

# Bau einer Kleinwasserkraftanlage mit Durchströmturbine an der Wehratalsperre

Klebsattel, G., Schneider, K., Wirth, D.

## **Kurzfassung**

Das Wehrbecken ist das Unterbecken des Pumpspeicherkraftwerkes Wehr der Schluchseewerk AG. Der Zufluß muß bei jedem Beckenstand zeitgleich wieder in das ursprüngliche Flußbett abgegeben werden. Die Abgabe erfolgt durch einen Stollen mit Auslaufbauwerk. Im Sperrenkraftwerk soll ein Teil des Abflusses zur regenerativen Energiegewinnung genutzt werden. Da die Zuflüsse und die Fallhöhen unabhängig voneinander sehr stark schwanken, ist nur der Einbau einer zweizelligen Durchströmturbine wirtschaftlich vertretbar. Die installierte Leistung beträgt 1 135 kW, die mittlere Jahreserzeugung wird ca. 3,8 Mio. kWh betragen.

## **1. Einleitung**

Das Pumpspeicherkraftwerk Wehr ist mit einer installierten Leistung von ca. 1 000 MW im Turbinen- und Pumpbetrieb seit 1976 eine der leistungsstärksten Anlagen dieser Art in Deutschland. Der Zufluß der Wehra in das Wehrbecken muß bei jedem Beckenstand zeitgleich wieder in das ursprüngliche Flußbett abgegeben werden. Die Abgabe erfolgt durch den 290 m langen Wehraumleitungsstollen mit einem Durchmesser von  $D = 3,7$  m.

Am Anfang befindet sich ein Einlaufbauwerk mit einem unteren und einem oberen Einlauf mit je einem Rechen sowie einer Rollschütze. Der Stollen endet in einem Auslaufbauwerk, wo er sich in zwei Rohrleitungsstränge  $D = 2\ 800$  mm teilt. Die Wehrdurchflußregulierung muß bei jedem Beckenstand zwischen Stauziel 419 m +NN und Absenkziel 395 m + NN die zeitgleiche Abführung der stark unterschiedlichen Zuflüsse in das Wehrbecken gewährleisten. Hierfür stehen zwei Ringschieber DN 300 und DN 900 für Abflüsse bis 0,9 bzw. 8 m<sup>3</sup>/s sowie zwei Kegelstrahlschieber DN 2800 für größere Abflüsse zur Verfügung.

Im sogenannten Sperrenkraftwerk soll ein Teil des bisher ohne energetische Nutzung abfließenden Wassers zur regenerativen Energiegewinnung genutzt werden.

## **2. Hydraulische Auslegung**

Für die hydraulische Auslegung der Turbine wurden die hydrologischen Verhältnisse am Pegel Wehra / Wehr untersucht. Die wesentlichen hydrologischen Kennwerte sind:

- mittlerer Abfluß:	2,63 m <sup>3</sup> /s
- mittlerer jährlicher Niedrigwasserabfluß:	0,42 m <sup>3</sup> /s
- mittleres jährliches Hochwasser:	30,43 m <sup>3</sup> /s
- Einzugsgebiet des Wehrbeckens:	67,59 km <sup>2</sup>
- Einzugsgebiet des Pegels:	60,63 km <sup>2</sup>

Unter Berücksichtigung der geringeren Höhenlage des Resteinzugsgebietes kann ein mittlerer nutzbarer Zufluß von ca. 2,8 m<sup>3</sup>/s erwartet werden.

Aus energiewirtschaftlichen, betrieblichen und baulichen Gesichtspunkten wurde ein Auslegungsdurchfluß für die Turbine von  $Q_N = 4 \text{ m}^3/\text{s}$  gewählt. Er entspricht etwa  $Q_{240}$ .

Die geodätische Fallhöhe ergibt sich aus der durch den Betrieb des Pumpspeicherkraftwerkes Wehr stark schwankenden Wasserspiegelhöhe im Wehrbecken. Zufluß und Fallhöhe sind damit vollkommen unabhängig voneinander.

Die optimale Nutzung der vorhandenen Durchflußverteilung erforderte den Einbau einer Turbine mit einer über den gesamten Durchflußbereich möglichst flachen Wirkungsgradcharakteristik, mit akzeptablen Wirkungsgraden auch bei den extremen Fallhöhenchwankungen. Die Wahl fiel deshalb auf eine zweizellige Ossberger®-Turbine mit Saugrohr.

