

Strom aus Trinkwassersystemen

Trinkwasserkraftwerke richtig geplant

Markus Hintermann, Niederdorf, Jean-Marc Chapallaz, Ste-Croix

Zusammenfassung

In der Schweiz besteht ein namhaftes Potential völlig umweltfreundlich nutzbarer Energie in Trinkwasserkraftwerken. Bei der Sanierung und Erweiterung von Wasserversorgungen sollte die energetische Nutzung jeweils untersucht und bei ökonomischer Tragbarkeit das Trinkwasserkraftwerk realisiert werden. Ohne Abstriche an der Zuverlässigkeit oder Einfachheit solcher Trinkwasserkraftwerke können diese kostengünstig erstellt werden. Eine professionelle Bearbeitung unter Berücksichtigung vielfältigster Belange ist jedoch wichtig, damit solche Anlagen nicht zu einem Störelement in der Wasserversorgung werden. Der Betrieb der Anlagen erfolgt vollautomatisch und verursacht nur geringe Betriebs- und Unterhaltskosten. Der vorliegende Artikel bietet in komprimierter, stark bebildeter Form einen Überblick über die wichtigsten technischen Belange von Trinkwasserkraftwerken. Er gibt jedoch auch Hinweise zu Umwelt- und Versicherungsfragen sowie zu Bewilligungsverfahren und Finanzierungsfragen.

Electricité produite dans les réseaux de distribution d'eau potable – Planification correcte des petites centrales hydro-électriques – Résumé

Les réseaux de distribution d'eau potable disposent d'un potentiel non négligeable pour la production d'électricité sans nuisances pour l'environnement.

L'exploitation de cette énergie devrait être évaluée lors d'assainissement ou d'extension d'un réseau de distribution d'eau, et à chaque fois que les conditions techniques et économiques s'y prêtent, une ou plusieurs petites centrales hydro-électriques devraient y être intégrées. Celles-ci peuvent être réalisées de manière simple et à un coût raisonnable sans perte de fiabilité.

Une approche professionnelle, tenant compte des multiples intérêts en jeu, est toutefois nécessaire pour éviter que la micro-centrale ne se transforme en un élément perturbateur de la distribution d'eau et de la défense incendie.

L'exploitation de telles installations est entièrement automatique et ne nécessite que des frais d'exploitation et d'entretien modestes.

L'article présente, sous forme condensée et avec de nombreuses illustrations, les aspects techniques les plus importants des petites centrales hydrauliques intégrées à des réseaux de distribution d'eau de boisson. Il donne également des informations sur les questions touchant à la sécurité d'approvisionnement, d'environnement, de qualité ainsi qu'aux procédures d'autorisations et aux questions de financement.

Electric Power from Drinking-Water Systems: Drinking-Water Power Plants Correctly Planned – Summary

In Switzerland exists a considerable potential of completely ecologically desirable utilisable energy from drinking-water power plants. During refurbishment and expansion work of water supplies the energetic utilisation should always be investigated and, if ecologically acceptable, the drinking-water power plant should be realised. Without curtailment of the reliability or simplicity of such drinking-water power plants, they can be realised at small cost. However, a professional treatment taking into consideration very diverse concerns, is very important, so that such facilities do not become a factor of interference of the water supply. The operation is fully automatic and causes only very small operational and maintenance costs. This article offers, in a condensed and much illustrated manner, a survey over the most important technical equipment of such drinking-water plants. It also gives advice concerning ecological and insurance questions as well as authorization processes and financial questions.

1. Einleitung

Die Wasserkraftnutzung in Kleinwasserkraftwerken gehört zu den umweltgerechten und ausgereiften Technologien zur Energieerzeugung. Neben der Reak-

tivierung und Erneuerung alter Kraftwerke bieten auch weniger verbreitete Methoden ein Nutzungspotential. Zu diesen *unkonventionelleren* Arten der Wasserkraftnutzung gehören die Energierückgewinnung in der Verfahrens-

technik sowie die Energieproduktion aus Abwassersystemen und mittels Turbinen in Trinkwassersystemen.

Neu ist jedoch die Idee nicht, mittels Klein- und Kleinstanlagen in Trinkwasserversorgungen elektrische Energie zu erzeugen. Bereits Anfang dieses Jahrhunderts hat es vereinzelte solcher Anlagen gegeben, damals vor allem für entlegene Bauernhöfe und Alpbetriebe. Grössere Anlagen wurden beispielsweise bereits 1918 in der Wasserversorgung Blattenheid BE oder 1913 in der Wasserversorgung Buchs SG installiert.

Nachdem sich das energiepolitische Umfeld in den vergangenen fünf Jahren – nach dem Kernkraftwerkmoratorium – stark verändert hat, wird auch der Nutzen der Energiegewinnung aus Trinkwasserversorgungen anders beurteilt. In den vergangenen zwei Jahren konnten bereits mehr als 20 neue Anlagen in Betrieb gesetzt werden. Dazu beigetragen hat u. a. die Tatsache, dass der für die Realisierung derartiger Anlagen verbundene Aufwand für Planungs- und administrative Arbeiten, wie Konzessionsverfahren, deutlich geringer ausfällt als bei konventionellen Kraftwerken an Fliessgewässern. Da zudem Trinkwasserkraftwerke meist nur in Kombination mit Erneuerungen und Erweiterungen der Wasserversorgung installiert werden, weisen sie auch meist eine höhere Rentabilität und einen deutlich einfacheren Betrieb auf als Kraftwerke an Fliessgewässern.

2. Generelle Nutzungsmöglichkeiten

Grundsätzlich gibt es zwei Möglichkeiten, wie das vorhandene Energiepotential in Trinkwassersystemen genutzt werden kann (*Abb. 1*). Sie können wie folgt umschrieben werden.

2.1 Ausnutzung der Höhendifferenz zwischen Quelfassung und Reservoir

In den Alpen, Voralpen und im Jura liegen die Quelfassungen oft hoch oben in den Bergen, die Versorgungssysteme jedoch im Tal. Der Wasserdruck, der aufgrund des Höhenunterschiedes zwischen der Fassung und dem Reservoir entsteht, wird in 90% aller Fälle durch Druckbrecherschächte vernichtet. Selten kommen auch Druckreduzierventile zum Einsatz. Werden diese *Druckbrecherschächte* überbrückt und wird die Zuleitung als Druckleitung betrieben, ist

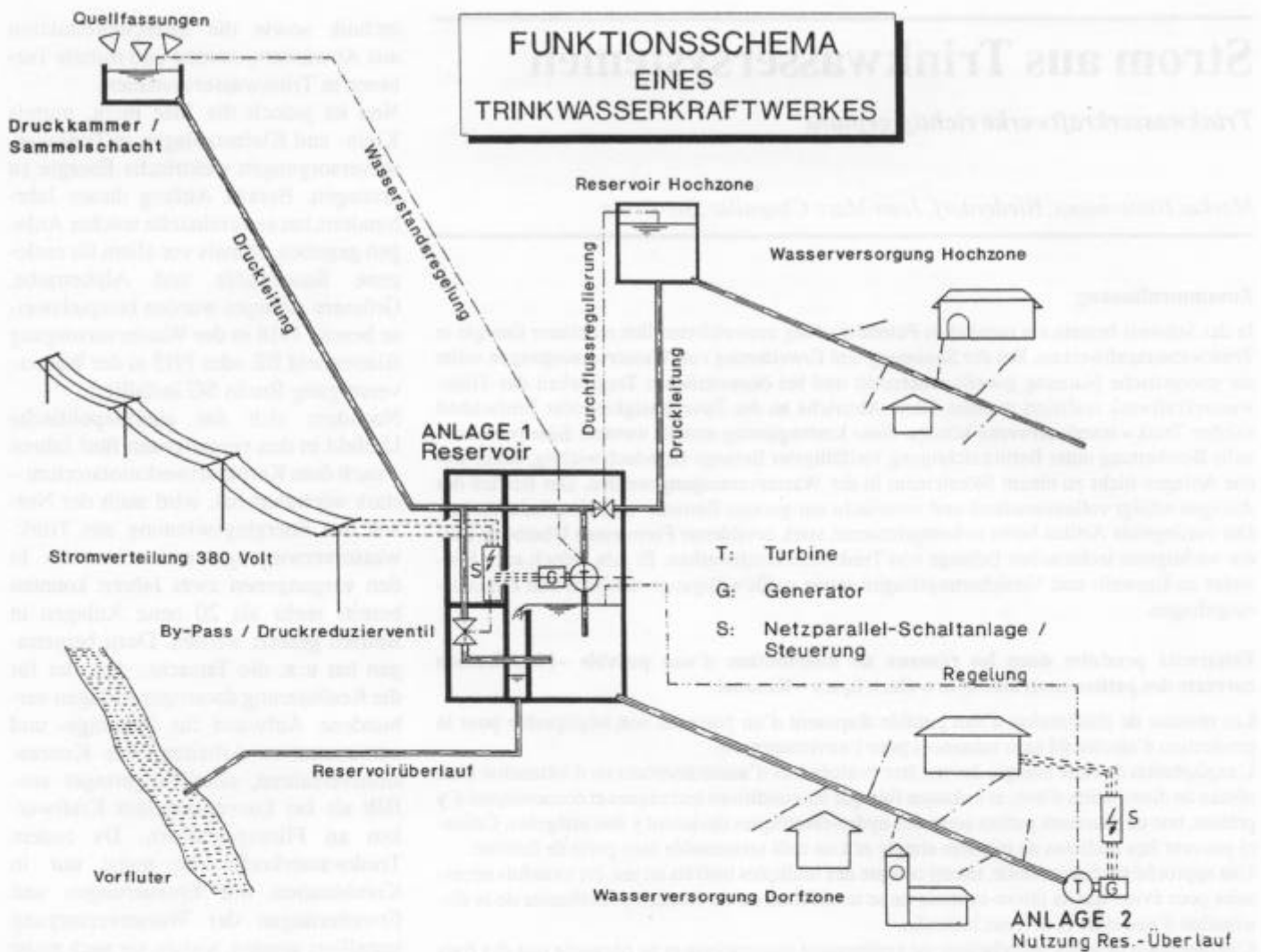


Abb. 1 Schematische Darstellung der Nutzungsmöglichkeiten zur Energiegewinnung aus Trinkwassersystemen. Bezeichnung der wichtigsten Anlagekomponenten. Anlage 1: Nutzung zwischen Quellfassungen und Reservoir resp. zwischen zwei Reservoiren. Anlage 2: Nutzung des Reservoirüberlaufes.

