Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria

Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband

Band: 81 (1989)

Heft: 7-8

Artikel: Belüftung und Kühlung von Wasserkraftgeneratoren : Möglichkeiten bei der Modernisierung

Autor: baer, Jürgen

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-940489

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: 25.12.2025

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

Belüftung und Kühlung von Wasserkraftgeneratoren

Möglichkeiten bei der Modernisierung

Jürgen Baer

Im Hydrogeneratorenbau stehen die elektrische Auslegung, die mechanische Konstruktion, die Beherrschung der Fliehkraftspannungen sowie Werkstofffragen einschliesslich elektrischer Isolation im Vordergrund. Kühltechnische Gesichtspunkte, die in den Anfängen des Generatorbaus bis hin zur Mitte dieses Jahrhunderts eher beiläufig berücksichtigt wurden, gewinnen aber zunehmend an Bedeutung.
Früher behandelte man die Ventilation vorwiegend aus dem Blickwinkel der Verlustabfuhr, indem ausreichende Kühloberflächen und grosse Strömungsquerschnitte vorgesorgt wurden, so dass die anfallende Verlustwärme durch die an den Generatorstirnseiten angeordneten Axial- bzw. Radialflügel hinreichend abgeführt werden konnte, ohne dass die Maschinen thermisch zu hoch belastet wurden. Die Folge waren oft aber ungewöhnlich und unnötig grosse Kühlströme (örtlich wie gesamthaft), schlechte Lüfterwirkungsgrade und hohe Ventilationsverluste, die ihrerseits den Maschinenwirkungsgrad schmälerten.
Die ventilations- und kühltechnischen Entwicklungen im letzten Vierteljahrhundert wurden in fortschrittliche Maschinenkonzepte umgesetzt. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse eröffnen auch für die Modernisierung älterer Anlagen neue Möglichkeiten. Diese werden in ihren Hauptzügen mitgeteilt und an ausgesuchten Beispielen von erfolgreich umgerüsteten Wasserkraftgeneratoren dargelegt.

Einführung

Bei der Weiterentwicklung der Generatoren, die mit einer höheren Ausnutzung und höheren raumspezifischen Verlusten verbunden war, ging es unter anderem darum, die Ventilationssysteme sowohl in der Kühlfähigkeit wie auch im Leistungsbedarf zu verbessern und zu optimieren.
Die letzten Jahrzehnte brachten in den technischen Fachgebieten der Strömungslehre, der Wärmeübertragung, der Wärmeleitung sowie des Ventilatoren- und Verdichterbaus weitere Fortschritte.
Dem Elektromaschinenbau konnten die neuen Erkenntnisse nur durch zusätzliche Anstrengungen zugänglich gemacht werden. Bei ABB wurde allein für diesen Zweck ein Laboratorium gebaut (Bild 1) [1], in dem das für die Kühlung elektrischer Maschinen erforderliche Spezialwissen erarbeitet wurde. Zur effizienten Weiterverwendung werden auch modernste Rechenverfahren und EDV-Mittel eingesetzt [2].
Bei älteren Wasserkraftgeneratoren mit beispielsweise 20 bis 40 Betriebsjahren kommt es heute vermehrt zu umfangreichen Nachrüstungen sowie Erneuerungen von Wicklungen und Blechkörpern, womit u.a. Wirkungsgrad- und Leistungssteigerungen erreicht werden [3, 4]. Die mögliche Einsparung an Ventilationsverlusten bei gleichzeitig verbesserter Kühlung wird jedoch nur in wenigen Fällen ausreichend genutzt. Immerhin kann bei der Erneuerung älterer Anlagen ein bedeutender Beitrag zur Wirkungsgradsteigerung durch eine neue ventilations- und kühltechnische Auslegung erbracht werden.
Anhand von Beispielen wird gezeigt, wie bei ABB aufgrund der langjährigen Produkt- und Grundlagenentwicklung be-

