

Günther Störzer

Einsatz von Pumpen als Turbinen (PAT) im Falleitungsbetrieb des Zweckverbands Landeswasserversorgung

1 Einleitung

Ein Trinkwasserversorgungssystem hat die Aufgabe, zu jeder Zeit qualitativ hochwertiges Trinkwasser, entsprechend der Trinkwasserverordnung (TrinkwV), in der erforderlichen Menge an teilweise sehr unterschiedlich dimensionierten Übergabestellen bereit zu stellen. Um dies auch bei wochenlanger Trockenheit in heißen Sommermonaten gewährleisten zu können sind die Versorgungssysteme in der Regel recht leistungsstark und großvolumig bemessen.

Diese, für Hochverbrauchsspitzen ausgelegten Systeme werden jedoch im Jahresdurchschnitt mit wesentlich geringeren Durchflüssen beaufschlagt, so dass eine Mengenregulierung erforderlich ist. Im Falleitungsbetrieb kann eine Mengenregelung ohne große Investitionskosten mittels Drosselarmaturen realisiert werden. In Zeiten nahezu täglich steigender Energiekosten und zu erwartender Verknappung von Energieressourcen ist es jedoch aus wirtschaftlichen und umweltethischen Gründen immer weniger vertretbar, das im Falleitungsbetrieb von Trinkwasserversorgungssystemen vorhandene Energiepotential an Drosselarmaturen in nicht nutzbare Wärmeenergie umzuwandeln.

Im nachfolgenden Beitrag wird aufgezeigt, dass Energierückgewinnungsanlagen, in Form von rückwärts durchströmten Serienpumpen im Turbinenbetrieb, zur Mengenregulierung im Falleitungsbetrieb wirtschaftlich für den bedarfsorientierten und schonenden Betrieb eingesetzt werden können.

2 Voraussetzungen und Grundlagen

Falleitungssysteme in der Trinkwasserversorgung dienen zum Transport von Wasser aus einem geodätisch höher gelegenen Wasserspeicher in ein niedriger gelegenen Speicher oder Verteilnetz. Die potentielle Lageenergie des Wassers, reduziert um die durchflussabhängigen Rohrreibungsverluste der Falleitung, können genutzt und mittels Turbinen und Generatoren in elektrische Leistung umgewandelt werden.

Die nutzbare Leistung

$$P_{\text{Nutz}} = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H_{\text{Nutz}} \quad (1)$$

ist, wie in **Bild 1** verdeutlicht, durch die Rohrleitungskennlinie in Abhängigkeit vom Wasserbedarf gegeben.

Die maximal nutzbare Leistung liegt im Scheitelpunkt der Parabel bei

$$Q_{\text{opt}} = \frac{Q_{\text{max}}}{\sqrt{3}} \quad (2)$$

wenn keine Zwischenabnahme auf der, durch die Rohrleitungskennlinie gekennzeichneten Leitung erfolgt. Die gewinnbare elektrische Leistung berechnet sich aus Gl. (1) unter Berücksichtigung der Turbinen- und Generatorwirkungsgrade zu

$$P_{\text{el}} = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H_{\text{Nutz}} \cdot \eta_T \cdot \eta_G \quad (3)$$

Volle Energieausnutzung und stabile Betriebsverhältnisse sind nur gegeben, wenn die Turbine auf bzw. unterhalb des Unterwasserniveaus aufgestellt wird. Keinesfalls darf die Energielinie das Leitungsprofil schneiden oder berühren. Dieser Umstand ist bei der Standortwahl der Energiegewinnungsanlage zu berücksichtigen.

3 Einrichtungen für die Energierückgewinnung und ihre Auslegung

Eine Energiegewinnungsanlage in der Wasserversorgung besteht aus folgenden Anlagenkomponenten:

- Hydraulische Strömungsmaschine (z.B. rückwärts betriebene Serienpumpe)
- Generator (z.B. rückwärts drehender Normmotor)
- Hydraulische Einrichtungen (Rohrleitungen, Armaturen etc.)
- Mess-, Steuer- und Regelungstechnische Einrichtungen (MSR-Technik)
- Energietechnische Einrichtungen

Sowohl die Turbine, als auch der Generator müssen für die, bei Lastabwurf auftretende Durchgangsdrehzahl, die sich beim Wegfall des öffentlichen Versorgungsnetzes einstellt, bemessen sein. Der durch die hierbei entstehende Durchflussänderung bedingte Druckstoß kann mittels schnell öffnender Nebenschlussarmatur oder durch die Anordnung eines Druckkessels reduziert werden.

Um Schäden durch unzulässig hohe Drehzahlen zu vermeiden sollte der Wasserdurchfluss schnellstmöglich abgestellt werden. Dies bedingt netzunabhängig angetriebene Schließorgane. Diese Netzunabhängigkeit kann beispielsweise durch Netzersatzanlagen oder durch den Einsatz von hydraulischen-, pneumatischen oder durch Fallgewicht angetriebenen Armaturen realisiert werden.