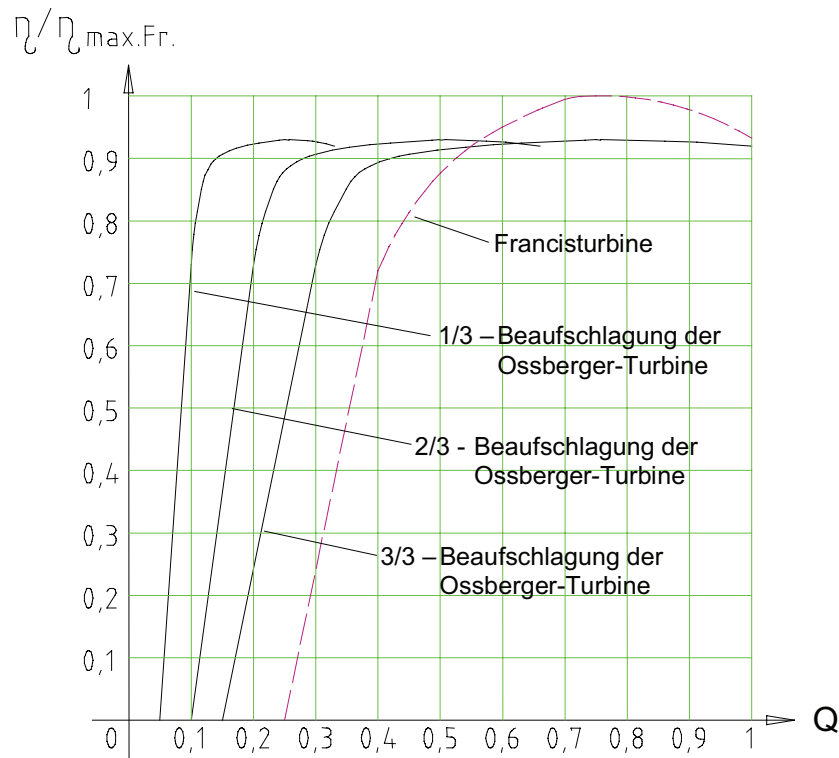


Bild 1 : Wirkungsgradverlauf einer OSSBERGER-Turbine im Vergleich zu einer Francis-Turbine bei unterschiedlichen Betriebsarten

Bild 1 zeigt den Wirkungsgradverlauf einer Durchströmturbine beispielhaft im Vergleich zu einer Francis-Turbine. Zwar ist der maximale Wirkungsgrad geringer, die Überlegenheit der Durchströmturbine zeigt sich jedoch deutlich bei kleineren Durchflüssen.

Die Auslegungsdaten der Turbine betragen:

- Nennfallhöhe:  $H_N = 30 \text{ m}$
- Nenndurchfluß bei  $H_N = 30 \text{ m}$ :  $Q_N = 4 \text{ m}^3/\text{s}$
- minimale Betriebsfallhöhe  $H_{\min} = 16 \text{ m}$
- maximale Betriebsfallhöhe  $H_{\max} = 36 \text{ m}$

Bei der Nennfallhöhe  $H_N = 30 \text{ m}$  ergibt sich eine Nenndrehzahl für die Durchströmturbine von  $n_N = 214,3 \text{ min}^{-1}$ . Da ein direktgekuppelter Generator ohne Getriebe (Abschnitt 4.5) verwendet wird, würde dies eine Generatorausführung mit 28 Polen bedeuten.

Aus wirtschaftlichen Gründen werden jedoch 26 Pole verwendet. Damit ergibt sich eine Nenndrehzahl von  $n_N = 230,8 \text{ min}^{-1}$ . Unter Berücksichtigung des Minderpreises für den Generator und der geringen Wirkungsgradeinbuße der Turbine stellt diese Festlegung ein wirtschaftliches Optimum dar.

Mit diesen Daten beträgt die maximale elektrische Leistung  $P_{\text{el,max}} = 1\,135 \text{ kW}$ , die mittlere Jahresarbeit beträgt 3,8 Mio. kWh.

