

Kosten sparendes Mess- und Auswerteverfahren

Berechnung der Durchflussmengen in einem Pumpspeicherwerk

Computation of water flow at a pumped storage hydroelectric power plant

Die Einführung der Oberflächenwasser-Entnahmegebühr stellte die Hamburgischen Electricitäts-Werke AG (HEW) vor das Problem der Erfassung der vom Pumpspeicherwerk Geesthacht der Elbe entnommenen Wassermenge. Eine innovative und kostensparende Lösung wurde in Zusammenarbeit von HEW und der Universität Rostock entwickelt. Es entstand ein analytisches Mess- und Auswerteverfahren, das bereits vorhandene Messsignale nutzt. Die erforderliche Hard- und Software ist heute fest im Kraftwerk installiert.

SUMMARY

Due to the introduction of the payment for the use of Elbe water the problem of measuring the water volume used by the pumped storage hydroelectric power plant Geesthacht existed for the HEW. An innovatively and cost-saving solution was developed in co-operation by HEW and the University of Rostock. The developed analytic measuring and evaluation procedure uses already existing measuring signals. The necessary hard- and software is installed now inside of the power plant.

Dipl.-Ing. **Gerhard Artinger**, Leiter konventionelle Kraftwerke, Dipl.-Ing. **Uwe Schulz**, Leiter Elektro- und Leittechnik konventionelle Kraftwerkstechnik, Hamburgische Electricitäts-Werke AG, Hamburg; Dipl.-Ing. **Axel Holst** und Dr.-Ing. **Fred Prillwitz** sind wissenschaftliche Mitarbeiter, Prof. Dr.-Ing. **Harald Weber** ist Institutsleiter, Institut für Elektrische Energietechnik, Universität Rostock.

Zu Beginn der fünfziger Jahre wurde in Zusammenarbeit zwischen der Wasser- und Schifffahrtsdirektion (WSD) Hamburg und der Hamburgischen Electricitäts-Werke AG (HEW) die Idee eines Pumpspeicherwerkes (PSW) bei Geesthacht geboren. Zur Regulierung der Elbe wurde eine Staustufe gebaut, die dem Pumpspeicherwerk Geesthacht als Unterwasserbecken dient (*Bild 1*). Das Speicherbecken liegt rd. 80 m höher auf dem Geestrücken. Über drei Fallrohre mit einem Durchmesser von jeweils 3,80 m kann Wasser mit drei Maschinensätzen in das Speicherbecken gepumpt oder bei Bedarf wieder entnommen werden. Die drei Pumpspeichersätze sind identisch aufgebaut und ermöglichen im Generatorbetrieb eine stufenlose Leistungsabgabe zwischen 0 und 45 MW je Maschinensatz.

Die klassische Aufgabe, nachts bei geringem Leistungsbedarf Energie zu speichern und zu Spitzenverbrauchszeiten am Tage zur Verfügung zu stellen, hat sich im Verlauf der letzten 10 Jahre geändert. Das PSW Geesthacht erhielt vielmehr die Aufgabe der Leistungs-Frequenz-Regelung bzw. Sekundärregelung. Mit den Maschinensätzen wird innerhalb des Versorgungsgebietes (Regelzone) die Differenz zwischen eingespeister und verbrauchter Leistung ausgeglichen. Um diese Aufgaben zu erfüllen, werden jährlich rd. 800 Mio. m³ Wasser der Elbe entnommen und mit Sauerstoff angereichert wieder zugeführt.

Mit Einführung der Oberflächenwasserentnahmeabgabe (Oberflächenwasserabgabegesetz – Owag) seit dem 1. Januar 2001 von 7,7 €/1 000 m³ durch das Land Schleswig-Holstein kam eine erhebliche zusätzliche Kostenbelastung auf das PSW zu.

Erste Überlegungen zur Kostenreduzierung führten zu einer engeren Anpassung der Regelbandbreite an das Regelprofil. Das Regelprofil wird in der Regelzone Hamburg überwiegend durch einen Großkunden geprägt, der etwa im 15-min-Rhythmus eine Leistung von 100 MW zu bzw. abschaltet.