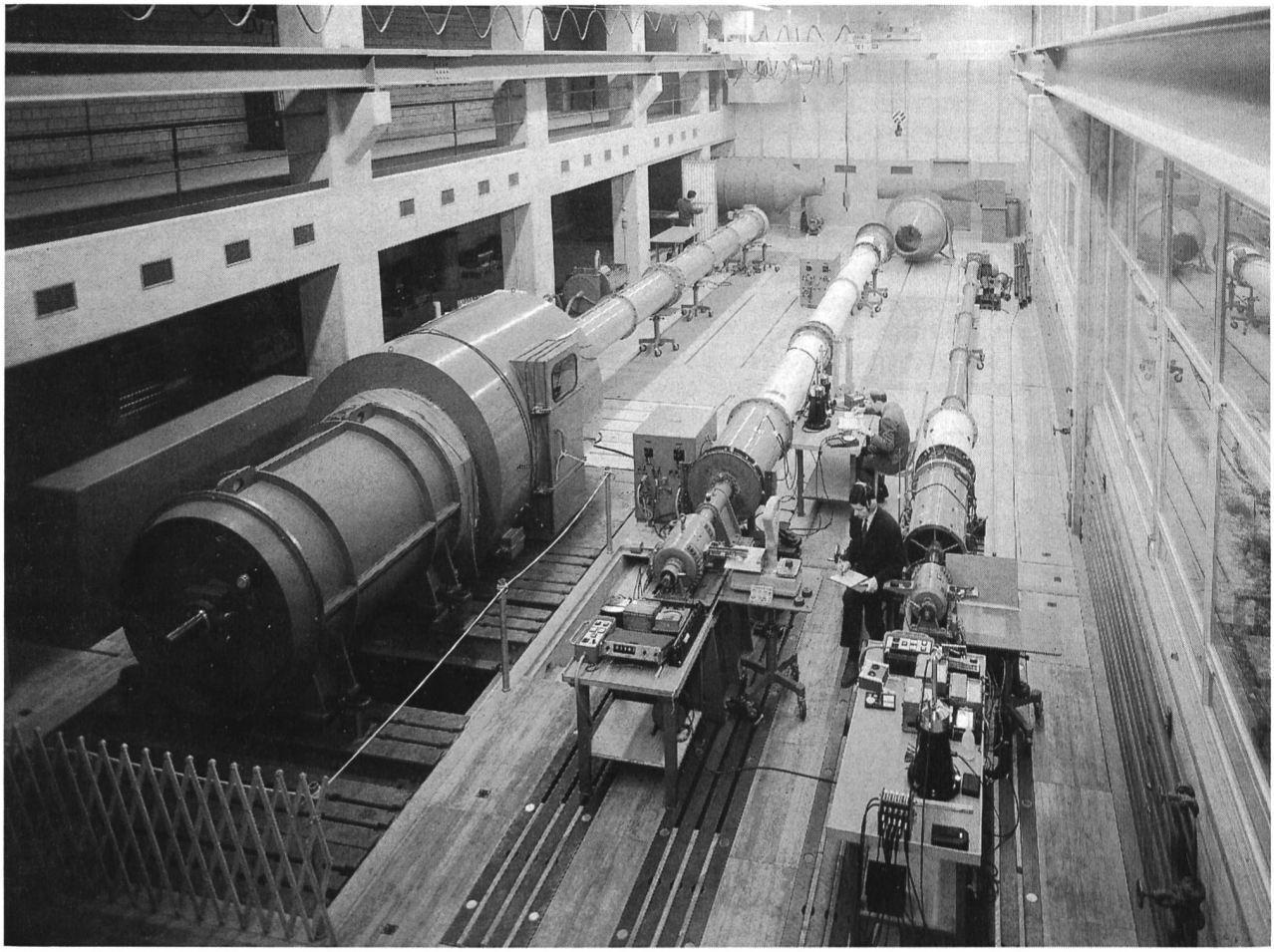

Bild 1. Laboratorium für strömungs- und wärmetechnische Untersuchungen der Asea Brown Boveri in der Schweiz.

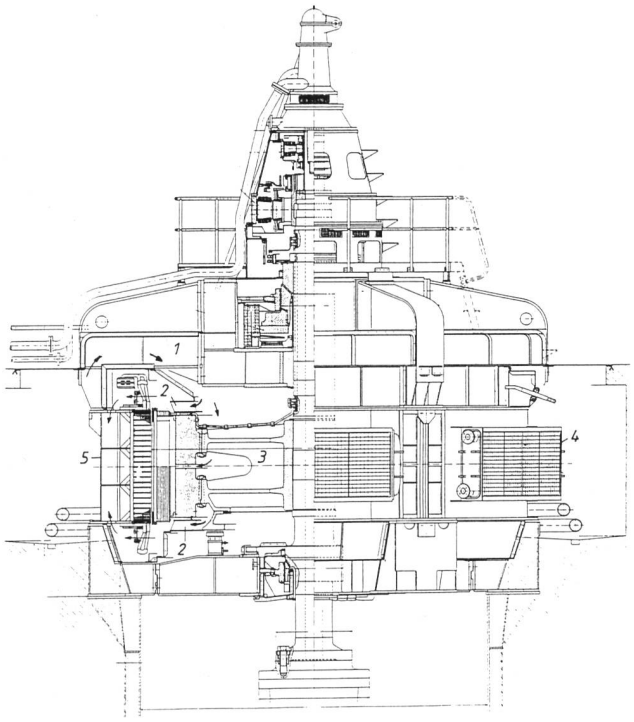

Bild 2. Dreiphasen-Generator, 21400 kVA; 10500 V; cosφ = 0,7; 50 Hz; 214/666 min^{-1}; Baujahr 1954.

1 Kühlluftzufuhr (oben), 2 Radialventilator, 3 Polradstern, 4 Kühler, 5 Statorgehäuse.

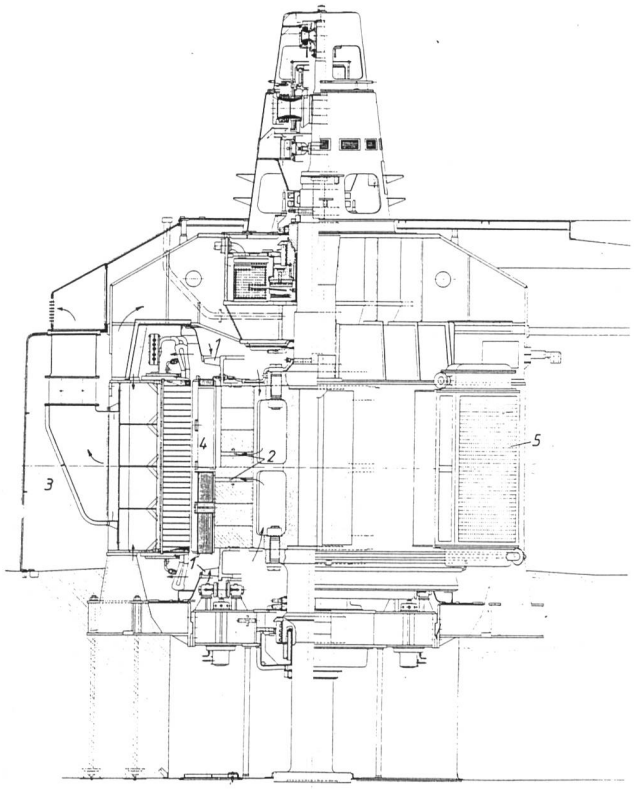

Bild 3. Dreiphasen-Generator, 64000 kVA; 10500 V; cosφ = 0,9; 50 Hz; 500/870 min^{-1}; Baujahr 1960.

