen: erstens in die Planungsarbeit und zweitens in die Ausführung, wobei die erste hauptsächlich in den technischen Büros an den Reissbrettern und Schreibtischen geleistet wird und die andere in den Werkstätten an Schmelzöfen, Schmiedepressen, Bearbeitungsmaschinen und auf Montage- und Prüfständen. Die Grenzen, welche Menschen zu den «Mitwirkenden» bei einem speziellen Gegenstand zu zählen sind und welche nichts damit zu tun haben, sind oft von der gleichen Unbestimmtheit wie die Grenzen des Kraft-

feldes eines magnetischen Polpaares. Die Planungsarbeit stützt sich auf wissenschaftliche Versuchsarbeiten und auf in langen Zeiträumen gewachsene Theorien. Die Forscher, denen sie zu verdanken sind, weilen vielleicht nicht mehr unter den Lebenden. Rohstoffe und Halbfabrikate für die materielle Verwirklichung der Entwürfe entstehen in über das ganze Land verbreiteten Gewerbebetrieben. Der Schiffbauer, welcher aus einem grossen Blechstapel eine Schiffshülle zusammenschweissen und -nieten lässt, denkt nur selten an den Bergmann, welcher Erz und Kohle aus der Erde holt, damit der Eisenhüttenmann den Stahl für die Bleche erschmelzen kann. Wenn er aber überlegt, welche Existenzbedrohungen dem von ihm gefertigten Schiff widerfahren können, muss er alle diese Menschen vor seinem geistigen Auge vorüberziehen lassen und sich vorstellen, was alles sie bei ihrer Arbeit ungenau oder falsch machen können. Allen diesen möglichen Fehlleistungen muss er sodann einen «Bewertungs-» und einen «Siebfaktor» anhängen, wobei der erstgenannte die Gefahrengrösse aus der unentdeckt eingeschlichenen Fehlleistung für sein eigenes Erzeugnis abschätzt, und der andere die Wahrscheinlichkeit angibt, mit welcher diese Fehlleistungen beim allmählichen Aufrücken des Rohstoffs zum Halbzeug und schliesslich zu einem Teil des fertigen Gegenstandes in den Prüfverfahren der fremden und eigenen Werkstätten erkannt, richtig bewertet und notfalls ausgesondert werden.

Je komplexer ein technisches Erzeugnis ist, desto mehr Einzelgebiete umfassen die Ueberlegungen, durch welche Wirtschaftlichkeit und Sicherheit, angemessener Aufwand und Betriebszweck gegeneinander abgewogen werden müssen. Je lebensnotwendiger ein menschlicher Tätigkeitsbereich ist, desto schwerwiegender sind diese Kompromisse zwischen beiden, desto weitreichender deren Folgen. Gesetzliche Auflagen können Schranken aufrichten, deren Schwellencharakter den Spielraum für die Kompromisse einengt, indem man gewisse Forderungen durchsetzt, an deren Einhalten alle Anbietenden am Markt gebunden sind. Dem Hersteller wird dann ein Teil seiner Ueberlegungen und seiner Pflichten durch das Gesetz vereinfacht. Der Käufer hingegen ist sicher, dass bestimmte Merkmale an allen angebotenen Erzeugnissen vorhanden sind, seine Wahl kann sich auf die Bewertung anderer Kennzeichen beschränken. Die Kehrseite gesetzgeberischer Eingriffe in die technische Gestaltung pflegt an den nationalen Grenzen zum Vorschein zu kommen, wo die eigene mit fremden Volkswirtschaften in Wettbewerb tritt. Dort ist meist derjenige im Vorteil, dessen Erzeugnis nur an ein billiges und zweckentsprechendes Minimum von gesetzlichen Vorschriften gebunden ist, wogegen solche Hersteller, in deren Ländern strengere oder durch den Fortschritt überholte Vorschriften die Weiterentwicklung hemmen, zuweilen Mühe haben, sich zu behaupten.

