

Dipl.-Ing. Gerhard Uhland, Renchen

Energie-Rückgewinnung in Trinkwasseranlagen

1. Einleitung

Es ist heute selbstverständlich, dass in jedem Haushalt einwandfreies Trinkwasser immer und überall zur Verfügung steht. Kaum jemand macht sich jedoch Gedanken, wie dieses technische und logistische Meisterwerk überhaupt ermöglicht wird. Oft muss Wasser von der Quelle über große Distanzen erst einmal zu einer Verteilerstation gepumpt werden, bevor es aufbereitet wird und zum Endverbraucher weitergeleitet werden kann. Es müssen Höhenunterschiede überwunden werden und zum Transport des Wassers in langen Leitungen sind erhebliche Energiemengen mithilfe von Pumpen in das System einzubringen. Energie-Rückgewinnungsanlagen in Trinkwasseranlagen können zumindest einen Teil dieser Energie wieder gewinnen und als elektrische Energie nutzbar machen.

Es darf aber bei allen Bemühungen um eine möglichst hohe Energie-Rückgewinnung nie vergessen werden, dass die sichere Versorgung der Verbraucher mit Trinkwasser oberste Priorität hat. Deswegen sind höchste Qualität und Zuverlässigkeit aller Komponenten unabdingbar.

2. Energie-Rückgewinnung aus Trinkwasser-Versorgungsanlagen

In vielen Trinkwasserversorgungsanlagen steht an dem Eintritt in Verteilerstationen ein relativ hoher Druck an, der für den Transport des Wassers gebraucht wurde, aber am Ende der Leitung zu Problemen führen würde und der deshalb abgebaut werden muss.

In der Verteilerstation befindet sich ein Speichersystem, das die zeitlich unterschiedlichen Zufluss- und Abflussmengen zu den Verbrauchern ausgleicht. Diese Speichersysteme sind üblicherweise offene Behälter ohne Überdruck. Deshalb muss der Restdruck des Wassers vor Eintritt in das Speicherbecken abgebaut werden. In der Vergangenheit hat man den Restdruck meist mit Ringkolbenventilen (RKV) abgebaut. Leider ist es damit nicht

möglich, die frei werdende Energie zurückzugewinnen. Heute ist man bestrebt, mithilfe von Energie-Rückgewinnungsturbinen die Restenergie in elektrisch nutzbare Energie umzusetzen und so die Gesamt-Energiebilanz des Wasserversorgungssystemes zu verbessern.

Bei größeren Anlagen werden heute diese Rückgewinnungssysteme oftmals nicht nur zur Einspeisung elektrischer Energie in das öffentliche Netz genutzt, sondern die Anlagen werden so ausgelegt, dass sie inselbetriebsfähig sind und somit bei Netzausfall zumindest einen Teil des Eigenbedarfes der Wasserversorgungsanlage sicherstellen können.

Je nach Aufgabenstellung, also im Wesentlichen abhängig von der zur Verfügung stehenden Druckhöhe und der Wassermenge, gibt es unterschiedliche Techniken zur optimalen Umwandlung der hydromechanischen in elektrische Energie. Im Folgenden werden die typischen Einsatzgebiete der heute meist gebräuchlichen Systeme und ihre wesentlichen Eigenschaften beschrieben.

Ein nicht zu vernachlässigender Aspekt bei allen Überlegungen zur Energie-Rückgewinnung ist das Zusammenwirken der einzelnen Komponenten mit dem Gesamtsystem. Hiermit ist die sogenannte Druckstoßproblematik gemeint, die bei allen Trinkwasser-Versorgungssystemen mit längeren Rohrleitungen ein wichtige Rolle spielt. Alle Regelvorgänge der Wassermenge verursachen entsprechende Druckänderungen im Rohrleitungssystem. Diese Druckänderungen können erhebliche Auswirkungen auf das gesamte System haben und im Fehlerfall zu großen Schäden führen. Deshalb sollen hier einige Überlegungen zur Druckstoßbehandlung an den Anfang dieser Betrachtung gestellt werden.