1 Axialventilator, 2 Rotorförderkanal, 3 Kaltluftraum, 4 Rotorpollücke, 5 Kühler.

sondere Konstruktionslösungen und technisch-wissenschaftliche Werkzeuge geschaffen wurden, die es gestatten, seitens der Kühlung einen wesentlichen Beitrag für eine verbesserte Energieumwandlung bei Nachrüstungen von Wasserkraftgeneratoren zu leisten.

Konstruktionen der früheren Zeit

Die Analyse des Kühlsystems älterer Hydrogeneratoren zeigt, dass die ventilationstechnische Ausbildung der Primärkühlkreise sehr oft kompliziert, schwer berechenbar, verlustaufwendig, in der Kühlluftführung ungenügend oder gar falsch und – gemessen am benötigten Gesamtkühlstrom – überreichlich war.

Bild 2 zeigt einen Generator vertikaler Bauart, bei dem die Kühlluft ausschliesslich von oben zugeführt wird. Die Beschaufelung des oberen und unteren Radialventilators ist mit gleichen Eintrittswinkeln versehen worden, obwohl der untere Ventilator seinen Förderstrom aus dem drallerzeugenden Polradstern ansaugt. Dies führt bei ihm zu erhöhten Verlusten bei erhöhter Lärmentwicklung mit schwingungsanregenden Strömungsablösungen.

Die Kühlluft, die in den Rotorstern eintritt, wird zunächst auf Umfangsgeschwindigkeit beschleunigt und anschliessend im unteren Radialventilator, welcher der drallbehafteten Zuströmung nicht angepasst ist, nochmals beschleunigt. Hinter dem Ventilatoraustritt strömt der grösste Teil dieser Fördermenge für die Kühlung des Stators zuerst durch die Pollücken, wo sie abermals auf Rotorumfangsgeschwindigkeit beschleunigt wird. Dieser mehrmalige Ein- und Austritt der Kühlluft beim rotierenden System führt zu wiederholten Beschleunigungen und Abbremsungen der Kühlluft, wodurch die Ventilationsverluste stark ansteigen.

Bei dem in Bild 3 dargestellten Generator wird die Kühlluft durch zwei Axialventilatoren und parallel dazu durch zwei Rotorförderkanäle umgewälzt. Bei diesem System saugen die Ventilatoren und die Rotorförderkanäle aus demselben Kaltluftraum an und blasen gemeinsam in die Pollücken aus. Werden diese parallel arbeitenden Ventilatoren nicht aufeinander abgestimmt, was nur durch eine genaue Vorausberechnung des Kühlsystems gesichert werden kann, so führt dies zu einer verschlechterten Kühlwirkung bei gleichzeitig steigenden Ventilationsverlusten [5].

Als weitere Konstruktions- und Auslegungsmerkmale älterer Generatoren sind zu nennen:

- Polkupfer als unverrippte Doppelspule gemäss Bild 4. Diese Konstruktion ist fertigungstechnisch teuer und ergibt keine bessere Kühlung als eine berippte Einfachspule. Darüber hinaus verursacht diese Doppelspule infolge grösserer Strömungsquerschnitte höhere Ventilationsverluste.
- Bei älteren Konstruktionen sind die Abströmquerschnitte hinter den Statorwickelköpfen zum Generatorgehäuserücken sehr grosszügig bemessen. Ähnlich verhält es sich mit den Statorpressfingerkanälen (Ausführung ohne Drossel). Deshalb strömt verhältnismässig viel Kühlluft über diese Wege des Kühlsystems, ohne dass sie dort benötigt wird.
- Bei den *Axial*ventilatoren sind folgende Umstände anzutreffen, die infolge zusätzlicher Verluste eine Wirkungsschädigung oder sogar die Nichtberechenbarkeit des Ventilators zur Folge haben können:
  - Das einer Berechnung zugängliche Teilungsverhältnis t/l der Axialflügel – $0{,}5 < t/l < 1{,}5$ – wurde bei vielen Generator-Axialventilatoren unterschritten (Wahl falscher Schaufelzahlen).
  - Die äussere Ventilatorluftführung überdeckt nicht die ganze axiale Erstreckung der Flügelspitzen, so dass

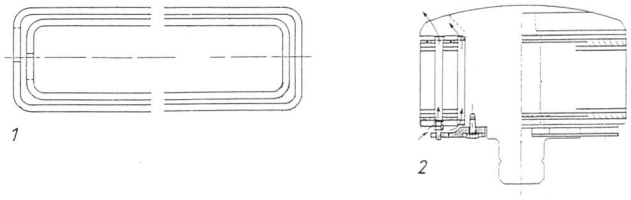

Bild 4. Polkupfer eines Hydrogenerators als unverrippte Doppelspule sowie Pol-Komplettschnitt mit Kühlluftführung.

1 Doppelspule, 2 Kühlstromführung in Doppelspule.

die Strömung im Schaufelkanal nicht in jedem Fall axial verläuft (Bild 5). Eine derartige Konstruktion ist einer sicheren Berechnung kaum zugänglich.

- Zu grosse Schaufelhöhen, bezogen auf den Sollkühlstrom, führen zu kleinen Staffelungswinkeln der Schaufeln und damit zu einem schlechten Ventilatorwirkungsgrad.
- Bei falsch verwundenen Axialflügeln kommt es zum Abreissen der Strömung in den Schaufelkanälen, was zu verminderter Druckerzeugung, schlechterem Wirkungsgrad sowie schwingungsanregenden Druckschwankungen der Gassäule führt (Bild 6).
- Zuströmung über scharfkantige Flügelträgerkontur.
- Herausragende Flügelbefestigungsschrauben führen zum vorzeitigen Strömungsabriss.
- Weite Spalte zwischen Flügelspitze und äusserer Luftführung (Laufradspalt) sowie zwischen Flügelfuss und Flügelträger (Nabenspalt) haben erhebliche Leckagen zur Folge (Minderleistung).

