Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band: 94 (2002)
Heft: 11-12

Artikel: Die Optimierung von Saugrohrlängen bei Niederdruckkraftwerken
Autor: Giezendanner, Walter
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-939671

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: 10.07.2025

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

Die Optimierung von Saugrohrlängen bei Niederdruckkraftwerken

Walter Giezendanner

1. Einleitung

Bei Niederdruck-Laufkraftwerken fallen so wohl beim Zufluss zu den Turbinen als auch im Wegfluss Verluste an. Letztere, die so genannten Saugrohrverluste, fallen besonders ins Gewicht, da es sich in erster Linie um Erweiterungsverluste handelt (Borda-Carnot-Verluste), welche durch eine sorgfältige und vor allem genügend lange Ausbildung des Saugrohres sehr stark reduziert werden können. Dadurch kann nämlich die nach dem Durchfluss durch die Turbine noch vorhandene Geschwindigkeitsenergie ($v^2/2g$) wieder zu einem guten Teil in (Unter-)Druckenergie (deshalb der Name Saugrohr) umgewandelt und genutzt werden. Deshalb kann es sich lohnen, bei einer Renovation oder einem Neubau diese Zone auf Verbesserungen hin zu überprüfen. Dafür sollen die nachfolgenden Ausführungen gewisse erste Hinweise für den Praktiker geben. Zur Vereinfachung wird dazu lediglich eine einzige Grösse, nämlich die mittlere Austrittsgeschwindigkeit, herangezogen, während Einflüsse wie spezifische Drehzahl, Drall oder Ungleichmässigkeit in der Strömung, Turbinenart usw. unberücksichtigt bleiben.

Erschwerend für die Aufzeichnung der Zusammenhänge war bisher die Tatsache, dass sich das Geschehen im Grenzbereich von Maschinen- und Bauingenieur abspielt, welche nicht immer die gleiche Sprache sprechen (auch Formelsprache). Die Versuchsanstalt für Wasserbau (VAW) an der ETH Zürich hat schon Anfang der 90er-Jahre eine Studie veröffentlicht [1], [2], welche diesem Umstand Rechnung trägt und das Problem relativ ausführlich behandelt. Auch diese Studie weist aber auf die vielen Einflussgrössen hin, insbesondere auf die Tatsache, dass die Anströmungsverhältnisse eine grosse Rolle spielen. Diese werden auch in [3] relativ anschaulich behandelt. Sie verursachen meist geringe Verluste vor der Turbine, wo eine Verengung herrscht, beeinflussen jedoch viel mehr die Energierückgewinnung in der Erweiterung im Saugrohr. An der EPF Lausanne sind momentan Untersuchungen im Gange, welche die Strömungsverhältnisse im Saugrohr und den Einfluss von Anströmung und Turbine untersuchen [4], [5], [6], [7], und dabei Aussagen von [1] bestätigen, jedoch für den Praktiker (noch) nicht so leicht umsetzbar sind.

Im Allgemeinen sind die Verluste vor der Turbine um einiges kleiner als nach der Turbine [1], deshalb sollte bei Renovationen mindestens eine Prüfung der Saugrohrverhältnisse stattfinden (Bild 1).

Die nachfolgenden Ausführungen stützen sich z.T. auf die Mitteilung Nr. 106 der VAW [1]. Mit den dort gewonnenen theoretischen und praktischen Erkenntnissen und einigen praktischen Annahmen über Baukosten und Energiepreise soll versucht werden, Hinweise zu optimalen Saugrohrlängen zu finden und die Sensitivität auf Änderungen dieser Annahmen aufzuzeigen. Die Hinweise sollten es auch dem Praktiker erlauben, anhand von wenigen charakteristischen Zahlen festzustellen, ob es sich lohnt, einen Saugrohrum- oder -ausbau ins Auge zu fassen.