es möglich, diese Höhendifferenz zur Stromerzeugung auszunutzen. Druck und Wassermenge am Eintritt ins Reservoir ergeben eine hydraulische Leistung, die mittels Turbinen und Genera-

toren in Elektrizität umgewandelt werden kann. In städtischen Gebieten kann in ähnlicher Weise der Höhenunterschied zwischen zwei Reservoiren genutzt werden.

2.2 Ausnutzung des Wasserüberlaufes eines Reservoirs

Die Ergiebigkeit von Quellen in Gebieten, die sich weit weg von Ballungszentren

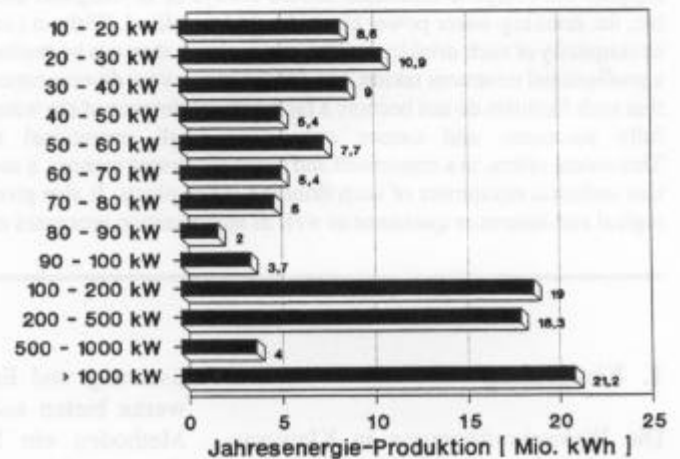
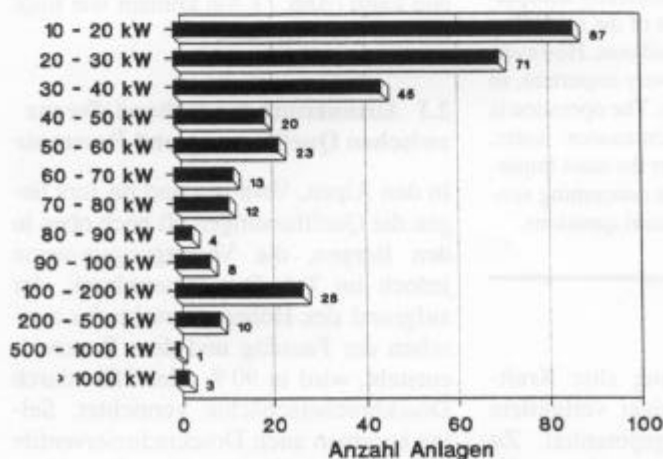


Abb. 2 Gesamtschweizerische Zahlen zum Energiepotential aus Trinkwasserversorgungen: Wie die Grafik zu den Leistungsgrößen zeigt (Grafik links), würden rund 75 % der 325 realisierbaren Anlagen eine installierbare Leistung von weniger als 60 kW aufweisen. Demgegenüber könnten 42 Anlagen mit einer Leistung von mehr als 100 kW rund 50 % der möglichen Jahresproduktion liefern (Grafik rechts).

tren befinden, übersteigt während der *grössten Zeit des Jahres* den Bedarf der lokalen Bevölkerung. Da die Quellen unter Berücksichtigung der Trockenzeitergiebigkeit gefasst werden, ergibt sich während vieler Monate ein Überfluss an Wasser. Dieser *Wasserüberfluss* kann zur Stromerzeugung verwendet werden. Die notwendige Höhendifferenz, die zur Stromerzeugung benötigt wird, kann durch den Bau einer *Druckleitung* ab Reservoirüberlauf erreicht werden. Viel kostengünstiger ist es jedoch, das bestehende Versorgungsnetz am Tiefpunkt, wo ein grosser Druck herrscht, anzuzapfen und dort mittels einer Kleinturbine zu nutzen.

3. Energiepotential in der Schweiz

Im Rahmen des *Aktionsprogrammes Diane* – eines Bestandteils von *Energie 2000* – wurde gesamtschweizerisch das nutzbare Energiepotential in den bestehenden Wasserversorgungen ermittelt. Im Vordergrund stand dabei die Nutzung des Höhenunterschiedes zwischen Quellen und Reservoir sowie zwischen zwei Reservoiren.

Die *Abb. 2* gibt einen Überblick über den Stand der Nutzung sowie das mögliche Energiepotential. Wie die Untersuchung von rund 1400 Gemeinden ergab, erzeugten Ende 1993 in der Schweiz 56 Anlagen die Energie mittels Turbinen in Trinkwassersystemen. Damit sind jedoch erst 25% des Potentials ausgeschöpft. Die Untersuchung des Energiepotentials hat ergeben, dass rund 325 solcher Anlagen gebaut werden könnten. Damit liessen sich rund 120 bis 160 Mio. kWh umweltfreundlicher Strom erzeugen, was die Stromversorgung von 25 000 Haushaltungen sichern könnte.

Da es sich mehrheitlich um *Kleinanlagen* handelt, ist absehbar, dass die Installation einer Kleinstturbine in die Wasserversorgung nur in den wenigsten Fällen aufgrund der Energieproduktion erfolgen wird. Der Bau von Trinkwasserkraftwerken lohnt sich meistens nur dann, wenn bestehende Wasserversorgungen zu erneuern sind oder neue, ergiebige Quellen erschlossen werden können.

4. Technische Aspekte

Auch wenn im Vergleich mit einem Kleinkraftwerk an einem Fließgewässer

einige administrative Schritte (z. B. Konzessionsverfahren) sowie technische Aspekte einfacher sind oder gar wegfallen, sollten die Probleme, die bei der Planung und Realisierung eines Trinkwasserkraftwerkes zu berücksichtigen sind, nicht unterschätzt werden.

Es darf nie vergessen werden, dass die Versorgung mit Wasser für den menschlichen Verbrauch und als Feuerlöschmittel die höchste Priorität behält. Die produzierte Elektrizität ist als sogenanntes Abfallprodukt einer Druckverrichtung im Wassernetz zu verstehen.

85% aller möglichen Trinkwasserkraftwerke weisen eine Leistung von weniger als 100 kW auf. Es handelt sich somit um Kleinanlagen, welche möglichst einfach, standardisiert und somit kostengünstig zu konzipieren sind. Es muss von vielen bestehenden Elementen der Wasserversorgung profitiert werden können. Die Ohnehinkosten für Leitungsmaterial, Quelfassungen, Sammelschächte sowie Reservoir sind im allgemeinen der Kostenstelle Wasserversorgung zu belasten.

Dank einer kompakten Bauweise können die Anlagen auf engstem Raum kostengünstig in bestehende Reservoirkammern integriert werden (*Abb. 3*). Eine seriöse Planung gewährleistet, dass derartige Anlagen nicht zu einer Belastung des Betreibers und zu einem Störelement in der Wasserversorgung werden.

4.1 Anlagekomponenten

Die einzelnen Anlagekomponenten sind in *Abb. 1* dargestellt. Nachfolgend wird auf wichtige Aspekte näher eingegangen.

4.1.1 Druckkammer, Sammelschacht

Die Druckkammer ist ein Becken oder kleines Reservoir, das sich am oberen Endpunkt der Druckleitung befindet. Es gewährleistet, dass die Leitung immer voll mit Wasser bleibt. Die Druckkammer ist meist auch der Sammelschacht, wo die verschiedenen Quellen zusammengeführt werden, die zur Turbinierung verwendet werden. Der Sammelschacht hat meist nur eine geringe Grösse, so dass die Turbine auf eine Konstanthaltung des Wasserstandes geregelt wird. Die minimale Grösse des Druck- oder Sammelschachtes sollte den 100fachen Wert der maximalen Schluckmenge der Turbine nicht unterschreiten.