– Bei den alten *Radial*ventilatorausführungen gibt es ebenfalls Differenzen zu modernen Konstruktionen:
  - Es wurden häufig Radialräder mit geraden, radialstehenden Schaufeln ($\beta_1 = \beta_2 = 90°$) eingesetzt, obwohl der Generator nur *eine* Drehrichtung aufweist und somit die geneigte, der Strömung angepasste Beschaufelung möglich gewesen wäre.
  - Es gibt viele Ausführungen ohne Deckscheibe, die durch grosse Spalte zwischen den Schaufeln und der Luftführung gekennzeichnet sind.
  - Ausführung sehr grosser Dichtspalte.
  - Ein Vordrall wurde – rechnet man ältere Anlagen nach – nicht berücksichtigt.
  - Die Einlaufgestaltung ist nur in seltenen Fällen befriedigend.

  Alle diese Abweichungen führen zu schlechten Wirkungsgraden und somit zu höheren Verlusten.

– Die Polradoberflächen haben viele vorstehende Konstruktionselemente, und oftmals sind die Polradsterne unabgedeckt, so dass die Oberflächenreibungsverluste verhältnismässig hoch ausfallen.

Zahlreiche andere Beispiele könnten noch angeführt werden. Es wurden jedoch nur jene Details aufgeführt, die den grössten Einfluss auf die von der Ventilation verursachten Leerverluste ausüben.

Es gibt aber auch unter den alten Generatoren hin und wieder günstig gestaltete Kühlsysteme, bei denen sich ein Konstrukteur etwas näher mit Strömungsphänomenen und Wärmeübergangsproblemen sowie mit der Ventilatorgestaltung auseinandergesetzt hat.

Das Einführen und Umsetzen der speziellen Entwicklung auf dem Gebiet der Strömungslehre und der Ventilatorauslegung [9 bis 11] über die technischen Bildungsstätten bis hin in die Konstruktions- und Berechnungsabteilungen von Grossunternehmen beanspruchte zum Teil Jahrzehnte und hing nicht zuletzt von der Struktur und den Einrichtungen eines Industrieunternehmens ab.

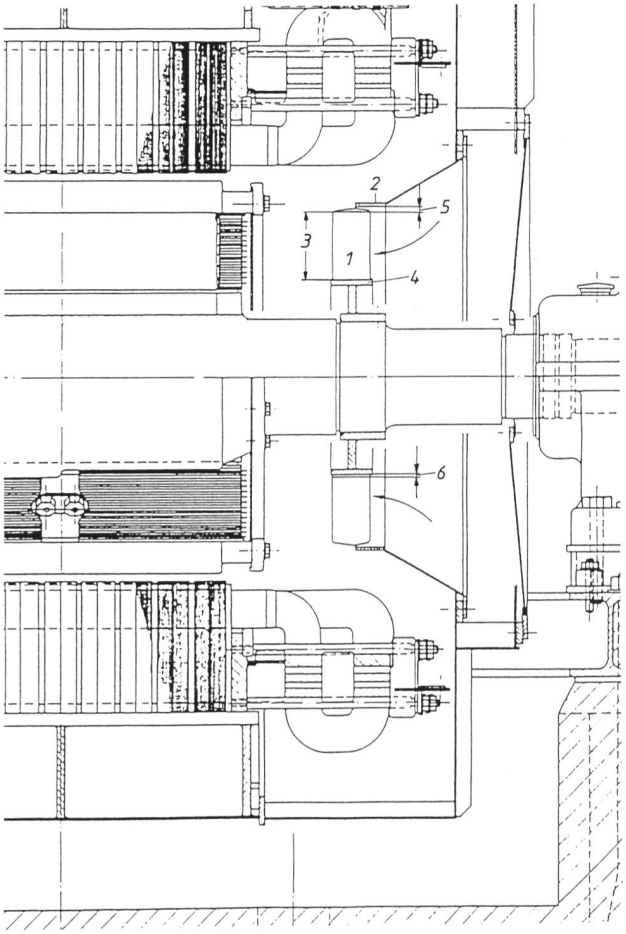

Bild 5. Generatorausschnitt mit Axialventilator und falsch ausgebildeter äusserer Verschalung.

1 Axialventilator, 2 äussere Ventilator-Luftführung, 3 Schaufelhöhe, 4 Flügelträger-Zuströmkontur, 5 Laufradspalt, 6 Nabenspalt.

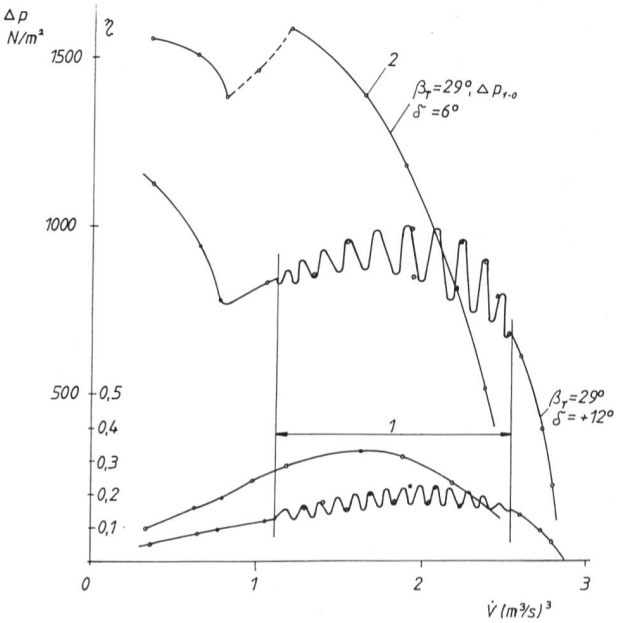

Bild 6. Messergebnisse an einem Axialventilator mit richtiger oder um 12° falscher Schaufelverwindung. Letzteres ist einem Weglassen der Schaufelverwindung gleichzusetzen.