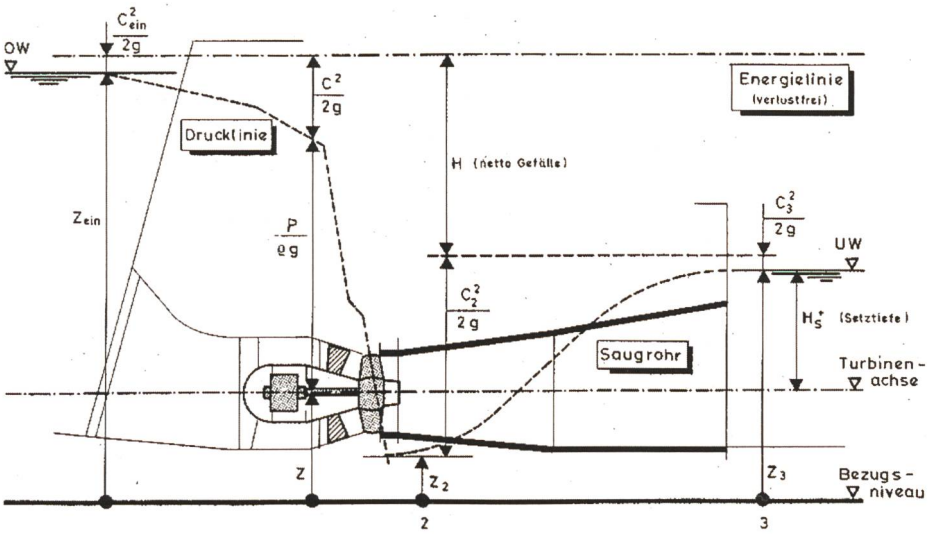

Bild 1. Bezeichnungen.

2. Zusammenfassung von Erkenntnissen aus der Studie VAW (Mitt. Nr. 106) und Grundsätzliches

Im Kapitel 5 «Hauptresultate» der erwähnten Studie [1] steht, dass, wer vertieft projektieren will, «sich mit den ausführlichen Unterkapiteln des Berichtes befassen muss». Weil dies für eine kurze Überprüfung zu zeitraubend sein kann, soll im Folgenden die Austrittsgeschwindigkeit, welche vereinfacht als gleichmässig verteilt angenommen wird, als massgebendes Kriterium herausgezogen werden. Dabei werden einigermassen gute Anströmverhältnisse vor der Turbine und auch eine gute Form des Saugrohrs vorausgesetzt. Bild 2 zeigt, welches der Trend in der Saugrohrformgebung ist.

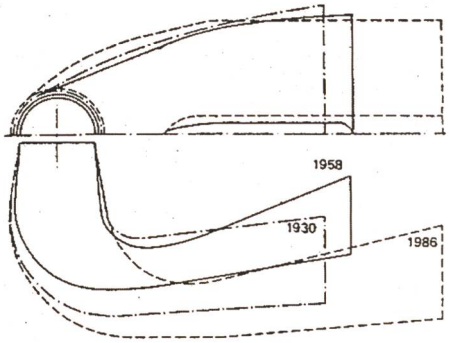

Bild 2. Historische Entwicklung der Saugrohrformen von Francisturbinen (aus [1]).

Bei der Lektüre der Studie [1] wird klar, dass die optimale Länge von mehreren Parametern abhängt wie: Einlaufgeometrie, spezifische Drehzahl und Typ der Turbine, geometrische Formen des Saugrohrs (Krümmer, Übergangsstück, Öffnungswinkel), Belastungsgrad, aber auch Baukosten. Der Bericht liefert eine Vielzahl von Diagrammen mit Verlustwerten und Abhängigkeiten verschiedener Parameter. Auch die Saugrohraustrittsgeschwindigkeiten einer ganzen Reihe von bestehenden Anlagen sind aufgeführt (Bild 3).