### **3. Bauliche Konzeption und Triebwasserführung**

Es wurde eine kostenoptimierte bauliche Konzeption erarbeitet unter Berücksichtigung der örtlichen Gegebenheiten am Fuße der Wehra-Talsperre, der baulichen Situation im vorhandenen Auslaufbauwerk, sowie der betrieblichen Randbedingungen während des Baus und des späteren Betriebes. Lösungen innerhalb des bestehenden Bauwerkes mußten aufgrund des nicht ausreichenden Platzdargebotes und verschiedener ausführungstechnischer Risiken verworfen werden.

Als optimal erwies sich die Errichtung des Turbinenhauses als seitlicher Anbau an das bestehende Ausflußbauwerk.

Damit ergibt sich die folgende Triebwasserführung:

Der hydraulische Anschluß an das vorhandene Rohrleitungssystem erfolgt durch einen angeschweißten Abzweigstutzen an den rechten Rohrstrang DN 2 800. Vor der Turbine sind eine Absperrklappe und ein Einlaufrechen angeordnet. Das Wasser wird in der Turbine rechtwinklig nach unten abgelenkt. Es strömt durch das Saugrohr in einen Ablaufkanal und durch das Tosbecken in das natürliche Flußbett der Wehra zurück.

Das Sperrkraftwerk hat keinerlei Einfluß auf den Pumpspeicherbetrieb des KW Wehr.

Die Energieableitung erfolgt in einer vorhandenen Kabeltrasse. Für die Errichtung waren keine neuen Zufahrten erforderlich.

Für die Unterlieger bringen Bau und Betrieb des Sperrkraftwerkes keine Veränderungen.

Im Sperrkraftwerk erfolgt der Ausbau von Wasserkraft praktisch ohne Umweltbeeinträchtigungen, da das Wasser im Bereich bestehender Anlagen aus einer vorhandenen Rohrleitung entnommen und direkt wieder in das Tosbecken eingeleitet wird, ohne neue Ausleitungsstrecke oder sonstige umweltrelevante Veränderungen gegenüber dem derzeitigen Zustand.

### **4. Elektro-mechanische Einrichtungen**

#### **4.1 Rohranschluß**

Die Form des Abzweigstutzens an den rechten Rohrstrang DN 2 800 wurde nach hydraulischen, fertigungs- und montagetechnischen Gesichtspunkten gewählt. Aufgrund der relativ geringen Anströmgeschwindigkeit erwies sich die Festlegung der hydraulischen Kontur als unproblematisch.

Der Stutzen wurde so weit vorgefertigt, daß auf der Baustelle nur noch Anpaßarbeiten im Bereich des Anschlusses an das vorhandene Rohr sowie die Anschluß-Rundnaht ausgeführt werden mußten. Dadurch konnte die notwendige Entleerzeit für das vorhandene Stollensystem minimiert werden.

Bei der Werkstoffauswahl wurde auf gute Verschweißbarkeit mit dem Werkstoff der vorhandenen Rohrleitung geachtet. Alle Schweißnähte wurden zu 100 % einer Ultraschall- und Oberflächenrißprüfung unterzogen.

#### **4.2 Absperrklappe und Turbinenanschluß**

Die Absperrklappe DN 1 600 wurde notschlußfähig für den maximalen Wasserstrom ausgelegt.

*Zur Aufnahme der beim Schließen unter Strömung auftretenden Kräfte und Momente auf den Klappenteller wird ein ölhydraulischer Antrieb mit einem doppeltwirkenden Hydraulikzylinder verwendet. Das maximale Arbeitsvermögen zum Schließen wird am Ende des Schließvorganges für das Einfahren des Klappentellers in den Dichtsitz*

*benötigt. Zur Sicherstellung dieses Arbeitsvermögens auch beim Ausfall der Hydraulikölpumpe wird deshalb als Energiespeicher ein Kolbenspeicher verwendet. Diese Ausführung bietet den Vorteil, daß Öl- und Gasverluste über Endschalter an der nach außen geführten Kolbenstange erkannt werden können.*

In dem Verbindungsrohrstück DN = 1 600 zwischen Absperrklappe und Turbine ist ein innenliegender Rechen LW = 30 mm zum Schutz der Turbine gegen grobes Treibzeug angeordnet. Rechenverlegungen können über eine Rechendifferenzdruck-Meßeinrichtung erkannt werden. Die Rechenreinigung kann nach Schließen der Absperrklappe über eine Gegenspüleleitung oder durch das Mannloch erfolgen.