Mit der Anpassung der Bandbreite auf ± 50 MW (Gesamtanlage) und dem Festlegen eines mittleren Oberwasserpegels konnte die Owag-pflichtige Wassermenge von rd. 800 Mio. m³/a auf rd. 500 Mio. m³/a reduziert werden. Das Prinzip der optimierten Owag-pflichtigen Wassermenge ist auf die Fahrweise in der Betriebsart »hydraulischer Wasserkurzschluss« (HWKS) zurückzuführen (*Bild 2*). Diese Betriebsart ermöglicht bei voller Leistungsbandbreite der Anlage einen quasi zeitlich uneingeschränkten Sekundärregelbetrieb.

Im HWKS wird stets eine Teilmenge Wasser über das Hosenrohr direkt der Turbine und dann wieder der Elbe zugeführt. Von der Stellung des Leitapparates der Turbine ist abhängig, ob der Speichersee dabei gefüllt oder entleert wird. Bei Erhalt der vollen Regelbandbreite und einer Regelzeit im Sekundenbereich gelangt etwa die Owag-pflichtige Wassermenge in den Hochspeicher, die der negativen Regelleistung entspricht. Problematisch ist die Erfassung der von der Elbe in das Oberbecken gepumpten Wassermenge, da eine dafür geeignete Messeinrichtung bisher nicht vorgesehen war.

Möglichkeiten zur Erfassung der Owag-pflichtigen Wassermenge

Unter Einbeziehung der vorhandenen Messstellen und der Anwendung der physikalischen Gesetzmäßigkeiten sollte ein kostengünstiges, den Anforderungen genügendes Messsystem installiert werden.

Prinzipiell kann über die Pegeländerung im Speicherbecken die zugeführte Wassermenge berechnet werden. Eine Pegelmessung über Druckmessdose ist vorhanden. Unter Berücksichtigung der verschiedenen Windverhältnisse war die Genauigkeit der installierten Messung des Oberwasserpegels für eine abrechnungsfähige Owag-Messung nicht ausreichend. Die Nachrüstung einer Durchflussmessung an den drei Fallrohren erscheint nicht

wirtschaftlich. Messfehler, verursacht durch Verformen der Rohre aufgrund der wechselnden Sonneneinstrahlung sind aufwändig zu kompensieren. Eine zusätzliche Messeinrichtung bedeutet ebenfalls einen kostenintensiven zusätzlichen Wartungs- und Instandhaltungsaufwand.

Bereits in der Vergangenheit wurden einige elektrische Größen an der Synchronmaschine bzw. am Netzanschluss genau erfasst. Anhand der Maschinenkennfelder kann daraus die Owag-pflichtige Wassermenge berechnet werden.

Ausgehend von den Vollastdaten führt die einfache Linearisierung um den Arbeitspunkt zu einer zu ungenauen Abschätzung. Diese Vorgehensweise wurde bereits zu Beginn der Überlegungen verworfen. In zwei Versuchsfahrten wurde eine ortsveränderliche Ultraschall-Durchflussmengenmessung am mittleren Rohr auf halber Rohrlänge installiert. Beim Durchfahren der Leistung zwischen 0 und 100 % konnte so für die Betriebsart HWKS eine Kennlinie »Wassermenge als Funktion der elektrischen Leistung« (Bild 3) ermittelt werden.

Bei den bisherigen Betrachtungen wurde von einem mittleren Oberwasserpegel ausgegangen. Während des Einsatzes zur Bereitstellung von Sekundärregelleistung ändert sich der Oberwasserpegel jedoch abhängig von der Dauer des Betriebes im jeweiligen Arbeitspunkt. Neben der Pegeldifferenz zwischen Ober- und Unterwasser haben die Rohrreibungsverluste, die Verluste der Turbine, der Synchronmaschine und der Pumpe selbst einen Einfluss auf die Richtung Hochspeicher geförderte Wassermenge.

In einem Modell, das an der Universität Rostock, Institut für Elektrische Energietechnik entwickelt wurde, konnten auch diese Einflüsse exakt nachgebildet und damit in der Owag-pflichtigen Wassermenge berücksichtigt werden.