Für andere Abhängigkeiten (z.B. Maschinentyp, Einfluss der Anströmung usw.) sei auf die Literatur verwiesen ([1] bis [7]). Dort können auch wertvolle Hinweise auf die optimale Formgebung des Querschnitts unmittelbar nach der Turbine und des Krümmers entnommen werden. Auf diese Gebiete wird deshalb hier nicht näher eingetreten, sondern auf die meist mehr oder weniger ge-

raden oder linear verlaufenden letzten 10 bis 30 m des Saugrohrs (die ja bei einer Sanierung auch in Frage stehen). Für diesen Bereich kann man den hydraulisch optimalen Öffnungswinkel Φ durch die zwei Werte 5° und 12° eingabeln. Bei einem Längenverhältnis von $L/D_{Turbine} \geq 5$ sollte laut einschlägiger Literatur der optimale Wert für Φ in diesem Bereich liegen.

Aus Bild 3 geht hervor, dass praktisch keine Abhängigkeit besteht zwischen Austrittsgeschwindigkeit und spezifischer Drehzahl der Anlagen. Diese Tatsache ermutigt dazu, den Parameter «Geschwindigkeit am Saugrohraustritt» (v_3) gleichsam als Referenzgrösse für Saugrohroptimierungen heranzuziehen, umso mehr als der für den Praktiker wichtigste Parameter «Saugrohrlänge» über den Öffnungswinkel oder das Flächenverhältnis mit der Austrittsfläche verknüpft ist. Diese Verknüpfung ist aber aus strömungstechnischen Gründen nur in einem relativ engen Bereich variierbar. Zudem ist die Austrittsgeschwindigkeit mess- und berechenbar und schliesslich massgeblich für die nicht mehr rückgewinnbare Energie des Kraftwerkdurchflusses. Im folgenden Kapitel werden deshalb für verschiedene Verlängerungen des Saugrohres die dadurch erzielten Austrittsenergiegewinne mit den geschätzten Kosten der dazu notwendigen baulichen Massnahmen (Verlängerung) verglichen und damit gleichsam die Saugrohrlänge optimiert.

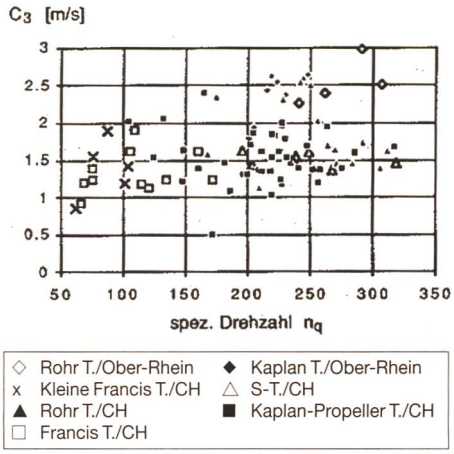

Bild 3. Geschwindigkeit am Saugrohraustritt (aus [1]).

3. Einfaches Beispiel zur Optimierung der Saugrohrlänge resp. des Austrittsquerschnitts

Anhand eines einfachen Beispiels und vereinfachten Annahmen (quadratischer Querschnitt mit Öffnungswinkel Φ, siehe Bild 4 oben) werden für verschiedene Annahmen die Kurven für Energiegewinn und Baukosten für verschiedene Saugrohrverlängerungen aufgezeichnet. Dort, wo die Differenzen am grössten sind, liegen die optimalen Saugrohrverlängerungen (Punkte 1 bis 10 in Bild 4). Die horizontale Achse in Bild 4 entspricht direkt der Längenposition im Saugrohr (mit halbem Öffnungswinkel Φ_1), und die oben in der Abbildung angeschriebenen Werte gehören zu diesen (mit vertikalen Linien verbundenen) Positionen. Die vertikale Achse zeigt die annualisierten Baukosten für Saugrohre mit der entsprechenden Länge respektive den dazugehörigen Energiegewinn (in Franken).