### 4.3 Turbine

Zum Einbau gelangt eine Durchströmturbine der Fa. Ossberger GmbH+Co, Weissenburg/Bayern, mit einem Laufraddurchmesser von  $D = 1\ 000$  mm. Das Turbinengehäuse ist zweizellig im Verhältnis 1:2 aufgeteilt. Die beiden Leitschaufeln können getrennt beaufschlagt werden, wodurch sich ein in einem großen Einsatzbereich günstiger Wirkungsgradverlauf ergibt.

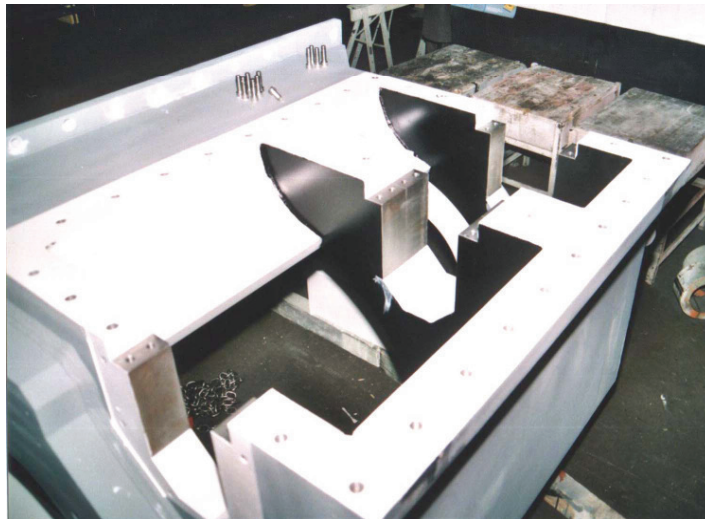


Bild 2: Gehäuse einer zweizelligen Ossberger®-Turbine mit gefräzten Leitschaufellagerbuchten

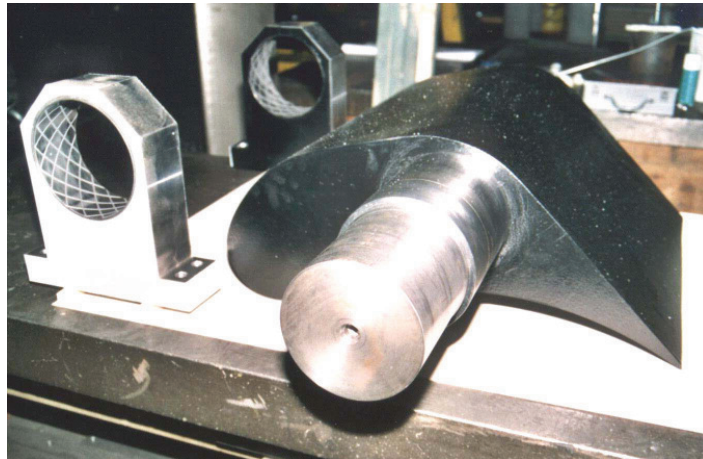
*Die Durchströmturbine ist vom Prinzip her eine radial- und teilbeaufschlagte Freistrahlturbine mit geringer spezifischer Drehzahl, die über dem Unterwasserspiegel angeordnet wird. Durch die Nachschaltung eines Saugrohres wird jedoch auch die Saughöhe zur Energieumsetzung ausgenützt. Der Freistrahler wird von den tragflügelähnlichen Leitschaufeln, die sich im Druckgehäuse mit rechteckigem Querschnitt befinden, gebildet. Er durchströmt den Schaufelkranz des walzenförmigen Laufrades zuerst von außen nach innen und nach Durchqueren des Radinnern von innen nach außen.*

Wie alle Freistrahlturbinen benötigt die Durchströmturbine einen sog. Freihang, damit das Laufrad nicht teilweise eintaucht und abgebremst wird. Deshalb wird die Wasserspiegelhöhe im Saugrohr durch zwei federbelastete Belüftungsventile eingestellt. Der Ablaufkanal hat eine freie Oberfläche.