β_T = Staffelungswinkel an der Nabe, δ = Schaufelverwindung, 1 Abreissbereich, 2 Schaufel mit richtiger Verwindung.

Neuzeitliche Konstruktionen

Im modernen Elektromaschinenbau werden bei der Bemessung und konstruktiven Ausgestaltung alle Bauteile und Funktionskreise rechnerisch überprüft. Dies trifft auch auf die Wärmeströmung und Kühlkreisläufe zu, die spezifisch auf die Bedingungen in Klein- und Mittelmaschinen bzw. grossen Sondermaschinen und Kraftwerksgeneratoren zugeschnitten sind.

Bei der Ventilation sind der Gesamtkühlstrom und weitgehend auch die Teilströme den abzuführenden Verlusten angepasst, die in den Aktivteilen der Maschine entstehen. Doch gibt es eine Reihe strömungsspezifischer Details zu berücksichtigen, welche die Wärmeübertragung begünstigen bzw. ventilationsbedingte Verluste zu vermindern helfen. Zum letzteren gehören beispielsweise zu grosse Dichtspalte (Bypässe für den Kühlstrom) und wirbelverursachende Bauteile, die sich bereits in der Konstruktionsphase verhindern lassen.

Ein solches Vorgehen ist möglich, weil an Originalmaschinen sowie an Ausschnittmodellen über Jahre gezielte Messungen durchgeführt worden sind. Die Versuchsresultate werden in Strömungsnetzprogrammen verwertet, die auf dem neuesten Erkenntnisstand nachgeführt sind [6 bis 8]. Pflege und Ausbau solcher Rechenprogramme sind ein wichtiger Bestandteil unserer Arbeit.

Die Kühlkreise der Hydrogeneratoren, wie auch bei allen anderen Maschinenarten, werden während der Konstruktion so gestaltet, dass sie einer Berechnung zugänglich sind. Es besteht ein ständiger Kontakt zwischen den Kühlungsfachleuten und den Konstrukteuren.

Werkzeuge für die Kühlkreisgestaltung

Um den heutigen Anforderungen bezüglich Betriebstemperatur und Lebensdauer bei hohen Materialausnutzungen auch seitens der Maschinenkühlung vollumfänglich nachkommen zu können, oder um an Generatoren älterer Baujahre verlustsparende Nachbesserungen auszuführen, wurden – wie zuvor geschildert – umfangreiche theoretische und experimentelle Untersuchungen vorgenommen und Rechenprogramme erstellt. Damit verfügen wir über fortgeschrittene Unterlagen und Rechenmittel, kurz «Werkzeuge» genannt, welche die Auslegungs- und Konstruktionsarbeiten mit Erfolg begleiten. Nachstehend einige Beispiele.

Die ABB-Philosophie der Generatorkühlung

Die Kühlung eines Hydrogenerators kann nur gesichert werden, wenn unter Berücksichtigung der Kühlflächengestaltung, der Isolationsdicken, der Materialfragen sowie anderer Bedingungen der erforderliche Kühlstrom am richtigen Ort zur Verfügung steht.

Dies erreicht man durch die Anwendung eines Strömungsnetzprogrammes [2], mit dessen Hilfe der Arbeitspunkt für die Ventilatoren im Kühlkreis ermittelt wird. Je feiner der Kühlkreis mit seinen Einrichtungen und Verzweigungen durch das Netz nachgebildet werden kann, desto genauer wird der Druckabfall für den Sollkühlstrom berechnet. Eine gewisse Toleranz von maximal ±10% ist jeder Berechnung einzuräumen.

Die Auslegung eines Maschinenventilators, ob axial [2] oder radial [13], ist seitens der Fertigung und Einbaubedingungen problematisch [12]. Sind nicht alle Fehlereinflüsse bekannt, so kann es zu unzulässigen Kühlstromeinbussen kommen. Bild 7 zeigt als Beispiel, mit welchen Abweichungen zwischen Berechnung und Ausführung gerechnet werden muss, wenn das Axialgebläse bei verschiedenen Einbaubedingungen betrieben wird. Nur bei strikter Einhaltung von Konstruktionsvorschriften sowie Fertigungstoleranzen, die bei ABB über umfangreiche Versuche erarbeitet wurden, können Unsicherheiten ausgeschaltet werden.