Zu den vereinfachten Annahmen: Die Baukosten wurden linear zur Verlängerung angenommen. Da einerseits die spezifischen Baukosten mit der Grösse der Baustellen eher kleiner werden, hingegen wegen der wachsenden Erweiterung das Volumen eher mehr als linear zunimmt, dürfte diese Annahme realistisch sein. Die fixen Kosten der Baustelleninstallation von angenommen 1 Mio. Fr., was bei einem Annuitätsfaktor von 6% einem jährlichen Betrag von Fr. 60 000.– entspricht, haben keinen Einfluss auf die Optimierung, da sie lediglich die Baukosten parallel nach oben oder unten schieben und

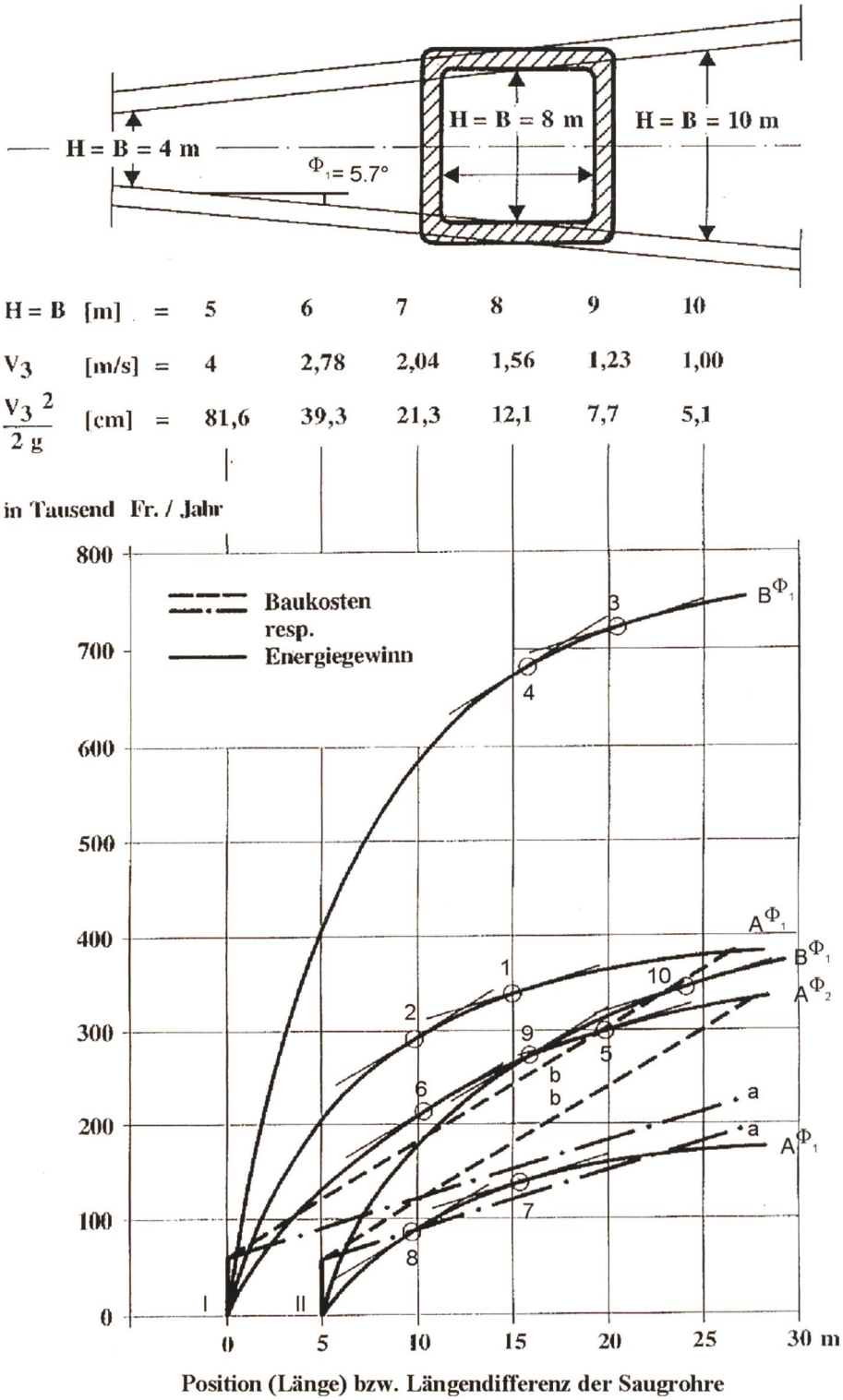

Bild 4. Energiegewinn und Baukosten für verschiedene Saugrohrverlängerungen.

damit nur die Differenz (Nutzen minus Kosten), nicht aber das Maximum der Differenz beeinflussen. Die spezifischen Baukosten wurden mit Fr. 1000.–/m³ und Fr. 2000.–/m³ angenommen (a, b). Diese relativ hohen Werte berücksichtigen die meist vom Wasser zu schützende Baustelle.