4.1.2 Zuleitung, Druckleitung

Es ist oft möglich, als Druckleitung die zwischen Quellen und Reservoir bestehende Zuleitung zu verwenden, was zu beträchtlichen finanziellen Einsparungen führt. Es muss aber gesichert werden, dass diese Leitung dem vollen Druck, inklusive Reserve für Druckstösse, widersteht. Dies ist besonders bei älteren Leitungen mit Korrosionsangriff

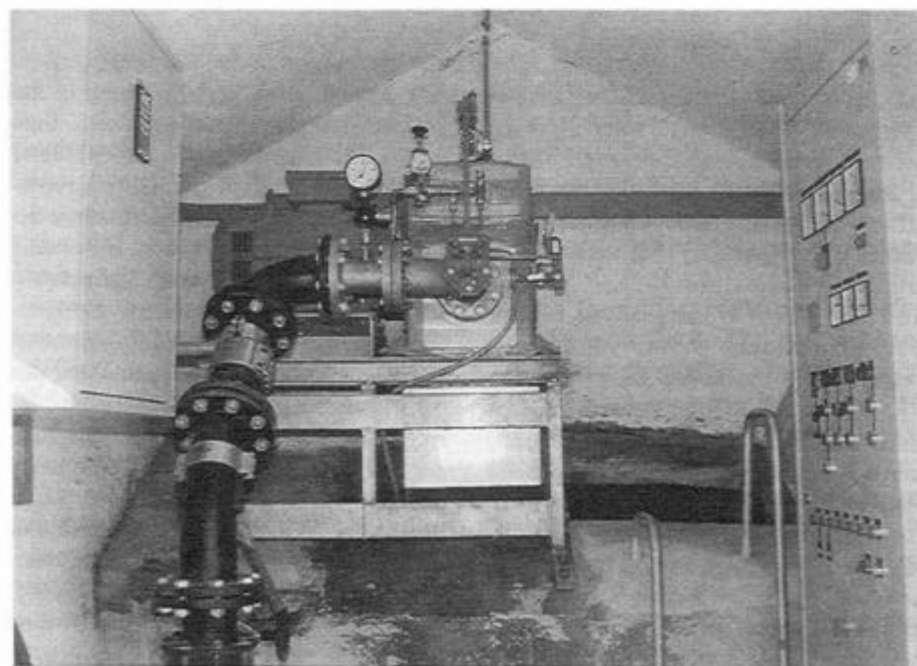


Abb. 3 Kompakte, standardisierte Anlage (Pelton-turbine, 20 kW, in horizontaler Bauweise), welche ohne zusätzliche Bauten auf engstem Raum in die 40jährige Schieberkammer des Reservoirs integriert werden konnte.

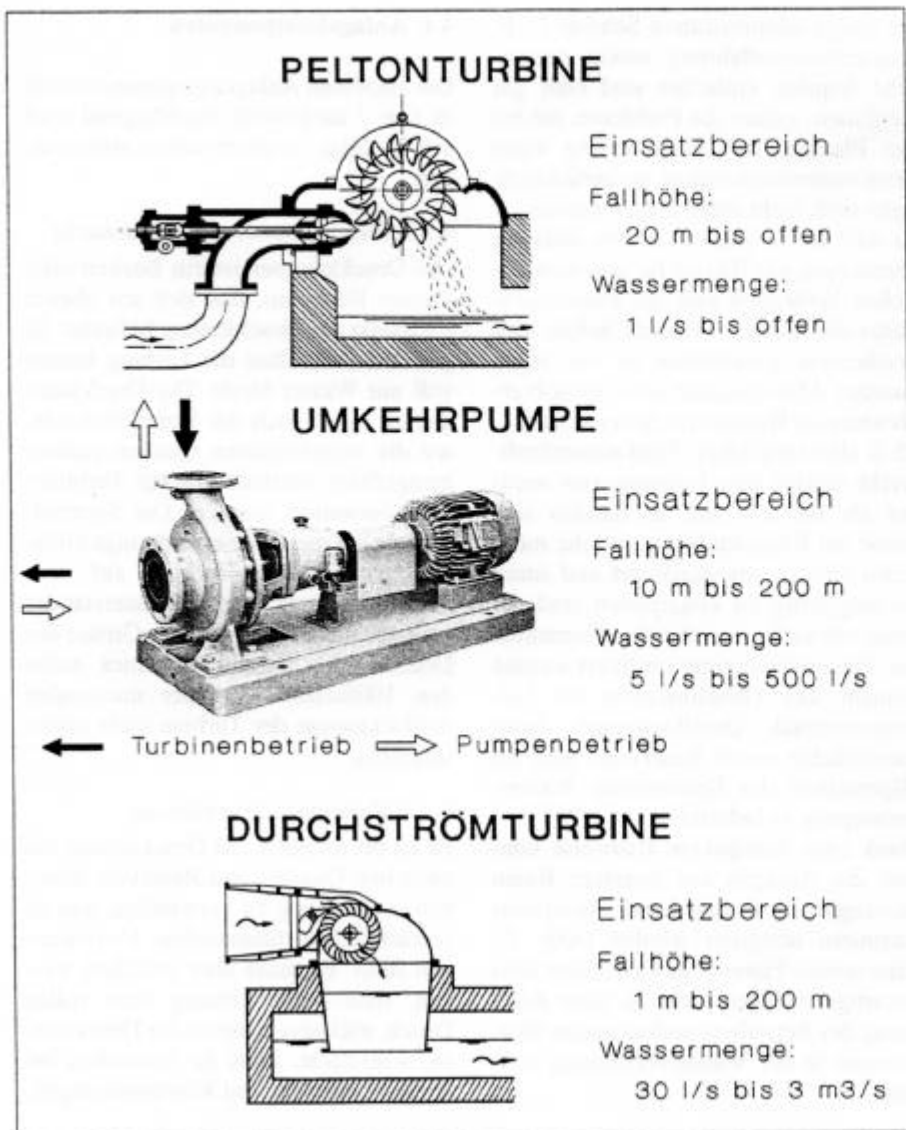


Abb. 4 Funktionsprinzip und Einsatzbereich der drei häufigsten Turbinentypen.

fen sowie wenn Druckbrecherschächte überbrückt werden, zu prüfen. Um zu vermeiden, dass eine ungeeignete Turbine ausgewählt wird, sind die *Druckverluste* bei der zur Abdeckung der Verbraucher notwendigen Wassermenge zu prüfen.

Im Hinblick auf *kostengünstige* Lösungen kommt der *Materialwahl* der Druckleitung besondere Bedeutung zu. Da Trinkwasserleitungen selten über einen Rohrdurchmesser von 200 bis 250 mm hinausgehen, kann richtungweisend festgehalten werden, dass bis zu einem *Druckniveau* von rund 20 bar Kunststoffleitungen eingesetzt werden können. Bei höheren Drücken empfiehlt sich der Einbau von Gussrohren. Durch die Wahl der entsprechenden Rohrklasse sowie geeigneter Zusatzmassnahmen sind dabei Drücke bis 100 bar möglich. Für Drücke ab ca. 80 bar empfiehlt es

sich jedoch, auch Stahllösungen in die Untersuchungen einzubeziehen. Eine seriöse Planung der neuen Druckleitung ist auch hinsichtlich der Dimensionierung von Widerlagern zur Aufnahme der Krümmkräfte unerlässlich. Besonders bei hohen Drücken muss die Längskraftschlüssigkeit durch geeignete Schubsicherungen und Betonriegel garantiert sein. Mitentscheidend für die Wahl des Rohrmaterials sind jedoch auch die Bodenbeschaffenheit, die Zugänglichkeit der Baustelle und die äusseren Belastungen.

Besondere Beachtung muss auch der *Druckstossproblematik* geschenkt werden. Die Reguliergeschwindigkeit der Turbine oder der Abschluss- und Bypass-Organen ist den jeweiligen Bedingungen anzupassen. Speziell bei sehr langen Druckleitungen kann ein zu schnelles Schliessen oder Öffnen der

Durchflussorgane zu Druckschwankungen bis zu einem Mehrfachen des Betriebsdruckes führen. Da die Anlagen meist nicht für derartige Fälle ausgelegt sind, können Schäden entstehen.

4.1.3 Turbinentypen und deren Einsatzbereiche

Es werden mehrheitlich drei Typen von hydraulischen Maschinen für Trinkwasserkraftwerke in Betracht gezogen (Abb. 4):

- A) Peltonturbinen
- B) Pumpen im Umkehrbetrieb
- C) Durchströmturbinen

Andere Turbinenarten, wie Francisturbinen, werden aus Kostengründen, aber auch aufgrund der Auslegedaten selten installiert.

Die Konstruktion der Turbinen muss so gestaltet werden, dass das Wasser nicht durch das Eindringen von Schmutzteilen oder Schmiermitteln verschmutzt werden kann. Zur Konstruktion der Maschinenteile werden die durch den SVGW für Trinkwasser zugelassenen Materialien verwendet. Meistens wird *rostfreier* Stahl verwendet, aber grundsätzlich sind die gleichen Werkstoffe wie beim Pumpen-, Rohrleitungs- und Armaturenbau zulässig (Guss, Stahl, Bronze, Kunststoffe usw.). Bei grösseren Anlagen kommen für das Turbinengehäuse normale Stahlsorten oder Gussarten zur Anwendung, wobei diese dann durch trinkwasserzulässige Korrosionsschutzanstriche zu schützen sind.



Abb. 5 Peltonturbinen in vertikaler Bauweise (Minianlage mit 800 Watt).

Pelton-turbinen

Die Pelton-turbine ist die meistverwendete Turbinenart in Berggebieten mit grösseren Gefällen und relativ kleinen Wassermengen. Es handelt sich um eine *Freistrahlturbine*, deren Leistung durch einen Wasserstrahl erzeugt wird, der auf ein Schaufelrad auftrifft. Die Turbinenwelle kann dabei horizontal (*Abb. 3*) oder vertikal plaziert sein (*Abb. 5*). Pelton-turbinen haben zudem die Eigenschaft, dass sie Zuflussschwankungen zwischen 25 und 100% bei einem guten Wirkungsgrad verarbeiten können.