3. Druckstoß

Die Rückgewinnung von Energie in einer Trinkwasserversorgungsanlage erfolgt üblicherweise am Ende einer längeren Zulaufleitung. Die Wassermasse in dieser Rohrleitung kann also sehr groß werden. Wird

die Strömungsgeschwindigkeit dieser Wassermasse verändert, entsteht eine Druckänderung, die hauptsächlich von der Länge der Rohrleitung und der Änderung der Fließgeschwindigkeit abhängt. Daher sind besonders bei langen Rohrleitungen die Auswirkungen möglicher Strömungsgeschwindigkeitsänderungen bereits in der Planungsphase sorgfältig zu untersuchen. Dies erfordert beispielsweise auch das DVGW-Merkblatt W303 „Dynamische Druckänderungen in Wasserversorgungsanlagen“.

Neben Änderungen der Fließgeschwindigkeit durch das geplante Betätigen von Ventilen kann das Verhalten von Turbinen zur Energie-Rückgewinnung erhebliche Auswirkungen auf das Leitungssystem haben. Besonders bei langen Leitungen muss man deshalb das Durchflussverhalten der Energie-Rückgewinnungsturbine berücksichtigen. Durch lange Zeitkonstanten lässt sich die Druckänderung bei Anfahr- und Stillsetzungsvorgängen meist innerhalb zulässiger Grenzen halten.

Anders sieht es bei dem ungeplanten Lastabwurf aus. Hier werden Generator und Turbine innerhalb kürzester Zeit auf die Durchgangsdrehzahl beschleunigt. Pelton-Turbinen sind in dem Fall als unkritisch zu beurteilen, da bei ihnen die Wassermenge unabhängig von der Laufraddrehzahl ist. Deshalb bleibt die Wassermenge auch bei Durchgangsdrehzahl konstant.

Anders sieht es dagegen bei Francis-Turbinen aus, bei denen die Drehzahlzunahme nach Lastabwurf zu einer deutlichen Änderung der Durchflussmenge und damit der Geschwindigkeit des Wassers führt. Diese plötzliche Geschwindigkeitsänderung erzeugt einen Druckstoß, der im Extremfall zur Zerstörung des Leitungssystems führen kann.

Aus der Untersuchung des Leitungssystemes vor der Turbine kann berechnet werden, wie groß die Änderungsgeschwindigkeit der Strömung maximal sein darf, um einen unzulässigen Druckanstieg auf alle Fälle sicher zu vermeiden. Basierend auf dieser Angabe und mit Kenntnis des Betriebsverhaltens der Turbine können nun geeignete Maßnahmen getroffen werden, um die geforderten Randbedingungen einzuhalten.

So kann man beispielsweise durch Vergrößerung der Schwungmasse der Turbinen-Generator-Baugruppe einen langsameren Drehzahlanstieg bei Lastabwurf erreichen. Eine

Verlängerung der Hochlaufzeit – auch nur um wenige Sekunden – kann die Druckstoßproblematik in vielen Fällen deutlich reduzieren.

Eine weitere Möglichkeit zur Entschärfung besteht im synchronen Öffnen eines Bypass-Stranges zu der Turbine, womit die fließende Gesamtwassermenge konstant gehalten werden kann.

In diesem Bypass-Strang muss nun die Restenergie, die noch in dem System vorhanden ist, von einem Ringkolbenventil oder Clayton-Ventil aufgenommen. Falls diese Ventile nicht schnell genug auf die erforderliche Umleitungswassermenge eingestellt werden können, sind zusätzliche Absperrventile erforderlich, die das „trocken“ voreingestellte Ventil im Bedarfsfall schnell zuschalten können.

4. Die „rückwärts laufende Pumpe“ als Energieerzeuger

Bei sehr kleinen Energiemengen, die aus dem Trinkwassersystem zurückgewonnen werden können, sollen natürlich nur sehr kleine Investitionen in Maschinen und Anlagenteile erfolgen, um die Rückgewinnung überhaupt wirtschaftlich vertretbar zu machen. Wo aus diesen oder anderen Gründen eine Wirtschaftlichkeit mit einer Turbine nicht erreicht werden kann, lässt sich manchmal mit einer handelsüblichen Trinkwasserpumpe, die man als Energieerzeuger laufen lässt, doch noch eine Rückgewinnung realisieren. Da Pumpen als Serienprodukte in größeren Stückzahlen hergestellt werden, sind sie relativ preiswert.