Erfassung der Owag-pflichtigen Wassermenge durch iteratives Rechenverfahren

Für eine genaue Berechnung der stationären Wassermengenströme abhängig vom Betriebszustand (Betriebsart, Leistung, Wasserpegeldifferenz) musste zunächst ein Modell der Gesamtanlage unter Verwendung von zulässigen Vereinfachun-



Bild 1. Pumpspeicherwerk Geesthacht

gen entwickelt werden [1]. So wurde einzelnen Rohrabschnitten sowie dem Ringschieber jeweils ein Reibungswiderstand, den Maschinen (elektrische Maschine, Turbine, Pumpe) je eine Wirkungsgradkennlinie zugeordnet (Bild 4).

Anlagenparameter und Wirkungsgradkennlinien wurden durch Analyse der vorhandenen Messungen identifiziert. Die Kennlinien wurden über eine Kurvenapproximation im Least-square-Verfahren in geschlossene Funktionen überführt. Den physikalischen Hintergrund der hydraulischen Anlage liefern die Gleichungen von Bernoulli und Torricelli.

Im Pumpbetrieb ergibt sich dabei aus dem Schnittpunkt der Pumpenkennlinie mit der Druckhöhenverlustkennlinie des Gesamtrohres ein direkter Zusammenhang zwischen Speicherzufluss, geodätischer Höhe und Pumpenleistung. Die gesuchte Größe des Speicherzuflusses kann für diese Betriebsart also direkt aus der geodätischen Höhe oder aus der Pumpenleistung abgeleitet werden.

Für die anderen beiden Betriebsarten Turbinenbetrieb und HWKS ist zusätzlich die Stellung des Leitapparates eine unbekannte Größe. Hier müssen die geodätische Höhe und gleichzeitig die elektrische Leistung Aufschluss über den mo-