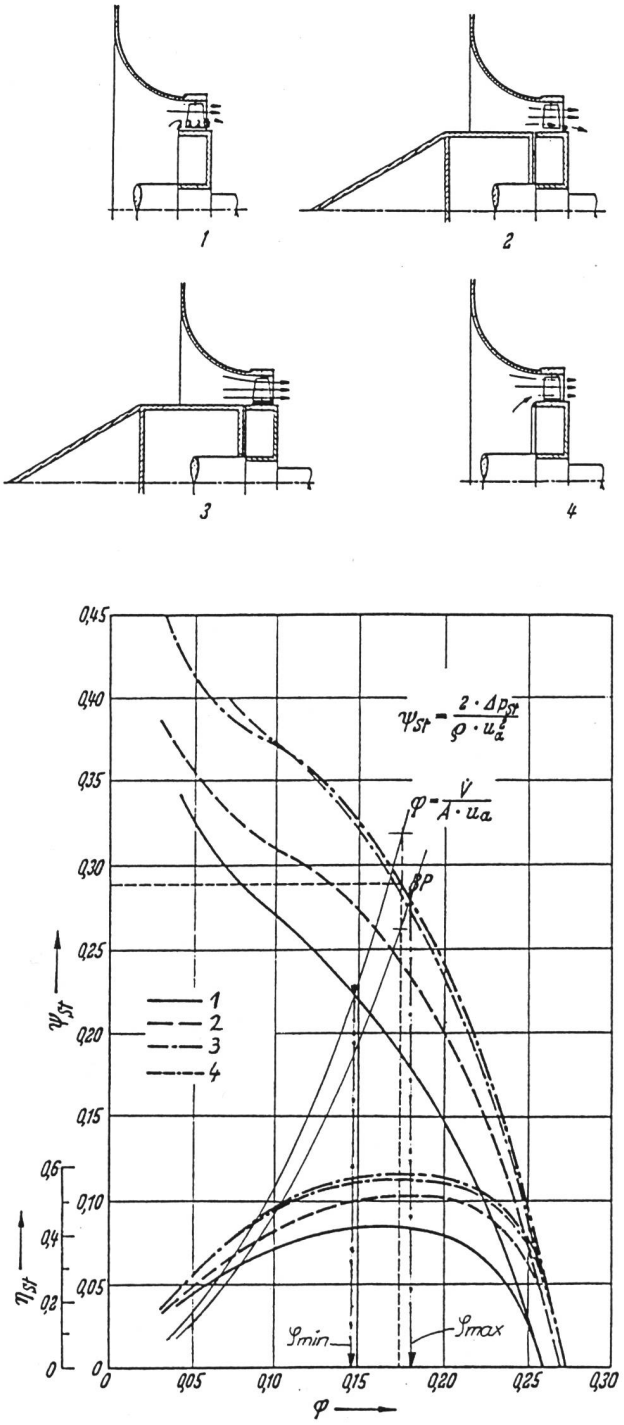

Bild 7. Ventilator- und Widerstandskennlinien eines Hydrogenerator-Kühlsystems. Berechnungs-, Konstruktions- und Fertigungstoleranzen können bis zu 20% Unterschied im Kühlstrom führen.

1, 2, 3, 4 Versuchsreihe, ψ_{St} = Druckziffer, φ = Lieferzahl, η_{St} = Wirkungsgrad, BP = Betriebspunkt.

Die Rechenprogramme sind grundsätzlich so aufgebaut, dass Besonderheiten des jeweiligen Maschinentyps Berücksichtigung finden. Selbstverständlich sind herstellerspezifische Daten berücksichtigt, die in der allgemeinen Literatur fehlen.

Darüber hinaus sind wir im Besitz weiterer Rechenprogramme und Unterlagen über die Voraussage von:

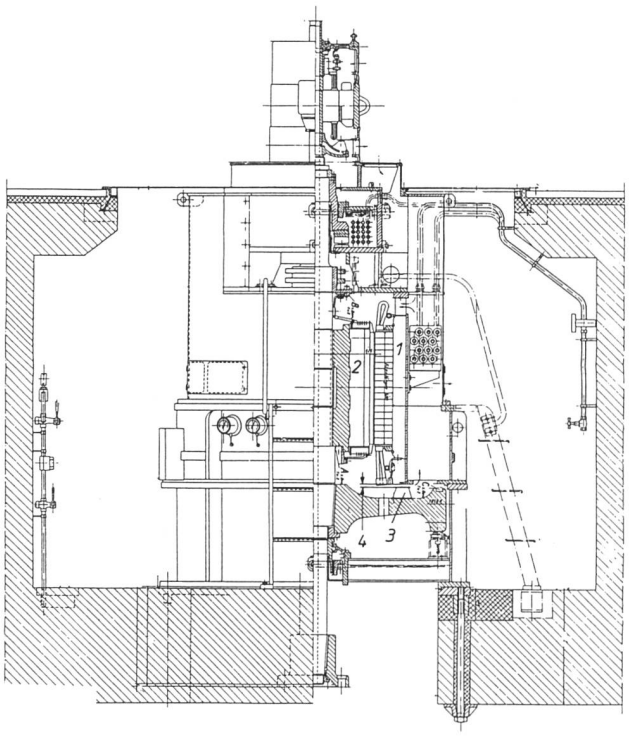

Bild 8. Dreiphasen-Eigenbedarfsgenerator, 850 kVA; 400 V; $\cos\varphi = 0{,}7$; $n = 750\ \text{min}^{-1}$, Aufstellungshöhe $H = 1315$ m ü. NN.

1 Kühlweg des Stators, 2 Kühlweg durch Pollücken plus Luftspalt, 3 Radialventilator, 4 Dichtspalt.

- Oberflächenreibungsverlusten des Polrades,
- Verlusten der Ventilatoren und der Rotorsterne,
- Beschleunigungsverlusten beim Kühlluftdurchtritt durch den Generator.

Durch den Einsatz dieser Werkzeuge sind wir in der Lage, an älteren Maschinensätzen von Wasserkraftgeneratoren leerlaufverlustsparende Massnahmen in demselben Ausmass vorzunehmen, wie es heute für Neuanlagen selbstverständlich ist.

Da das Gebiet sehr komplex ist, empfehlen wir den Betreibern, bei Erneuerungsabsichten den Kontakt zu uns und unseren Spezialisten zu suchen, damit eine gute und dem Objekt angepasste Lösung ausgearbeitet werden kann.

Beispiele aus der Modernisierungspraxis

Die folgenden Beispiele sollen zeigen, in welcher Grössenordnung die möglichen Einsparungen bei den Ventilationsverlusten älterer Wasserkraftgeneratoren liegen, wenn sie einer Erneuerung unterzogen werden sollen.