Die Kurven der zusätzlichen Energiegewinne infolge der zusätzlichen Saugrohrlänge basieren auf den theoretischen Borda-Carnot-Verlusten ($c_3^2/2g$) am Austritt. In der Realität dürften diese Kurven etwas tiefer liegen, da die (relativ kleine) Reibung im Saugrohr und Ungleichmässigkeiten im Geschwindigkeitsprofil nicht berücksichtigt werden. Betriebsdauerannahme: 5000 Std./Jahr.

Die beiden Kurvenscharen für Energiegewinn und Baukosten gehen von den mit 0 und 5 bezeichneten Längenpunkten aus, d.h. es handelt sich um Saugrohrverlängerungen an bestehende Saugrohraustritte mit 4 resp. 2,78 m/s Austrittsgeschwindigkeit (I, II, siehe Bild 4).

In Bild 4 werden folgende Punkte betrachtet:

I, II: Eintrittsgeschwindigkeit in die Verlängerung von 4 resp. 2,78 m/s («Startposition»)

A, B: Energiepreise von 10 resp. 20 Rp./kWh

a, b: Baukosten von 1000 resp. 2000 Fr./m³ umbauten Raums

$\Phi_1 = 5{,}7°$ resp. $2\,\Phi_1 = 11{,}4°$, $\Phi_2 = 2{,}85°$ resp. $2\,\Phi_2 = 5{,}7°$ (Φ_1, Φ_2 = halbe Öffnungswinkel, Bild 4 oben gilt nur für Φ_1).

Die verschiedenen Kombinationen dieser Annahmen geben folgende optimale Punkte:

Punkt	Fall	optimale Verlängerung [m]	zugehörige Austrittsgeschwindigkeit [m/s]
1	I, A, a, Φ_1	15	1,56
2	I, A, b, Φ_1	10	2,04
3	I, B, a, Φ_1	20	1,23
4	I, B, b, Φ_1	15	1,56
5	I, A, a, Φ_2	20	2,04
6	I, A, b, Φ_2	10	2,78
7	II, A, a, Φ_1	10	1,56
8	II, A, b, Φ_1 (nicht rentabel)	5	2,04
9	II, B, a, Φ_1	11	1,04
10	II, B, b, Φ_1	19	1,50

Es bestätigt sich, dass höhere Energiepreise und tiefere Baukosten längere Saugrohre und kleinere Austrittsgeschwindigkeiten ermöglichen. Diese Grössen haben auf die Optimierung einen mindestens so grossen Einfluss wie gewisse konstruktive Anordnungen (z.B. höhere Radien, kleinere