*Moderne CNC-gesteuerte Fertigungsverfahren ermöglichen die auftragsbezogene Herstellung der Turbine als gusstoleranzfreie Schweißkonstruktion.*

Das Gehäuse (Bild 2) nimmt die Passlagereinsätze für die Leitschaufellagerung auf. Die Regulierwellen mit aufgeschrumpften gehärteten und geschliffenen Edelstahlbüchsen laufen in wartungsfreien DEVA-Gleitlagern (Bild 3). Dies erlaubt eine leichte Montage und Demontage der Leitschaufeln in radialer Richtung (Bild 4), obwohl die massiven Regulierwellen durchgehend mit den Leitschaufeln verschweißt sind. Die nach Schablone hergestellten Leitschaufeln werden dichtend in das Turbinengehäuse eingepaßt und dienen daher gleichzeitig als Absperrorgan.

Das Laufrad hat einen Durchmesser von 1 000 mm und ist mit 37 Schaufeln bestückt, die, unterstützt von mehreren Stützscheiben, mit den Endscheiben verschweißt sind. Aus hydraulischen Gründen wird auf eine durchgehende Welle verzichtet, Lagerung und Drehmomentübertragung erfolgen über zwei Wellenstummel, auf die die Endscheiben aufgeschraubt sind. Auswechselbare Wellenschutzhülsen verhindern das Einlaufen der Wellenabdichtung.



*Bild 3: Leitschaufel und Passlagereinsatz für die Leitschaufel*



*Bild 4: Montage der Leitschaufeln mit Lagereinsatz im Turbinengehäuse*

Bei der Montage wird das Laufrad zunächst in das Turbinengehäuse eingesetzt (Bild 5). Anschließend werden die Hauptlagergehäuse über die Welle geschoben, mittels eines Paßbundes im Gehäuse zentriert und mit ihm verschraubt. Sie stützen sich direkt auf dem Fundamentrahmen ab und leiten nahezu keine Biegemomente in das Turbinengehäuse ein.

Die Lagergehäuse nehmen die Stopfbuchsenabdichtung und die Lagereinheit, bestehend aus einem Pendelrollenlager mit Spannhülse, auf.

Die räumliche Trennung von Wellenabdichtung und Lagereinheit sowie die wartungsfreie Leitschaufellagerung gewährleistet, daß keine Schmiermittel in das Triebwasser gelangen. Der abnehmbare Eckkasten deckt das Laufrad ab und ermöglicht eine problemlose Zugänglichkeit.

Gemäß Ausschreibung der Schluchseewerk AG wurden die tragenden Schweißnähte der Turbinen- und Rohrleitungsteile durch die MPA Stuttgart geprüft und abgenommen.

