Ausbau des Rheinkraftwerks Laufenburg : fünf Jahre Betriebserfahrung mit Straflo-Turbinen

Autor(en): **Fust, Armin**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens, de l'Association des Entreprises électriques suisses**

Band (Jahr): **89 (1998)**

Heft 2

PDF erstellt am: **29.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-902042

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

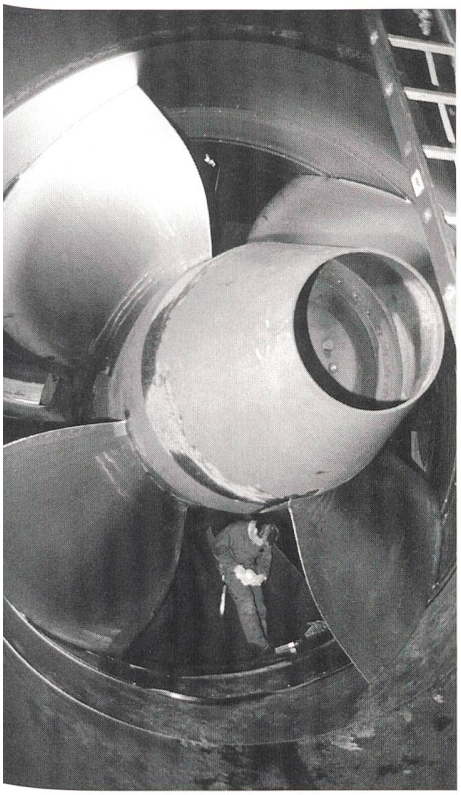
Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Die zehn Straflo-Turbinen von Laufenburg haben sich nach einigen anfänglichen Modifikationen im fünfjährigen Betrieb bestens bewährt. Der Unterhalt ist bescheiden und sehr gut durchführbar. Die Standzeiten der wichtigsten Dichtungselemente sind wesentlich höher als garantiert. Die Leistungwerte der Einzelmaschinen erfüllen die Garantiewerte der Modellabnahme, und die Jahresleistung übertrifft die Prognose nach den ersten fünf Jahren leicht. Einfach geregelte Straflo-Turbinen bilden eine kostengünstige Variante für den Umbau von Werken mit grösserer Maschinenanzahl.

Ausbau des Rheinkraftwerks Laufenburg

Fünf Jahre Betriebserfahrung mit Straflo-Turbinen



Kontrollarbeiten am Straflo-Laufrad.

Adresse des Autors
Armin Fust, Dr., dipl. Ing. ETH
Kraftwerk Laufenburg AG
5080 Laufenburg

■ Armin Fust

Einleitung

Die Konzessionserneuerung des Rheinkraftwerks Laufenburg im Dezember 1987 schrieb vor, dass bei gleichbleibenden Wasserspiegeln eine Erhöhung der Ausbauwassermenge (maximaler Turbinendurchfluss) von 1030 auf maximal 1420 m^3/s vorzunehmen sei [4]. Aus verschiedenen möglichen Varianten wurde dafür der Einbau von neuen Straflo-Maschinengruppen in die alten zehn Turbinenöffnungen ausgewählt. Diese Lösung hatte den Vorteil, dass der Umbau maschinenweise in den einzelnen bestehenden Maschinengruben vorgenommen werden konnte [4] und deshalb am wirtschaftlichsten ausfiel.

Die Realisierung dieser Aufgabe mit Straflo-Maschinengruppen wies einige Eigenheiten auf, welche bei diesem Projekt neu Anwendung fanden. Diese Lösung wurde von vielen Seiten mit einer gewissen Skepsis beobachtet. Dieser Bericht soll die diesbezüglichen Erfahrungen zusammenfassen.

Spezialitäten der eingesetzten Straflo-Maschinengruppen

Die Maschinengruppen (Bilder 1 und 2) weisen folgende Spezialitäten auf, die sich besonders bei Umbauten von Anlagen mit einer Maschinenleistung bis rund 10 MW und einer grossen Anzahl Maschinen eignen [1]:

