

Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band: 85 (1993)
Heft: 1-2

Artikel: Der Generator zur Straflo-Turbine : Belüftung, Kühlung und Konstruktion
Autor: Baer, Jürgen / Stöckli, Franz
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-939954>

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: 22.02.2026

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

Der Generator zur Straflo-Turbine

Belüftung, Kühlung und Konstruktion

Jürgen Baer und Franz Stöckli

Zusammenfassung

Der Wasserkraftgenerator zur Straflo-Turbine weist aufgrund seiner radialen Anordnung um die Turbine markante Besonderheiten bezüglich Konstruktion und Belüftung auf. Die Abweichungen zur traditionellen Bauweise eines Wasserkraft-Generators bei fluchtender Anordnung des Maschinenstranges sind bedeutend.

Es wird über die Belüftung und Konstruktion des Aussenkranz-Generators berichtet, ohne deren richtige Bemessung eine ausreichende symmetrische Kühlung des Generators nicht möglich ist.

Am Beispiel Laufenburg werden die Ergebnisse von Berechnung und Messung gegenübergestellt.

Einführung

Die ersten Ideen zum Konzept der Straflo-Turbine, die im Wasserbau-Niederdrucksektor besondere Vorteile bietet, gehen auf das Jahr 1919 zurück. Aber erst die Schriften der 60er Jahre [1] und die besonderen Anstrengungen von Escher Wyss in den 70er Jahren [2, 3] brachten – verbunden mit dem Plan zur Modernisierung der Rheinkraftwerke Laufenburg und Augst – den längst fälligen grossen Durchbruch.

Die Gelegenheit der Modernisierung eines bestehenden Kraftwerkes mit Leistungssteigerung, aber gleichzeiti-

gem Erhalt der sichtbaren Bausubstanz (Bild 1) drängte regelrecht dieses neue Konzept auf, um die Auflagen des Umweltschutzes und der Denkmalpflege mit der Absicht eines erhöhten Gewinnes elektrischer Energie in einem Projekt zu vereinen.

Aber auch für Neuprojekte von Flusskraftwerken ist dieses Turbinen-Generator-Konzept interessant, da es allein schon vom Bauvolumen her betrachtet zu Kosteneinsparungen führt.

Die Beschreibung der komplett neuen Maschinensätze, die Absicht der Modernisierung einer alten Zentrale, die erforderlichen Bauarbeiten sowie Bauprogramme, Layout über den Ablauf eines Umbaus in vielen Bildern einschliesslich der Terminsituation sind in den Schriften [4] bis [7] aufgezeigt.

Dass bei ABB technisch-wissenschaftliche Werkzeuge für die Behandlung der Belüftung und Kühlmittelverteilung in komplizierten sowie neuartigen Konstruktionen vorhanden sind, ist in [8] und [9] nachzulesen.

Für die konstruktive Lösung bei besonderen Anforderungen bezüglich Bauart oder Festigkeit kann ABB auf eine langjährige Tradition und Erfahrung zurückblicken [10, 11].

Nachstehend werden die besonderen Merkmale der Belüftung und Konstruktion sowie die praktischen Erfahrungen aus der modernisierten Zentrale Laufenburg aus der Sicht des Generatorbauers wiedergegeben.

Belüftung und Kühlung

Die Entwicklung eines Generators mit geeignetem Kühlkreis, so wie es für eine Aussenkranz-Bauart zu einer

