

## Beschreibung

Verfahren und Vorrichtung zum Steuern eines Wasserversorgungsnetzes

5

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Steuern eines Wasserversorgungsnetzes nach dem Oberbegriff von Anspruch 1.

10

Die Erfindung betrifft ferner eine Vorrichtung zum Steuern eines Wasserversorgungsnetzes nach dem Oberbegriff von Anspruch 2.

15

Ein derartiges Verfahren bzw. eine derartige Vorrichtung sind aus der EP 3 450 638 A1 bekannt.

20

Das bekannte Verfahren bzw. die bekannte Vorrichtung dient zum Steuern eines Wasserversorgungsnetzes, das Knotenkomponenten und Kantenkomponenten umfasst. An den Knotenpunkten kann Wasser eingespeist, entnommen, verteilt oder gespeichert werden. Bei den Knotenkomponenten kann es sich somit um Einspeiser wie Brunnen, Quellen oder Fremdwasserlieferanten, Wasserverbraucher und um Wasserbehälter wie Tanks oder Becken handeln. Über die Kantenkomponenten wird das Wasser zwischen den Knotenkomponenten transportiert. Bei den Kantenkomponenten kann es sich um passive Komponenten wie Rohre sowie um aktive, steuerbare Komponenten wie Pumpen oder Ventile handeln. Die Steuerung der aktiven Kantenkomponenten und damit der Durchfluss von Wasser erfolgt nach Maßgabe eines Steuerplans (Fahrplan), in dem eine zeitliche Abfolge der Ansteuerungen der steuerbaren Kantenkomponenten festgelegt wird. Der Steuerplan wird auf Basis von Randbedingungen derart bestimmt, dass für einen in Zeitscheiben (z. B. Stunden) unterteilten Planungszeitraum (z. B. Tage, Woche) in jeder Zeitscheibe eine vorbestimmte Wasserbilanz des Wasserversorgungsnetzes im zeitlichen Mittel eingehalten wird. Zu den Randbedingungen gehören beispielsweise obere und untere Grenzen für Einspeisungen von Wasser in das Wasserversorgungsnetz in den einzelnen Zeitscheiben und voraussichtliche Entnahmen von Wasser aus dem Wasserversorgungsnetz in den Zeitscheiben. Für

35

jeden Wasser speichernden Knotenpunkt wird als Randbedingung jeweils ein Mindestfüllstand vorgegeben, der nicht unterschritten werden darf, um die Wasserversorgung zu gewährleisten.

5

Unter Einhaltung der Randbedingungen wird der Steuerplan anhand einer Zielfunktion (Kostenfunktion) optimiert, um den Energieverbrauch durch die steuerbaren Komponenten, z. B. Pumpen, des Wasserversorgungsnetzes zu minimieren und/oder den Verschleiß bzw. die Beanspruchung der Komponenten, z. B. Ventile, zu minimieren, indem ihre Schaltvorgänge minimiert werden. Dazu werden in der Zielfunktion für jede steuerbare Kantenkomponente die Anzahl ihrer Ansteuerungen mit einem Kostensatz für einen Energieverbrauch und/oder Verschleiß der jeweiligen Kantenkomponente multipliziert und anschließend die Summe über alle Kantenkomponenten gebildet, um die Gesamtkosten zu erhalten, die zu minimieren sind. Der Begriff Kosten ist nicht nur monetär zu verstehen, sondern umfasst auch Verbrauch, Aufwand, Verschleiß usw., was sich letztlich aber wieder in Kosten niederschlägt.