Der Hauptnachteil einer solchen „rückwärts laufenden Pumpe“ ist ihr niedriger Wirkungsgrad als Energieerzeuger, da sie ja nicht für diese Aufgabe optimiert wurde, sondern für eine effektive Druckerzeugung. Setzt man nun eine solche Pumpe als Energieerzeuger ein, hat sie eine extrem zugespitzte Wirkungsgradkurve. Das heißt, ihr Wirkungsgrad nimmt schon bei geringen Abweichungen von der bestimmungsmäßigen Wassermenge oder dem Druck rapide ab. Eine effektive Energieerzeugung ist nur bei konstanten Mengen und Drücken möglich. Da in den meisten Wasserversorgungsanlagen Wassermengen und -drücke aber nicht konstant sind, sollte selbst bei Kleinstanlagen vor einer geplanten Investition sorgfältig

geprüft werden, ob sich nicht mit einer Kleinstturbine eine bessere Wirtschaftlichkeit ergibt.

Auf der anderen Seite haben „rückwärts laufende Pumpen“ aber auch einen Vorteil, der sie für die Nachrüstung in bestehenden Trinkwasseranlagen oft geeignet erscheinen lässt: Sie sind klein, haben genormte Anschlussmaße, sind druckfest und können mit Gegendruck arbeiten. Kleinere Baugrößen sind zudem als kompakte Einheit von Pumpe und eingebautem Generator erhältlich. Mit einer elektronischen Frequenzsteuerung lässt sich der Einsatzbereich „rückwärts laufender Pumpen“ in gewissen Grenzen erweitern, allerdings muss man berücksichtigen, dass die erforderliche Elektronik zusätzliche Energieverluste verursacht.

5. Die Durchströmturbine als Trinkwasserturbine

Der Vollständigkeit halber ist an dieser Stelle auch die Durchströmturbine als Trinkwasser-

turbine zu erwähnen. Allerdings wird diese Turbinenart vorwiegend nicht zur Energie-Rückgewinnung in Trinkwasser-Verteilssystemen eingesetzt, sondern zur Energiegewinnung aus dem natürlichen Gefälle beispielsweise an Stauanlagen, also für Rohwasser.

Durchströmturbinen sind einfache, robuste Maschinen, die einen relativ großen Durchfluss- und Fallhöhenbereich abdecken können. Für den Einsatz in Trinkwasserversorgungsanlagen sind sie weniger geeignet, weil sie große Abmessungen haben, mit niedriger Drehzahl laufen und deshalb meist ein Getriebe brauchen und weil sie nur einen vergleichsweise niedrigen Wirkungsgrad im Vergleich zu anderen Turbinen haben. Da sie als Turbine mit teilbeaufschlagtem Laufrad auch bei Durchgangsdrehzahl keine Verminderung des Durchflusses verursachen, ist ihr Einsatz am Rohrleitungsende unkritisch. Allerdings brauchen sie unbedingt einen freien Auslauf des Wassers aus dem Turbinengehäuse, was ihre Verwendungsmöglichkeiten einschränkt.



Abb. 1: Trinkwasserversorgungsanlage Obermaubach: 2-düsige Pelton-Turbine, Leistung 160 kW, mit Spezialgrundrahmen zur Krafteinleitung in das Gebäude bei gleichzeitiger Entkopplung von Körperschall



Abb. 2: Laufwerk der Pelton-Turbine Obermaubach



Abb. 3: Wasserwerk Stadtwerke Bühl: 1-düsige Pelton-Turbine, Leistung 22 kW, in Kompaktausführung

6. Die Pelton-Turbine als Trinkwasserturbine

Pelton-Turbinen werden in der Wasserkraft für kleinste Leistungen von wenigen Kilowatt bis in den Megawattbereich eingesetzt. Für den Einsatz als Trinkwasserturbine ist eine Pelton-Turbine generell sehr gut geeignet:

- Als teilbeaufschlagte Turbine hat sie einen sehr flachen Wirkungsgradverlauf, das heißt, ihr Wirkungsgrad nimmt bei Abweichungen von der Auslegungswassermenge und dem Auslegungsdruck nur langsam ab,
- sie hat wenige bewegte Teile,
- alle Trinkwasser berührenden Teile können aus Edelstahl hergestellt werden,
- durch die variable Düsenzahl von 1 bis 6 Düsen kann sie ein weites Q/H-Spektrum abdecken,
- sie kann mit horizontaler oder vertikaler Welle gebaut werden,
- sie eignet sich zur Nutzung hoher Drücke,
- sie ist bauartbedingt wartungsarm,
- durch eingebaute Strahlableiter lassen sich sehr lange Schließzeiten erreichen, wodurch ein Druckstoß im Leitungssystem vermieden wird.