Nachfolgende Betrachtungen sollen sich mit einem Teilgebiet aus dem Gewerbe der elektrischen Energieversorgung befassen, dem heute bekanntlich eine ebenso grosse Bedeutung für die Lebensfunktionen des Einzelmenschen und des ganzen Volkes zukommt wie der Nahrungsmittelversorgung, dem Verkehrswesen und der Bekleidungsindustrie. Da die elektrische Energie in breiter Front in alle anderen Gewerbe als Hilfskraft eingedrungen ist und die Zahl der Menschen heraufgesetzt hat, die man innerhalb gegebener geographischer Grenzen beschäftigen und ernähren kann, so ist ein möglichst hohes Mass an Zuverlässigkeit der Versorgung, eine möglichst niedrige Gefährdung der Benützer und der im Elektrizitätsgewerbe Beschäftigten zu fordern. Andererseits besteht der Wunsch zu Recht, die Kosten für die Erzeugung, Verteilung und Verwendung dieser Energie niedrig zu halten, da eben wegen ihrer umfangreichen Anwendung der niedrige Strompreis auf die Leistungsfähigkeit der gesamten Volkswirtschaft und damit schliesslich auf den Lebensstandard des Einzelnen einen ähnlichen Einfluss hat wie der Preis der Hauptnahrungsmittel.

Es würde ein sehr weitgespanntes Vorhaben bedeuten, wollte man all den Einflüssen nachgehen, die in der Elektrizitätsgewinnung und -verteilung die Sicherheit erhöhen oder

vermindern können, um die Kostenbewegung als Funktion dieser Sicherheit herauszufinden und daraus den jeweils optimalen Aufwand an Leitungsquerschnitt, Installationsmaterial, Ueberwachungs- und Sicherungsgerät abschätzen zu können.

B. Der Turbogenerator als Lehrbeispiel

Als Gegenstand enger, umgrenzter Ueberlegungen ist im folgenden der Turbogenerator des thermischen Kraftwerks ausgewählt worden, wobei zweierlei Gründe diese Wahl befürworten mögen: Erstens stellen in vielen Ländern die Dampfkraftwerke die Mehrzahl der Bezugsquellen an elektrischer Energie dar. Zweitens hat sich die Dampfturbine zusammen mit dem zugehörigen Stromerzeuger zu einem Aggregat entwickelt, bei dem das Wechselspiel zwischen höchster Wärmeausnutzung und Betriebsweise, zwischen höchster Einheitsleistung und Werkstoffanstrengung, zwischen Einsatz-, Ueberholungszeit und mutmasslicher Lebensdauer einzelner Bauteile, zwischen dem Aufwand für Ueberwachungsgerät und der Schadenerwartung besonders interessant ist, innerhalb eines gewissen Spielraumes unterschiedliche Auffassungen zulässt und infolgedessen zu einer gewissen Variationsbreite der Bauformen geführt hat. Dieses Wechselspiel ist vor allem für den Konstrukteur interessant, der solche Maschinen zu entwerfen hat. Aber auch der Betriebsmann, der die laufende und arbeitende Maschine pflegen und beaufsichtigen muss, mag ihm Reize abgewinnen.

Freilich lassen sich nicht alle Konstruktionen, welche in der nunmehr sechzigjährigen Entwicklung im Dampfturbinenbau aufgetaucht sind, im Rahmen einer solchen Betrachtung auf logische Ueberlegung zurückführen. Auch im Dampfkraftwerk hat es Modeströmungen gegeben, in deren Folge eine an einer Stelle entwickelte Maschinenform auf den Flügeln der Propaganda ihren Weg in eine ganze Anzahl Zentralen fand, ehe eine genaue zahlenmässige Nachprüfung die Behauptung gewisser Vorteile als Uebertreibung erkennen liess.

Die Verfeinerung der Messtechnik schuf die Voraussetzung zur Erarbeitung logischer Bewertungsverfahren; und mit dem Anwachsen des statistischen Erfahrungsmaterials wird die Wahrscheinlichkeit immer geringer, dass scheinbare Fortschritte an Stelle von wirklichen in die Praxis eindringen. Freilich setzt das Urteil über die «Zukunft» von neu sich anbahnenden Entwicklungslinien hohe menschliche Qualitäten voraus, Persönlichkeiten, die in Theorie und Erfahrungswelt gleichzeitig beheimatet, recht selten sind. Ihr Ersatz durch eine an Formulare gewöhnte und in vorgespurten Denkbahnen erzogene Bürokratie pflegt eher den Fortschritt zu hemmen, als ihm zu nützen. Solange jedoch bei der Planung der Kraftwerke und beim Entwurf der Maschinen, Kessel usw. die private Wirtschaft in Führung bleibt, sind genügend vorwärtsdrängende Kräfte im Spiel, um auch heute noch Verbesserungen an Vorhandenem anzubringen, gute Gedanken weiter zu entwickeln, sowie auch hier und da unerwartet mit neuen Vorschlägen zu überraschen. Sache der erwähnten gewerblichen Organisationen ist es dann, den Einzelversuch vorzubereiten, der die Ausführbarkeit des neuen Gedankens nachweist, die Betriebe auszuwählen, in denen man den Vorschlag losgelöst von seinem Erzeuger durch eine Reihe kritischer Fachgenossen prüfen und erproben kann, um schliesslich der Einführung einer erprobten Sache in die Praxis die Wege zu ebnen. Wie die Vergangenheit lehrt, summieren sich gerade die kleinen, unscheinbaren Fortschritte mit der Zeit zu einer ansehnlichen Gesamtverbesserung der Wirtschaftlichkeit und Zuverlässigkeit des zeitgenössischen Kraftwerkbetriebes.