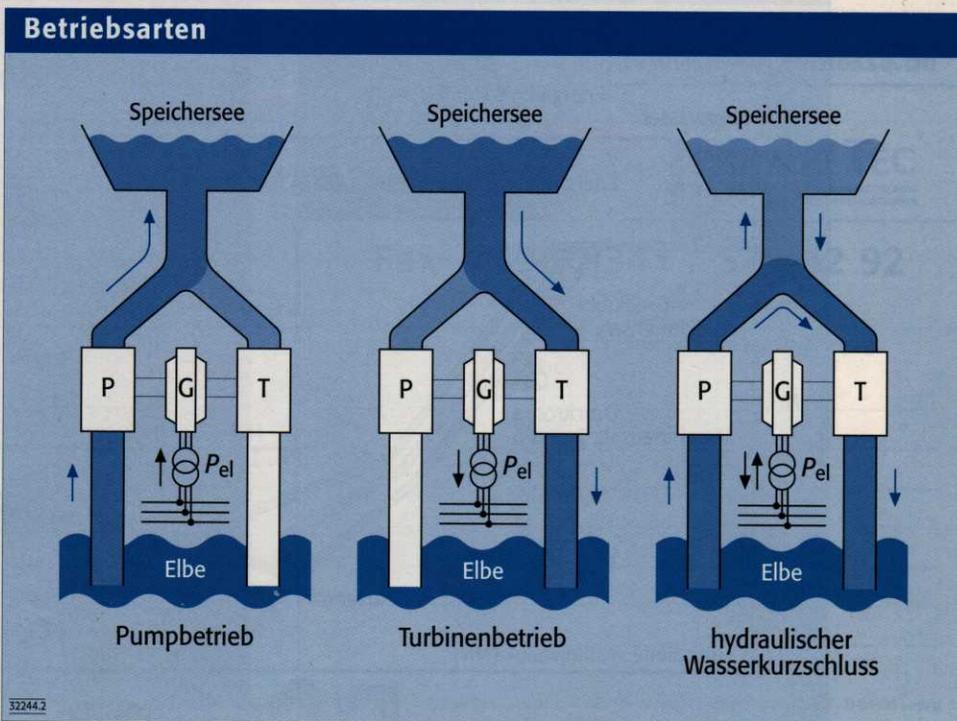


Bild 2. Prinzip der Betriebsarten

Ultraschallmessung

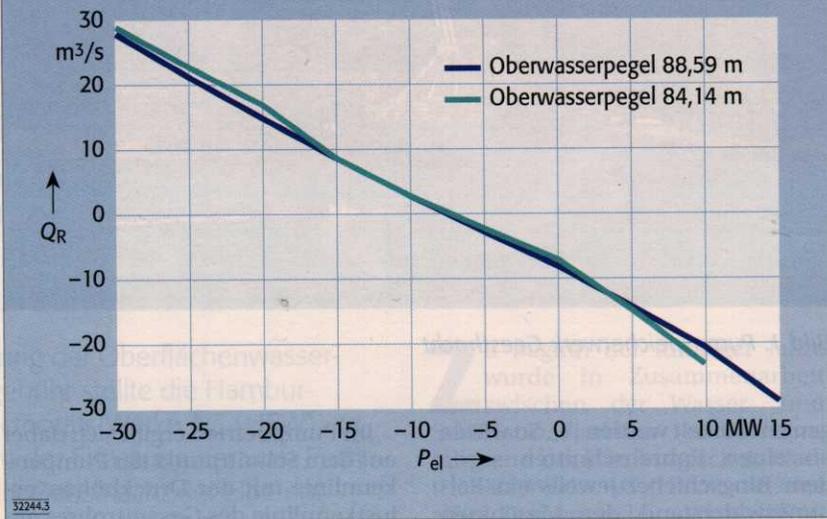


Bild 3. Gemessener Rohrdurchfluss abhängig von der elektrischen Leistung in der Betriebsart HWKS

mentanen Wassermengenstrom in den Druckrohren liefern. Es entsteht eine dreidimensionale Funktion für den Speicherzufluss $Q_R = f(H_{geo}, P_{el})$ (Bild 5). Die Berechnung des Durchflusses im Turbinenbetrieb erfordert dazu eine Iteration über der Turbinenwirkungsgradkennlinie.

Beim HWKS werden die Berechnung von Pumpbetrieb und Turbinenbetrieb miteinander kombiniert. Aufgrund der vielfältigen gegenseitigen Abhängigkeiten der einzelnen Größen untereinander und der daraus entstehenden Gleichungssysteme höherer Ordnung kann jedoch keine geschlos-

sene Lösung gefunden werden. Aus diesem Grund ist die Anwendung eines weiteren Iterationsverfahrens erforderlich (Bild 6).

Die Schnittstelle der Wirkungsbe-
reiche von Pumpe und Turbine auf
der hydraulischen Seite ist der
Druck am Hosenrohr; auf der me-
chanischen Seite ist es die mechani-
sche Wellenleistung. Unter Einbe-
ziehung der Berechnungen an
Pumpe und Turbine wird zyklisch
die Bilanz an beiden Schnittstellen
gebildet, wobei das Ergebnis jeweils
der Startwert des neuen Berech-
nungsschrittes ist. Der berechne-
te Rohrdurchfluss nähert sich dabei
immer weiter der Lösung des
Gleichungssystems. Nach dem Er-
reichen des Abbruchwertes für die
Genauigkeit wird die Lösung über-
nommen.

Die auf diese Art ermittelten Rechenergebnisse des gesamten Arbeitsbereiches beim hydraulischen Wasserkurzschluss ergeben die 3-D-Kurve $Q_R = f(H_{geo}, P_{el})$ (Bild 5). Q_R ist dabei der je Maschinensatz von der Elbe ins Oberbecken geförderte Wassermengenstrom abhängig von der elektrischen Wirkleistung der Synchronmaschine (P_{el}) sowie der Wasserpegeldifferenz (H_{geo}). Die konstanten Flächen in Bild 5 bei den Grenzdurchflüssen stellen die