3.1 Die hydraulische Strömungsmaschine

Die Auswahl der hydraulischen Strömungsmaschine ist abhängig von den hydraulischen Daten (spezifische Drehzahl). Für die meisten Fälle in der Wasserversorgung ($n_q \approx 10$ bis 70) eignen sich Francis-Spiralturbinen oder, als kostengünstige Alternative hierzu, rückwärts betriebene Serienpumpen (Pumpe als Turbine – PaT).

Die charakteristische Turbinenkennlinie einer PAT liegt zwischen den beiden Grenzkurven $n = 0$ (fest gebremst) und $M = 0$ (Leerlauf) (vgl. **Bild 2**). Hier ist prinzipiell eine Leistungsabgabe gegeben. Bei einem üblicherweise gekoppelten Drehstromasynchron-Generator setzt eine Leistungsabgabe erst bei übersynchroner Drehzahl ein.

Die Francis-Turbine hat im Auslegungspunkt einen etwas besseren Wirkungsgrad und den Vorteil, dass eine stetige Regelung der Wassermenge und damit der Leistungsabgabe durch Leitapparatverstellung möglich ist.

Der erzielbare Wirkungsgrad von PATs liegt in der Größenordnung des Pumpenwirkungsgrades. Aufgrund der definierten Turbinenkennlinie kann nur ein Schnittpunkt mit der Rohrleitungskennlinie gebildet werden, daher kann eine Mengenregelung nur durch Zu- oder Abschaltung einer PAT erfolgen. Aus diesem Grund sind für feinere Regelungen mehrere PAT in Parallelschaltung erforderlich (vgl. **Bild 3**).

3.2 Der Generator

Als Generator kommt in der Regel, wegen seines einfachen Aufbaues und seines unkomplizierten Betriebsverhaltens eine Drehstrom-Asynchronmaschine in Kurzschlussläuferausführung in Frage. Der Einsatz dieses Maschinentyps setzt die Einspeisung in das Versorgungsnetz des öffentlichen elektrischen Energieversorgungsnetzes voraus, da der Generator zum Betrieb zwingend benötigte Blindleistung aus dem Netz beziehen muss. Ein elektrischer Inselbetrieb erfordert eine komplizierte und aufwendige Regelungstechnik und ggf. den Einsatz eines anderen Elektromaschinentyps.

Wird die mit der Turbine gekoppelte Asynchronmaschine übersynchron angetrieben, gibt sie Energie in das elektrische Netz ab, wobei die Energieabgabe annähernd proportional zum

Drehmoment ist. Die Drehzahlerhöhung (Schlupf) im Nennpunkt beträgt ca. 1 bis 5 % der Synchrondrehzahl und ist abhängig von der Motorausführung und der Leistungsgröße.

Die Synchrondrehzahl n_{syn} [1/min] ist durch die Netzfrequenz f_N [1/S, Hz] und die Polpaarzahl p (Maschinengröße) über die Beziehung

$$n_{\text{syn}} = p \cdot 60 \cdot f_N \quad (4)$$

gegeben. Damit ergeben sich bei Energienetzen mit $f_N = 50$ Hz Synchrondrehzahlen von

$p = 1:$	$n_{1\text{syn}} =$	3 000 1/min	
$p = 2:$	$n_{2\text{syn}} =$	1 500 1/min	
$p = 3:$	$n_{3\text{syn}} =$	1 000 1/min	
$p = 4:$	$n_{4\text{syn}} =$	750 1/min	usw.

Für ein schonendes Zuschalten von Asynchron-Generatoren auf das öffentliche Netz ist darauf zu achten, dass die Drehzahldifferenz zwischen Generator Drehzahl und Netzsynchrodrehzahl so gering wie möglich ist. Daher sind Asynchron-Generatoren mit einem Drehzahlerfassungssystem auszustatten, die beispielsweise einen Generator mit zwei Polpaaren ($n_{2\text{syn}} = 1\,500$ 1/min) nur im Drehzahlfenster von $1\,499 < n < 1\,505$ 1/min zuschalten.

Für kleinere Leistungen kommen gewöhnlich Drehstrom-Normmotoren mit einer Nennspannung von $U_N = 400$ V in Betracht, die direkt ins Niederspannungsnetz des Energieversorgers einspeisen. Bei größeren Leistungen ($P_{el} > 630$ kW) dringt man in Bereiche vor in denen Mittelspannungsmotoren mit Nennspannungen bis $6\,300$ V zum Einsatz kommen, die entweder direkt oder mittels eines Transformators in ein Mittelspannungsnetz einspeisen.