Die Konstruktion der Pelton-turbine ist relativ einfach. Es müssen jedoch zum Trinkwasserbetrieb einige Anpassungen getroffen werden, um jegliche Verschmutzung des Wassers zu vermeiden. Diesbezüglich besonders vorteilhaft erweisen sich Turbinen, bei denen das Laufrad fliegend auf der verlängerten Generatorwelle montiert ist. Dadurch entfällt die Lagergruppe für die Turbine, und die Zahl der zu unterhaltenden Elemente verringert sich (*Abb. 6*).

Die *Wassermengenregulierung* erfolgt durch eine Düse, die mit einer verstellbaren Nadel ausgerüstet ist. Bei kleineren Leistungen und geringerem Druck wird die Nadel mittels eines Elektroantriebs oder mittels Wasserdruckzylindern verstellt, im Gegensatz zu den grösseren Maschinen, wo Ölhydraulikaggregate dazu verwendet werden. Vorteil des Elektroantriebs oder des Wasserdruckzylinders ist das Wegfallen des Mediums Öl, das das Wasser verschmutzen kann. Bei Hydraulikaggregaten ist deshalb auf eine kompakte, geschlossene Bauweise zu achten (*Abb. 7*).

Um *Druckstösse* in der Zuleitung zu vermeiden, sind die Pelton-turbinen mit einem Strahlableiter, der den Strahl im Notfall, z. B. bei Netzausfall, vom Rad entfernt, ausgerüstet. Dadurch wird die Turbine ausser Betrieb gesetzt, ohne die Düse vorgängig schliessen zu müssen. Die Düse kann anschliessend in der gewünschten Schliesszeit langsam geschlossen werden oder offen bleiben, damit das Wasser ins Reservoir geführt wird, ohne einen Bypass in Betrieb zu setzen. Der Strahlableiter wird im allgemeinen ohne Hilfsenergie (wie Batterie) betätigt, sondern mit einem Gewicht oder einer Spannfeder, die bei Stromausfall automatisch gelöst wird. Es handelt sich um ein einfaches und zuverlässiges Sicherheitsorgan.

Umkehrpumpe

Eine Umkehrpumpe ist eine Normpumpe, die rückwärts betrieben wird.

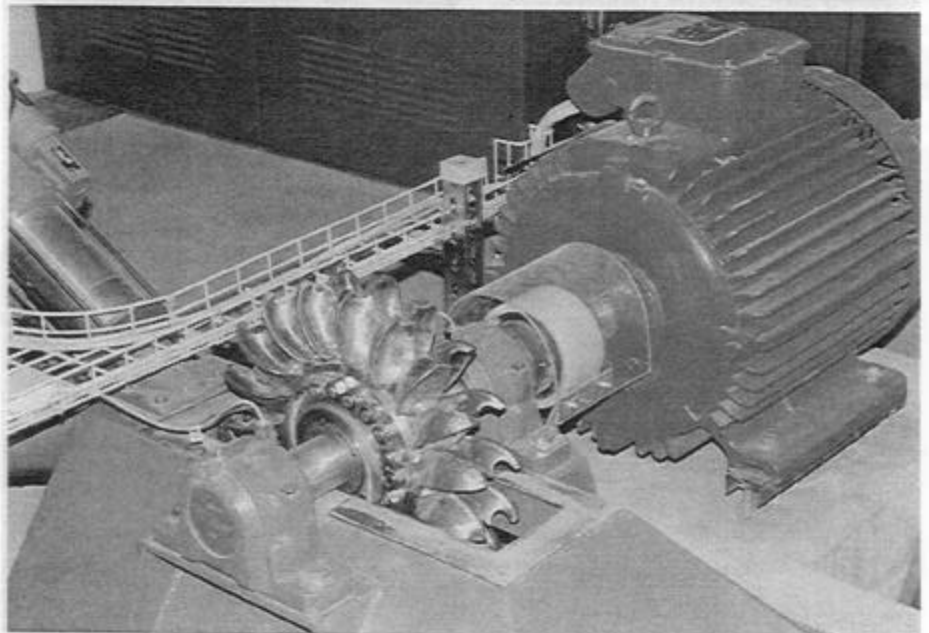
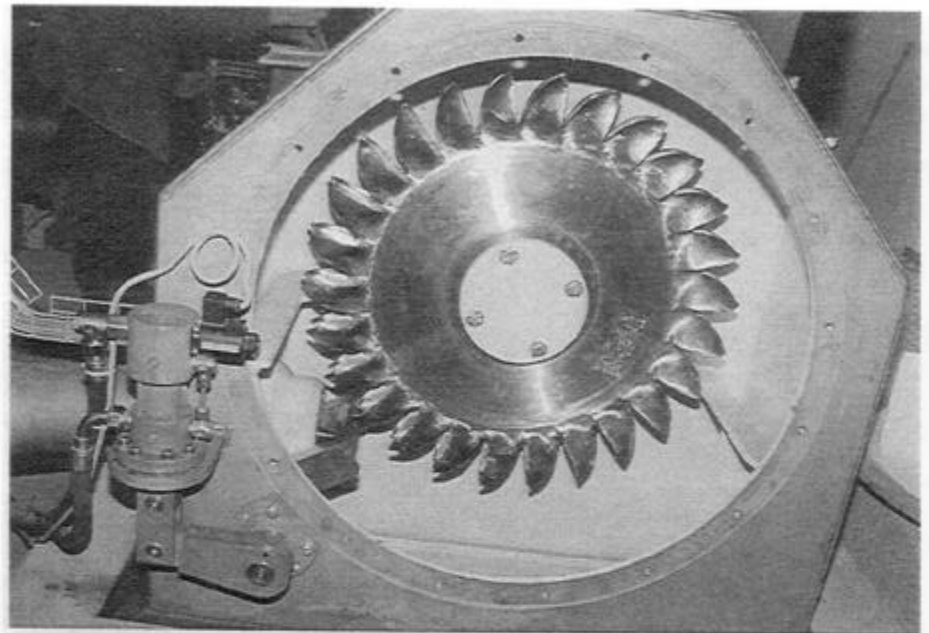


Abb. 6 Bild oben: Laufrad fliegend auf der Generatorwelle montiert. Bild unten: Anlage Visp (45 kW) mit separater Lagerung der Turbinenwelle, welche über eine Kupplung mit der Generatorwelle verbunden ist.

Die Durchflussrichtung sowie die Drehrichtung sind im Vergleich zu denjenigen einer normalen Pumpe umgekehrt (*Abb. 8*). Es muss aber beachtet werden, dass der Betriebspunkt einer rückwärtslaufenden Pumpe verschieden vom Betriebspunkt als Pumpe ist. Die Druckdifferenz (ca. 1,5- bis 2,0fach) sowie der Durchfluss (ca. 1,2- bis 1,5fach) sind im Turbinenbetrieb höher als im Pumpenbetrieb bei gleicher Drehzahl. Die Auswahl der geeigneten Pumpe als Turbine für eine bestimmte Anlage bleibt Sache des Spezialisten, eine Abnahmemessung der Maschine im Werk des Herstellers wird empfohlen.

Es handelt sich um eine kostengünstige Lösung, da der Preis einer Pumpe weniger als der Hälfte des Preises einer Pelton-turbine entspricht. Der Anwendungsbereich dieser Maschinenart reicht bezüglich Betriebsdruck von 10 bis 200 m. Der Einsatz ist jedoch durch folgende Eigenschaften begrenzt:

- Die Umkehrpumpe arbeitet nur bei konstantem Durchfluss optimal.
- Ihr Wirkungsgrad ist im allgemeinen niedriger als derjenige einer zweckgebauten Turbine, insbesondere einer Pelton-turbine.
- Ihre mechanische Konstruktion muss unter Berücksichtigung härterer Betriebsverhältnisse (höhere Lei-

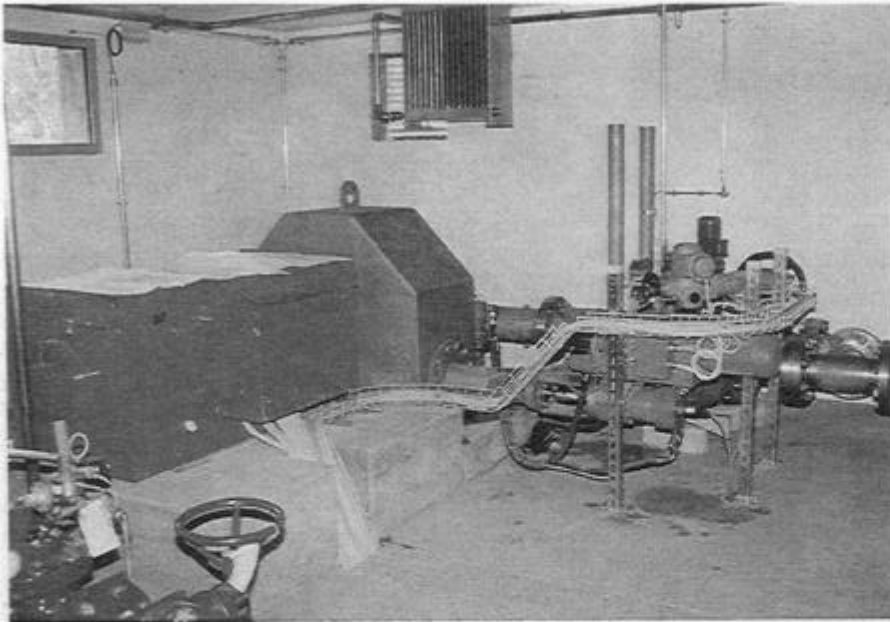


Abb.7 Anlage Baltschieder (300 kW) mit einem kompakten Hydraulikaggregat zum Antrieb der Düsenadel und des Strahlableiters. Bei einer Störung des Aggregates werden die Abstellfunktionen über einen zusätzlichen Druckspeicher sichergestellt.