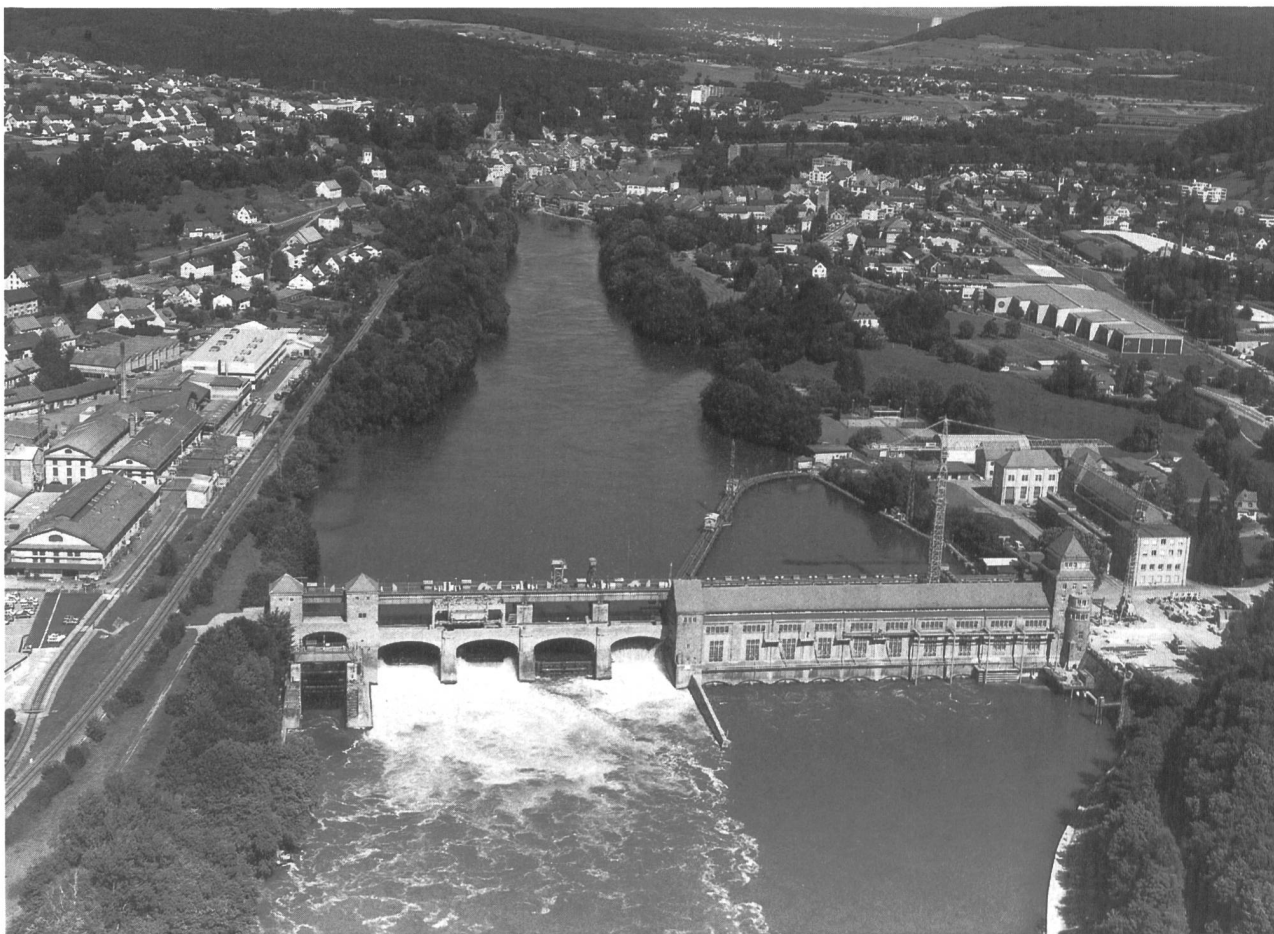


Bild 1. Luftaufnahme der Zentrale Laufenburg Baujahr 1909–1914 von der Unterwasserseite gesehen mit heutiger Agglomeration. (Veröffentlichung mit freundlicher Genehmigung des Kraftwerkes Laufenburg.)

Straflo-Turbine erforderlich war, zieht unter anderem zwangsläufig die Frage nach sich, wie der Kühlkreis des Generators zu gestalten ist, um eine effiziente sowie funktionsgerechte Kühlstromumwälzung und -verteilung zu erhalten. Ferner muss die rechnerische Erfassung des Kühlkreises mit der werkseigenen Software [12] gewährleistet sein.

Das ausgeführte Belüftungskonzept im Fall der betrachteten Anlage Laufenburg, welches eine gute Kühlung aller Generatorteile gewährleistet, ist in Bild 2 skizziert.

Der Kühlkreis

Der Generator ist um die Turbine herum gebaut, weist somit einen grossen Durchmesser bei einer kurzen Eisenlänge auf und erhält zweckmässigerweise eine Kühlstromumwälzung von fremdangetriebenen Axialventilatoren. Die Fremdventilatoren sind axial einseitig oben in unmittelbarer Nachbarschaft zu den Wärmetauschern angeordnet. Dieses Kühlkonzept wurde gewählt, weil es gleichfalls revisionsfreundlich ist.

Die Fremdventilatoren drücken die Kühlluft in den mittleren Ringraum zwischen Gehäuse und Statoren. Bei richtiger Drosselung wird die Kühlluft so geführt, dass vor Eintritt in den Aktivteil eine am Umfang gleichmässige und gute Kühlung des Statorwickelkopfes gewährleistet ist. Anschliessend strömt die Luft axial durch den Generator, kühlt sodann auf gleiche Weise wie vorher beschrieben den anderen Statorwickelkopf, sammelt sich im folgenden Ringraum und wird über die Wärmetauscher rückgekühlt.

Das Strömungsnetz

Die Sicherstellung des Kühlstromes für einen Generator nebst Nachweis seiner kühltechnisch sachgerechten Verteilung erfolgt bei ABB mittels einer Strömungsnetzbeziehung des Kühlkreises, wobei unter Umständen – nach erstem Design – fehlgeleitete Teilkühlströme durch die Wahl geeigneter Drosseln und Leiteinrichtungen in die richtigen Zonen gelenkt werden können.

Das Strömungsnetz für den behandelten Fall ist im Bild 3 gezeigt. Der Kühlkreis des Generators wurde zu diesem