Diesen offensichtlichen Vorzügen steht aber auch eine Reihe von Nachteilen gegenüber:

- Sie ist für niedrige Drücke (Fallhöhe) schlecht geeignet,
- die Turbinendrehzahl ist relativ niedrig, was große Abmessungen von Turbine und Generator bedingt,
- wegen der großen Abmessungen ist sie relativ teuer,
- wegen der niedrigen Drehzahl ist auch der Generator relativ groß und teuer.
- Das Laufrad muss frei drehen können. Die Turbine braucht einen freien Wasseraustritt und muss über dem Wasserspeicher aufgestellt werden. Daher kann der geodätische Höhenunterschied zwischen Laufrad und Wasseroberfläche nicht genutzt werden.
- Im Strahlableiterbetrieb (z. B. bei Netzausfall) kann sie Geräusche entwickeln. Der Wasseraustrittsbereich muss durch

eine Panzerung gegen Schäden durch den Wasserstrahl geschützt werden.

- Die Turbine eignet sich nicht für geschlossene Rohrleitungssysteme mit Gegendruck hinter der Turbine.
- Der Wirkungsgrad erreicht nicht ganz so hohe Werte wie eine Francis-Turbine.
- Die großen Dimensionen der Pelton-Turbinen-Anlage erfordern meist höhere Baukosten.

Die Pelton-Turbine eignet sich also besonders, wenn eine bauliche Anordnung gewählt werden kann, bei der sie in ein offenes System (z. B. Sammelbecken) entleert. Auch für die Verwendung in Systemen mit sehr langen Trinkwasserleitungen ist kein Turbinen-Bypass notwendig, da sie bei Lastabwurf des Generators im Strahlableiterbetrieb beliebig lange Schließzeiten ermöglicht.

Bei bestehenden Anlagen kann der nachträgliche Einbau einer Pelton-Turbine größere Umbaumaßnahmen an der Rohrleitungsführung und an dem Gebäude erfordern. Deshalb sollte bereits in der Planungsphase einer Versorgungsanlage an eine mögliche spätere Nachrüstung gedacht werden.

Beispiele ausgeführter Anlagen mit Pelton-Turbinen von Wiegert & Bähr zeigen die Abb. 1 bis 3.

7. Die Francis-Turbine als Trinkwasserturbine

Francis-Turbinen sind die in der Wasserkraft am häufigsten eingesetzten Turbinen. Sie werden für Kleinwasserkraftanlagen ebenso erfolgreich wie in den größten Turbinenanlagen im mehrstelligen Megawattbereich eingesetzt. Sie bieten höchste Wirkungsgrade und durch ihre im Vergleich zu Pelton-Turbinen höheren Drehzahlen günstigere Dimensionen.

Die Francis-Turbine erreicht von dem Nenn-durchsatz bis hinunter zu etwa 50–40% der Nennmenge sehr hohe Wirkungsgrade, wobei auch ein großer Fallhöhenbereich möglich ist. Unterhalb dieses Bereiches fällt der Wirkungsgrad stark ab, sodass zur Abdeckung eines größeren Bereiches eine Kombination von mehreren Turbinen gewählt werden muss.