- Ein Hydrogenerator mit einer Leistung von 30 MVA, $\cos\varphi = 0{,}84$, $n = 500\ \text{min}^{-1}$ und 6000 V, Baujahr 1929, hatte Ventilationsverluste von rund 310 kW, das heisst von über 1 % der abgegebenen Wirkleistung. Nach einer umfangreichen Umrüstung des Generators mit neuer Kühlluftführung und neuen Ventilatoren betragen die Verluste nur noch 164 kW, woraus eine Einsparung von 146 kW und eine Verbesserung des Wirkungsgrades um mehr als ½ Prozentpunkt resultieren.
- In Bild 8 ist ein Eigenbedarfsgenerator dargestellt, der über Jahre zu hohe Polkupfererwärmungen aufwies, so dass in gewissen Zeitabständen die Isolierung erneuert werden musste. Im Jahre 1985 wurde für den Kunden eine komplette Kühlkreisnachrechnung mit unseren zuvor beschriebenen Rechenmitteln durchgeführt und anschliessend ein Umbau des Generators mit folgendem Befund empfohlen:
  1. Ungünstige Kühlluftführung
  2. Ungeeignete Radialventilatorauslegung
  3. Zu grosse Dichtspalte zwischen Radialventilator und Gehäuse

  Tabelle 1 zeigt den damaligen Istzustand sowie den zu erwartenden Sollzustand, der sich aufgrund der Berechnung und der zugehörigen Umbauvorschläge ergeben würde.

  Der Umbauvorschlag wurde akzeptiert! Eine Überprüfung des Generators nach zweijährigem Betrieb im erneuerten Zustand brachte die Bestätigung, dass der Generator als saniert betrachtet werden darf.
- Bei einer anderen Anlage in vertikaler Ausführung mit den Nenndaten 28000 kVA, $\cos\varphi = 0{,}8$, 11000 V, $n = 500\ \text{min}^{-1}$ könnten allein mit neuen Ventilatoren die Leerverluste um rund 55 kW reduziert werden. Darin sind noch nicht die Einsparungsmöglichkeiten bei den Oberflächenreibungs- und Beschleunigungsverlusten enthalten. Dafür wären zusätzliche Berechnungen erforderlich.
- Bei einer weiteren Anlage (4400 kVA, $\cos\varphi = 0{,}7$) in Durchzugsbelüftung mit nur einem Radialventilator, aber mit grosser Lärmentwicklung zeigte sich, dass bei Austausch des Radialrades das Geräusch auf ein übliches Niveau reduziert werden kann. Als Nebenerfolg würde sich die Ventilatorantriebsleistung um mindestens 15 kW verringern.

Tabelle 2. Bewertung der Leerverluste in einigen ausgewählten Ländern.

Land	Bewertung der Leerverluste Fr./kW
Deutschland	3000 bis 7000
Norwegen	3000 bis 5000
Österreich	6000 bis 10000
Schweden	rund 5000
Schweiz	3000 bis 10000

Tabelle 1. Zusammenstellung der Untersuchungsergebnisse des 850-kVA-Eigenbedarfgenerators.

Berechnung Ventilatorbetriebspunkt Teilvolumenströme Kühlluftgeschwindigkeiten		*Istzustand* – Statorrücken offen – vorhandener Ventilator	*Umbauvorschlag* – Statorrücken geschlossen – neuer Ventilator mit Reduktion des Dichtspaltes
stat. Druckerzeugung	ΔP_{St} in N/m²	200	900
Gesamtvolumenstrom	$\dot{V}$ in m³/s	1,97	1,09
Statorrückenkühlstrom	$\dot{V}_{St}$ in m³/s	1,67	0,136
Pollückenkühlstrom	$\dot{V}_{Pol}$ in m³/s	0,12	0,642
Luftspaltkühlstrom	$\dot{V}_{LSP}$ in m³/s	0,11	0,128
Schwungradkühlstrom	$\dot{V}_{Sch}$ in m³/s	0,07	0,186
Kühlluftgeschwindigkeiten	in m/s		
Statorrücken	$W_{St\text{-}R}$	6,7	0,41
Pollücke	W_{Poll}	4,07	20,99
Luftspalt	W_{LSP}	9,24	11,5

– Als letztes Beispiel soll für einen Generator nach einer Konstruktion gemäss Bild 3 mit den Nenndaten 18760 kVA, 10500 V, $\cos\varphi = 0{,}8$, $n = 600\ \text{min}^{-1}$ die Einsparmöglichkeit an Leerverlusten beim Auswechseln der vorhandenen Axialventilatoren genannt sein. Allein zwei neue Axialräder würden die Verluste um 60 kW verringern. Eine Strömungsnetzrechnung mit neuen Drosselungen im Kühlkreis und veränderten Luftführungen würde mit Sicherheit noch grössere Verlusteinsparungen aufdecken.

Bei einer Bewertung der Leerverluste gemäss Tabelle 2 mit einem mittleren Wert von 5000 Franken/kW ergeben sich beachtliche Renditen bei den eingesparten Verlusten, selbst unter Einbezug der Umrüstungskosten.

Die obigen Beispiele betreffen Maschinen von vergleichsweise kleiner Leistung. Bei Grossgeneratoren liegt der wirtschaftliche Nutzen in noch attraktiveren Grössenordnungen.

Auswirkung auf Ventilationsgeräusche

Die Verbesserung des Ventilationssystems älterer Maschinen liefert in den meisten Fällen als willkommene Zugabe eine Verminderung des aerodynamischen Geräusches. Entsprechende Grundlagenentwicklungen und maschinentypische Untersuchungen in unserem Akustiklabor [14] geben die sichere Basis für gezielte Umrüstungen [15].

Schlussbemerkung

Die Beispiele haben gezeigt, dass je nach Ausbildung älterer Wasserkraftgeneratoren ein ansehnlicher Teil der ventilationsbedingten Leerverluste durch Umstellung auf den neuesten Stand der Technik eingespart und der Nutzleistung zugeführt werden kann.

Bei Teilerneuerungen («Refurbishment»), die gewöhnlich auf die Schlüsselbauteile wie Blechkörper, Wicklungen und Isolierungen ausgerichtet sind, sollten also auch die Möglichkeiten beachtet werden, die sich durch Nachbesserungen oder Umstellungen im Ventilations- und Kühlsystem bieten. Die hohe Bewertung insbesondere der Leerverluste, die zum wesentlichen Teil durch die Ventilation verursacht sind, gibt dazu einen besonderen Anreiz. Darüber hinaus sollten die Möglichkeiten der Abwärmenutzung zur Zentralenheizung wie auch der Lärmminderung beachtet werden. Die Werkzeuge dazu sind vorhanden. Das gilt nicht nur für ältere Hydrogeneratoren, sondern auch für die anderen Arten elektrischer Maschinen.