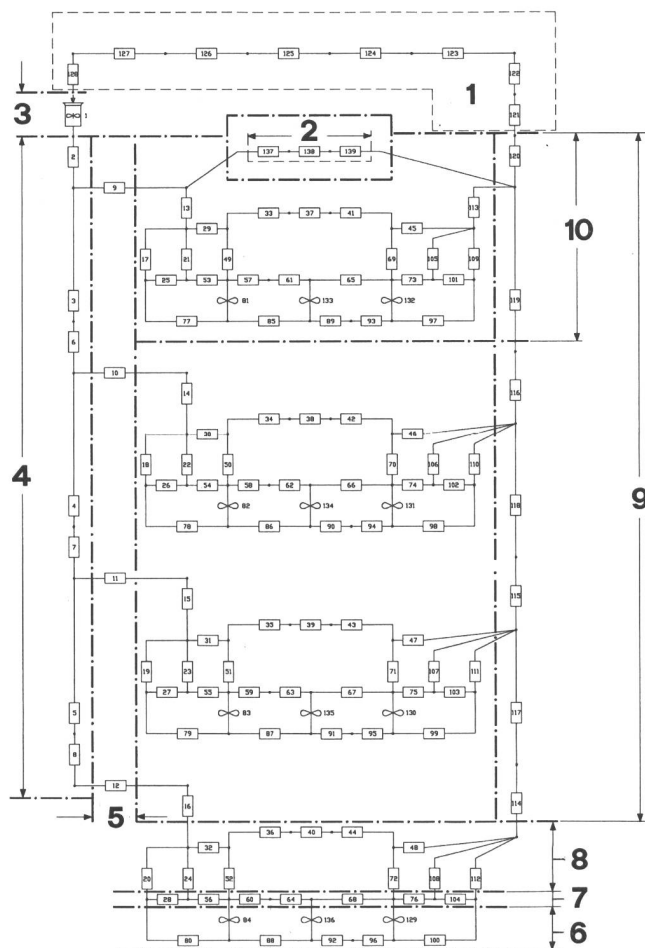


Bild 3. Strömungsnetz des Kühlkreises für den Aussenkranz-Generator Laufenburg. 1 Kühler mit Gehäuseaufsatz, 2 Klemmenkasten, 3 fremdangetriebene Axialventilatoren, 4 Statorgehäuse Rückenraum, 5 Kühlstrom-Verteilungsraum je $\frac{1}{8}$ des Umfanges vom Generator, 6 Rotor-Pollücken, 7 Luftspalt, 8 Wickelköpfe plus Pressplatten, 9 Gehäuse-Rückström-Ringraum, 10 Strömungsnetz für $\frac{1}{8}$ des Generatorumfangs.

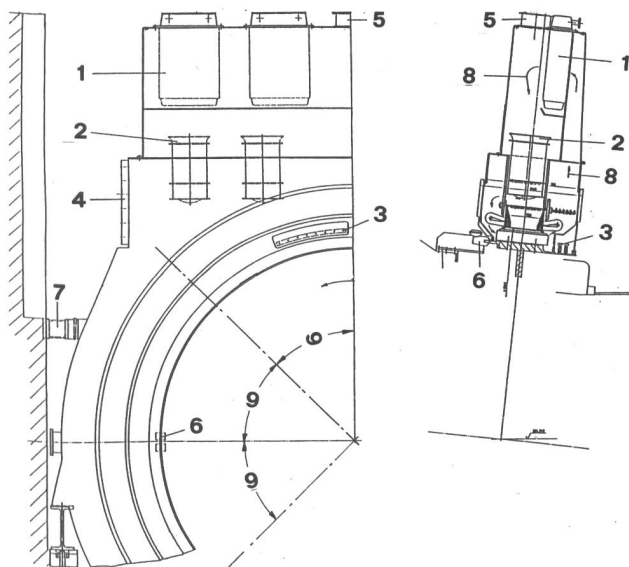


Bild 2. Generator-Ausschnitt mit Kühlkreisnachbildung. 1 Luftkühler, 2 fremdangetriebene Axialventilatoren, 3 Bürstenbrücke, 4 Statorklemmen, 5 Druckausgleich, 6 Bremseinrichtung, 7 Schwingungsdämpfer, 8 Kühlluft-Strömungs-Richtungsanzeige, 9 Kühlkreissegment ($\frac{1}{8}$ des Generatorumfangs).

Zweck – über dem Generatorumfang betrachtet – in acht gleiche Segmente/Zonen von 45 Grad unterteilt, wovon nur vier im Netz nachgebildet wurden, da der Generator durchzugsbelüftet ist, das heisst symmetrisch mit Kühlluft versorgt wird.

Nach Abschluss der Rechnungen, die u. a. die Betriebskennwerte der notwendigen Lüfter liefern, wurden die vier fremdangetriebenen Axialventilatoren aus einem einschlägigen Katalog gewählt.

Die Fremdventilatoren

Der Einsatz von Ventilatoren im Parallelbetrieb in einem Lüftungssystem ist nicht ganz unproblematisch, kann es doch zu verminderter Förderleistung kommen, wenn die Abreiss- oder Pumpgrenze nicht beachtet wird [13].

Dieser Problematik bewusst, wurde in Zusammenarbeit mit dem Ventilatorlieferanten das Arbeitsdiagramm (Bild 4) der parallelgeschalteten Axialventilatoren erstellt, um negativen Überraschungen bei der Inbetriebsetzung vorzubeugen. Ausserdem war ein ausreichender Kühlstrom bei Betrieb von nur drei Ventilatoren gefragt.

Messtechnische Ergebnisse

Die betrachteten Generatoren weichen in ihrem konstruktiven Aufbau stark von der herkömmlichen Bauweise ab, und die Platzverhältnisse im Kühlkreis sind derart eng

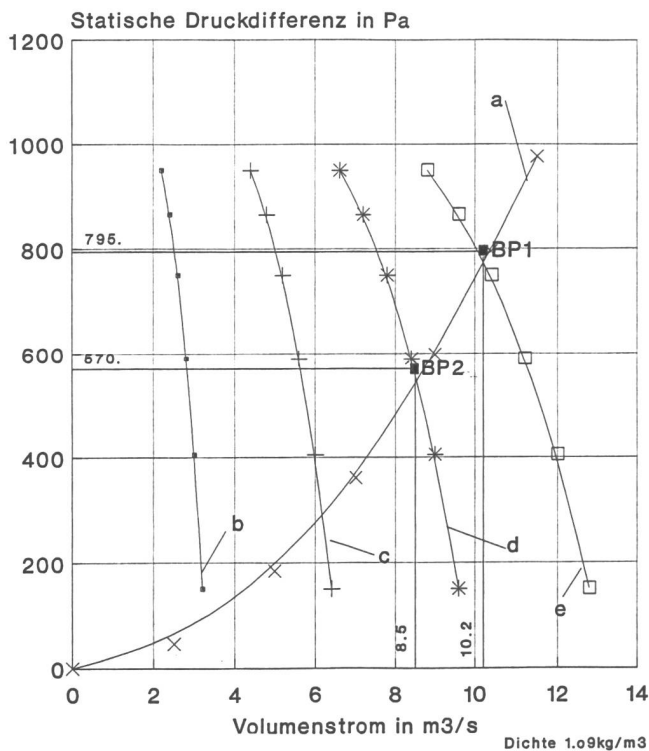


Bild 4. Arbeitsdiagramm für den Kühlkreis der Anlage Laufenburg: a) gerechnete resultierende Widerstandskennlinie, b) Ventilator-kennlinie eines Axialrades, c) zwei Axialventilatoren parallel, d) drei Axialventilatoren parallel, e) vier Axialventilatoren parallel, BP 1 Betriebspunkt bei Nennbetrieb, BP 2 Betriebspunkt im Fall der Abstellung eines fremdangetriebenen Axialventilators.