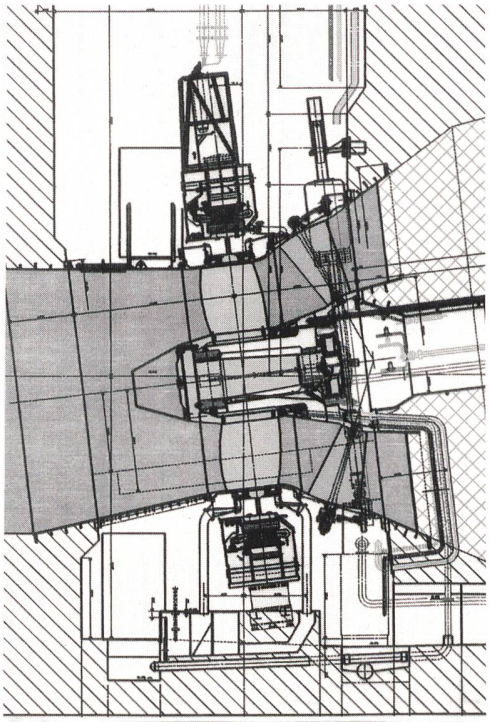


Bild 1 Ein Längsschnitt durch Turbine und Generator zeigt die sehr kompakte Bauart der leicht geneigt eingebauten Straflo-Maschinengruppe. Das vierflüglige Propellerrad ist von einem Aussenkranz umfasst, auf dem die Pole angebracht sind, die ihrerseits im Stator des Generators rotieren.

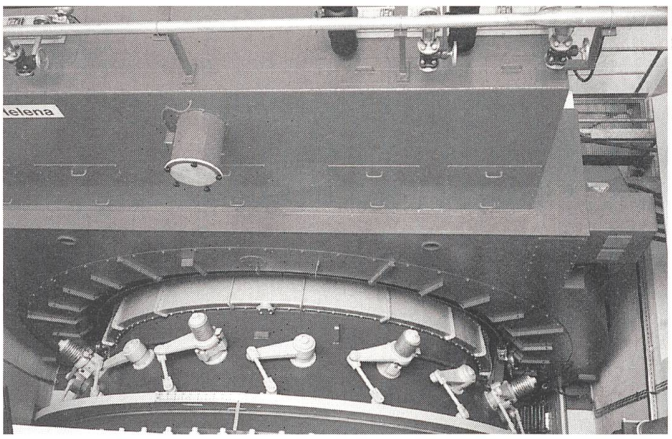


Bild 2 Oberwasserseitige Ansicht der Maschinengruppe mit Einlaufrohr, Leitapparat und Statorgehäuse.

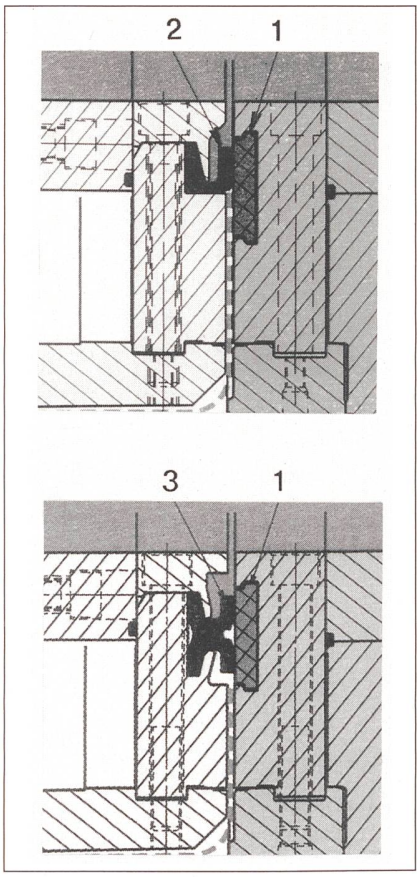


Bild 3 Schnitt durch Aussenkranzdichtung mit Keramikring (1), Einfachlippendichtung (2) und Doppellippendichtung (3).

- einfache Regulierung (Propellerturbine)
- Aussenkranzdichtung mit einer Materialkombination von Gummi und Keramik
- einseitige Lagerabstützung (fliegende Welle, Nabenlagerdichtung wie bei Aussenkranz)
- radial dehnbare Statorabstützung

Die ausgewählte Maschinenkonfiguration ist äusserst kompakt. Der Zusammenbau des Leitapparats, des Rotors mit Lagerung und des Stators mit Wicklung erfolgte separat in den Herstellerwerken. Die fertig montierten Komponenten konnten im Kraftwerk in kurzer Zeit eingebaut werden.

Die ganze Maschinenauslegung erfolgte aufgrund von Modellversuchsresultaten für eine optimale Jahreserzeugung. Allerdings waren zu diesem Zeitpunkt die wirklichen Wasserspiegellagen im Unterwasser noch nicht exakt bekannt, da vom Unterlieger RKS (Säckingen) noch eine Baggerung der Rheinsohle in Projektierung war. Diese Baggerung wurde dann in den Jahren 1992/93 auch tatsächlich ausgeführt und bewirkte Wasserspiegelsenkungen von bereichsweise über einem Meter.