Dieses Spiel der vorwärtsdrängenden Kräfte und der beharrenden Massen, des risikofreudigen Moments zum Fortschritt und der verzögernden und filternden Massnahmen zur Erhaltung der betrieblichen Sicherheit und Einsatzbereitschaft einmal an Hand einer grösseren Anzahl von Konstruktionsbeispielen ans Licht der Kritik zu stellen, wäre sicher ein wünschenswertes Vorhaben. Die Vielfalt der Wirklichkeit, dazu eine gewisse Schwierigkeit, verwickelte kausale Zusammenhänge in einfache Formeln zu fassen, weiterhin eine manchmal weitgehende Unbestimmtheit der Entstehungsgeschichte vieler Bauformen, des Geschehens beim Eintritt von Funktionsstörungen in den betrachteten Maschinen, erschweren derartige Untersuchungen. Hinzu kommen menschliche Erwägungen: die Irrtumsfähigkeit, die Grenzen des guten Willens bei schwachen Kräften, das Gebundensein an

Umwelt und Zeitgeist. Deshalb wird im folgenden mehr Wert darauf gelegt, das auf den ersten Blick recht regellose Kraftlinienfeld aufzuzeigen, an dessen Netz sich eine Betrachtung über Sicherheitsfragen und Lebensdauererwägungen bei Turbogeneratoren zu orientieren hat. Einzelheiten werden nur soweit erwähnt, als sie das Beispiel besonders typischer, manchmal zweckentsprechender, manchmal zweckwidriger Formgebung darstellen. Dass manches dabei subjektive Erkenntnis des Verfassers ist, für die nicht von jedem Fachkollegen volle Zustimmung verlangt werden kann, sei ordnungshalber eingeflochten.

C. Betriebsweise und Einsatz der Turbogeneratoren

Bis auf wenige Ausnahmen halten heute alle Versorgungsunternehmen für elektrische Energie ihre Netze durchgehend unter Spannung, um ihren Abnehmern zu jeder der 24 Stunden des Tages Strom liefern zu können. Nur wenige Gegenden gibt es auf der Erde, wo man dem Abnehmer zumuten kann, dass sein Hausanschluss von 1 h bis 4 h nachts oder zu anderen Tageszeiten keine Spannung führt. Wenn längere Abschaltungen vorgenommen werden, so sind Katastrophen vorhergegangen, die einen Teil des Netzes oder der Kraftwerke beschädigt haben, nach denen man zu einer Zwangsunterteilung der Belieferten nach Wichtigkeit ihres Anschlusses und nach Lieferkraft der verfügbar gebliebenen Maschinen greifen musste. Man könnte auf Grund dessen versucht sein, das Ideal der betrieblichen Zuverlässigkeit einer Turbodynamo darin zu sehen, dass sie 8760 Stunden im Jahr entweder am Netz läuft oder doch einsatzbereit ist. Dieses Ideal ginge ein gutes Stück über das Erforderliche hinaus. Fast alle Versorgungsnetze stützen sich heute auf mehr als eine Maschine. Ausserdem hat das Stromlieferprogramm einen Tages-, einen Wochen- und einen jahreszeitlichen Rhythmus, innerhalb deren Starklast- und Schwachlastzeiten abwechseln. Bild 1 zeigt den täglichen Gang eines Netzes, das vorwiegend städtische und industrielle, bzw. gewerbliche Abnehmer versorgt. Die Belastung steigt morgens, wenn die ersten elektrizitätsbedürftigen Menschen sich erheben, steil an und fällt abends wieder ab, wenn sich die letzten schlafen legen. Im Winter wird durch die jahreszeitliche Dunkelheit eine morgendliche und abendliche «Lichtspitze» verursacht. Im Wochenrhythmus (Bild 2) springt die verringerte Höhe der Spitzenlast an Samstagen und Sonntagen hervor. Wenn man die jeweils gemittelten Wochenlasten (Zahl der pro Woche abgegebenen kWh dividiert durch 7×24 h) über der Zeit aufträgt, so erhält man Einblick in den jahreszeitlichen Gang der Netzbelastung (Bild 3).