gestaltet, dass es nicht möglich war, einen geeigneten Messort zu finden, um den Istkühlstrom zu bestimmen. Die Messungen mussten aus diesem Grund auf das ABB-Labor und die Zentrale aufgeteilt werden.

Die Laborversuche

Im modernisierten Laboratorium für strömungs- und wärmetechnische Untersuchungen der ABB-Kraftwerke AG im Werk Birr/Schweiz (Bild 5) wurden die Fremdaxialventilatoren, die mit Kurzeinlaufdüse, Einlaufgitter und automatischer Verschlussklappe für den Fall einer Havarie des Antriebsmotors versehen sind, geeicht und ihre vom Lieferanten garantierte Betriebskennlinie $\Delta p = f(\dot{V})$ kontrolliert.

Bild 6 zeigt die sehr gute Übereinstimmung der Ventilator-kennlinie mit der abgegebenen Liefergarantie sowie den ausgeprägten Abreissbereich. Dieser liegt richtigerweise oberhalb des Sollbetriebspunktes, und somit ist bei Parallelschaltung von vier Ventilatoren unangenehmen Überraschungen vorgebeugt. Weiterhin sind die Eichkennlinie, die zur Bestimmung des Generatorkühlstromes vorhanden sein muss, sowie die Eichmessstelle am Ventilator dargestellt.

Die Anlagenmessungen

In der Zentrale wurde an einem Generator der Gesamtkühlstrom mit Hilfe der geeichten Ventilatoren gemessen und mit eingebauten statischen Druckmesssonden die Kühlstromverteilung am Umfang des Generators kontrolliert.

Der ermittelte Gesamtkühlstrom liegt gegenüber der Berechnung um weniger als 10% höher.

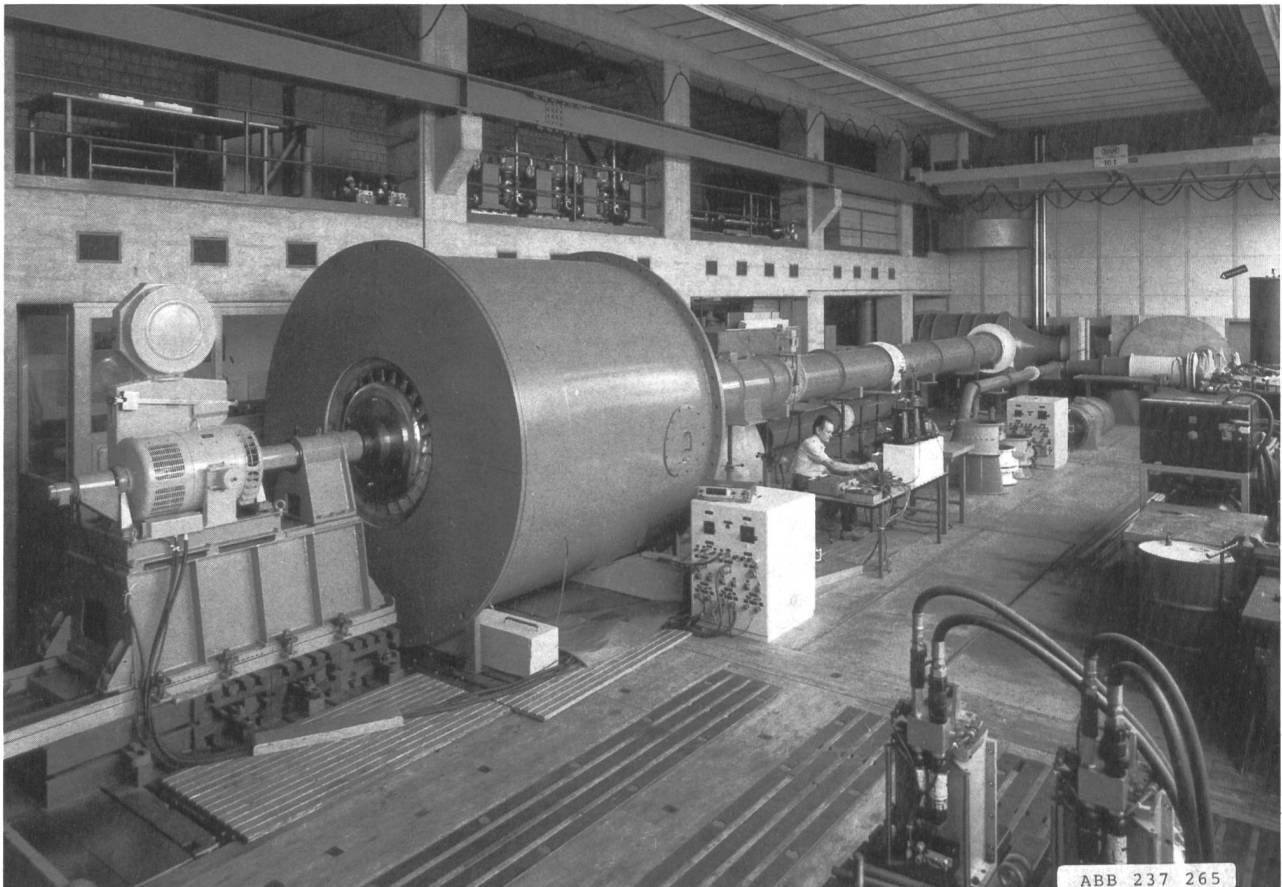


Bild 5. Laboratorium für strömungs- und wärmetechnische Untersuchungen, ABB Kraftwerke AG, Werk Birr/Schweiz (ABB 237 265).