3.3 Hydraulische Einrichtungen

Die weiteren hydraulischen Einrichtungen sind zur Sicherstellung der Wasserversorgung bei Teil- oder Überlastbetrieb sowie zur Turbinenrevision ein Nebenschluss mit Nebenschlussarmatur erforderlich. Absperrarmaturen vor und hinter der Turbine sind für Revisionszwecke vorzusehen.

In Einzelfällen kann eine Regelarmatur bei PATs für eine Wassermengenregulierung eingesetzt werden. Nach Möglichkeit sollte hier aber eine verlustlose Regelung durch Zu- und Abschaltung paralleler Aggregate erfolgen.

3.4 Energietechnische Einrichtungen

An energietechnischen Einrichtungen sind Schaltanlagen für die Energieableitung mit Generatorschalter, Kondensatoren zur Blindstromkompensation der Asynchronmaschine, ggf. eine Umspannstation, die erforderlichen Messeinrichtungen für den Energiefluß und die

Eigenbedarfseinrichtungen erforderlich. In jedem Fall sind mit dem zuständigen Energieversorgungsunternehmen die Meß-, Schutz- und Überwachungseinrichtungen für die Energieableitung abzustimmen.

3.5 Mess-, Steuer- und Regelungstechnische Einrichtungen

Die MSR-Einrichtungen dienen der Überwachung und Automation der gesamten Energierückgewinnungsanlage. Durch die Automation der aus den Turbinen, Generatoren, Nebenschlussarmaturen und Hilfsaggregaten bestehenden Energiegewinnungsanlage kann die Bedienung so weit vereinfacht werden, dass sie wie eine normale Drosselarmatur durch Auf-, Halt- und Zu-Befehle steuerbar ist.

Zu automatisieren sind hauptsächlich

- die Drehzahlsynchronisation und die Zuschaltung des Generators ans Netz,
- das Zu- und Abschalten von Kompensationskondensatoren (Blindleitungsregelung),
- die Überwachung von Leistung, Strom, Lager- und Kühlmitteltemperaturen,
- die Abschaltung des Aggregats im Störfall und bei Netzausfall,
- die druckstoßfreie Umschaltung auf Nebenschlussbetrieb,
- das Wiederanfahren der Turbine nach Netzstörungen,
- das Zuschalten der Nebenschlussarmatur bei Spitzenbedarf.

Diese Automatisierungsmaßnahmen vor Ort sind die Voraussetzung für die Einbindung der Energiegewinnungsanlage in ein übergeordnetes System, z.B. als Stellglied in einer Behälterwasserstandsregelung

4 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Da eine Energiegewinnungsanlage für die Wasserbereitstellung nicht unbedingt notwendig ist, müssen sich sowohl die Zusatzinvestitionen als auch die durch den Betrieb entstehenden Mehraufwendungen durch den Betriebserlös amortisieren.

Auf der Sollseite sind die Kosten für den Kapitaldienst, die Abschreibung, den Betrieb und die Instandhaltung zu berücksichtigen, auf der Habenseite der Erlös aus der Eigenbedarfsnutzung und Stromlieferungen ins öffentliche Versorgungsnetz.

Stromgewinnungsanlagen, die potentielle Energie aus natürlichen höher gelegenen Vorkommen in elektrische Energie umwandeln, wie beispielsweise Laufwasserkraftwerke an Flüssen fallen unter die Begünstigungen des Erneuerbare-Energien-Gesetz – EEG. Im Falle der LW, die aufgrund der gegebenen Topologie zwischen Trinkwasserquelle und Abnehmer, das Wasser zunächst auf ein höheres Niveau fördern muss, und erst im daran anschließenden Falleitungsbetrieb Energie „zurück“ gewinnen kann – per Definition also Pumpspeicherbetrieb ausübt – wird gemäß EEG § 6 (5) nicht begünstigt.

Vor diesem Hintergrund wird bei der LW jeweils im Zuge der Identifizierung nutzbarer potentieller Energie geprüft, ob die Energie zur Reduzierung des Eigenbedarfes beispielsweise in einem in der Nähe liegenden Pumpwerk dienen kann. In so einem Fall sind selbstverständlich auch die Investitionen für einen Kabelbau ggf. über mehrere Kilometer Länge zu berücksichtigen.

5 Überblick über die Energierückgewinnung bei der Landeswasserversorgung

Der Zweckverband Landeswasserversorgung in Stuttgart, kurz LW genannt, wurde 1912 zunächst als staatliches Unternehmen gegründet und mit der Aufgabe betraut, die wasserarmen Gebiete des damaligen Königsreiches Württemberg im Mittleren Neckarraum und im Nordosten des Landes mit Trinkwasser zu besorgen, das am Südostrand der Schwäbischen Alb zwischen Ulm und Heidenheim gewonnen wird.

Das in **Bild 4** dargestellte Fördersystem ist entsprechend den Bedarfsanforderungen gewachsen.