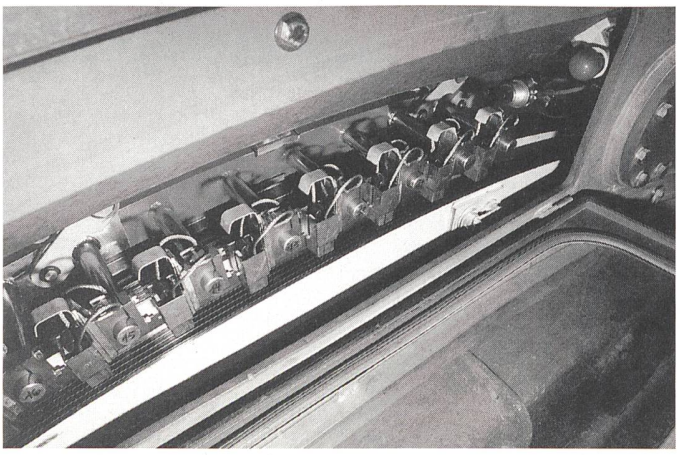


Bild 4 Blick in die geöffnete Schleifringkammer. Im Stillstand werden die Bürstenbrücken pneumatisch vom Schleifring abgehoben.

Modifikation nach der Inbetriebsetzungsphase

Dichtungen

Die grundsätzlichen Bedenken bei den Aussenkranzdichtungen – hohe Leckwassermenge und grosser Verschleiss – erwiesen sich im Betrieb als unbegründet. Dennoch war bei der unterwasserseitigen Aussenkranzdichtung eine Modifikation nötig. In der kalten Jahreszeit bei Wassertemperaturen unter 8 °C war jeweils ein deutliches Absinken der Leistungscharakteristik von rund 300 kW zu verzeichnen. Die Ursache war lange Zeit unklar. Verschiedenste Messungen und Versuche führten nicht weiter. Bei der Durchführung eines Versuches zu diesem Phänomen wurde von einem rauchenden Monteur zufällig bemerkt, dass der Rauch in den Leckwasserkanal gesogen wurde. Es bestätigte sich, dass im Unterdruckbereich hinter den Laufschaufeln Luft ins Saugrohr gelangte. Dieser Lufteintrag senkte die Diffusorwirkung des Saugrohrs derart deutlich, dass der entsprechende Leistungsabfall zu verzeichnen war. Die Abhängigkeit von der Wassertemperatur scheint mit dem Anteil gebundener Luft im Wasser bzw. mit der Inkompressibilität des Wassers zusammenzuhängen. Die einseitige Dichtlippe zum Wasser hin wurde nun durch eine Dichtlippe zur Luftseite hin ergänzt (Bild 3), womit der sprunghafte Leistungsabfall bei tieferen Wassertemperaturen behoben werden konnte.

Leitapparat-/Schliessgewicht

Die hydrodynamischen Kräfte auf die Leitschaufeln erwiesen sich in der Praxis bei der einfach geregelten Maschine und beim erhöhten Gefälle grösser als in der Projektierung zugrunde gelegt. In der Folge musste das Federpaket (ersichtlich in Bild 2), das die Schaufeln nach einer Auslenkung beim Einklemmen eines Geschwemmselstückes in die Ausgangsstellung zurückholt, verstärkt werden. Gleichzeitig wurde auch das Schliessgewicht, das den Leitapparat bei einem Ausfall der Hydraulik schliesst, vergrössert.

Labyrinthdichtungen

Die einzelnen Gehäusekammern des Stators sind gegen die rotierenden Teile mit Labyrinthdichtungen gegenseitig getrennt. Dadurch wird verhindert, dass Kohlenstaub aus der Schleifringkammer oder Staub aus der Umgebung in das Statorinnere mit den elektrischen Wicklungen gelangen. Die Labyrinthlippen aus Messingblech, welche fix auf

den segmentförmigen Abdeckblechen montiert sind, erhitzten sich bei Streifungen derart, dass sie wegschmolzen. Sie wurden durch einen unempfindlichen Teflonwerkstoff ersetzt. Zudem wurde die Konstruktion modifiziert, so dass die Dichtlippenpakete bei montierten Abdeckblechen justiert werden können.

Kohlenbürstenwahl und Kohlenstaubabsaugung

Konstruktionsbedingt haben die Schleifringe (Bild 4) etwa 5 m Durchmesser, womit Gleitgeschwindigkeiten von 30 m/s (108 km/h) verbunden sind. Die Wahl der Kohlenbürstenqualität, insbesondere des Minuspols, machte anfänglich grosse Schwierigkeiten. Die Standzeiten der Kohlen betrugen zeitweise nur gerade 500 Betriebsstunden. Nach ausgedehnten Versuchen wird jetzt eine imprägnierte Qualität eingesetzt, die fünf- bis zehnfache Lebensdauer aufweist.