Anlagenschema

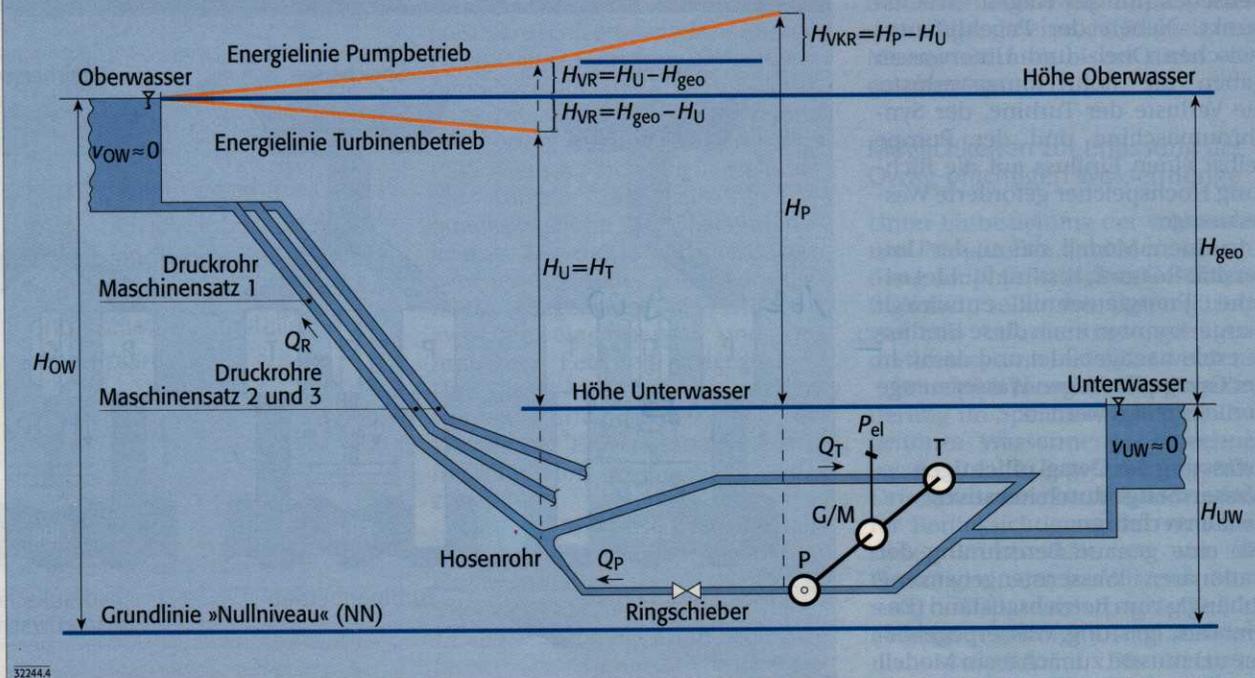


Bild 4. Anlagenschema des PSW Geesthacht

Abhängigkeit

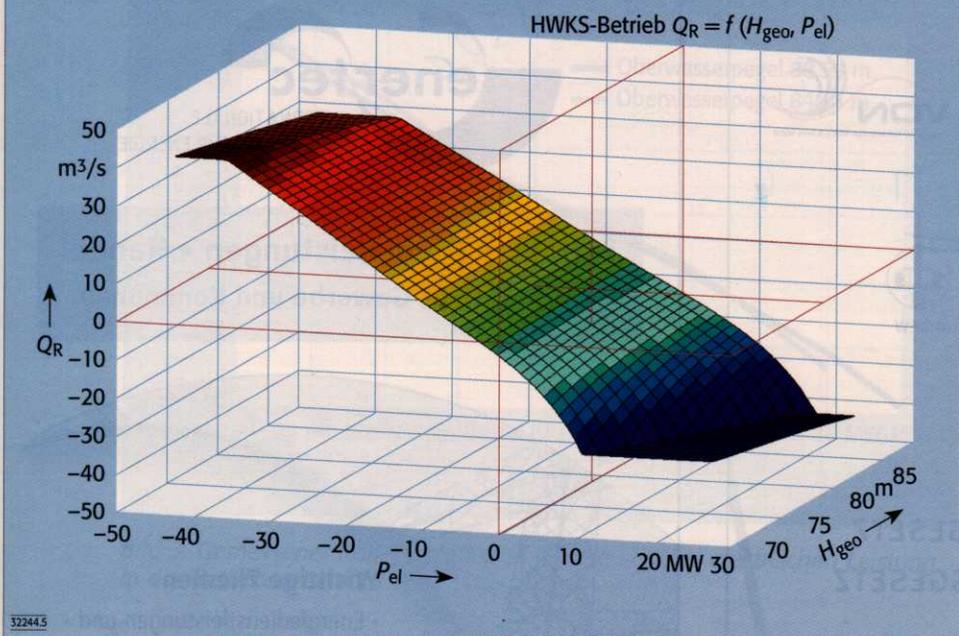


Bild 5. Rohrdurchfluss abhängig von elektrischer Leistung und geodätischer Höhe in der Betriebsart HWKS