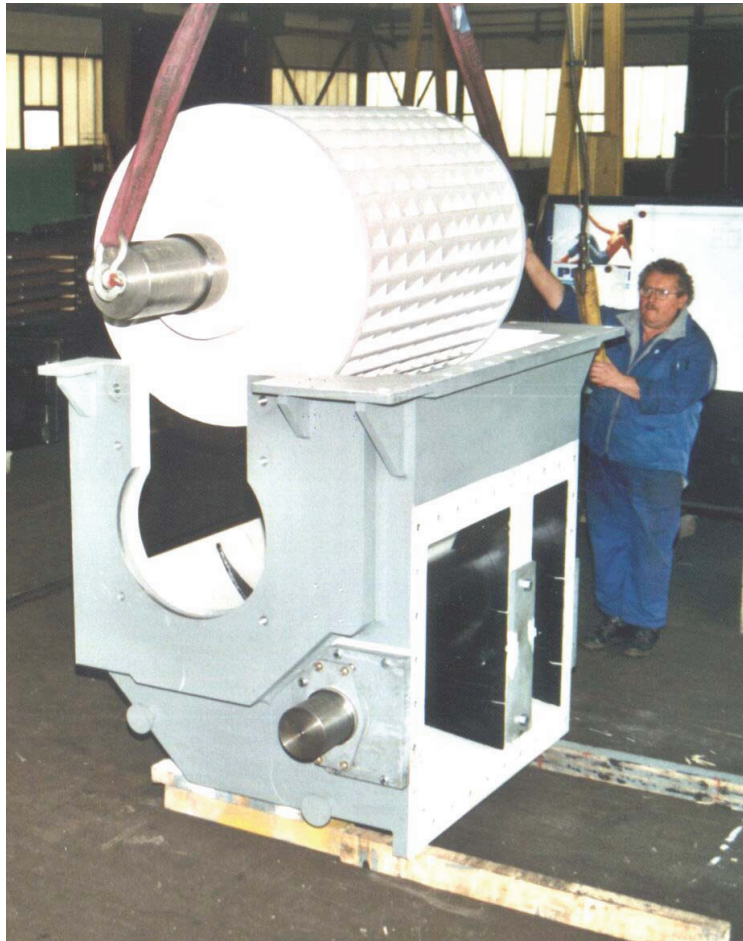


Bild 5: Montage des Lauftrades in radialer Richtung zur Turbinenachse

Zwei Hydraulikzylinder greifen über Hebelarme an den Regulierwellen der beiden Leitschaufeln an und bestimmen so deren Öffnung und damit den Durchfluß der Turbine. Berührungslose Drehwinkelgeber erfassen die Öffnung für die übergeordnete Regeleinrichtung.

An den Hebelarmen sind, wie bei OSSBERGER-Turbinen üblich, zusätzlich Schließgewichte montiert, die auch im Störfall ohne externe Energiequelle die Turbine sicher schließen.

Ein gemeinsames Hydraulikaggregat mit Proportionalventiltechnik versorgt über den Kolbenspeicher die Zylinder der Durchströmturbine und der Absperrklappe.

#### 4.4 Generator

*Bei der gegebenen Maschinenleistung ist die Verwendung eines Asynchrongenerators mit Kompensationseinrichtung einem Synchrongenerator technisch und wirtschaftlich unterlegen.*

*Zur Steigerung der Zuverlässigkeit und Reduzierung der Instandhaltungsaufwendungen wird auf ein Getriebe zwischen Turbine und Generator verzichtet. Zur Erzielung der für die Turbine optimalen Synchrodrehzahl von 214,3 1/min ist eine 28-polige Generatorausführung notwendig. Eine Ausführung mit 26 Polen ergab einen Minderpreis für den Generator, der die durch die Erhöhung der Drehzahl der Turbine verursachte Wirkungsgradeinbuße der Turbine bei weitem kompensiert.*

*Die erzeugte Energie wird direkt über das Mittelspannungsnetz des Pumpspeicherkraftwerkes Wehr abgegeben. Deshalb wurde eine Generatorspannung von 6,3 kV gewählt und auf einen einen zusätzlichen Maschinentransformator verzichtet.*

## 4.5 Energieableitung

Zur Energieableitung mußte lediglich zwischen dem Sperrkraftwerk und dem 770 m entfernten Auslaufbauwerk des Pumpspeicherkraftwerkes Wehr ein entsprechendes leistungsfähiges Erdkabel verlegt werden. Ab dem Auslaufbauwerk konnte ein bereits verlegtes Kabel mit verwendet werden.

Neue Kabeltrassen oder Freileitungen waren nicht erforderlich.

## 5. Bauablauf

Der seitliche Anbau für die Unterbringung des Maschinensatzes des Sperrkraftwerkes erfolgte in Stahlbetonbauweise.

Die Gründungssohle des neuen Anbaus liegt 2,8 m unter der Fundamentplatte des bestehenden Auslaufbauwerkes. Deshalb war während des Baugrubenaushubs eine Unterfangung erforderlich.

Als Folge der relativ großen Wandlast des bestehenden Bauwerkes war die Vernagelung einer bewehrten Spritzbetonwand mit einem Nagelraster von 1,1 m x 1,3 m bei einer erforderlichen zulässigen Nagelkraft von 154 kN und einer Nagellänge von 4 m notwendig.

Wegen der für die Unterfangung des Auslaufbauwerkes vorhandenen Baustelleneinrichtung wurde die gesamte 8 m tiefe Baugrube als Vernagelung ausgeführt. Lediglich die Südseite wurde als Zufahrtsrampe abgebösch.

Da sich die Baugrubensohle rund 3,5 m unter dem Grundwasserspiegel befindet, war eine Grundwasserabsenkung erforderlich.

Es gelang mit einem aus der Bauzeit der Wehra-Talsperre bereits bestehenden Brunnen das Grundwasser bis nahe an die Baugrubensohle abzusenken. Die Restabsenkung erfolgte mit einer ergänzenden offenen Wasserhaltung.