Bei der Versorgung ihrer Kunden mit Trinkwasser müssen Wassernetzbetreiber die Sicherheit dieser Versorgung garantieren, damit auch in Extremsituationen, z. B. bei Ausfall des Wassernachschubs oder plötzlicher Zunahme der Abnahmemengen, die Wasserversorgung über einen gewissen Zeitraum sichergestellt ist. In Abhängigkeit davon, wie schnell auf solche Ereignisse reagiert werden kann (Zeit zur Wiederherstellung bzw. Erhöhung des Wassernachschubs), müssen die Mindestfüllstände der Behälter bemessen werden. Gleichzeitig wollen die Wasserbetreiber natürlich möglichst energie- und kosteneffizient operieren, indem sie z. B. energieintensives Pumpen zu Zeiten hoher Energiepreise vermeiden oder Tarifmerkmale wie atypische Netznutzung optimal nutzen. Versorgungssicherheit und Kostenoptimalität können dabei konkurrierende Ziele sein.

Der Erfindung liegt das konkrete Problem zugrunde, gleichzeitig Versorgungssicherheit und Energie- und Kosteneffizienz in

den aktuellen Betriebsentscheidungen (Schaltungen von Pumpen, Öffnen von Ventilen) zu berücksichtigen.

Die Versorgungssicherheit hat generell oberste Priorität.

5 Traditionell wird sie garantiert, indem hohe Mindestfüllstände in Trinkwasserspeichern eingehalten werden müssen. Diese konservativ gewählten Grenzen schränken den Spielraum für einen energie- und kosteneffizienten Betrieb signifikant ein. Energie und Kosten werden daher bei den aktuellen Betriebs-

10 entscheidungen oft gar nicht einbezogen, z. B. wenn nach einem festen Regelsatz Pumpen angeschaltet werden, sobald ein gewisser Füllstand im Speicher unterschritten wird, und ausgeschaltet werden, sobald ein maximaler Füllstand erreicht ist. Oder es wird dem Leitstandpersonal mit seinem Experten-

15 wissen überlassen, zu entscheiden, wie und wann Pumpen zu schalten und Ventile zu öffnen sind, um die geforderten Mindestfüllstände einzuhalten. Eine innovativere Herangehensweise ist es, durch eine vorausschauende Modellbetrachtung des Systems über die folgenden Stunden bis Tage geeignete oder

20 sogar in Bezug auf Energie und Kosten optimale Fahrpläne für Pumpen und Ventile zu ermitteln, die die geforderten Mindestfüllstände einhalten. Allerdings ist, wie schon erwähnt, bei den konservativ gewählten Mindestfüllständen der Spielraum für Einsparungen begrenzt. Die vorausschauende Betrachtung

25 erlaubt es zwar, die Mindestfüllstände niedriger anzusetzen, wenn durch die Modellrechnung nachgewiesen wird, dass trotz niedrigerer Mindestfüllstände, die Versorgungssicherheit in den folgenden Stunden und Tagen gewährleistet ist, jedoch resultiert durch die Absenkung der Mindestfüllstände eine gewisse Verringerung der Versorgungssicherheit, wodurch die Ak-

30zeptanz solcher innovativer Systeme leidet.

Gemäß der Erfindung wird dieses Problem durch das in Anspruch 1 definierte Verfahren bzw. die in Anspruch 5 definierte Vorrichtung gelöst.

35

Vorteilhafte Weiterbildungen der Erfindung sind in den Unteransprüchen angegeben.

Gemäß der Erfindung wird also für jeden der Wasser speichernden Knotenpunkte (Behälter, Speicher, Becken usw.) jeweils ein den Mindestfüllstand überschreitender Sicherheitsfüllstand festgelegt und die Zielfunktion für jeden dieser Wasser speichernden Knotenpunkte um jeweils einen weiteren Summanden in Form eines von dem Füllstand abhängigen weiteren Kostensatzes ergänzt, der bei einem dem Sicherheitsfüllstand entsprechenden Füllstand minimal und bei einem dem Mindestfüllstand entsprechenden Füllstand maximal ist.