Die erste Leitung in DN 900 wurde 1917 in Betrieb genommen und führte über die Trasse Heidenheim - Aalen – Schwäbisch Gmünd nach Stuttgart. Aufgrund des enorm gestiegenen Wasserbedarfes wurde noch vor dem 2. Weltkrieg die parallel zur ersten Leitung verlaufende Leitung 2 gebaut.

Bereits beim Bau der ersten Leitung wurden Energiegewinnungspotentiale identifiziert und mit einer Francis-Turbine bereits im Jahre 1922 in der ehemaligen Stromgewinnungsanlage Rechberg (geographisch zwischen SBH Osterbuch und BH Breech gelegen und aufgrund der Erneuerung der Stromgewinnungsanlage Breech im Jahr 2006 stillgelegt) realisiert. Weitere Potentiale konnten damals nicht realisiert werden, da aufgrund des stark ansteigenden Wasserbedarfes keine Überschussenergie nutzbar gemacht werden konnte.

Erst durch den Neubau der Hauptleitung 3 in DN 1400 über die Trasse Geislingen – Göppingen war das gesamte Leitungssystem der LW so bemessen, dass bei normaler Abnahmesituation eine Rückgewinnung auf allen Leitungssystemen möglich wurde.

Die Leitungen im Bereich südlich von Stuttgart und Göppingen bis Blaubeuren, der ehemaligen Blau-Lauter-Gruppe, kamen infolge einer Fusion 1994 zur LW hinzu.

Der Ausbaugrad der Energiegewinnung bei der LW ist im dargestellten Prinzipbild (**Bild 5**) ersichtlich.

In dem gewachsenen System enden die von den Hauptpumpwerken ausgehenden Druckleitungen im höchsten Punkt in den Scheitelbehältern. Von hier aus fließt das Wasser in den so genannten Falleleitungen den tiefer liegenden Behältern zu, wobei die Wassermengenregulierung durch die Energiegewinnungsanlagen vorgenommen wird.

Die Gesamtkapazität der Speicherbehälter entspricht ca. einem durchschnittlichen Tagesbedarf. Somit ist es bei sinnvoller Nutzung der Behälter möglich, einen energiekostenoptimierten Betrieb des Systems zu fahren.

Dieser energieoptimierter Betrieb sah die vielen Jahre vor der Liberalisierung des Strommarktes vor, dass während des Niedertarifes (Nachtstrom) kostengünstig mit großen Pumpen in den Förderwerken die Scheitelbehälter gefüllt und während des Hochtarifes (Tagstrom) über die Turbinen Spitzenleistungen erzeugt und gewinnträchtig an die öffentlichen Energieversorger verkauft wurde. Inzwischen, mehrere Jahre nach der Liberalisierung veränderten sich diese Verhältnisse drastisch: Zum einen gibt es keine Unterscheidung mehr zwischen Nieder- und Hochtarif, d.h. es gibt für die LW nur noch einen tageszeitunabhängigen Stromeinkaufspreis, zum anderen verringerten sich die Erlöse aus dem Turbinenstromverkauf bei gleichzeitig explodierenden Stromeinkaufspreisen für die Pumpen. Das Verhältnis des Stromeinkaufspreises zum Stromverkauf liegt für die LW derzeit bei etwa 2:1.

Die derzeitige Betriebsweise hat daher zur obersten Priorität, die spezifischen Transportkosten eines Kubikmeters auf einem Minimum zu halten. Somit gehen in diese Gesamtbetrachtung alle Kostenaufwendungen ab den Reinwasserbehältern in den Wasserwerken über den Energiebedarf aller Pumpen, den Energieerlös aller Turbinen bis zu den Endabgabestellen ein. Das bedeutet für den Turbinenbetrieb, dass nicht mehr in Maxima gedacht wird, bei denen in der Tagesspitzenlastzeit möglichst viel Energie erzeugt wurde, sondern dass auf stetigen Durchfluss bei möglichst hoher Energieerzeugung pro durchfließenden Kubikmeter (Aspez → max) geachtet wird. Hierbei dienen die Wasserbehälter als aktives Bewirtschaftungselement und nicht nur rein als Trinkwasserspeicher.

Optimiert wird dieser Betrieb durch ein zentrales mathematisches Berechnungsmodell, das für eine, vom Betriebspersonal vorzugebenden Tagesbereitstellungsmenge, die Fahrweise der Förderpumpen in den Wasserwerken als auch die Durchflüsse durch die Turbinen in den

Stromgewinnungsanlagen vorgibt. Ebenfalls berechnet dieses Modell, welcher Anteil über die Leitungen 1/2 (Osterbuch – Schönbühl) und wie viel über die Leitung 3 (Amstetten – Schönbühl) fließt.

6 Betriebserfahrungen mit rückwärts betriebenen Pumpen

Die Landeswasserversorgung betreibt seit dem Jahr 1922 Francis-Spiralturbinen. Seit dem Jahr 1985 setzt die LW Serienpumpen – rückwärts durchströmt – als Turbinen (PaT) ein.