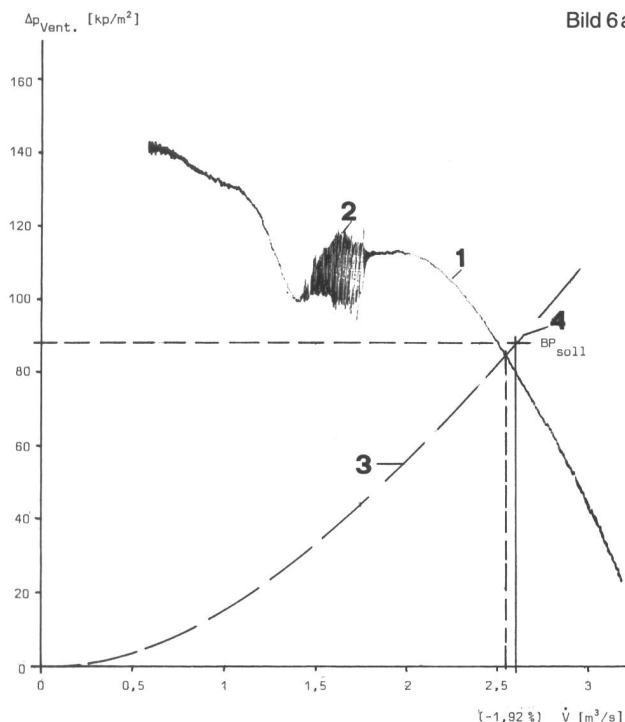


Bild 6a

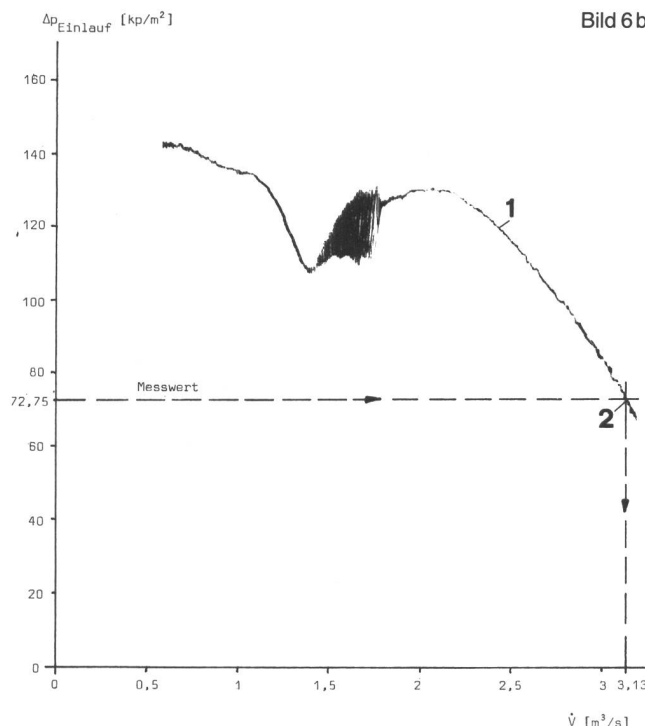


Bild 6b

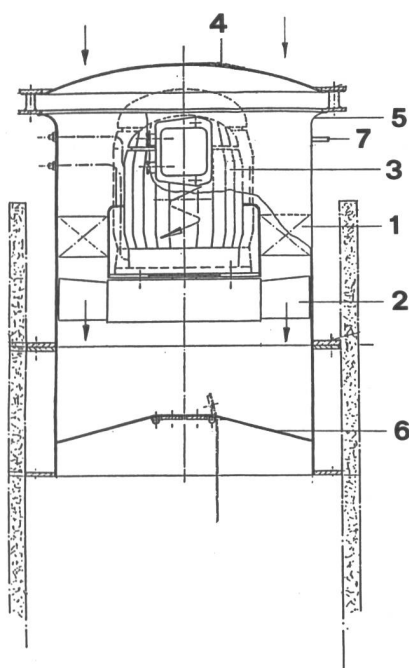


Bild 6c

Bild 6. a) Im Labor aufgenommene Ventilatorcharakteristik 1 mit Abreissbereich 2 und Betriebspunkt 4, 3 Widerstandsparabel.

b) Im Labor gemessene Kalibrierkennlinie 1 von einem der vier parallelgeschalteten fremdangetriebenen Axialventilatoren mit in der Anlage gemessenem Arbeitspunkt 2.

c) Fremdangetriebener Axialventilator, 1 Vorleitrad, 2 Laufrad, 3 Antriebsmotor, 4 Einlauf Schutzgitter, 5 Kurzeinlaufdüse, 6 automatische Luftklappe, 7 Eichmessstelle zur Förderstrom-Bestimmung.

eigenen Spezialkenntnissen, ist, wenn erfahrene Anwender/Mitarbeiter dahinterstehen.