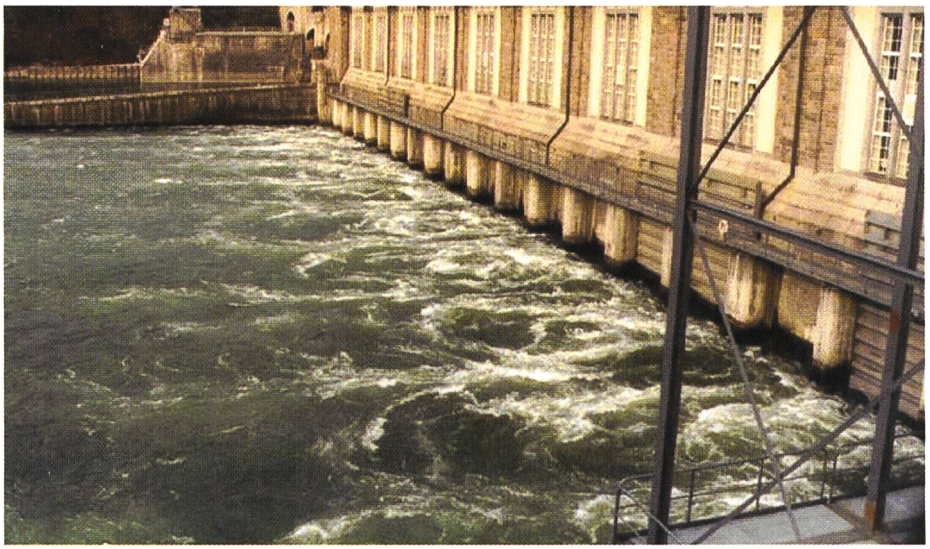

Bild 5. Beispiel einer Anlage mit etwa 2,6 m/s Austrittsgeschwindigkeit. Gut sichtbar die Erweiterungswirbel.

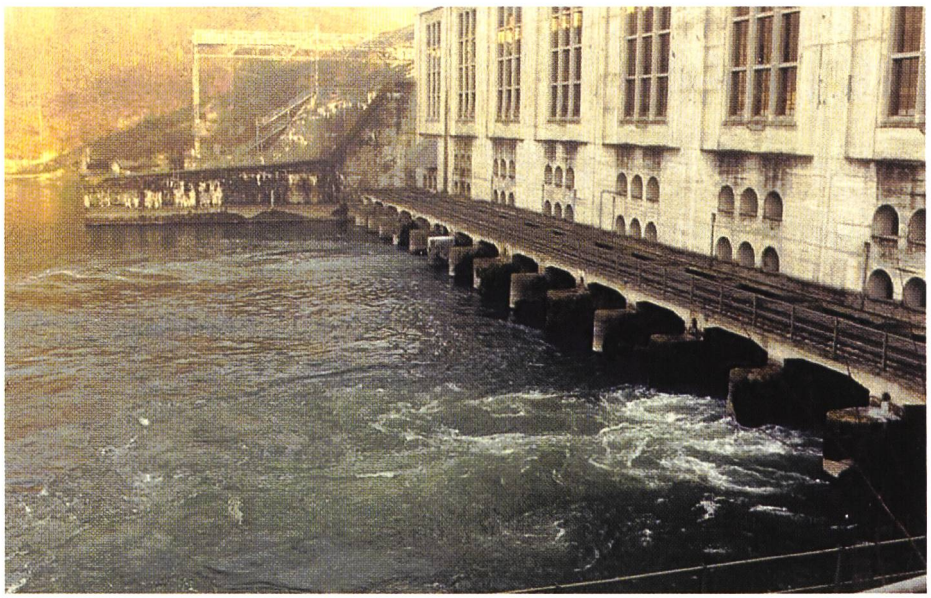

Bild 6. Unterwasserseite KW Mühleberg: Im Hintergrund Austritt der Kaplanturbine mit langem Saugrohr, im Vordergrund die Francisturbine mit kurzem Saugrohr, bei ungefähr gleichem Q (aus Studienbericht VAW).