Rechenalgorithmus

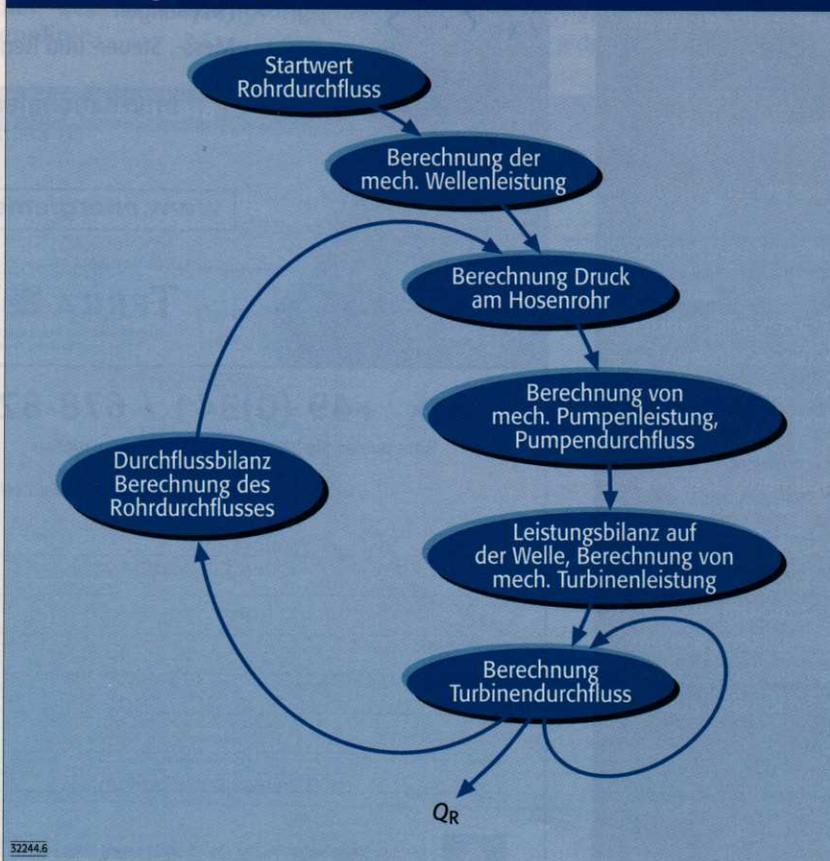


Bild 6. Prinzip des Rechenalgorithmus für HWKS-Betrieb

Konvergenzgrenzen des Berechnungssystems dar und sind mit den natürlichen Leistungsgrenzen des Kraftwerks identisch. Beim Vergleich der errechneten Werte mit den zuvor durch Ultraschallmessung ermittelten Durchflüssen ergaben sich sehr gute Übereinstimmungen. Das ist ein Hinweis auf exakt bestimmte Kraftwerksparameter und -kennlinien sowie die Gültigkeit des basierenden Kraftwerksmodells.

Programmierung und Implementierung der Messeinrichtung

Im Weiteren bestand die Aufgabe darin, eine Messeinrichtung zu entwerfen und aufzubauen, die den oben beschriebenen Algorithmus benutzt, um damit kontinuierlich den Rohrdurchfluss zu ermitteln und für weitere Bearbeitungen aufzuzeichnen. Dazu wurde eine rechnerbasierte Messanordnung aufgebaut, die überwiegend aus einem handelsüblichen PC, ausgerüstet mit Messkarte, und einer Koppelbaugruppe zur Signalpegelanpassung besteht. Folgende Eingangssignale werden erfasst:

- Höhe des Oberwassers (1 Analogsignal)
- Höhe des Unterwassers (1 Analogsignal)
- Generatorleistung (1 Analogsignal je Maschinensatz)
- Betriebsart (3 Digitalsignale je Maschinensatz).