Die Betrachtung der Lastdiagramme (Bilder 1 bis 3) erlaubt eine Antwort auf die Frage: Wieviel Maschinen soll man für ein gegebenes Versorgungsnetz aufstellen und wie sind diese zweckmässig zu unterteilen? Die erste Antwort ist relativ einfach: Man muss stets so viel Maschinen verfügbar haben, dass die höchste zu erwartende Werktagsspitze noch mit Sicherheit geliefert werden kann. Da jederzeit, und mit etwas verstärkter Wahrscheinlichkeit während der Spitzenlast, eine Havarie an irgendeiner Maschine möglich ist, muss man etwa $\frac{1}{8}$ bis $\frac{1}{5}$ mehr Maschinenleistung verfügbar haben, als für die Lieferung der Spitzenlast nötig ist.

Zu kleineren Nacharbeiten, einschliesslich Austausch schadhaft gewordener Teile gegen solche aus dem eigenen Vorratslager der Zentrale, steht über das Wochenende vom Freitag 22 h bis Montag 5 h eine zusammenhängende Arbeitszeit von 55 Stunden zur Verfügung. Während des Wochenendes kann man also Reparatur- bzw. Ueberholungsarbeiten an etwa $\frac{1}{4}$ der Maschinenkapazität vornehmen lassen, sofern man in dieser Zeit mit der Arbeit fertig wird. Je grösser der in 50 Stunden zu erledigende Reparaturumfang ist, desto wertvoller pflegt die Maschine für den Betrieb zu sein. Durch geschickte oder ungeschickte Anordnung der ab- und wieder anzubauenden Teile kann man die Montagezeiten in sehr weiten Grenzen beeinflussen. Es gibt Bauarten, bei denen man zwecks Revision des Drucklagers die halbe oder ganze Steuerung abbauen muss. Den Steuerschieber eines Kraftgetriebes kann man bei der einen Turbine nach wenigen Handgriffen herausziehen, bei der anderen erst nach stundenlangen Bemühungen. Wichtig ist z. B. auch, dass man frischdampfseitig in der 50-Stunden-Pause das Schnellschlussventil öffnen, nachsehen und wieder zusammenbauen kann, samt Funktionserprobung ohne und mit Dampfdruck. Naturgemäss kann man über Wochenende keine Generalüberholung vornehmen. Für eine solche gibt eine amerikanische Arbeit eine

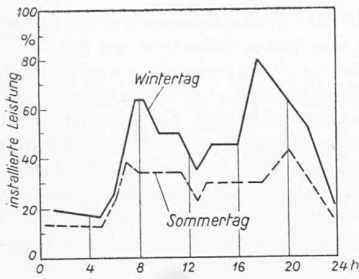


Bild 1. Täglicher Gang der Belastung eines städtischen Abnehmer versorgenden elektrischen Verteilnetzes. Die gesamte installierte Maschinenleistung des Kraftwerkes darf in der Spitze zu etwa 80 bis 85 % in Anspruch genommen werden, um noch eine Reserve bei Ausfall einer Einheit einsetzen zu können.

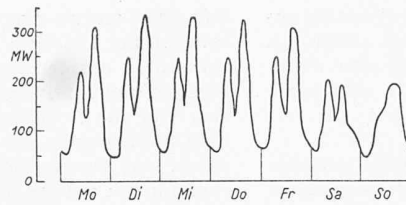


Bild 2. Wöchentlicher Gang der Belastung eines Netzes. An Samstagen und Sonntagen werden etwa 30 % der Maschinen nicht gebraucht und können kürzere Reparaturen erfahren.

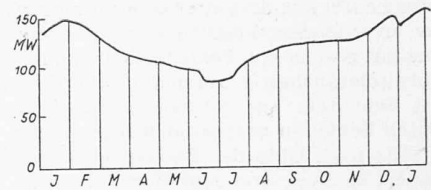


Bild 3. Jährlicher Gang der gemittelten Netzbelastung. In den Sommermonaten sind für $\frac{1}{3}$ bis $\frac{1}{4}$ der Maschinenleistung längere Revisions- und Reparaturzeiten verfügbar. Die Winterspitze stellt maximale Anforderungen und verlangt gewöhnlich hohe Einsatzbereitschaft.

durchschnittliche Dauer von 24 Tagen an. Je nach vorgefundenen Schäden kann aber eine Ueberholung der Innenteile auch mehrere Monate in Anspruch nehmen, besonders wenn Schaufeln erneuert werden müssen, die das Lieferwerk nicht vorrätig hat. Die Generalüberholung der Turbosätze wird man nach Möglichkeit in die Zeiten geringer Lastanforderung legen, also in die Monate April bis Juli für den in Bild 3 dargestellten Jahresverlauf der gemittelten Netzbelastung.