Literatur

[1] *M. Schwarz:* Ein neues Laboratorium für strömungs- und wärmetechnische Untersuchungen an Elektromaschinen. «Brown Boveri Mitt.» *55* (1968) 10/11, S. 631–639.

[2] *J. Baer, I. Novosel:* Belüftungstechnische Auslegung rotierender elektrischer Maschinen mittels Digitalrechner. «Bull. SEV/VSE» *66* (1975) 6, S. 313–317.

[3] *F. Mez, C. Stadelmann:* Möglichkeiten der Leistungssteigerung von Generatoren unter Beibehalt der Statorabmessungen. Tagungsband vom Schweizerischen Wasserwirtschaftsverband 1983.

[4] *R. Schuler:* Isolationssysteme für rotierende Hochspannungsmaschinen. BBC-Druckschrift Nr. CH-T0060 D.

[5] *H.-U. Banzhaf:* Anlagenspezifische Fragen bei Ventilatoren in Parallelschaltung. «BKW» Bd. *41* (1989) 1/2.

[6] *W. Bohl:* Technische Strömungslehre. Vogel-Buchverlag Würzburg 1986.

[7] VDI-Bericht 594: Ventilatoren im industriellen Einsatz (1986).

[8] *W. Pfister:* Fluidenergiemaschinen Bd. 1. und 2. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg 1986.

[9] *B. Eck:* Ventilatoren. Springer-Verlag Berlin, 1962.

[10] *C. Pfleiderer:* Kreiselpumpen für Flüssigkeiten und Gase. Springer-Verlag Berlin, 1961.

[11] *H. Richter:* Rohrhydraulik. Springer-Verlag Berlin/Göttingen/Heidelberg 1962.

[12] *J. Baer:* Axialventilatoren für eigenbelüftete rotierende elektrische Maschinen. «Konstruktion» *25* (1973), S. 25–28.

[13] *H. D. Sommer:* Ein Näherungsverfahren zur Berechnung von Ventilatoren mit geraden radial gestellten Schaufeln. «VDI-Z» *119* (1977) 19, S. 933–936.

[14] *B. Ploner:* Ein neues Akustiklabor für Zweckforschung. «Brown Boveri Mitt.» *53* (1966) 6/7, S. 428–431.

[15] *B. Ploner, F. Herz:* Minderung von Sirenentönen bei Radiallüftern rotierender Maschinen durch neue konstruktive Massnahmen. «Brown Boveri Mitt.» *56* (1969) 6, S. 280–287.

Adresse des Verfassers: *Jürgen Baer,* Masch.-Ing. (grad.), Studien Elektrische Maschinen (Kühlungs-Sonderfragen), Asea Brown Boveri AG, CH-5242 Birr.

Une version française de cet article est à obtenir chez le département KWHZ, Asea Brown Boveri SA, CH-5242 Birr.

An english version of this article is available at department KWHZ, Asea Brown Boveri Ltd, CH-5242 Birr.

Baubeschluss für das Kraftwerk Pradella-Martina

Der Verwaltungsrat der Engadiner Kraftwerke AG (EKW) hat in seiner Sitzung vom 15. März 1989 den Bau des Kraftwerks Pradella-Martina (Untere Innstufe) beschlossen, in welchem die Wasserkraft des Inn zwischen der bestehenden Zentrale Pradella der EKW unterhalb Scuol und der österreichischen Grenze genutzt werden soll.

Langwieriges Bewilligungsverfahren

Die Regierung des Kantons Graubünden erteilte im Dezember 1985 die für den Bau und Betrieb der Unteren Innstufe notwendigen Bewilligungen gemäss Fischereigesetz sowie Natur- und Heimatschutzgesetz. Im Februar 1986 erhoben vier Unterländer Umweltschutzorganisationen dagegen Verwaltungsgerichtsbeschwerde beim Bundesgericht. Ein erster Augenschein des Bundesgerichts fand im November 1986 in Anwesenheit der Parteien statt. Fast ein Jahr später, nämlich im September 1987, fällte das Bundesgericht ein Teilurteil, worin es den Bestand wohlerworbener Rechte der EKW aufgrund der seit 1957 bestehenden rechtsgültigen Konzessionen anerkannte. Im Mai 1988 nahm eine Abordnung des Bundesgerichtes zum zweiten Mal einen Augenschein vor, an dem wiederum die Parteien wie auch die Experten teilnahmen. Die EKW, der Kanton und die Gemeinden hatten gemeinsam einen Vorschlag ausgearbeitet, der nach Meinung der bundesgerichtlichen Delegation geeignet gewesen wäre, im Rahmen dieses Augenscheins eine Verständigung zwischen den Parteien herbeizuführen. Vorgeschlagen wurde eine Revitalisierung von Auen in Strada, die im Zusammenhang mit dem Bau der vom Kanton geplanten Umfahrungsstrasse und mit der gleichzeitigen Verlegung des dortigen Kieswerks durchführbar wäre. Die Beschwerdeführer waren aber nicht gewillt, einer Verständigung zuzustimmen. Es folgten weitere schriftliche Eingaben der Experten und der Parteien sowie ein letzter Versuch, unter den Parteien eine aussergerichtliche Einigung zu erzielen. Auch dieser blieb erfolglos, weil die Umweltschutzorganisationen offensichtlich nur bezweckten, das Verfahren noch weiter zu verzögern. Das Bundesgericht musste daher sowohl über die gestützt auf das Fischereigesetz und das Natur- und Heimatschutzgesetz eingereichte Beschwerde gegen die Bewilligung der Bündner Regierung