Konstruktion

Das Augenfällige am Straflo-Generator sind seine Abmessungen. Bedingt durch das Straflo-Konzept, dass also der Generatorrotor direkt auf den Turbinen-Laufschaufeln aufgesetzt ist, ergibt sich eine Maschine mit grossem Durchmesser. Dies hat mehrere Vorteile: Zum einen wird das Schwungmoment gegenüber einem konventionellen Rohrgenerator sehr gross, was für die Regulierung der Turbine vorteilhaft ist. Zum anderen ergibt sich eine kürzere Eisenlänge des Statorkörpers, was zur Verbesserung der Kühlung beiträgt.

Ein wesentlicher Punkt bei der Auslegung von Straflo-Generatoren ist die mechanische Stabilität von Rotor und Stator. Dies bedingt, dass diese sehr steif gebaut werden müssen, damit Rotor und Stator bei transienten Betriebsvorgängen nicht zum Streifen kommen. Um einen möglichst hohen Wirkungsgrad zu erzielen, sollte der Luftspalt vertretbar klein sein.

Der Stator muss bei grossen Durchmessern auch mehrteilig transportiert werden können. Da der Stator des Straflo-Generators im Gegensatz zum üblichen Rohrgenerator nicht wasserdicht sein muss, fällt die Ausführung wesentlich kostengünstiger aus.

Die Lagerung des Rotors

Aus strömungstechnischen Gründen ist die zweifache Lagerung, das heisst ein Lager auf jeder Seite des Rotors, nicht optimal. Das unterwasserseitige Lager läge dann im Turbinen-Wasserkanal und würde die Strömung behindern. So ist man bestrebt, die Maschine einseitig zu lagern, wie Bild 7 zeigt. Dies erfordert eine möglichst steife und besondere Bauart des einzigen Lagers.

Der Rotor

Der Aussenring der Straflo-Turbine bildet gleichzeitig den Polradring des Generators. Seine Dicke ergibt sich mit Rücksicht auf den Magnetfluss und die Zentrifugalkraft der Polkörper. Je nach Umfangsgeschwindigkeit des Pol-

Ein Vergleich ergab in den vier betrachteten Achtern des Generatorumfangs eine maximale Abweichung der Kühlstromverteilung (Berechnung/Messung) von rund 7%.

Die weiteren Ergebnisse, wie:

- garantierte Temperaturen,
 - Summe der Oberflächenreibungsverluste und Förderleistung,
- liegen in den garantierten Toleranzbereichen [14].

Abschluss

Die erzielten Ergebnisse bestätigen auch in diesem Fall, nämlich eines vorher nie in ähnlicher Form angetroffenen oder behandelten Ventilationskreislaufes, wie vielfältig anwendbar die ABB-Software, verbunden mit den firmen-

radrings bei der Durchgangsdrehzahl der Turbine können die Polkörper mit Bolzen oder aber, wie bei vertikalen Hydrogeneratoren üblich, mittels Polklauen am Polradring befestigt werden. Die Polkörper können massiv oder lamelliert sein, jedoch ist bei der massiven Ausführung ein etwas niedrigerer Wirkungsgrad hinzunehmen. Die Rotorwicklung wird über Schleifringe angespeist, die ebenfalls am Aussenring der Straflo-Turbine befestigt sind.

Der Stator

Der Stator ist an drei Stellen auf das Fundament abgestützt. Bei der Auslegung und Dimensionierung des Systems sind mögliche auftretende Kurzschlusskräfte,

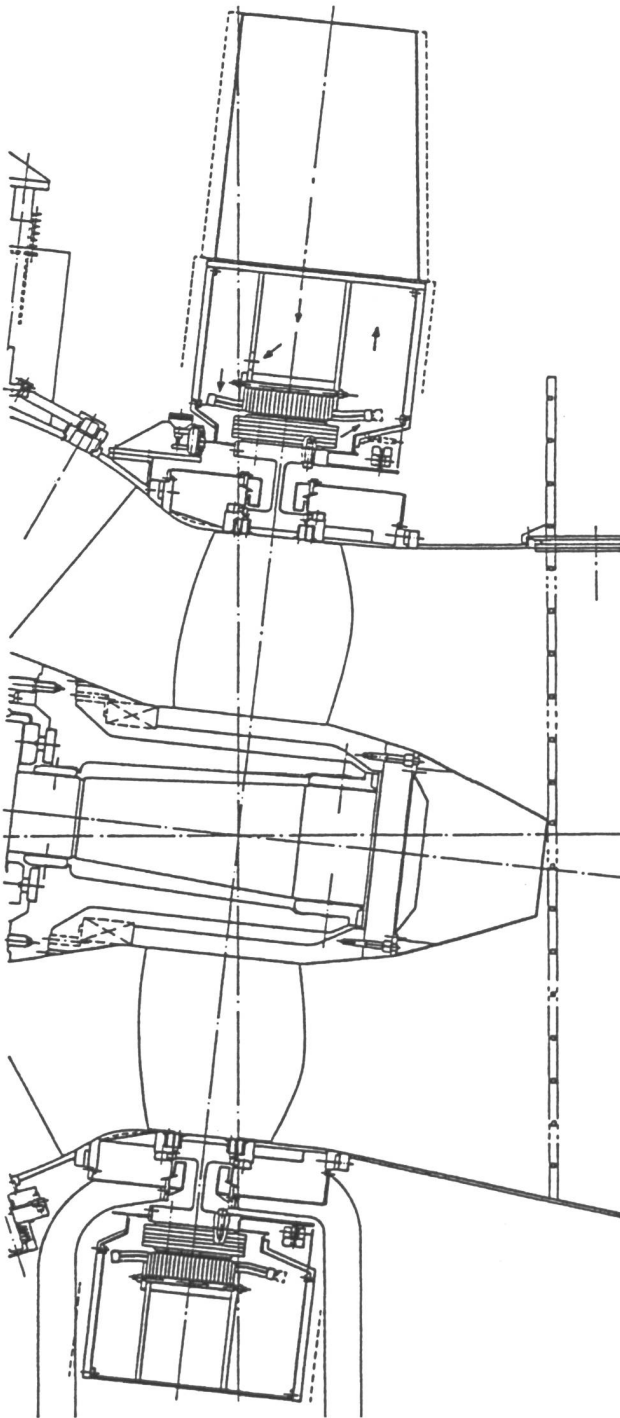


Bild 7. Schnittbild eines Straflo-Turbinen-Generators in Einlager-Ausführung.