Der Rückgang der Last in dieser Zeit auf $\frac{2}{3}$ der Winterspitze macht $\frac{1}{3}$ der Maschinen für Revisionsarbeiten frei. Eine richtig entworfene und betriebene Turbine wird somit alle drei Jahre mit einer gründlichen Durchsicht der Innenteile zufrieden sein müssen. Dies lässt sich bei Turbinen für Frischdampftemperaturen unter 500°C auch einhalten. Die besondere Verhaltensweise der Werkstoffe oberhalb 500°C bringt es mit sich, dass für Hochdruckturbinen eine schnellere Aufeinanderfolge der Durchsicht und Aufarbeitung ihrer Innenteile erwünscht sein kann. Man muss dann den Einsatz und die Ueberwachungsarbeiten so planen, dass jede Turbine alle zwei Jahre oder sogar jährlich eine Revision erfährt, gegebenenfalls unter Vermehrung der Zahl der Reservesätze.

Weiterhin ist darauf Rücksicht zu nehmen, dass die in aufsteigender Linie befindliche Elektrifizierung des öffentlichen und häuslichen Lebens nach Verlauf eines Jahres im Durchschnitt rd. 8 % mehr Kapazität verlangt. Bei 5 % Abgang infolge Ueberalterung müssen also mindestens 13 % der augenblicklichen Leistung als neue Maschinen beschafft und aufgestellt werden.

Je nachdem, ob man die kleineren Ueberwachungsarbeiten über das Wochenende mit zu den Zeiten zählt, während denen die Maschine nicht verfügbar ist, oder ob man sie, da in diesen 50 Stunden niedriger Netzbelastung ein Teil der Maschinen eben «planmässig» nicht benötigt wird, als die Einsatzbereitschaft nicht mindernd ansieht, kommt man zu anderen Zahlen für die prozentuale Einsatzbereitschaft. In Amerika hält man das letztgenannte Verfahren für angebracht und beziffert demgemäss die Einsatzbereitschaft (availability factor) der Turbosätze mit 94 bis 95 %.

D. Art der Beanspruchung und Abnutzung der Schaufelung

Wenn man die Statistiken der Ueberwachungsgesellschaften durchblättert, so findet man, dass Dampfturbinen verhältnismässig betriebssichere Maschinen sind. Das Verhältnis «Geleistete kWh/Reparaturstunden» ist wesentlich höher als bei jeder anderen thermischen Kraftmaschine; es ist besser als das der Kolbendampfmaschine und auch besser als das der Verbrennungsmotoren, selbst wenn man den Dampfkessel auf seiten der Turbine mit anrechnet. Die hohe Zuverlässigkeit der heutigen Dampfturbinen macht die gesamte Elektrizitätswirtschaft verhältnismässig störungssicher.

Gleichwohl hinterlassen die gewaltigen Dampfmengen, die einen neuzeitlichen Turbogenerator täglich durchströmen, ihre Spuren an den arbeitenden Teilen. Irgendwann geht ihr Widerstandsvermögen gegen die Kräfte der Dampfströmung, den korrodierenden Angriff der Salze, die werkstoffzermürbende Hitze des Heissdampfs zu Ende, und die Turbine muss schadenshalber stillgelegt werden.

1. Hochdruckschaufeln

Die am stärksten beanspruchten Teile sind die Turbinenschaufeln. Schaufelschäden nehmen infolgedessen unter allen Krankheiten der Dampfturbine die erste Stelle ein, gefolgt von