Bei der LW werden keine gezielten regelmäßigen Revisionen oder Instandhaltungsmaßnahmen vorgenommen. Allerdings sind alle Turbinen mit Sensoren an Verschleißteilen zur Erfassung von Lager- und Wicklungstemperaturen sowie Leckage an Gleitringdichtungen und Überwachungseinrichtungen für Überdrehzahl und Energiebezug ausgestattet. Diese Einrichtungen haben bisher alle Unregelmäßigkeiten rechtzeitig erkannt und die jeweilige Maschine vollautomatisch außer Betrieb genommen ohne dass Folgeschäden aufgetreten sind.

Nicht zu unterschätzen sind jedoch Informationen des aufmerksamen Betriebspersonals. Da dieses den „Sound“ des Normalbetriebes einer Anlage im Ohr hat erkennt es, lange bevor die Sensorik Grenzwertüberschreitungen meldet, dass eine Maschine nicht mehr so läuft wie bisher. Eine Überprüfung der auffälligen Maschine mittels Schwingungsmessung und Analyse des Frequenzspektrums geben dann schnell Auskunft darüber, wo was getan werden muss.

In der Regel treten an den Turbinen etwa nach zehn- bis zwanzigtausend Betriebsstunden Verschleißerscheinungen entweder an der Gleitringdichtung oder an einem Lager auf. Die Standzeiten der Generatoren sind etwa doppelt so lang. Da bei einer Reparatur die Aufwendungen für den Aus- und Einbau sowie den Transport in eine Fachwerkstatt gegenüber den Ersatzteilen einen hohen prozentualen Anteil haben, lässt die LW bei diesen Maßnahmen generell alle Lager und die Gleitringdichtung ersetzen.

Sehr viel Wert wird bei der LW auf die nach der Remontage erforderliche Ausrichtung des Generators zur Turbine gelegt. Hier ist immer wieder zu beobachten dass Fachmonteure dies lediglich mit unzureichender Messtechnik vornehmen. Je genauer jedoch ein Generator ausgerichtet ist, desto länger bleibt die Turbine störungsfrei in Betrieb. Hier ist somit die strenge Aufsicht des Betreibers gefragt!

7 Schlussbemerkung

Wie am Beispiel des Zweckverbands Landeswasserversorgung dargestellt, können ohne Beeinträchtigung der Wassergüte und unter Berücksichtigung der Wasserversorgung Stromgewinnungsanlagen in Trinkwasserversorgungssystemen wirtschaftlich eingesetzt werden. Bei sachgerechter Ausführung kann zudem ein zuverlässiger und schonender Betrieb der Anlagensysteme gewährleistet werden.

Durch den Einsatz von preiswerten rückwärts durchströmten Serienpumpen mit gekoppelten Normmotoren können kostengünstige und einfache Anlagen gebaut werden, die sich auch bei kleineren Leistungen innerhalb kurzer Zeit amortisieren.

In jedem Fall ist die Nutzung dieser Energie ein wertvoller Beitrag zur Verringerung der CO₂-Emission und zur effizienteren Nutzung der kostbaren Energievorräte.

Autoren

Dipl.-Ing. (FH) Günther Störzer
Zweckverband Landeswasserversorgung
Schützenstraße 4
70182 Stuttgart
stoerzer@lw-online.de

Verzeichnis der Bildunterschriften

- Bild 1: Energieumsatz
- Bild 2: Vergleich Turbinenkennlinie (links) und Pumpenkennlinie (rechts) einer PAT mit $n_q = 37,5 \text{ min}^{-1}$
- Bild 3: Kennlinienfeld von 4 parallel schaltbaren PAT ($n_q = 37,5 \text{ min}^{-1}$) geschnitten mit zwei Anlagenkennlinien (mit und ohne Unterwegsabgabe).
- Bild 4: Übersichtsplan Fernleitungsnetz der LW mit Stromgewinnungsanlagen
- Bild 5: Falleitungssystem der Landeswasserversorgung