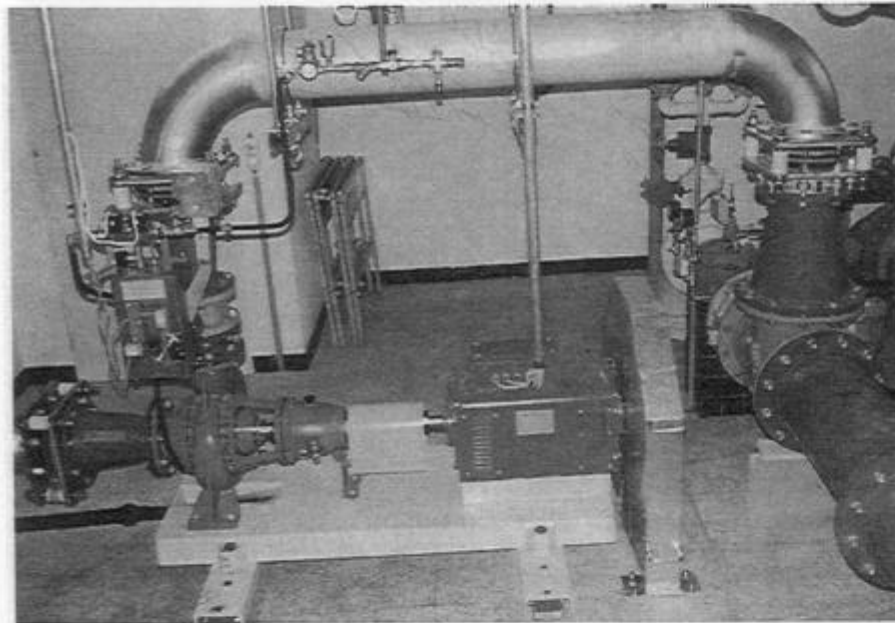


Abb.8 Umkehrpumpe als Turbine (13 kW) in der Wasserversorgung der Gemeinde Morges.

stung als Turbine, Lauf bei doppelter Drehzahl im Leerlauf oder bei Netzausfall) geprüft werden.

- Die Maschine kann bei voller Entlastung (zum Beispiel Netzausfall) starke Druckstöße in die Zuleitung erzeugen.

Aus der Sicht der Beeinträchtigung der Wasserqualität stellen Umkehrpumpen kein Problem dar, da es sich um die gleichen Maschinen handelt, die zur Förderung von Trinkwasser vorgesehen werden.

Durchströmturbinen

Wie der Name schon sagt, durchströmt bei diesem Turbinentyp der eintreffende Wasserstrahl das walzenförmige Turbinenrad und trifft dabei beim Austritt aus dem Turbinenrad ein zweites Mal auf die Laufradschaufeln. Bezüglich des Betriebsverhaltens sind sich diese beiden Turbinentypen ähnlich. Abb. 6 zeigt, dass dieser Turbinentyp bereits bei sehr geringen Fallhöhen einsetzbar ist. Ihre Anwendung findet die Durchströmturbine in Nieder- und Mitteldruckanlagen.

Die Durchflussmenge sollte jedoch 30 l/s nicht unterschreiten.

Kostenmässig sind diese Turbinen günstiger als Pelton-turbinen; weisen jedoch einen geringeren Wirkungsgrad auf. Da sich einerseits der kostenmässige Vorteil sowie der Nachteil des tieferen Wirkungsgrades vielfach betriebswirtschaftlich neutralisieren, andererseits dieser Turbinentyp nur bei verhältnismässig grossen Wassermengen, welche in der Trinkwasserversorgung sehr selten sind, zum Einsatz kommt, ist die Durchströmturbine in Trinkwasserkraftwerken nicht sehr verbreitet.

4.1.4 Generatoren

In den meisten Fällen werden Trinkwasserkraftwerke parallel zum öffentlichen Netz betrieben. Asynchrongeneratoren sind deshalb die am meisten installierten elektrischen Maschinen. Diese Maschinenart, im Prinzip ein Asynchronmotor mit angepassten elektrischen Eigenschaften, ist in ihrer Konstruktionsart sowie in bezug auf ihre Steuerung die einfachste und zuverlässigste Lösung bei Trinkwasserkraftwerken. Es empfiehlt sich jedoch, auch für den Netzparallelbetrieb ab ca. 100 kW Leistung den Einsatz eines Synchrongenerators zu prüfen. Bei Asynchrongeneratoren sind Bildleistungskompensatoren erforderlich, welche beim Synchrongenerator weggelassen werden können. Die Erfahrung hat gezeigt, dass sich die Kosten in etwa ab einer Leistung von 100 kW gegenseitig aufzuheben vermögen. Es kann zudem festgestellt werden, dass vielfach Asynchronmotoren, die als Generatoren betrieben werden, angeboten werden. Asynchronmotoren, die als Generatoren betrieben werden, weisen einen ungünstigeren Wirkungsgrad auf als Synchrongeneratoren. Hingegen sind zweckgebaute Asynchrongeneratoren nur unwesentlich teurer und bezüglich Wirkungsgrad den Synchrongeneratoren ebenbürtig.

4.1.5 Steuerung und Überwachung

Trinkwasserkraftwerke werden im Prinzip wie Flusskraftwerke betrieben. Das gesamte verfügbare Wasser muss durch die Turbine, deren Öffnung in dieser Beziehung gesteuert wird. Zu diesem Zweck wird eine Wasserstandsregelung eingesetzt, um die Wassermenge, die durch die Turbine fliesst, so zu steuern, dass der Wasserpegel in der Druckkammer praktisch konstant bleibt. So entspricht die Durchflussmenge durch die Maschine der Quellschüttung. Die Si-

gnalübertragung zwischen Turbinenraum und Druckkammer kann entweder über ein Signalkabel, das parallel zur Druckleitung verlegt wird, über das öffentliche Telefonnetz oder, wenn beide Lösungen nicht realisierbar sind, über Funk erfolgen.

Die Stromerzeugung ist unabhängig vom Bedarf erforderlich, da in den meisten Fällen keine Speicherung möglich ist. Aus diesem Grunde sowie zur Sicherung einer ausreichenden Stromqualität ist der Betrieb derartiger Kleinwasserkraftwerke nur im *Verbundbetrieb* mit dem lokalen Elektrizitätswerk sinnvoll. Trinkwasserkraftwerke werden deshalb im allgemeinen für den Netzparallelbetrieb konzipiert. Die Anlage muss so ausgerüstet sein, dass sie bei einem Netzausfall unverzüglich vom Netz getrennt wird. Liefert das öffentliche Verteilnetz wieder Strom, so startet die Anlage *vollautomatisch* nach einem speziell vorgegebenen Ablauf. Trinkwasserkraftwerke werden somit automatisch mit minimalem menschlichem Eingriff betrieben. Störungen sind deshalb dem

Betriebspersonal über das Telefonnetz (Telealarm) oder andere Gemeindemittel zu melden. Die Steuerung sollte jedoch auch einen echten Handbetrieb der Anlage

zulassen. Damit können Funktionsstörungen (wie zum Beispiel ein Ausfall der Wasserstandserfassung) bis zu deren Behebung ohne nennenswerte Betriebsunterbrüche überbrückt werden. Bei einem Handbetrieb sind selbstverständlich alle netzseitigen Schutzvorkehrungen zu garantieren (Abb. 9).

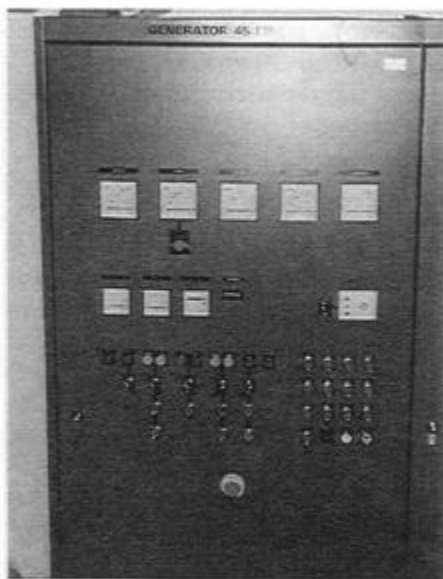


Abb. 9 Kompakter Steuerschrank mit Netzparallelschaltanlage für ein Kraftwerk mit 45 kW Leistung.

4.1.6 Netzanschluss

Die erzeugte Generatorspannung misst im allgemeinen bei Kleinkraftwerken 400 Volt und kann somit direkt ins *Niederspannungs-Verteilnetz* des lokalen Elektrizitätswerkes eingespeisen werden. Der Netzanschluss hat jedoch auch den Bedürfnissen und Vorschriften des lokalen Elektrizitätswerkes zu entsprechen. Übergabepunkt und Spannung sind gemeinsam mit dem EW festzulegen. Die zu wählende Transportspannung hängt zudem von der Leitungslänge bis zum Übergabepunkt ab. Je nach Länge der Leitung ist zu Beginn und am Übergabepunkt ein Trafo mit den entsprechenden Schutzvorkehrungen vorzusehen.