denjenigen der Reglungs- und Sicherheitsorgane. Unter den zwei bis vier Dutzend Schaufelkränzen der neuzeitlichen Kraftwerktrubine sind die ersten und die letzten am meisten gefährdet. Ueberwiegend werden heute die Turbogeneratoren durch Düsengruppenventile geregelt, welche den Dampf über drei bis sechs verhältnismässig kurze Düsenbänder in das erste, das Regelrad, einströmen lassen. Seine Schaufeln werden deshalb bei jedem Umlauf mehrmals von Dampfstössen getroffen, an einem Tage mehrere Millionen mal. Wenn auch die Füsse sehr kräftig bemessen sind und der Einbau sehr sorgfältig vorgenommen wird, so dass die Schaufeln rüttelsicher festsitzen, so ist doch durch das Kriechen der Werkstoffe bei der hohen Temperatur, mit der das erste Rad angeströmt wird, mit einer in kürzerer oder längerer Zeit sich ausbildenden Entspannung der Verbindung zwischen Rad-scheibe und Schaufelfuss zu rechnen. Die zurzeit recht hohen Brennstoffpreise sind ein starker Anreiz, den Wärmeaufwand pro kWh durch weitere Temperatursteigerung des Frischdampfes unter die heute üblichen Werte von 2900 bis 2700 kcal/kWh herabzudrücken. Die Zahl der Kraftwerke mehren sich deshalb rasch, welche mit Temperaturen von 540°C , 560°C und 600°C arbeiten wollen.

Der Konstrukteur wird durch diesen Zug der Zeit genötigt, erstens hochwärmfeste Werkstoffe, wie sie der Gasturbinenbau entwickelt hat, auch in der Dampfturbine zu benutzen. Zweitens muss er danach trachten, die Beanspruchung möglichst niedrig zu halten, da die Lebensdauer bis zu dem nach neueren Forschungen jede Kriechbeanspruchung oberhalb 500°C abschliessenden Bruch sehr erheblich von der Höhe der Spannung abhängt. Während der Hersteller von Flugzeugturbinen seine Werkstoffe soweit anstrengen kann, dass der Bruch nach 1000 h zu erwarten ist (in Bild 8, S. 186, mit σ_{1000} bezeichnet), kann man im Dampfturbinenbau nur etwa $\frac{1}{3}$ dieser Beanspruchung, entsprechend 100 000 h mutmasslicher Betriebsdauer bis zum Bruch, anwenden. Während bei 400°C die herkömmliche Schaufelbefestigung mit Hammerkopf in I-Nut sowie die aufgenietete Radbandage eine durchaus langlebige Konstruktion darstellt (Bild 4a), wird sie rasch unbrauchbar bei 500°C , weil der sich entspannende Kranz die Pressung der Füsse gegeneinander in Umfangsrichtung entschwinden lässt, so dass die Schaufeln von den Dampfstössen locker gerüttelt werden und bald Schwingungsbrüche erfahren. Deshalb geht man bei 500°C für das Regelrad zur eingienieteten Steckfuss-schau-fel oder zur Quernutbefestigung, dem bekannten Lavalfuss, über. Kennt man die Schweisseigenschaften der Werkstoffe von Rad und Schaufel, so kann man beide auch noch durch eine Schweissung verbinden, an sich die bestmögliche Verbindung im Kriechbereich, da sie die Teile ohne äussere Konstruktionsspannung zusammenfügt (Bild 4b). Hochwärmfeste Legierungen pflegen leider sehr empfindlich zu sein gegen rauhe thermische Behandlung; deshalb ist bei ihnen die Schweissung nicht ratsam. Für 600°C scheint eine kräftig bemessene Steck-

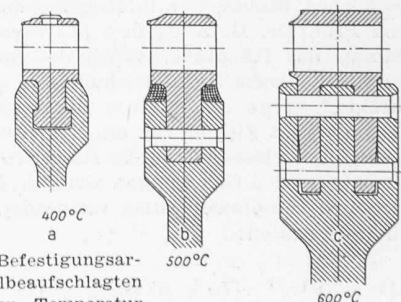


Bild 4. Drei verschiedene Befestigungsarten der Schaufeln von teilbeaufschlagten Turbinenstufen. Bei hoher Temperatur muss die Fussbefestigung verstärkt werden.

fusschaufel mit doppelter Quernietung trotz ihres etwas primitiv anmutenden Schnittbildes gut geeignet zu sein (Bild 4c). Die mit Stachstahl, Schleifscheibe und Spiralbohrer samt Reibahle toleranzhaltig herzustellende Verbindung ist auch noch bei Schaufeln aus solchen Werkstoffen anwendbar, die nur durch Schleifen bearbeitet werden können.