Beim hohen Verschleiss der Bürsten kommt der Bürstenstaubabsaugung aus der Schleifringkammer grosse Bedeutung zu. Der Auslass dieser Absaugung war anfänglich nur mit mechanischen Filtern bestückt. Die entsprechenden Filter verstopften sehr rasch oder mussten so grob gewählt werden, dass die Wirksamkeit gering war. Um einer Verstaubung des ganzen Gebäudes entgegenzuwirken, wurden die Filteraggregate durch stärkere, zweistufige ersetzt, welche sich mit Druckluft grob gegenspülen lassen.

Kühlsystem

Für Kühlzwecke wird Grundwasser verwendet. Wegen des relativ aggressiven Grundwassers der Region wurden alle Installationen im Gebäude in rostfreiem Stahl ausgeführt, die äusseren Zuleitungen in Kunststoff. Einzelne Einbauelemente wie Temperaturgeber, Strömungswächter, Kühler, die nicht in rostfreiem Stahl gefertigt waren (Kupfer, Messing, Guss), bewährten sich trotz isoliertem Einbau je nach Material schlecht und mussten rasch ersetzt werden, da nichts mehr von ihnen vorzufinden war. Bei der Verwendung von rostfreiem Stahl ist strikte darauf zu achten, dass auch korrosionsbeständige Materialien im Nu abgebaut werden können. Die Kupferrohrkühler wurden ersetzt durch Doppelwandkühler aus Weissmetall. Bei diesen musste die Strömungsgeschwindigkeit so stark reduziert werden, dass die schützende Oxidschicht nicht ständig durch Turbulenzwirbel abgebaut wird und so Leckstellen entstehen.

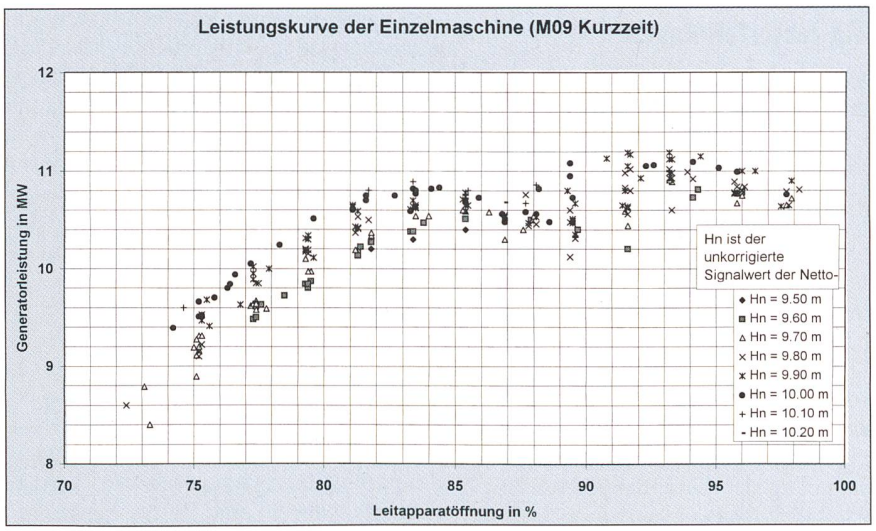


Bild 5 Kurzzeitcharakteristik der Einzelmaschine für verschiedene Gefälle. Der Verlauf zeigt die typische Leistungseinbusse im Bereich um 90% Öffnung, welche bei raschem Verstellen der Maschine auftritt (Haltepunkte < 15 Minuten).