*In der fertiggestellten Baugrube, die zur Minimierung des Baugrubenaushubs und des Baugrubenverbaus die Abmessungen des fertigen Bauwerks hat, wurden die Außenwände einhäutig geschalt und direkt gegen den Spritzbeton der Baugrubenvernagelung betoniert .*

Für den Anschluß der Turbine an die Rohrleitung im Keller des bestehenden Bauwerkes, war eine Öffnung mit einer Breite von 5m und einer Höhe von 4 m erforderlich. Da diese Öffnung einen erheblichen Eingriff in das bestehende Bauwerk darstellt, mußte zur Sicherung der Lastabtragung eine Wandscheibe vorgesetzt werden.

Der Ausbruch erfolgte mit einer Kombination von Seilsäge und hydraulischem Spaltgerät. Die Diamant-Seilsäge ermöglichte die Schnitte entlang der äußeren Konturen der Ausbruchöffnung. Weiterhin diente sie einer Teilung des Blockes in Teilblöcke, die dann mit einem hydraulischen Spaltgerät weiter zerkleinert wurden.

Zur Rückführung des Wassers in die bestehende Auslaufbox wurden drei Durchbrüche 2 m x 1 m durch die 1 m dicke Außenwand ebenfalls im Seilsägeverfahren hergestellt.

## 6. Montageablauf

Nach Fertigstellen des Bauwerkes und Einbau der Krananlage erfolgte das Anpassen des Abzweigstützens bei gefülltem Wehra-Umleitungsstollen. Nach dem Entleeren des Stollens wurde das vorhandene Rohr aufgetrennt und unmittelbar mit den Schweißarbeiten begonnen. Dadurch konnte die dafür erforderliche Entleerzeit des Stollens minimiert werden.

Mit Rücksicht auf eine kostengünstige Krananlage und bauliche Einsparungen wurde der Generatorläufer vor Ort in den Stator eingefahren. Deshalb mußte der Generator vor der Turbine montiert werden. Zwischen Turbinenfundament und Turbinengehäuse wurde ein zusätzlicher demontierbarer Zwischenrahmen angeordnet, um den Rotor nach Ausbau des Turbinengehäuses und des Zwischenrahmens bei Bedarf wieder ausfahren zu können.

Im Vorfeld wurde auch die Variante mit einem abhebbaren Dach, Verzicht auf eine Krananlage und Montage des Maschinensatzes mit Hilfe eines Mobilkranes untersucht. Abgesehen von den betrieblichen Nachteilen wäre die Ausführung eines wasserdichten abhebbaren Daches und Verzicht auf eine Krananlage jedoch wesentlich teurer gewesen als deren Einbau.

## **7. Einbindung des Sperrenkraftwerkes in die Wehrdurchflußregulierung**

Die Turbine wird als weiteres Regulierorgan so in die Steuerung der Wehrdurchflußregulierung eingebunden, daß kleine und mittlere Zuflüsse durch die Turbine abgearbeitet werden. Bei Überschreitung des Turbinenschluckvermögens werden die weiteren Schieber in Betrieb genommen.

Die Stellgeschwindigkeiten des Turbinenleitapparates und der Absperrklappe wurden mit Rücksicht auf die maximal möglichen Verstellgeschwindigkeiten der bereits vorhandenen Regulierorgane so festgelegt, daß die Bedingung Zufluß = Abfluß auch bei Betriebsübergängen und Störungen stets eingehalten wird.

## **8. Zusammenfassung**

Das Sperrenkraftwerk am Wehradam stellt eine einzigartige Möglichkeit des wirtschaftlichen Ausbaus der Wasserkraft ohne zusätzliche Umweltbeeinträchtigungen dar.

Sowohl während des Baus als auch im Hinblick auf den späteren Betrieb konnten alle Belange der Wirtschaftlichkeit und der Umweltverträglichkeit ohne Zielkonflikt miteinander in Einklang gebracht werden.

Die üblicherweise vorhandenen Problempunkte ökologische Durchgängigkeit, Restwassernutzung, Ausleitungsstrecke und Beeinträchtigung der Unterlieger wurden durch den Neubau nicht berührt.

### **Anschrift der Verfasser:**

Dipl.-Ing. Gundo Klebsattel  
Schluchseewerk AG  
Rempartstr. 12 – 16  
79098 Freiburg

Dr.-Ing. Klaus Schneider  
Schluchseewerk AG  
In der Würze 14  
79837 Häusern

Dipl.-Ing. Dieter Wirth  
Ossberger GmbH + Co  
Otto-Rieder-Str. 7  
91781 Weissenburg