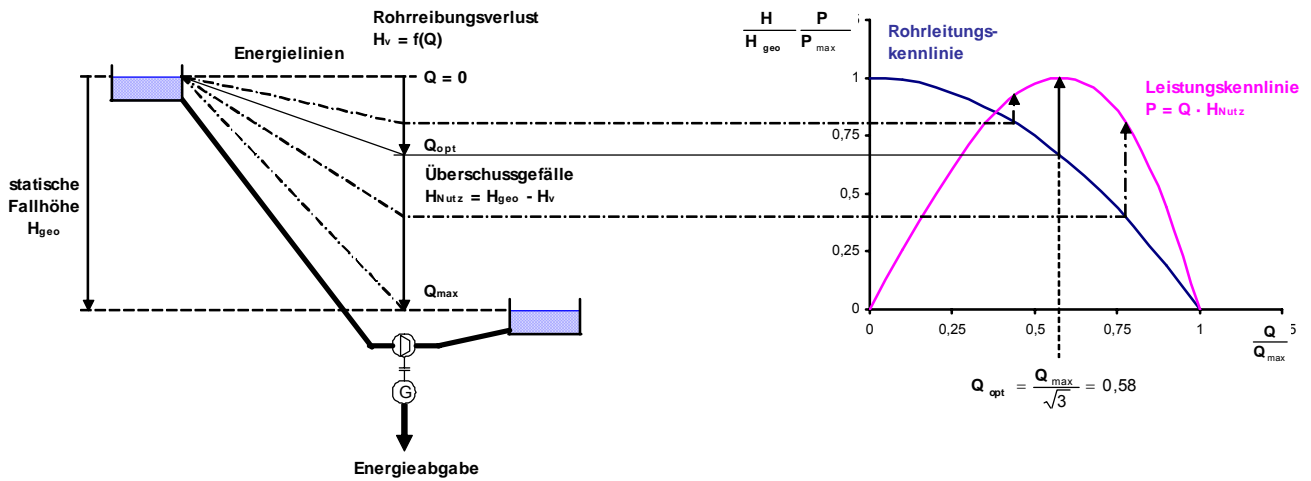


Bild 1: Energieumsatz

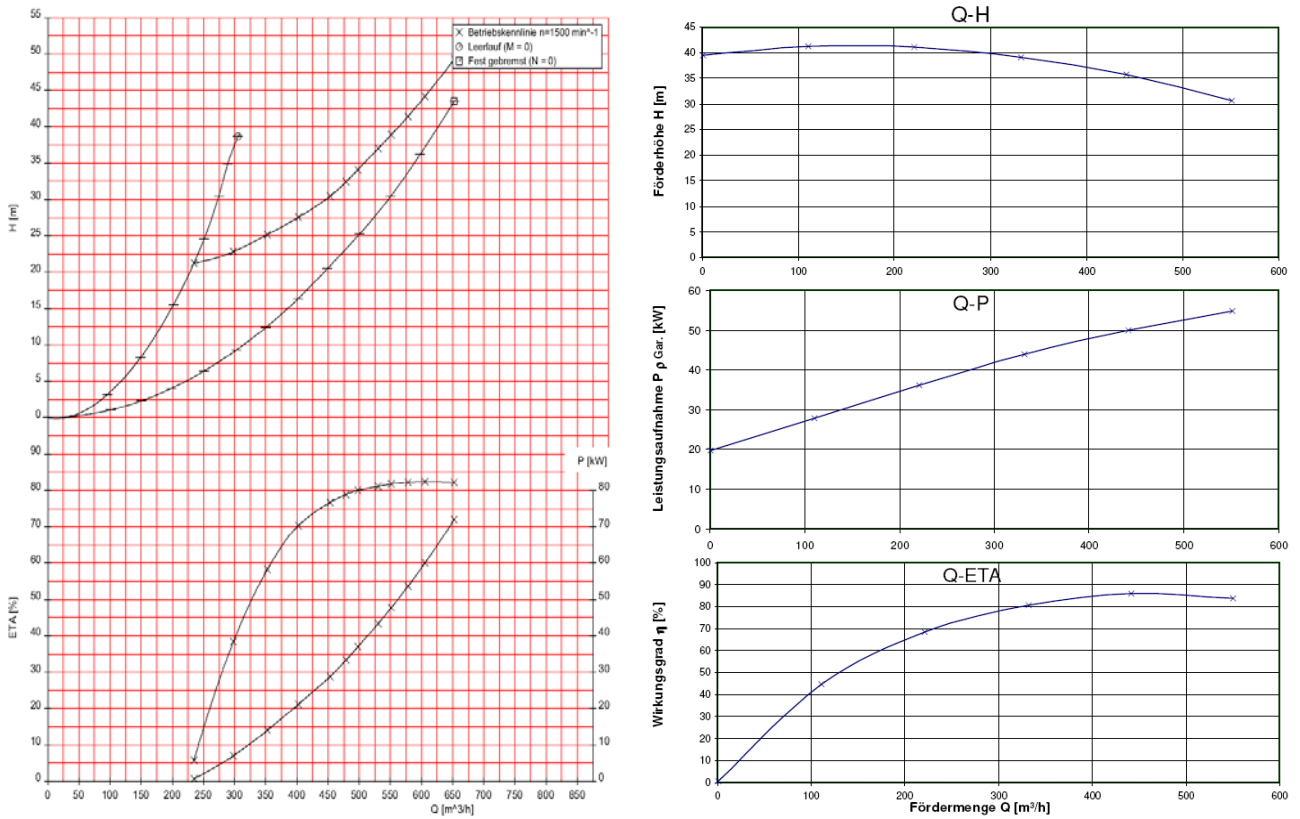


Bild 2: Vergleich Turbinenkennlinie (links) und Pumpenkennlinie (rechts) einer PAT mit $n_q = 37,5 \text{ min}^{-1}$