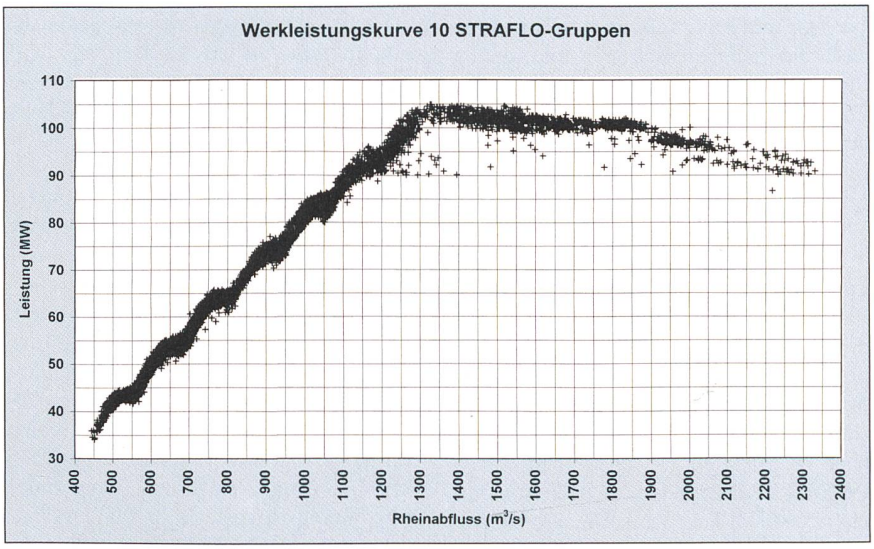
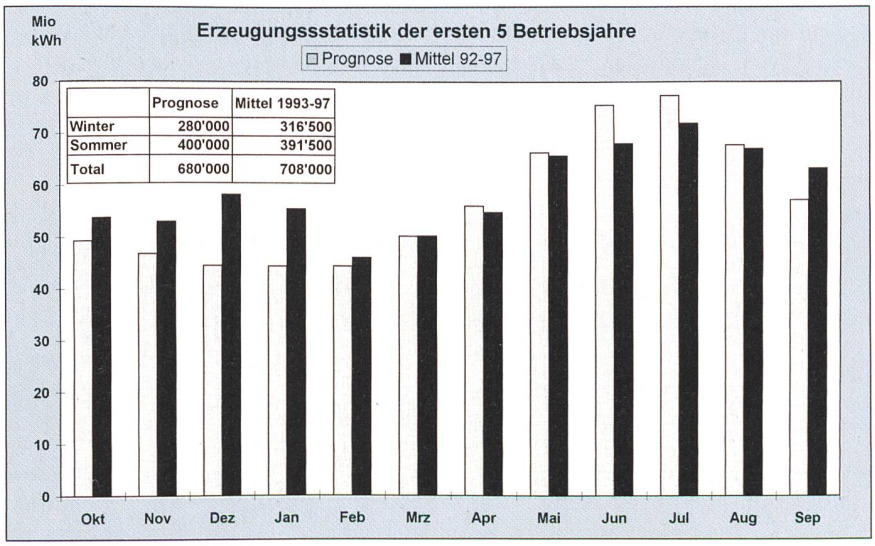


Bild 6 Werkleistungskurve der zehn Maschinengruppen. Deutlich erkennbar ist das Zu- und Wegschalten der einzelnen Maschinen. Die Streuung der Werte ist zum grössten Teil durch die Bewirtschaftung des Unterwassers bedingt.



	Prognose	Mittel 1993-97
Winter	280'000	316'500
Sommer	400'000	391'500
Total	680'000	708'000

Bild 7 Jahreserzeugung der ersten fünf Betriebsjahre im Vergleich zur Prognose. Positiv fällt auf, dass die Jahreserzeugung leicht über der Prognose liegt und der Anteil Winterenergie deutlich höher ist.

Betriebserfahrungen

Leistungscharakteristik der Einzelmaschine

Abnahme- und Betriebsmessungen haben gezeigt, dass die Maschinengruppe die garantierten Leistungswerte problemlos erreicht. Dennoch traten bei der Analyse der Leistungswerte gewisse erstaunliche Erscheinungen auf. So weisen die Straflo-Turbinen – je nach Maschine unterschiedlich ausgeprägt – zwischen 85 und 90% Leitapparatöffnung einen Abfall in der Leistungskurve gegenüber der Modellkurve auf (Bild 5). Bei rund 90% Öffnung springt die Leistung ohne Änderung der Einstellungen um bis zu 0,3 MW. Druckmessungen in der Maschine haben gezeigt, dass in den Zuständen reduzierter Leistung im Saugrohr Druckinstabilitäten auftreten. Erstaunlicherweise tritt dieser Leistungsabfall nur bei raschem Durchfahren der Kennlinie auf. Die Langzeit-Betriebswerte zeigen diesen Abfall nicht. Die Ursache dieser Diskrepanz ist bisher nicht geklärt. Aber auch im Langzeiteinsatz bringen die Turbinen über rund 90% Öffnung keinen Leistungszuwachs mehr.