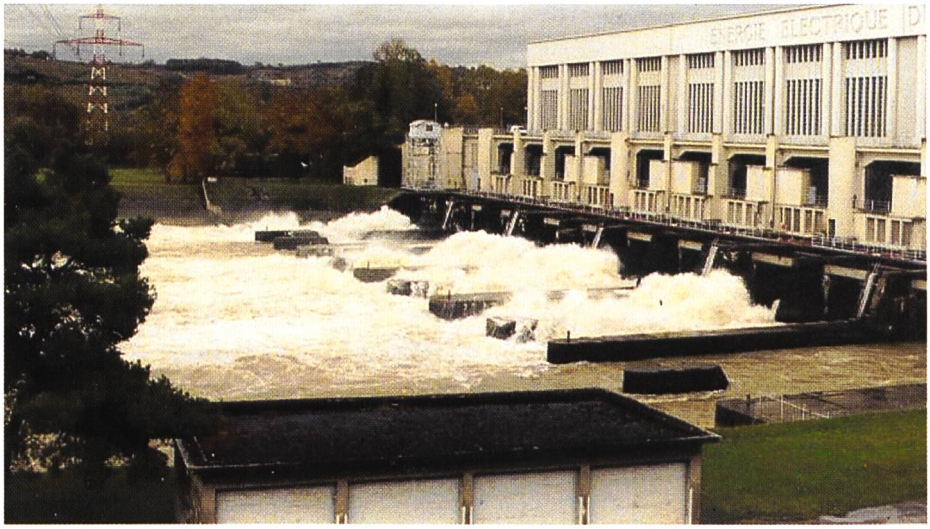

Bild 7. Wie die Wiedereinleitung nicht aussehen sollte. In diesem Bild sind allerdings die Bypässe in Funktion, und das gezeigte KW Kembs hat kaum Verbesserungspotenzial.

Öffnungswinkel). Dass kleinere Öffnungswinkel zu höheren Austrittsgeschwindigkeiten führen, scheint ebenfalls logisch.

Daraus kann abgeleitet werden, dass aus wirtschaftlichen Gründen der optimale Öffnungswinkel an der Obergrenze des Bereiches der hydraulisch optimalen Winkel gewählt werden sollte, umso mehr als in der Praxis in der Strömung ja fast immer noch ein Restdrall vorhanden ist, welcher die Strömung gegen die Wände drückt und somit den Punkt der Ablösung nach grösseren Öffnungswinkeln hin verschiebt (also $2\,\Phi = 10–15°$).

Ferner ist darauf hinzuweisen, dass die hier ermittelten Werte Resultate von stark vereinfachten Beispielen sind. Die angegebenen «optimalen» Saugrohrverlängerungen sind diejenigen, bei denen die Differenz Nutzen-Kosten am grössten ist. Jeder Punkt rechts davon, also mit einer grösseren Saugrohrlänge und kleinerer Austrittsgeschwindigkeit, gibt aber weniger Austrittsverluste und damit eine höhere Energieproduktion.

4. Faustregeln und Hinweise für die Überprüfung von Saugrohren

1. Mittlere Austrittsgeschwindigkeiten zwischen 1,4 und 2 m/s deuten auf eine gute Anlage hin. Bei mittleren Austrittsgeschwindigkeiten von mehr als 2,5 m/s lohnt sich wahrscheinlich eine Überprüfung im Hinblick auf mögliche Verbesserungen. Bei gegen 4 m/s wird dringend empfohlen, eine Verbesserung zu untersuchen.
2. In den meisten Fällen bedeutet eine Verlängerung um eine aus einer wie in Bild 4 gezeigten Überschlagsrechnung hervorgehende Zusatzlänge schon eine markante Verbesserung.
3. Die Öffnungsgeometrie sollte so beschaffen sein, dass der Öffnungswinkel $2\,\Phi$ (resp. bei asymmetrischer Geometrie die entsprechende Querschnittsflächenentwicklung im Bereich zwischen 10° und 15° liegt. Bei höheren Werten sind Ablösungen zu befürchten, während bei tieferen Werten die Wirtschaftlichkeit leidet.
4. Die Geschwindigkeitsverhältnisse am Austritt eines Kraftwerks können schon von blossem Auge abgeschätzt werden. Hohe Schaumkronen und aufwallende Wasseroberflächen deuten auf stark schädliche Geschwindigkeitskonzentrationen. Diese stammen meist aus zu knappen Saugrohrabmessungen, manchmal aber auch aus schlechten Anströmverhältnissen vor der Turbine. In letzterem Fall sind Modellversuche zu empfehlen.
5. Da sich Optimierungen immer auf die Zukunft beziehen, sollten auch bei den Annahmen für den Nutzen längerfristig vertretbare Werte zugrunde gelegt werden. Das heisst, dass ein gegenüber heute erhöhter Energiepreis eingesetzt werden sollte, da u.E. die heutigen Energiepreise historisch tief sind (beschränkte Reserven, zukünftig erhöhter Verbrauch 3. Welt usw.). Dieses Postulat wird übrigens auch bei Rentabilitätsrechnungen für Neu- und Umbauten im Wasserkraftsektor zu häufig vernachlässigt.