Je nach Güte der Bauart und Besonderheit des Betriebes dauert es zwei, drei oder fünf Jahre, bis die Hochdruckschaufelung durchgesehen, nachgearbeitet oder erneuert werden muss. Die hohe thermische Güte der Energieumsetzung von 32 bis 35 %, die man mit Kraftwerken von nahezu 600 ° C Frischdampf Temperatur erreicht, ist an die Verwendung warmfester Werkstoffe im Kriechgebiet gebunden. Je höher die Temperatur, desto kurzlebiger die letzten Reihen Ueberhitzerrohre und die ersten Reihen Turbinenschaufeln. Vielleicht beschert uns die Zukunft Bauarten der Kessel und Turbinen, bei denen diese Elemente rasch ausgetauscht werden können, so dass man sie für eine mittlere Lebensdauer von 5000 h entwerfen kann. Dann könnte es wohl möglich sein, Dampfkraftwerke mit 150 at und 700 ° C zu betreiben. Bei den Sammelkästen, Rohrleitungen und Gehäusen kann man leichter niedrige Beanspruchung durch dicke Wandstärken anstreben; ausserdem ist es wenigstens grundsätzlich möglich, durch Isolation und gekühlte äussere Wand die strömungsführenden und die dem Innendruck widerstehenden Schalen bzw. Kanäle zu trennen, so dass sich in diesen Bauteilen die hohe Temperatur auch mit langlebigen Formen beherrschen lässt. Vermutlich wird der Zug zu weiterer Temperatursteigerung die Unterteilung der Bauelemente in kurz- und langlebige stärker als bisher hervortreten lassen. Während die Mitteldruckpartie, das Niederdruckgehäuse und die kalten Teile, Lagerböcke, Oelleitungen usw. für eine Lebensdauer gleich der Amortisationsdauer des Maschinenkapitals — oder auch dem doppelten hiervon — entworfen werden, wird man das Hochdruckgehäuse für halbe und die ersten Schaufelreihen sowie die frischdampf führenden Ventile vielleicht zweckmässiger für eine Standzeit gleich ein Viertel der Amortisationsdauer entwerfen.

2. Niederdruckschaufeln

In etwas anderer Weise als die Hochdruckschaufeln werden diejenigen am niederdruckseitigen Turbinenende beansprucht. Das Streben nach immer grösseren Einheitsleistungen hat die Konstrukteure gezwungen, mit der Beanspruchung der Schaufelfüsse in der letzten Schaufelreihe sehr hoch zu gehen. Man erreicht im letzten Radkranz bei Rädern von 2,5 m Aussendurchmesser und 3000 U/min eine Umfangsgeschwindigkeit an der Schaufelspitze von nahezu 400 m/s. Bei entsprechender Formgebung der Schaufel kann man die Zugbeanspruchung in der Blattwurzel zu etwa 40 % der Streckgrenze eines auf rd. 80 kg/mm² Kaltfestigkeit vergüteten Stahles annehmen. Bei der Schnellschlussdrehzahl (12 % über der Normaldrehzahl) sind es dann 50 %; darüber hinaus pflegt man nicht zu gehen, weil man im Laufe des Betriebes für jede Verbindung mit einer gewissen Einbusse an Festigkeit durch Korrosion oder zufällige mechanische Beschädigung rechnen muss; auch unter solchen Umständen soll aber der Fuss noch die Schaufel in der Radscheibe halten können, ohne sogleich zu Bruch zu gehen.

Die Niederdruckschaufeln erleiden ihre Schäden gewöhn-

lich nicht an der durch Fliehkraft höchstbeanspruchten Stelle, sondern am äusseren Drittel des Schaufelblattes, wo die Wassertropfen des feuchten Dampfes Erosionsnarben einschlagen und die Schaufelvorderkante sägezahnartig ausbröckeln lassen. Um die Schaufeln widerstandsfähiger zu machen, lötet man Stellitebleche auf oder vergütet die vordere Schaufelkante durch eine Brennerhärtung. Beide Massnahmen lassen Eigenspannungen zurück, die Anlass zum Entstehen von Rissen aus unbedeutenden Kratzern geben können. Die Erosion durch Tropfenschlag pflegt die Schaufeln nicht gleichmässig abzuwehren. Es ist vorgekommen, dass drei oder vier Schaufeln besonders stark angegriffen waren, während man die übrigen noch als betriebsbrauchbar ansehen konnte. Statt zu diesem Zeitpunkt schon die gesamte Reihe zu erneuern, pflegt man gewöhnlich die «Erstversager» um das schadhafte Stück zu kürzen. Danach gleicht man die Wuchtung des Läufers durch entsprechende Kürzung noch gesunder, mittelpunktsymmetrisch zu den schadhafte liegender Blätter aus und geht mit der so nachgearbeiteten Beschauelung wieder in Betrieb, bis die weiterschreitende Erosion die Erneuerung des ganzen Schaufelkranzes nötig macht.