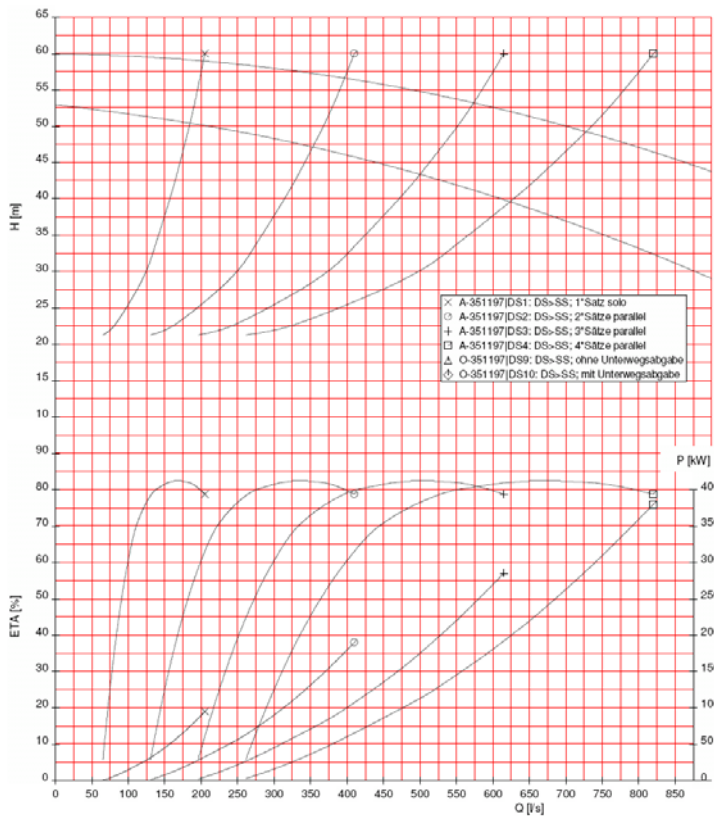


Bild 3: Kennlinienfeld von 4 parallel schaltbaren PAT ($n_q = 37,5 \text{ min}^{-1}$) geschnitten mit zwei Anlagenkennlinien (mit und ohne Unterwegsabgabe).