Führt der Rhein Geschwemmsel, so ist es nicht zu vermeiden, dass Verunreinigungen wie Blätter, Gräser, Algen, Äste, Plastikfolien usw. an den Anströmkanten der Leit- und Laufschaufeln haften bleiben und die Strömung stören. Als Folge treten Wirkungsgradverluste mit Leistungsreduktionen bis 0,4 MW auf. Je nach Geschwemmselfracht tritt diese Leistungsreduktion bereits nach Stunden oder erst nach Tagen auf. Die wirksamste Abhilfe, diese Verunschmutzung zu entfernen, geschieht durch Abstellen und erneutes Anfahren der Turbine.

Werkleistungskurve der zehn Maschinen

Alle im Einsatz stehenden Turbinen werden vom Pegelregler grundsätzlich gleich gefahren, und zwar in einem Öffnungsbereich von 65 bis 92%. Die Werkleistungskurve widerspiegelt also die Leistungskurve der Einzelmaschine (Bild 6). Die Streuung der Werte für einen Abflusswert ist begründet durch die Bewirtschaftung des Stauraums im Unterwasser. Die Kurve zeigt ausgezeichnete Übereinstimmung mit der theoretisch ermittelten Werkleistungskurve aufgrund der Modellresultate. Das maximale Schluckvermögen der Turbinen liegt bei 1355 m^3/s.

Die einfach regulierten Maschinen eignen sich problemlos für den Bereich, bei dem mehr als sechs Maschinen in Betrieb sind. Bei tieferem Wasserangebot bewirken schon relativ geringe Schwankungen des Zuflusses häufige An- und Abstellvorgänge von Maschinen.

Jahreserzeugung

Die Erzeugungsprognose aufgrund des langjährigen Abflusses betrug 680 Mio. kWh (inkl. Einstauersatz des Unterliegers). In den vergangenen fünf Jahren wurde diese Prognose im Mittel leicht übertroffen. Markant verschoben gegenüber der Prognose hat sich der Anteil Winterstrom (Bild 7).

Vibrationen

Die einfach regulierte Turbine weist für Einstellungen unterhalb des optimalen Betriebsbereichs hohe Instabilitäten im Saugrohr auf. Diese bewirken Schläge und Vibrationen, die sich auf das Gebäude und die Maschine übertragen. Aus diesem Grund mussten in den Büroräumen schwingungsisolierte Böden und Wände eingebaut werden. Eingehende Messungen haben jedoch gezeigt, dass die auftretenden Amplituden für die Gebäude keine unzulässigen Belastungen bedeuten. Auch maschinentechnisch waren bisher keine Folgen dieser Vibrationen feststellbar. Beispielsweise haben die Wicklungskontrollen keine Unregelmässigkeiten aufgedeckt, was allenfalls durch die freie Dehnbarkeit des Statorgehäuses positiv unterstützt wird.

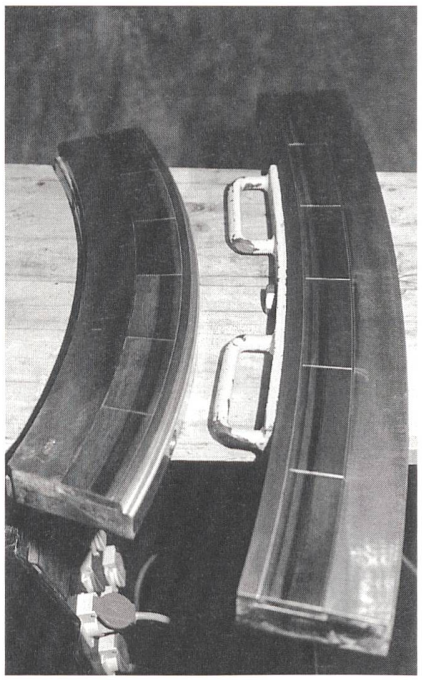


Bild 9 Keramikringsegment nach zweijährigem Betrieb. Ausser einem Einlaufspiegel ist der Verschleiss teilweise kaum messbar.

Leckwasser

Wie die Tabelle von Bild 8 zeigt, liegen die Erfahrungswerte ein Mehrfaches unter den Garantiewerten. Auch die Lebensdauer der Dichtungselemente liegt bedeutend über den angenommenen Werten. Insbesondere der kostspielige Keramikring (Bild 9) hält sich sehr gut.

Betriebskennwerte der Aussenkranzdichtung			
	Keramikring	Einfachlippe (Oberwasser)	Doppellippe (Unterwasser)
Verschleiss	> 0,5 mm nach 50 000 Betriebsstunden ($^1/_7$ des Garantiewertes)	Von Wasserqualität abhängig (Sandgehalt)	Von Wasserqualität abhängig (Sandgehalt)
Lebensdauer	> 80 000 Betriebsstunden	> 40 000 Betriebsstunden	> 20 000 Betriebsstunden

Bild 8 Zusammenstellung zu Verschleiss und Lebensdauer der Dichtungselemente.