Sowohl diese Ungleichmässigkeit der Erosion als auch das Risiko, dass bei einzelnen Schaufeln unbedeutende Vergütungsnachwirkungen vorzeitig zu Brüchen führen, bevor der ganze Kranz seine volle Lebensdauer erreicht hat, empfehlen für die Schaufelbefestigung auf dem Rad solche Verbindungen, die eine Auswechslung einzelner Schaufeln ohne Herausnahme von Nachbarschaufeln gestatten. In neueren Niederdruckturbinen werden deshalb die Füsse der Schaufeln des letzten und manchmal auch des vorletzten Rades in gefräste Quernuten mit Doppel-T oder dreifach verzahntem Profil in Achsrichtung eingeschoben. Auch die Steckfusschaufel mit zwei oder drei Nieten quer durch den Radkranz erfreut sich neuerdings zunehmender Anwendung zur Befestigung langer Niederdruckschaufeln. Da die elastischen Eigenschaften dieser Verbindung im Lauf etwa die gleichen sind wie an stillstehender Turbine, lassen sich die Eigenfrequenzen aller Schaufeln des beschauelten Rades einzeln nachprüfen, und man kann bei richtiger Abstimmung auf die lästige Verdrachtung bzw. auf das Deckband verzichten.

Immer wieder kommt es vor, dass einzelne Kränze im Stufenverband nach einigen hundert oder tausend Betriebsstunden schadhafte werden. Meist ist die Ursache in einer in Nähe der Betriebsdrehzahl liegenden Eigenfrequenz samt einer dazu passenden Erregung aus Teilbeaufschlagung oder Teilfugensperstücken zu suchen. Bei neuen Turbinen ist es nicht mit voller Sicherheit möglich, solchen zufälligen Schwingungserscheinungen aus dem Wege zu gehen; ab und zu, wenn auch verhältnismässig selten, gerät ein Kranz zu nahe an ein Resonanzgebiet heran. Man wechselt die betroffenen Schaufeln durch solche mit anderer Abstimmung aus und kommt damit aus dem Resonanzbereich heraus. Als nach 1945 in manchen Netzen die Frequenz infolge der Energieverknappung gesenkt wurde, häuften sich die Schäden an Schaufelungen im Stufenverband, weil man aus dem «bereinigten» Drehzahlbereich von 3000 ± 50 U/min herauskam und man sich bei 2900 oder 2850 U/min da und dort erneut mit unabgeklärten Zufallsresonanzen auseinandersetzen musste, die bei 3000 U/min meist noch innerhalb der Garantiezeit ausgemerzt worden waren.

Fortsetzung folgt

Bemerkungen zur Knickung des verwundenen, einseitig eingespannten Stabes

Von Dipl. Phys. EDGAR LÜSCHER, Lausanne

DK 539.41

Die Knicklasten eines auf Druck beanspruchten und verwundenen Stabes, der in Kugelgelenken gelagert ist, wurde von Prof. Dr. H. Ziegler [1] berechnet. Ziegler benützte damals das Hauptaxensystem des unverformten Stabes und leitete die Differentialgleichung für die elastische Linie auf direktem Wege ab. In einer umfassenden Arbeit [2] neueren Datums geht Ziegler für die Herleitung der Differentialgleichungen zur Behandlung des Knickproblems von den Clebsch-Kirchhoffschen Gleichungen aus [3]. Es wird dabei ein aufgerichtetes Hauptaxensystem verwendet. Die Zieglerschen Gleichungen lauten:

$$(1) \quad \beta v_u'' - (\alpha + \beta) \omega_0 v_v' + (D - \alpha \omega_0^2) v_u = 0$$

$$\alpha v_v'' + (\alpha + \beta) \omega_0 v_u' + (D - \beta \omega_0^2) v_v = 0$$

Darin bedeuten:

- $\alpha \beta$ Biegesteifigkeit des Stabes
- $v_u v_v$ Koordinaten im aufgerichteten System
- ω_0 Verwindungswinkel
- D Drucklast
- s Längskoordinate des Stabes

Die Randbedingungen für den einseitig eingespannten Stab lauten:

Am eingespannten Ende: $s = 0$

$$(2) \quad v_u = 0, v_v = 0$$

Am freien Ende: $s = l$

$$(3) \quad v_u' - \omega_0 v_v = 0, \quad v_v' + \omega_0 v_u = 0$$