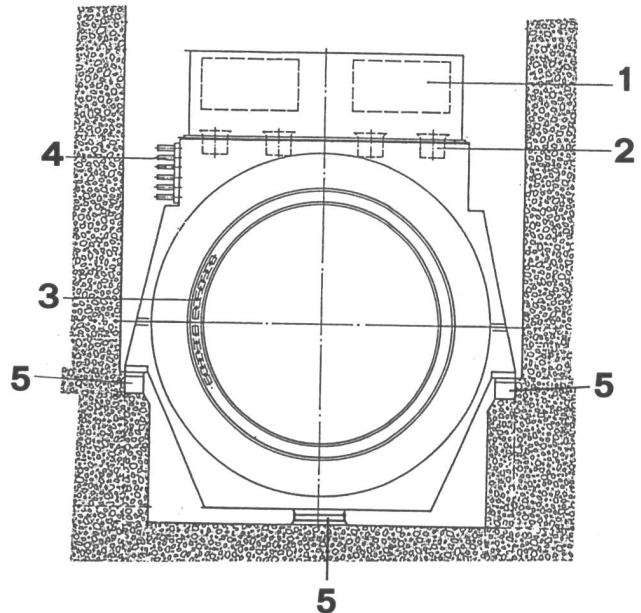


Bild 8. Dispositionszeichnung eines Straflo-Generators mit Drei-Punkt-Aufstellung.

1 Wasser-/Luftkühler, 2 Axialventilatoren, 3 Bürstenbrücke, 4 Statorklemmen, 5 Aufstellungspunkt.

Wärmedehnungen (Maschine kalt und warm) und Beibehaltung eines gleichmässigen Luftspaltes zwischen Rotor und Stator zu berücksichtigen. Das Statorgehäuse, als Träger des aus Elektroblech geschichteten Blechkörpers, muss sehr steif gebaut werden. Abnormale Betriebsvorkommnisse, zum Beispiel Störungen in der Wasserführung, können den Rotor zum Schwingen anregen. Ein sehr steif ausgebildeter Stator verhindert, dass diese oder andere unplanmässige Ereignisse die Maschine gefährden können.

Von grosser Bedeutung ist die Führung der Kühlluft. Stator und Rotor müssen symmetrisch gekühlt werden, damit keine unregelmässigen Verformungen am rotierenden und statischen Teil entstehen. Die Statorwicklung kann sowohl als Spulen- wie auch als Roebelstabwicklung hergestellt werden. Bei sehr kurzen Statorlängen fällt eine Spulenwicklung kostengünstiger aus. Da bei diesem Maschinentyp mit einer Überflutungsgefahr gerechnet werden muss, wird der Generator mit einem entsprechenden Korrosionsschutz versehen. Nach einer derartigen Störung können Stator- und Rotorwicklung, nachdem sie kurz getrocknet wurden, wieder betrieben werden. Damit Turbine und Generatorrotor leicht inspiziert werden können, wird der Stator mit einer axialen Verschiebevorrichtung versehen.

Die Schleifringe

Die Rotorwicklung wird in der Regel mit einer statischen Erregung über Schleifringe gespeist. Da die Schleifringe ebenfalls am Aussenkranz der Straflo-Turbine befestigt werden müssen, haben sie einen sehr grossen Durchmesser und damit gleichfalls hohe Umfangsgeschwindigkeiten. Sie müssen aus diesem Grund bei allen Betriebsbedingungen einen sehr genauen Rundlauf aufweisen, um übermässige Bürstenabnutzungen zu vermeiden. Der Aussenkranz der Straflo-Turbine wird auf seiner Innenseite direkt vom Wasser beströmt, was eine sehr gute Kühlung erbringt. Die am Aussenkranz befestigten Schleifringe werden trotzdem von der Bürstenreibung und dem Stromdurchgang stark erwärmt. Mit einer speziellen Befestigung

stigung der Schleifringe wird sichergestellt, dass sie sich frei dehnen können und dass die Dehnung absolut symmetrisch erfolgt.

Erste Betriebserfahrungen

Die Laufzeit des ersten von insgesamt zehn Generatoren im Kraftwerk Laufenburg beträgt zweieinhalb Jahre. In dieser Zeit ist die als Prototyp zu bezeichnende Maschine einwandfrei gelaufen. Nacheinander wurden die anderen Maschinensätze montiert und dem Betrieb übergeben. Die letzte Gruppe Nr. 10 hat im November 1992 ihren kommerziellen Betrieb aufgenommen.