Unterhalt

Betriebszeiten

Entsprechend der gestaffelten Montage- und Inbetriebsetzung haben sich die Betriebsstunden bis heute noch nicht angeglichen und bewegen sich zwischen 55 000 und 36 000 Stunden. Seit der Inbetriebnahme sind die Maschinen an knapp 80% der möglichen Zeit effektiv in Betrieb gewesen.

Unterhaltsfreundlichkeit der Anlagen

Bei mittlerer Wasserführung sind nur an rund 70 Tagen im Jahr alle zehn Maschinen im Einsatz. In der übrigen Zeit stehen eine oder mehr Maschinen für Unterhaltsarbeiten zur Verfügung. Deshalb ist es möglich, bei verschiedenen Komponenten von vorbeugendem zu zustandsabhängigem Unterhalt überzugehen oder zu warten, bis die Komponenten ausfal-

len. Allerdings muss für diesen Fall ein möglichst einfacher Austausch vorbereitet sein, d.h. die Komponenten müssen gut zugänglich und möglichst «steckbar» montiert sein, dass mechanische und elektrische Anschlüsse nur umgesteckt werden können. Diese Bedingung ist an den Straflo-Maschinengruppen in vielen Punkten erfüllt oder wurde in den letzten Jahren durch Anpassungen erreicht. Jedenfalls sind in den ersten fünf Betriebsjahren praktisch keine Erzeugungsstunden verloren gegangen, weil die Maschinengruppen nicht verfügbar waren.

Dichtungswechsel

Das kritischste Element der Straflo-Maschine, die Aussenkranzdichtung, bietet unterdessen vom Unterhalt her keine Probleme. Ein Wechsel einer Aussenkranzdichtung kann aufgrund der Erfahrung heute in zwei bis drei Arbeitstagen ausgeführt werden, so dass praktisch abgewartet werden kann, bis ein übermässiger Anstieg der Leckwassermenge auftritt. Im Bedarfsfall wurden auch schon Wiederinbetriebnahmezeiten unter 24 Stunden erreicht.

Das Entleeren der Turbinen wird möglichst eingeschränkt, da es eine aufwendige Nebenerscheinung mit sich bringt. Beim oberwasserseitigen Entleerungsrohr befindet sich der Schieber erst vor der Sammelrinne, die das Wasser zur Landseite in einen Pumpensumpf leitet. Nun füllt sich das Rohrstück vom Einlaufschacht bis zum Schieber stets mit Sand, der bei der Entleerung in den Pumpensumpf gelangt und von dort periodisch weggebracht werden muss. Zur Vermeidung dieser Sandansammlung wird noch eine geeignete Abhilfe erarbeitet.

Keine Kavitationserscheinungen/ unbedeutende Laufradrisse

Die regelmässigen Kontrollen der Laufradschaufeln haben bisher nicht die geringsten Spuren von Kavitation gezeigt. Die im Modellversuch festgelegten Kavitationsgrenzen haben sich also bewährt.

Bei diesen eingehenden Kontrollen wurden allerdings kleine Anrisse in der Übergangspartie zwischen Laufradschaufel und aufgeschrumpftem Aussenkranz festgestellt. Beim Verschweissen der Schaufeln mit dem Ring wurde dem kerbzonenfreien Übergang etwas zu wenig Beachtung geschenkt und der Schweissnahtansatz zu wenig gerundet. Die Risse wurden genauestens analysiert, Spannungsmessungen und -rechnungen angestellt und für ungefährlich befunden.