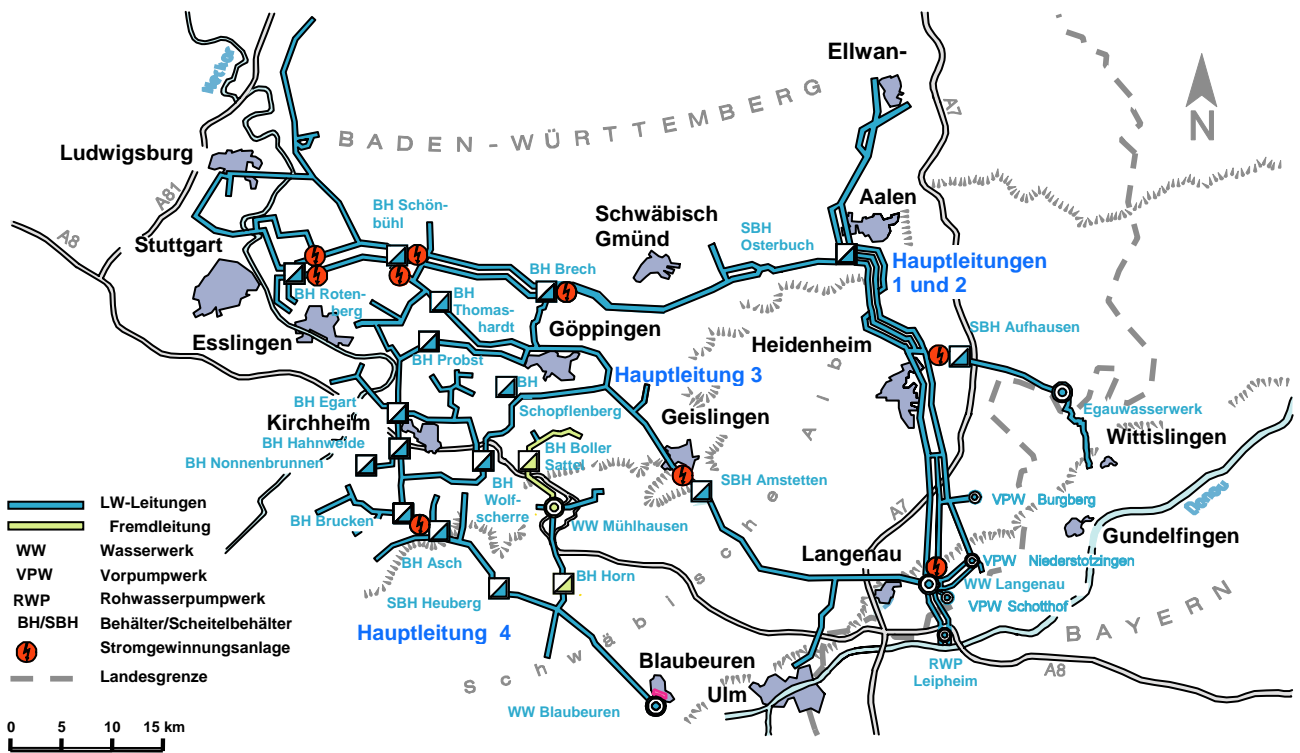


Bild 4: Übersichtsplan Fernleitungsnetz der LW mit Stromgewinnungsanlagen

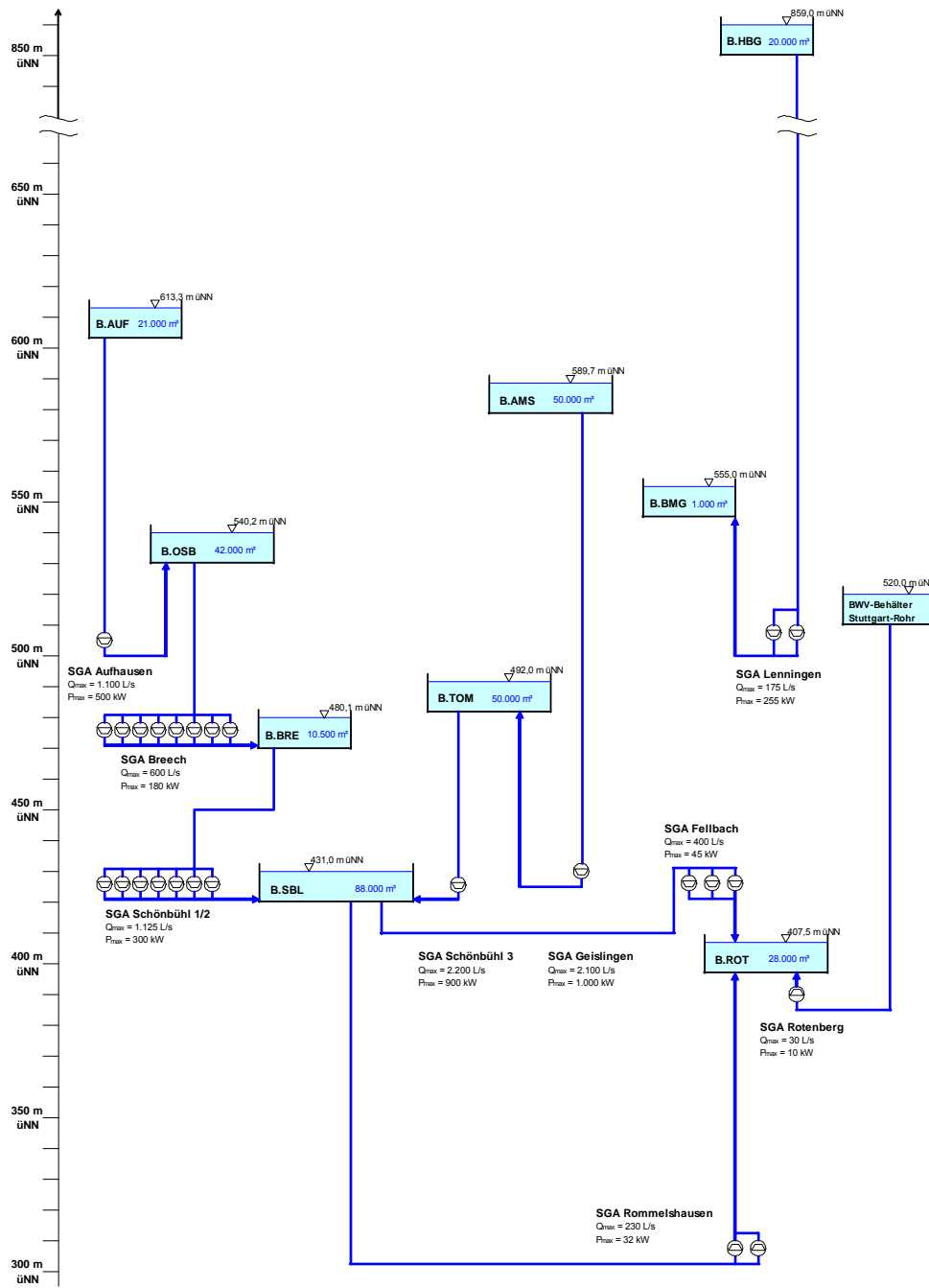


Bild 5: Falleitungssystem der Landeswasserversorgung