Insgesamt werden fünf Analogsignale und neun Digitalsignale ausgewertet. Die Abtastung wird im Sekundentakt durchgeführt. Die Steuerung der Messkarte sowie der Berechnungsalgorithmus sind mit der Softwareumgebung LabView programmiert. Mit LabView wurde ein virtuelles Messinstrument erstellt, das dem Bediener eine einfache und anwenderfreundliche Oberfläche bietet. Der prinzipielle Programmablauf ist in Bild 7 dargestellt. Die Unterscheidung Sekundentakt, Minutentakt und Tagesroutine sind dabei erkennbar.

Die Messwerte werden im Sekundentakt aufgenommen. Darüber angeordnet ist der Minutentakt, der jeweils einen Minutendatensatz in eine Messdatei (Tagesdatei) schreibt. An jedem Tagesende wird diese Messdatei mit insgesamt 1440 Minutendatensätzen mit einer Tagesabrechnung versehen

und geschlossen. In der Messdatei sind neben den Owag-pflichtigen Wassermengen auch weitere interessierende Daten gespeichert, z. B. Tagesgänge der Generatorleistungen, Verläufe der Wasserpegel und vorzeichenbehaftete Wassermengen (hinauf/hinunter) durch das Druckrohr. Zur Sicherheit werden die Messdateien doppelt, auf getrennten Festplatten, gespeichert. Mit dem im PC vorhandenen CD-Brenner kann archiviert werden. Zur Fehlerüberwachung wird eine ständige Plausibilitätskontrolle der Messwerte durchgeführt. Bei festgestelltem Fehler wird über einen digitalen Ausgang der Messkarte ein Signal an die Kraftwerksleitstelle gesendet.

Zusammenfassung und Ausblick

Die Kostenbelastung durch die Abgabe für die Oberflächenwasserentnahme führt zu einem veränderten und verringerten Einsatz des Pumpspeicherwerks Geesthacht. Gleichzeitig muss die entnommene Wassermenge für Abrechnungszwecke genau erfasst werden.

Die Nutzung bereits vorhandener Messsignale im Kraftwerk bietet bei Anwendung mathematischer Verfahren die günstigste Möglichkeit zur Bestimmung der momentanen stationären Durchflussmenge. Eine rechentechnische Modellierung des Kraftwerkes ist dafür notwendig. Auf dieser Basis wurde von der Universität Rostock, Institut für elektrische Energietechnik ein Mess- und Auswertesystem, entwickelt und installiert. Es läuft nach über einjähriger Betriebszeit ohne Beanstandungen. Obwohl durch die Nutzung vorhandener Messsignale die teure Investition für eine Durchflussmessenrichtung gespart werden konnte, bedroht die Abgabe für die Owag-pflichtige Wassermenge noch immer die Wirtschaftlichkeit des Kraftwerkes.

Durch das derzeit geltende Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) ist auch für die nahe Zukunft mit einer weiteren starken Zunahme der Einspeisungen aus Windenergieanlagen (WEA) zu rechnen. Besonders die Windparks mit ihren hohen und stark schwankenden Leistungen beeinflussen das Netz erheblich. Dadurch steigt der Bedarf an Regelleistung ständig. Bereits heute wird darüber diskutiert, dass »die Netzregler nicht nur auf die Regelkraft-