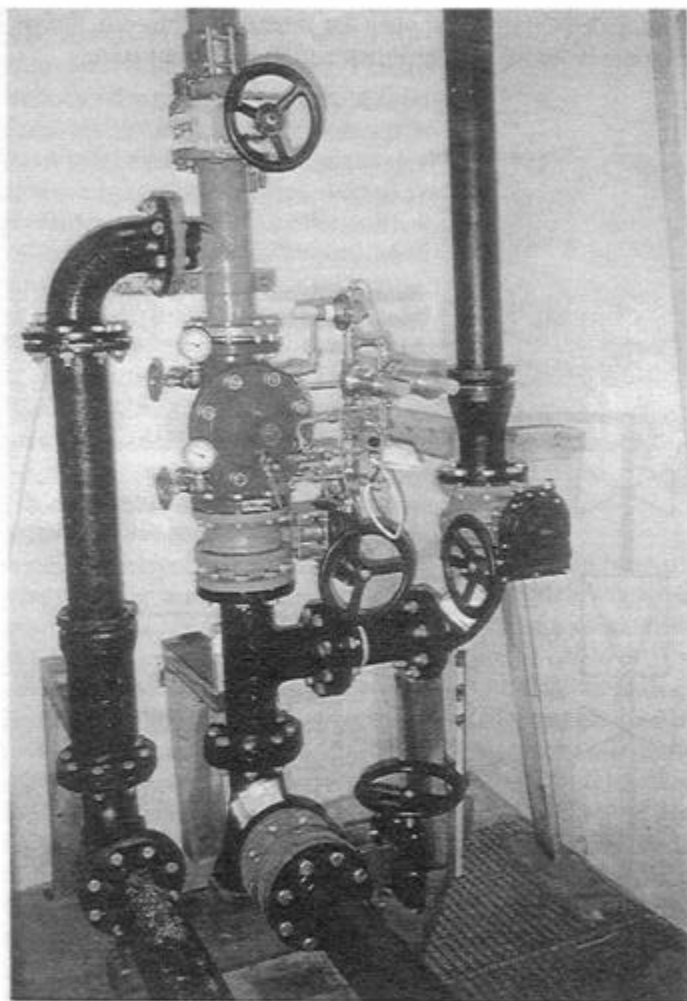


Abb. 10 Hydraulisches Druckreduzierventil, eingebaut in der bestehenden Reservoirzuleitung, welche nun als Bypass verwendet wird.

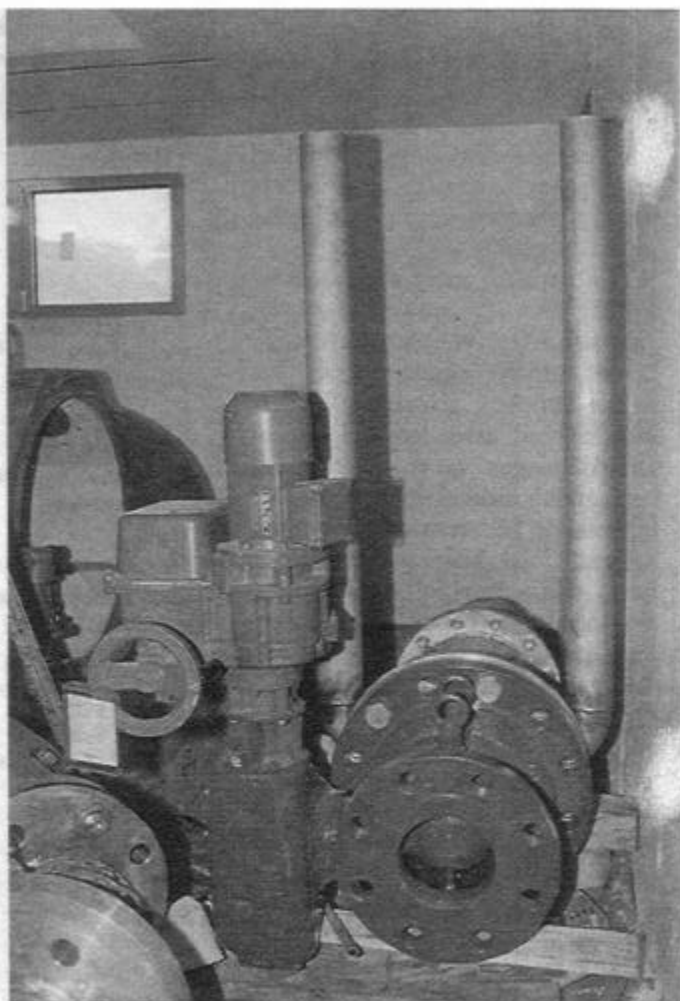


Abb. 11 Kegelstrahlschieber (deutlich sind die Belüftungsrohre sekundärseitig zu sehen).

4.1.7 Versorgungssicherheit

Die Wasserversorgung und die Gewährleistung der Feuerlöschsicherheit haben immer Priorität über die Stromerzeugung. Bei Netzausfall, Maschinenstörungen und Unterhaltsarbeiten darf der Wasserdurchfluss nicht unterbrochen werden. Dies wird durch die Installation eines *Bypass-Systems* gewährleistet. Diese Bypass-Systeme müssen nicht nur den freien Durchfluss ins Unterwasser gewährleisten, sondern sie müssen mit geeigneten Armaturen zur Druckvernichtung ausgestattet sein. Druckreduziereinrichtungen drängen sich ab ca. 10 bar Leitungsdruck auf. Als *Druckreduziermöglichkeiten* kommen in Frage:

- Wasserhydraulisch betätigte Regelventile, welche elektromagnetisch betrieben werden und in stromlosem Zustand den Durchfluss mit Druckreduzierung ermöglichen. Diese kostengünstige Lösung gewährleistet sekundär der Armatur in jedem Betriebszustand den gewünschten Druck. Primärseitig ist jedoch ein Leerlaufen der Druckleitung bis auf einen einstellbaren Minimaldruck nicht zu verhindern. *Abb. 10* zeigt den Einbau eines derartigen Ventils im Bypass-System. Derartige Ventile wurden in den 30er Jahren entwickelt und werden heute zuhauf in Wasserversorgungen als Druckreduzierstationen eingesetzt.
- Als optimale, aber auch teurere Lösung kann der Einbau eines *Kegelstrahlschiebers* angesehen werden. Diese Armatur empfiehlt sich bei hohen Drücken, grösseren Wassermengen und besonders bei langen Druckleitungen, wo eine Entleerung der Leitung nicht erwünscht ist. Der eintretende Wasserstrahl wird derart zerstäubt und gleichzeitig belüftet, dass sekundärseitig das Wasser drucklos in die Toskammer der Turbine zurückfliessen kann (*Abb. 11*). Die Armatur ist wasserstandsabhängig regelbar, wobei die Wasserstandserfassung der Turbine automatisch auf die Durchflussregelung des Kegelstrahlschiebers umgeschaltet werden kann. Öffnungs- und Schliesszeiten der Armatur müssen denjenigen der Turbine entsprechen. Diese Armatur benötigt zum Antrieb eine elektrische Hilfsenergiequelle, welche am besten über die 24-Volt-Batterie-Versorgung der Anlage sichergestellt wird.

Bei Pelton-turbinen ist auch ein Durchfluss und somit eine Druckvernichtung über den Strahlblenker möglich, wobei man auch hier wegen Unterhaltsarbeiten an der Maschine nicht auf einen Bypass verzichten sollte.

Die *Abb. 12* zeigt zusammenfassend die erforderlichen Armaturen, welche in einem Trinkwasserkraftwerk vorzusehen sind.

4.2 Abnahme der Anlagen und Garantien

Die Rentabilität eines Kleinkraftwerkes ist auch vom *Wirkungsgrad* der Maschinen (Turbine, Generator) abhängig. Bei einer bestimmten Investition wird die Rentabilität durch einen effektiven Wirkungsgrad, der niedriger ist als der garantierte, gefährdet. Kleinerer Wirkungsgrad bedeutet weniger produzierte kWh bei gleichbleibender Investition. Diese Tatsache hat auch bei Anlagen kleinerer Leistung ihre Gültigkeit. Die Wirkungsgrade sind deshalb vom Turbinen- und Generatorlieferanten zu garantieren.

Es ist deshalb sehr wichtig, den Wirkungsgrad der Anlage bei der Inbetriebnahme kontrollieren zu können. Zu die-

sem Zweck kann der Planungsingenieur im Rahmen seines Projektes den Einbau von *Messeinrichtungen* vorsehen, die es erlauben, die Anlage gemäss VSE-Richtlinien für Turbinenmessungen abzunehmen. Der Druck kann mit kalibrierten Manometern, die Wassermenge mittels geeichter Überfallmessung oder Wasserzählern und die elektrische Leistung mittels EW-Zähler gemessen werden. Dies sind alles Messgeräte, die keine fühlbaren Mehrkosten verursachen. Es wird empfohlen, den Generator beim Hersteller auf dem Prüfstand messen zu lassen. So kann der Turbinenwirkungsgrad aus diesem Ergebnis und dem bei der Abnahme gemessenen Gesamtwirkungsgrad ermittelt werden.

Bei *Inbetriebnahme* sollten auch die verschiedenen möglichen Störungen und Betriebszustände simuliert werden, um die Zuverlässigkeit der Sicherheitseinrichtungen zu prüfen. Dies ist besonders wichtig, da später die Anlage ohne menschliche Überwachung betrieben wird. Es wird empfohlen, die *Garantiezeiten* für die elektromechanische Ausrüstung auf 2 Jahre festzulegen. Ebenso ist nach der Inbetriebnahme ein 30tägiger Probebetrieb zu vereinbaren.