Literatur

- [1] Patent specification: London, Inventors: Michael Braivitch and Bruce Donald Artur, Jan. 1968. Improvements in or relating to Water Turbines Pumps and Reversible Pump Turbines.
- [2] W. Meier, H. Miller: Die Entwicklung zur Straflo-Turbine. «Bull. SEV/VSE» 69 (1978) 9, S. 943–947. Nr.: 1,099,346.
- [3] CH Patentschrift 596446 von 3/1978: Hydroelektrischer Maschineneinsatz mit kranzförmiger elektrischer Maschine von H. Müller, Escher Wyss/Zürich.
- [4] R. Ruoss, J. Gyenge, F. Fischer: Ausbau des Rheinkraftwerkes Laufenburg mit Straflo-Turbinen, «Technische Rundschau, Sulzer» 3/1988.
- [5] A. Fust, R. Ruoss, H. Vögtli, J. Vontobel: Ausbau und Erneuerung des Rheinkraftwerkes Laufenburg, «wasser, energie, luft» 83 (1991) 1/2, S. 1–14.

- [6] J. Vontobel, A. Fust: Halbzeit beim Ausbau des Rheinkraftwerkes überschritten. «Bulletin SEV/VSE» 82 (1991) 6, S. 15–20.
- [7] R. Strauss, P. Ender, P. Krebs: Ausbau des Kraftwerkes Augst «Bulletin SEV/VSE» 82 (1991) 6, S. 21–27.
- [8] J. Baer: Belüftung und Kühlung von Wasserkraftgeneratoren. «wasser, energie, luft» 81 (1989) 7/8, S. 154–159.
- [9] M. Geller, J. Baer: Operating Behavior of Fans for the Cooling of Synchronous Machines. International Conference on the Evolution and Modern Aspects of Synchronous Machines, 1991 Zürich, Switzerland.
- [10] Wiedemann/Kellenberger: Konstruktion elektrischer Maschinen. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg/New York 1967.
- [11] 10 Autoren aus 6 Unternehmen: Das Kraftwerk Augst. Ausbau 1991–1994. Herausgeber KW-Augst AG.
- [12] J. Baer, I. Novosel: Belüftungstechnische Auslegung rotierender elektrischer Maschinen mittels Digitalrechner. «Bull. SEV/VSE» 66 (1975) 6, S. 313–317.
- [13] Hakan Bard: Parallelbetrieb von Ventilatoren, Flaeht Review «Ventilatoren und Ventilator-Einheiten» 1979.
- [14] M. Regli: Spezialmessungen mit Wirkungsgradbestimmung, ABB-Prüfprotokoll (interner Bericht).

Adressen der Verfasser: Jürgen Baer, ABB Power Generation Ltd, Dept. KWDE1, CH-5401 Baden, Werk Birr, und Franz Stöckli, ABB Kraftwerke AG, Abt. KWHT, CH-5401 Baden, Werk Birr.

Die Bau- und Konsolidationssetzungen von Staudämmen

Max Herzog

Zusammenfassung

Anhand der bei 22 grossen Staudämmen in elf Ländern gemessenen Setzungen wird ein Näherungsverfahren zur rechnerischen Erfassung der Bau- und Konsolidationssetzungen von geschütteten Dämmen vorgeführt.

Summary: Construction and consolidation settlements of embankment dams

On hand of settlements measured at 22 embankment dams in 11 countries an approximate method for the prediction of construction and consolidation settlements of fill dams is presented.

1. Einleitung

Seit den ersten vollständigen Setzungsmessungen – sowohl für die ganze Dauer der Schütt- und Konsolidationsphase als auch für die ganze Höhe und nicht nur die Oberfläche – an Stein- oder Erdschüttdämmen ist bekannt, dass die Schütt- und die Konsolidationsphase deutlich auseinandergehalten werden müssen, wenn die rechnerische Erfassung wirklichkeitsnah ausfallen soll.

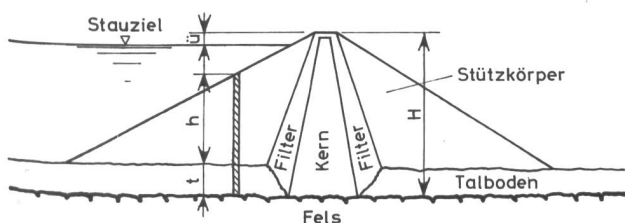


Bild 1. Dammquerschnitt mit Bezeichnungen.

2. Verwendete Bezeichnungen

b_K	Kernbreite im unteren Drittel
E_1, E_2	Verformungsmoduln der Bau- resp. Konsolidationssetzung
H	grösste Dammhöhe
h	beliebige Dammhöhe
n	Porenanteil
p_g	Bodendruck der vertikalen Dammsäule (Überlagerungsdruck)
p_v	tatsächlicher Bodendruck bei vorhandener Silowirkung
t	Dicke der Talfüllung mit Lockermaterial
u_1	Bausetzung während der Schüttphase
u_2	Konsolidationssetzung nach Abschluss der Schütтарbeiten
z	vertikale Koordinate
γ	Raumwichte
δ	Wandreibungswinkel
λ_0	Seitendruckziffer der Ruhe
ϕ'	wirksamer Reibungswinkel des Schüttmaterials

3. Theoretische Grundlagen

Für den Dammquerschnitt des Bildes 1 unterscheidet man die Bausetzungen

$$u_1 = (\gamma/E_1)(h+t-z)z = (\gamma/E_1)[(h+t)z - z^2]$$

die sich bereits in der Schüttphase einstellen und deren Verlauf über die Höhe der betrachteten Dammsäule parabolisch ist (Bild 2), sowie die Konsolidationssetzungen

$$u_2 = \int_0^z (\gamma/E_2)(h+t-z) dz = (\gamma/E_2)[(h+t)z - z^2/2]$$

die erst nach Abschluss der Schütтарbeiten eintreten. Ihr Verlauf über die Dammhöhe entspricht einer halben Parabel (Bild 2). In beiden Fällen wird vorausgesetzt, dass die