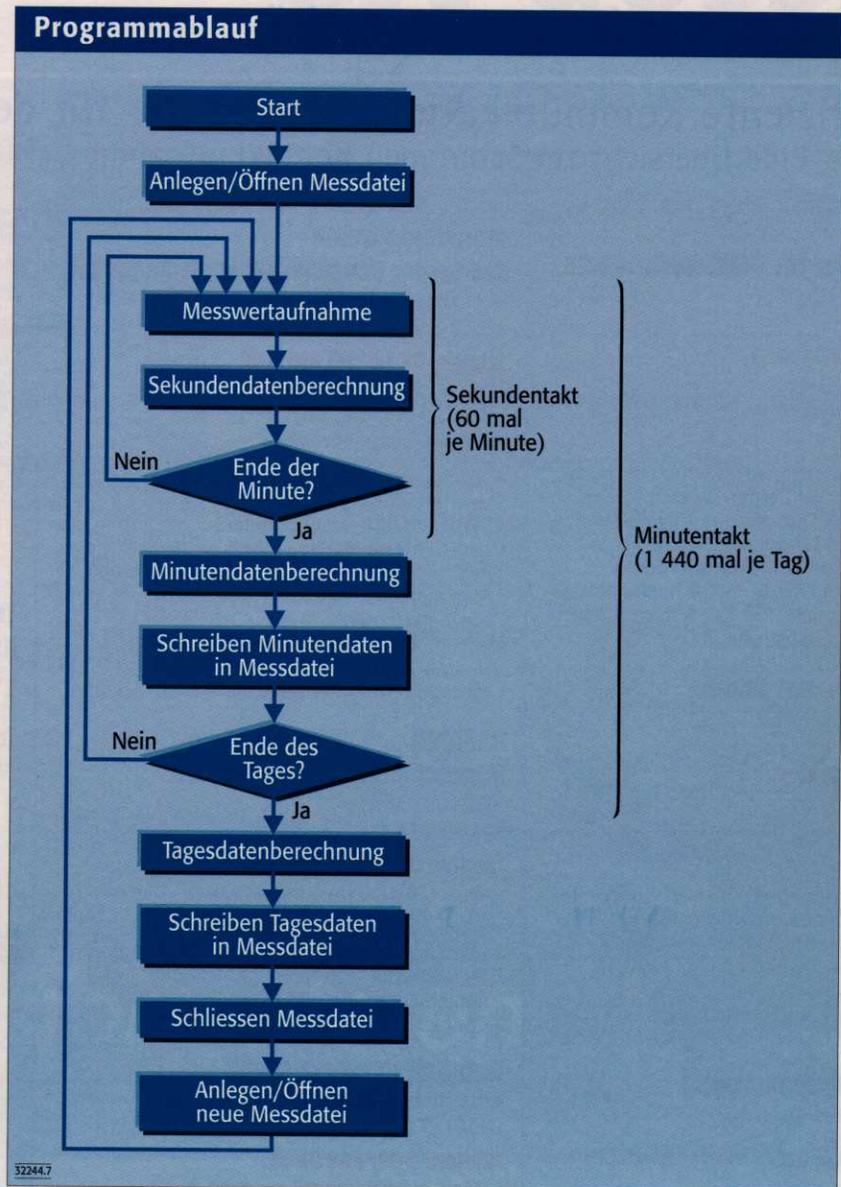


Bild 7. Prinzipieller Programmablauf

werke sondern auch auf die WEA einwirken und gegebenenfalls deren Leistung drosseln müssen. In der WEA-Industrie wären solche Maßnahmen zwar höchst unpopulär, doch sind sie beim geplanten Ausbau der Windenergienutzung unvermeidlich« [2].

Das Pumpspeicherwerk Geesthacht bietet die Möglichkeit, Regelleistung für die geplanten Offshore-Windparks in Nord- und Ostsee erzeugernah bereitzustellen. Leistungsspitzen könnten zwischengespeichert und bei Bedarf netzvertraglich eingespeist werden. Es wäre bedenklich, wenn eine politisch gewollte Abgabe zu einer Schließung des Pumpspeicherwerks führen würde. Damit wäre für diesen

Standort die technisch notwendige und bereits jetzt realisierbare Möglichkeit der Zwischenspeicherung von regenerativ erzeugter Energie nicht mehr vorhanden.

SCHRIFTTUM

- [1] Weber, H.; Prillwitz, E; Hladky, M.; Asal, H.-P.: Reality oriented simulation models of power plants for restoration studies. Control Engineering Practice 9, 2001, S. 805 – 811.
- [2] Leonhard, W.: Netzeinspeisung aus regenerativen Quellen. ew Jg. 101 (2002), H. 4, S. 36 – 41.

(32244)

axel.holst@etechnik.uni-rostock.de

www.e-technik.uni-rostock.de/ee/