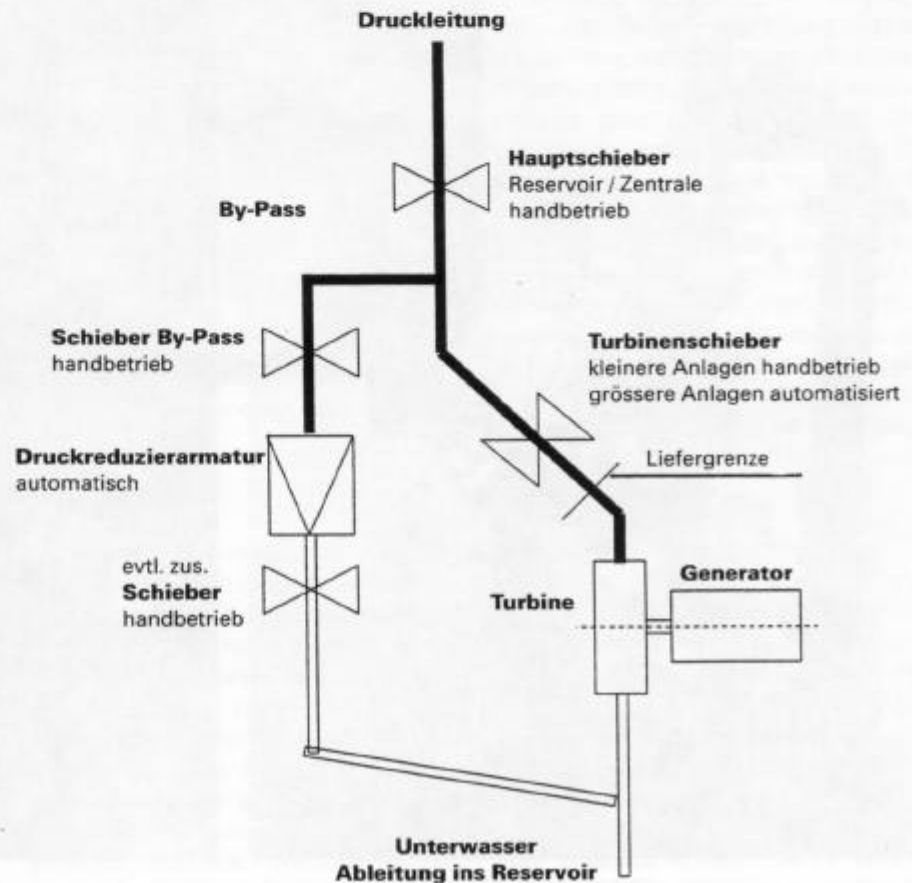


Abb. 12 Schematische Darstellung der erforderlichen Armaturen eines Trinkwasserkraftwerkes.

4.3 Einige in der Praxis festgestellte Planungs- und Ausführungsmängel

Leider ist die Ansicht noch immer weit verbreitet, in Kleinwasserkraftwerken werde eine Technologie von gestern angewendet und jeder, der im entferntesten etwas mit Maschinen- und Wasserbau zu tun habe, könne diese Technologie auch handhaben.

Die nachfolgenden Bemerkungen sollen mithelfen, einige in der Praxis festgestellte Planungs- und Ausführungsmängel künftig vermeiden zu helfen:

- Überdimensionieren der Turbine gegenüber der effektiv verfügbaren Wassermenge. Die Maschine läuft dann öfter im Teillastbereich, wo der Wirkungsgrad ungünstiger ist. Vorbeugende Massnahme: Wassermenge über eine genügend lange Periode messen (soweit möglich über mehrere Jahre).
- Zuleitung zu knapp bemessen: dies führt zu hohen Druckverlusten, der Druck schwankt stark vor der Turbine, die bei ungünstigem Wirkungsgrad betrieben wird.
- Der Lieferant der Maschinen garantiert zu hohe Wirkungsgrade, um den Auftrag zu bekommen. Es entstehen dann Konflikte bei der Inbetriebnahme, wenn die Garantiebedingungen und die Abnahmemessungen im voraus nicht klar definiert sind.
- Wegen unzureichender Analyse des Druckstossphänomens während der Planung treten hohe Druckstösse auf. Speziell zu beachten sind dabei Umkehrpumpen und andere Komponenten wie Ventile.
- Komplexe und aufwendige technische Lösungen, zum Beispiel bei der Steuerung (SPS), was den Einsatz auswärtiger Spezialisten bei Störungen und Revisionen erfordert. Dies führt zur Erhöhung der Betriebs- und Unterhaltskosten.
- Das Problem einer Zwangslüftung der Zentrale bei grösserer Anlage wird unterschätzt, was zu einem Wärmestau und einer Überhitzung des Generators führen kann.
- Dem, infolge der meist hochtourigen Maschinen, entstehenden Lärm wird zu wenig Beachtung geschenkt.
- In Unkenntnis der auf dem Markt vorhandenen Produkte und Lieferanten werden unnötig teure sowie komplizierte Installationen und Massnahmen vorgesehen (Abb. 13).
- Die Möglichkeiten, Eigenleistungen zu erbringen, werden falsch einge-

schätzt, was zu Verzögerungen bei der Inbetriebnahme und damit zu Einnahmeverlusten führen kann.

Es gilt der Grundsatz:

Zuverlässigkeit und Einfachheit haben Priorität bei Trinkwasserkraftwerken. Diese müssen ohne direkte menschliche Überwachung betrieben und durch nichtspezialisiertes Personal betreut werden können.

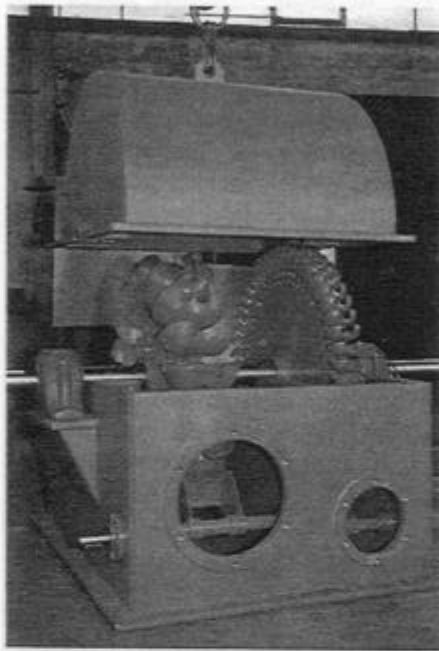


Abb. 13 Zweirädrige Pelton-turbine, welche in der Lage ist, zwei Zuflüsse mit unterschiedlichen Wassermengen und Druckverhältnissen in einer einzigen Anlage zu verarbeiten (sehr kostengünstige Lösung).

5. Günstiger Alternativstrom

Eine Ende 1993 durchgeführte Modellrechnung zu den spezifischen Anlagekosten (Franken pro kW installierter Leistung) ergab für Trinkwasserkraftwerke als obere Kostenlimite für Anlagen über 100 kW installierbarer Leistung Kosten zwischen 3000 und 4000 Franken pro kW. Kleinanlagen mit wenigen kW installierbarer Leistung können auch schon einmal 12000 Franken pro kW kosten. Es kann festgestellt werden, dass je höher die Fallhöhe ist, desto niedriger die spezifischen Anlagekosten ausfallen. In den erwähnten Kosten sind die Mehraufwendungen für einen allfälligen Ersatz der Zuleitungen durch Druckleitungen noch nicht enthalten. Da ein Ersatz der Zuleitung jedoch meist im Rahmen einer Sanierung der

Wasserversorgung erfolgt, sind diese Mehrkosten relativ gering.

Die jährlichen *Betriebsaufwendungen* werden von den Kosten für die Amortisation sowie für den Betrieb und Unterhalt der Anlage bestimmt. Bezüglich der Betriebskosten stehen Trinkwasserkraftwerke besonders günstig da. Der anzustrebende vollautomatische Betrieb der Anlage beschränkt den Betriebsaufwand auf gelegentliche Kontrollgänge und Unterhaltsarbeiten an der elektromechanischen Ausrüstung. Die Erfahrung hat gezeigt, dass bei Anlagen unter 30 kW installierter Leistung mit einem summierten Betriebsaufwand von max. 2000 Franken zu rechnen ist. Bei Anlagen ab 100 kW liegt dieser Wert bei ca. 1% bis 2% der Anlagekosten. Es empfiehlt sich, die Amortisationszeit möglichst kurz anzusetzen. Diese sollte 20 Jahre nicht überschreiten, damit anschliessend genügend Zeit besteht, um finanzielle Reserven für spätere Erneuerungen der Anlagen schaffen zu können. Im landesweiten Durchschnitt liegt der Energiegestehungspreis für neue Trinkwasserkraftwerke bei rund 10 Rp./kWh. Trotz der Tatsache, dass in diesem Preis die Mehrkosten für die Druckleitung nicht enthalten sind, kann somit von einer äusserst günstigen Alternativenergie gesprochen werden. Vereinfachend lässt sich sagen, dass je höher die Leistung ist, desto besser die Wirtschaftlichkeit der Anlage ist.