Für die Energie-Rückgewinnung in Trinkwas-



Abb. 4: Thüringer Fernwasserversorgung: Anlage Arnstadt-Espenfeld, Hochbehälter 02, Francis-Turbine, Leistung 55 kW, mit Turbinen-Bypassleitung



Abb. 5: Thüringer Fernwasserversorgung: Anlage Erfurt-Bienstadt, Francis-Turbine, Leistung 63 kW, nachträglich in bestehende Anlage eingebaut



Abb. 6: Wasserwerk Sösetal der Harzwasserwerke: Francis-Turbinen-Generatoreinheit, Leistung 153 kW, mit Schwungmasse für Inselbetrieb

seranlagen ist die Francis-Turbine sehr gut geeignet:

- Mit bis zu über 93% Wirkungsgrad erreicht sie die höchsten Werte aller im Trinkwasserbereich eingesetzten Turbinenarten,
- durch ihre vergleichsweise hohe Drehzahl ist eine kleine Baugröße möglich, was sich auch günstig auf die Baukosten auswirkt,
- die hohe Drehzahl ist auch für die Generatoren günstig. Kleine Baugrößen sind möglich und es werden gute Generatorwirkungsgrade erzielt.
- Die Turbine kann mit Gegendruck arbeiten. Sie muss also nicht zwangsläufig über einem offenen Speicherbecken angeordnet werden, sondern sie kann in ein bestehendes Rohrleitungssystem eingebaut werden. Dies ist besonders für Nachrüstung älterer Anlagen von Bedeutung, da die Kosten für Baumaßnahmen gering bleiben.
- Die völlige Nutzung des am Einbauort zur

Verfügung stehenden Restdruckes ist möglich,

- Bauformen mit liegender oder mit stehender Turbinenwelle sind möglich,
- die Rohrleitungsführung zu und von der Turbine kann in weiten Grenzen an das Gebäude angepasst werden.

Als Hauptnachteile bei einem Einsatz von Francis-Turbinen in Trinkwasseranlagen sind zu nennen:

- Die Berechnung und sorgfältige Dimensionierung der Turbinen sind sehr aufwendig. Für das Erreichen höchster Wirkungsgrade sind neben umfangreichen mathematischen Berechnungen große Erfahrung und äußerste Präzision bei der Herstellung der Turbinen erforderlich. Dies verursacht relativ hohe Kosten.
- Francis-Turbinen verlieren im unteren Teillastbereich stark an Wirkungsgrad. Zur Nutzung eines weiten Wassermengenbereiches können mehrere parallel arbeitende Turbinen erforderlich werden.



Abb. 7: Anlage Moos der Wasserversorgung Stadt Zürich/Schweiz: Francis-Turbine, Leistung 40 kW, mit elektrischer Regulierung



Abb. 8: Anlage Lindenberg, Harzwasserwerke: Vertikale Francis-Turbine, Leistung 124 kW, mit elektrischer Regulierung und Clayton-Ventil zur Druckbegrenzung alle Fotos: Wiegert & Bähr

- Das Durchflussverhalten der Turbine bei Überdrehzahl muss beachtet werden. Mit steigender Drehzahl des Turbinenlaufrades erhöhen sich die Fliehkräfte auf das Wasser in dem Laufrad. Bei einem Ansteigen der Drehzahl auf Durchgangsdrehzahl, z. B. bei einem Lastabwurf des Generators durch Netzausfall, kann dieser Effekt eine plötzliche, extreme Durchflussänderung verursachen. Besonders bei langen Rohrleitungen könnte das zu gefährlichen Druckstößen führen, die durch geeignete Maßnahmen unbedingt verhindert werden müssen.
 - Zur Aufrechterhaltung eines konstanten Durchflusses bei Netzausfall muss eine gezielte Bypassleitung zu der Turbine genau die jeweilige Wassermenge aufnehmen, die nicht mehr von der Turbine verarbeitet werden kann. Dies erfordert eine genaue Steuerungs- und Überwachungsanlage.
 - Das dynamische Verhalten der Komponenten im Bypass-Strang kann ein zusätzliches Verlangsamen der Hochlaufzeit der Turbine erforderlich machen. Hierfür müssen an der Turbinen-Generatorbaugruppe zusätzliche Schwungmassen vorgesehen werden.
 - Für Trinkwassersysteme mit längeren Rohrleitungen müssen bereits in der Planungsphase Druckstoßberechnungen durchgeführt werden, um jegliche Gefährdung der Anlage zu vermeiden.
- Beispiele ausgeführter Anlagen mit Francis-Turbinen von Wiegert & Bähr zeigen die Abb. 4 bis 9.



Abb. 9: Thüringer Fernwasserversorgung; Anlage Gotha mit einer Francis-Turbine, Leistung 260 kW