Literatur

[1] «Saugrohre bei Flusskraftwerken», *S. Deniz, M. Bosshard, J. Speerli, P. Volkart,* Mitteilung Nr. 106 der VAW, Zürich, 1990.

[2] «Saugrohre, Geschwindigkeitsmessungen am Saugrohraustritt einer Rohrturbine», *S. Deniz, J. Speerli, P. Volkart,* Mitteilung Nr. 109 der VAW, Zürich, 1991.

[3] «Verluste bei der Anströmung von Wasserkraftanlagen», *Tobias Lang, Theodor Strobl* und *Sabine Nothaft*, Nr. 12 der Wasserwirtschaft 90 (2000).

[4] «Etude du champ instationnaire de vitesse en sortie de roue de turbine. Etude expérimentale et numérique.» *G. D. Ciocan, S. Mauri, J. Alca Arpe, J.-L. Kueny*, Nr. 2-2001 der «La houille blanche».

[5] «Werlé-Legendre separation in a hydraulic machine draft tube», *S. Mauri, J.-L. Kueny, F. Avellan* in «Proceedings of ASME FEDSM'02», Montreal, Quebec, July 14-18 2002 (FEDSM2002-31196).

[6] «3D PIV and LIV measurements at the outlet of a francis turbine draft tube» *M. S. Iliescu, G. D. Ciocan, F. Avellan* in «Proceedings of ASME FEDSM'02», Montreal, Quebec, July 14-18 2002 (FEDSM2002-31332).

[7] «Wall friction measurements: Application in a Francis Turbine Cone» *G. D. Ciocan, F. Avellan, E. L. Berca* in «Proceedings of ASME FEDSM'02», Montreal, Quebec, July 14-18 2002 (FEDSM2002-31333).

Anschrift des Verfassers
Walter Giezendanner, Bundesamt für Wasser und Geologie, Postfach, CH-2501 Biel.

Sahara wird grüner – Satellitenbilder zeigen das Ende der Dürre

■ *Wolfgang Weitlaner*

Ein internationales Wissenschaftlerteam hat nach der Auswertung von Satellitenbildern festgestellt, dass die Trockengebiete in der Sahara-Region kleiner geworden sind. Die erfreulichen Nachrichten gelten insbesondere für Staaten entlang eines breiten Gürtels durch die Wüste, der sich von Mauretanien bis hin nach Eritrea erstreckt.

Verantwortlich für die zunehmende Vegetation ist nach Angaben des Wissenschaftsmagazins «New Scientist» eine höhere Niederschlagsrate. Aber auch südlich der Sahara soll die Niederschlagsmenge zugenommen haben. Vor 20 Jahren verwandelten Dürreperioden den nördlichen Teil des Staates Burkina Faso in Wüste. In der Zwischenzeit soll auch dort wieder, nach Niederschlägen, neue Vegetation entstanden sein, berichten die Forscher.

Die Untersuchungen wurden von holländischen, deutschen und amerikanischen Hilfsorganisationen geführt. Diese wollen ihre Ergebnisse den Ministern von Burkina Faso präsentieren. Ähnlich positive Neuigkeiten werden auch aus dem südlichen Mauretanien, Nordwest-Niger, Zentral-Tschad und aus Teilen Sudans und Eritreas gemeldet. Die Hilfsorganisationen geben auch an, dass in vielen Gebieten, wo Geld in den Schutz des Bodens und Wassers investiert wurde, die Situation besser geworden sei. Als erfolgreiche Strategie zur besseren Nutzung des Bodens wurde das so genannte «contour bunding» eingeführt. Dabei werden Anbauflächen mit Steinen umfasst, sodass die wertvolle Humusschicht bei Regen nicht einfach weggeschwemmt wird. Mit dieser Methode konnten in den vergangenen Jahren tausende Hektar Landfläche gewonnen werden, auch in Gegenden, wo vorher fast nichts wuchs.

Anschrift des Verfassers
Wolfgang Weitlaner, c/o Pressetext Austria, E-Mail: weitlaner@pressetext.at