6. Umweltaspekte

Die Mehrfachnutzung der Wasserversorgung ist nicht nur aus ökonomischer Sicht interessant. Auch bezüglich Beurteilung der Umweltaspekte kann eine positive Bilanz gezogen werden. Die wesentlichen Anlageteile sind unterirdisch angeordnet und passen sich bestens in die Umgebung und die Natur ein. Zudem ist die ökologische Beeinträchtigung solcher Anlagen auf Fließgewässer meist gering. Den strengen hygienischen Anforderungen an das Konsumgut Wasser kann mit dem Einsatz speziell konstruierter Turbinen genüge getan werden. In chemischer wie in physikalischer Hinsicht, aber auch bezüglich Aussehen, Geruch und Geschmack verändert sich turbiniertes Wasser zudem in keiner Weise. Die kleinen, meist hochtourigen Maschinen erzeugen Lärm, welcher durch geeignete Massnahmen am störenden Austritt aus der Zentrale gehindert werden kann.

7. Bewilligungsverfahren

Die grossen kantonalen und regionalen Unterschiede in der Gesetzgebung und den Vorschriften bedingen eine sorgfältige Prüfung der jeweiligen Situation und lassen allgemeingültige Schlussfolgerungen nur in beschränktem Masse zu.

Spezielle Vorschriften über Trinkwasserkraftwerke gibt es zurzeit nicht. Die Installationen haben sich an den Richtlinien und Leitsätzen des Schweizerischen Vereins des Gas- und Wasserfaches (SVGW) zu orientieren. Beim Netzanschluss sind die Vorschriften des Eidgenössischen Starkstrominspektors (ESTI) zu beachten. Dazu ist ein Anschlussgesuch mit Anlagenbeschreibung und Anschlussschemata einzureichen. Die Einhaltung dieser Vorschriften wird vom ESTI überprüft und genehmigt. Die elektrischen Installationen werden nach Inbetriebsetzung der Anlage vom ESTI abgenommen. Parallel zum Verfahren ist auch ein *Installationsgesuch* an das zuständige Elektrizitätswerk einzureichen. Das EW kann über die Art der Stromabnahme, den gewünschten Übernahmepunkt sowie

über das vorgesehene Zählersystem mitentscheiden.

Turbinen in Trinkwasserversorgungen bedürfen wie Wasserkraftwerke an Fliessgewässern einer *kantonalen Bewilligung*. In manchen Kantonen wird unter dem Hinweis auf die Sekundärnutzung des Trinkwassers bis zu einer bestimmten Anlagengrösse auf eine *eigentliche Konzessionserteilung* verzichtet. Andere Kantone wiederum verlangen auch schon für kleinere Trinkwasserkraftwerke eine Konzessionsanfrage. In jedem Fall sind jedoch die kantonale Lebensmittelkontrolle resp. das Kantonslabor sowie die kantonale Gebäudeversicherung resp. die Feuerpolizei über das Bauvorhaben in Kenntnis zu setzen und die Genehmigung einzuholen.

8. Versicherungsfragen

Der Betreiber eines Kraftwerkes ist haftbar für alle Personen- und Sachschäden, die sich aus dem Betrieb der Anlage ergeben. Es ist deshalb eine entsprechende *Haftpflichtversicherung* abzuschliessen, resp. das neue Kraftwerk ist

in den bestehenden Versicherungsschutz zu integrieren. Es empfiehlt sich zudem, eine Maschinenbruch- sowie Betriebsunterbruchversicherung abzuschliessen. Damit können grössere finanzielle Verluste kostengünstig umgangen werden.

9. Finanzierung, Förderbeiträge

Gemäss Bundesgesetz über eine sparsame und rationelle Energienutzung vom Dezember 1990 und der dazugehörigen Verordnung (in Kraft seit 1. März 1992) sind die Unternehmungen der öffentlichen Energieversorgung verpflichtet, die von Eigenproduzenten angebotene Energie abzunehmen, sofern die technischen Bedingungen erfüllt sind. Diese Abnahmepflicht gilt für die ganze Schweiz, obwohl noch nicht alle Kantone ihre Gesetze und Verordnungen dementsprechend abgeändert haben. Das Eidg. Verkehrs- und Energiewirtschaftsdepartement (EVED) hat nun, gestützt auf diesen Energienutzungsbeschluss und die Energienutzungsverordnung, für die Vergütung von Strom aus Energieerzeugungsanlagen von Selbstversorgern einen minimalen *Jahresmitteltarif* von 16 Rp./kWh empfohlen. Zusammen mit dem heute tiefen Zinsniveau tragen die gesetzlichen Rahmenbedingungen dazu bei, dass die Wirtschaftlichkeit eines Grossteils der möglichen Trinkwasserkraftwerke gegeben ist. Das Bundesamt für Energiewirtschaft (BEW) leistet zudem *Förderbeiträge* an Kleinwasserkraftwerke. Vorstudien werden finanziell bis zu 30% unterstützt. An gesamte Bauvorhaben können an die nichtamortisierbaren Mehrkosten ebenfalls Beiträge bis zu 30% gewährt werden. Viele kantonale Gesetzgebungen belohnen zudem Anstrengungen zur Nutzung ökologisch verträglicher Energiequellen. Die Unterstützung wird in Form von Beitragsleistungen an Kleinwasserkraftwerke, durch Erlass/Ermässigung von *Wasserzinsen* oder durch vereinfachte Bewilligungsverfahren gewährt.

Die Investition in eine neue Anlage ist jedoch heute für viele Gemeinden nicht nur eine Frage der Wirtschaftlichkeit. Im Hinblick auf die darbedenden Gemeindefinanzen stehen meist jedoch die eigentlichen Investitionskosten und das damit verbundene Investitionsrisiko im Vordergrund, was vielfach zu negativen Realisierungsentscheiden führt. Es gilt deshalb vermehrt, derartige Projekte auf *privatrechtlicher* Basis zu finanzieren.



Abb. 14 Ständiger Informationsstand der Gemeinde Fuldera mit Angabe der aktuellen Turbinenleistung.

Nebst Genossenschaften und Vereinen bietet sich hier die Bildung von Aktiengesellschaften unter Beteiligung der Gemeinde an. Diese Form der Finanzierung hat den Vorteil, dass das Investitionsrisiko auf den Betrag des Aktienkapitals verringert und auf mehrere Partner verteilt werden kann. Neueren Datums ist die Form des *Anlagen-Contractings*. Dabei finanziert eine aussenstehende Unternehmung die Investition und refinanziert diese Investitionsleistung und die Betriebskosten aus dem Verkauf der produzierten Energie. Der Hauptvorteil des Anlagen-Contractings ist der betriebswirtschaftliche Druck auf den Drittinvestor. Es liegt im Interesse des Contractors, seine Anlage effizient und mit zuverlässigster Technologie auszurüsten. Nach Abschluss des Contracting-Vertrages kann die Gemeinde das Werk zu einem festzulegenden Restwert übernehmen und kommt so praktisch gratis in den Besitz eines funktionsfähigen Kleinkraftwerkes und hat bei beschränktem Risiko erst noch vom Know-how einer spezialisierten Firma profitiert.

10. Vom Wissen zur Tat

Ein weiterer positiver Aspekt derartiger Kleinstwasserkraftwerke ist derjenige der Bewusstseinsförderung durch dezentrale Kleinstwasserkraftwerke (*Abb. 14*). Dazu aus der anlässlich der Einweihung des Trinkwasserkraftwerkes Fuldera ge-

haltenen Ansprache des Gemeindepräsidenten *Conrad Caflisch*:

«Die zunehmende Umweltbelastung macht auch vor unserem Tal (Val Müstair) nicht halt. Die Lebensqualität und die vorhandenen Ressourcen nehmen ab. Deshalb ist die zur Frage stehende Energieproduktion aus Trinkwasserversorgungen nicht vernachlässigbar. Die Erzeugung ist zudem umweltfreundlich, langfristig gesichert und mit keiner Qualitätseinbusse des Wassers verbunden. Wir wissen jetzt, woher ein Teil des Stromes in unserer Gemeinde kommt. Der Strom kommt nicht einfach aus der Steckdose. Tragen wir Sorge dazu. Mit der gezielten Nutzung unserer einheimischen Wasserkraft helfen wir mit, die CO₂-Belastung und die Abhängigkeit von ausländischem Atomstrom zu senken, ohne dass wir unsere Natur zusätzlich belasten.»

Jedermann ist sich einig, diese Art der Energiegewinnung verdient gefördert zu

werden. Schreiten wir deshalb vom Wissen um unsere Umwelt zur Tat und nutzen die vorhandenen, umweltfreundlichen Energiequellen.

Literaturhinweise

- [1] Kleinstwasserkraftwerke. Impulsprogramm Pacer – Erneuerbare Energien, Bundesamt für Konjunkturfragen, EDMZ, Bern, Bestell-Nr. 724.244 d
- [2] Nutzen statt Aufgaben. Modernisieren und Reaktivieren von Kleinstwasserkraftwerken. Diane-Kleinstwasserkraftwerke, Bundesamt für Energiewirtschaft, EDMZ, Bern, Bestell-Nr. 805.173 d
- [3] Potentialanalyse Trinkwasserkraftwerke in der Schweiz. Diane-Kleinstwasserkraftwerke, Bundesamt für Energiewirtschaft. Bezug ca. ab Mai 1994, EDMZ, Bern

Adressen der Autoren:



M. Hintermann
dipl. Bauing. HTL
Hydro-Solar AG
Burghaldenweg 18
4435 Niederdorf



J.-M. Chapallaz
dipl. Masch.-Ing. EPFL/SIA
JMC-Engineering
rue du Chasseron 36
1450 Ste-Croix