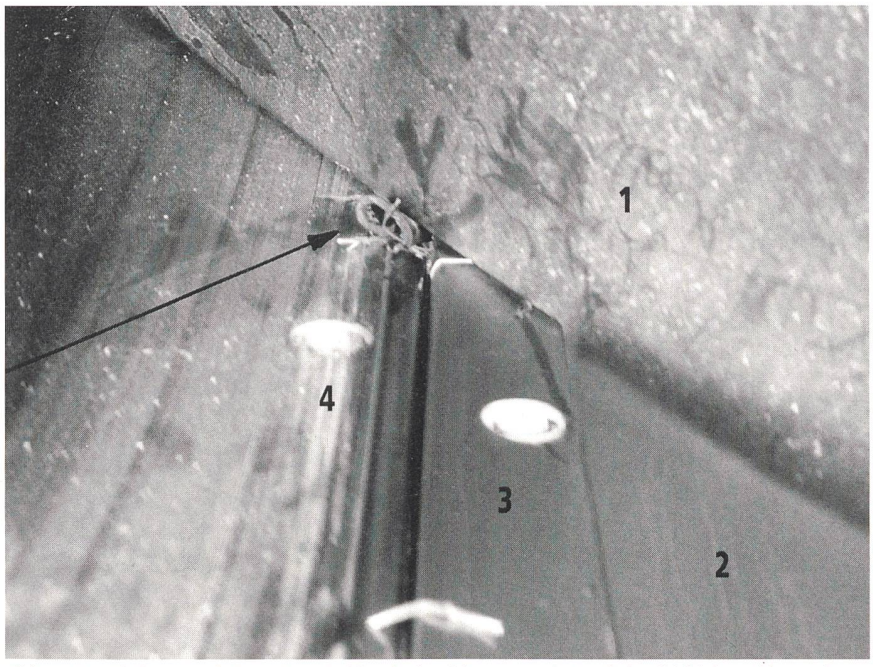


Bild 10 Der Pfeil zeigt auf einen Gummischlauch, der sich am Fuss der Laufschaufel (1) festgeklemmt hat. Durch die Rotation wird der feststehende Klemmring (4) abgenutzt. Ebenfalls sichtbar ist der Aussenkranz (2) und der Trägerring für das Keramiksegment (3).

Die Partien wurden nachträglich an allen Laufrädern nachgeschliffen.

Verschleiss der feststehenden Ringe

Bei den Kontrollen zeigte sich relativ häufig, dass im oberwasserseitigen Spalt zwischen rotierenden Laufschaufeln und feststehenden Ringen reissfeste Partikel wie Seilstücke, Gummischläuche, Aalhäute usw. eingeklemmt werden und offensichtlich über längere Zeit mit dem Laufrad mitrotieren (Bild 10). In solchen weichen Partikeln kann sich Sand einlagern, der dann die feststehende Gegenpartie abschmirgelt. Im Extremfall kann dieser Verschleiss nach einigen tausend Betriebsstunden bereits mehrere Millimeter betragen.

Referenzen

[1] Ausbau des Rheinkraftwerks Laufenburg mit Straflo-Turbinen. Technische Rundschau Sulzer, H. 3 (1988).

[2] Halbzeit beim Ausbau des Rheinkraftwerks Laufenburg. Bulletin SEV/VSE, 82. Jahrgang, H. 6 (1991).

[3] Ausbau und Erneuerung des Kraftwerks Laufenburg. wasser, energie, luft – eau, énergie, air, 83. Jahrgang, H. 1/2 (1991).

[4] Rheinkraftwerk Laufenburg – Ausbau 1988 bis 1994. wasser, energie, luft – eau, énergie, air, 86. Jahrgang, H. 7/8 (1994).

Agrandissement de la centrale de Laufenbourg Cinq ans d'expérience avec des turbines Straflo

Bien qu'ayant dû être modifiées plusieurs fois au début, les turbines Straflo n'en ont pas moins fait parfaitement leurs preuves au cours de leurs premières cinq années de service. Elles sont d'un entretien facile et modeste. La durée de vie des principaux éléments d'étanchéité est nettement plus élevée que celle garantie. Les performances de chaque machine satisfont aux conditions de garantie à la réception du modèle, et la production annuelle dépasse légèrement les prévisions initiales. Des turbines Straflo réglées simplement constituent une variante avantageuse pour la transformation de centrales équipées de nombreuses machines.

Natel D von PHILIPS

GSM, easy-fähig

genie™

24-STUNDEN FIRST CHOICE AUSTAUSCHSERVICE WELTWEIT

diga™

- Das kleinste und leichteste Handy der Welt!
- Sprachwahlfunktion - gehorcht auf's Wort.
- Ausfahrbares Mikrofon.
- Bis zu 8 h Sprech- oder 525 h Bereitschaftszeit.

- Das Preisgünstige!
- Mailbox-Direktwahl mit eigenem Mailbox-Symbol.
- Tastaturschutz.
- Bis zu 10 h Sprech- oder 350 h Bereitschaftszeit.

405

OTTO FISCHER AG

Elektrotechnische Artikel en gros, Aargauerstrasse 2, Postfach, 8010 Zürich
Telefon 01/276 76 76, Romandie 01/276 76 75, Ticino 01/276 76 77
Telefax 01/276 76 86, Romandie 01/276 77 63, Ticino 01/276 77 95

Coupon für
Prospekt Natel D «Philips»
Otto Fischer AG
Aargauerstrasse 2
Postfach
8010 Zürich

Firma: _____
zuständig: _____
Adresse: _____
PLZ/Ort: _____
Tel.: _____

Bu