5  
10

Wie in den erwähnten innovativen, modellbasierten Ansätzen wird ein abgesenkter Mindestfüllstand verwendet, der nicht unterschritten werden darf. Zusätzlich wird ein höherer Sicherheitsfüllstand z.B. auf Höhe des traditionell konservativ gewählten Mindestfüllstands festgelegt. Mit einer vorausschauenden Modellbetrachtung kann der Steuerplan (Fahrplan) für die Pumpen und Ventile bewertet und optimiert werden. Die Zielfunktion ist dabei nicht nur wie bisher der Energieverbrauch bzw. die Energie- und Schaltkosten, sondern es werden zusätzlich virtuelle Kosten in Form der weiteren Kostensätze bei einer Absenkung des Füllstands unter den Sicherheitsfüllstand angesetzt. Die virtuellen Kosten (weiteren Kostensätze) sind dabei umso höher, je weiter der Füllstand abgesenkt wird und sich dem Mindestfüllstand nähert.

15  
20  
25

Die virtuellen Kosten bzw. weiteren Kostensätze können nach Maßgabe einer vorgegebenen Funktion in Abhängigkeit von der Differenz zwischen dem Füllstand und dem Mindestfüllstand oder Sicherheitsfüllstand des jeweiligen, Wasser speichernden Knotenpunkts berechnet werden. Im einfachsten Fall steigen die virtuellen Kosten ausgehend von dem Wert Null bei Sicherheitsfüllstand mit zunehmender Annäherung des Füllstandes an den Mindestfüllstand linear an. Es ist aber auch möglich, dass dieser Anstieg progressiv erfolgt.

30  
35

Die Kostensätze für den Energieverbrauch und/oder Verschleiß und die weiteren Kostensätze für die Füllstände können mit unterschiedlichen Gewichtungsfaktoren versehen werden, d. h.,

die realen Kosten und die virtuellen Kosten können konfigurierbar unterschiedlich gewichtet werden.

Der Vorteil gegenüber dem oben erwähnten traditionellen Ansatz mit hohen Mindestfüllständen besteht darin, dass Energieverbrauch und Kosten überhaupt berücksichtigt und im laufenden Betrieb gespart werden. Gegenüber den ebenfalls oben erwähnten innovativen Bewertungs- und Optimierungsansätzen besteht der Vorteil, dass neben dem Energieverbrauch bzw. den Kosten zusätzlich die Versorgungssicherheit berücksichtigt wird. Ergeben sich bei der Optimierung des Steuerplans für die Pumpen und Ventile unterschiedliche Fahrweisen, die aus Energie- und Kostensicht gleichwertig sind, so wird die Fahrweise vorgeschlagen, die die größtmögliche Versorgungssicherheit garantiert. Gibt es unterschiedliche Fahrweisen, die sich bzgl. Energie und Kosten geringfügig unterscheiden, aber bzgl. Versorgungssicherheit deutliche Unterschiede aufweisen, so werden Fahrweisen vorgeschlagen, die zwar einen etwas höheren Energieverbrauch oder etwas höhere Kosten verursachen, aber bzgl. Versorgungssicherheit einen deutlichen Gewinn bringen. Gibt es unterschiedliche Fahrweisen, die sich bzgl. Energie und Kosten deutlich unterscheiden, aber bzgl. Versorgungssicherheit nur geringe Unterschiede aufweisen, so werden Fahrweisen vorgeschlagen, die bzgl. Versorgungssicherheit geringe Abstriche machen, aber bzgl. Energie und Kosten deutliche Einsparungen ermöglichen. Die vorausschauende Betrachtungsweise innovativer Systeme erlaubt zudem ein frühzeitiges Erkennen (Frühwarnsystem), wann möglicherweise Sicherheitsfüllstände erreicht bzw. unterschritten werden und erlaubt so ein frühzeitiges Gegenwirken falls gewünscht. Die Erfindung ermöglicht damit Einsparungen bei Energie und Kosten bei gleichzeitigem Fokus auf Versorgungssicherheit, was die Akzeptanz solcher Systeme in der Wasserwirtschaft erhöhen wird.

Im Weiteren wird die Erfindung beispielhaft anhand der Figuren der Zeichnung erläutert; im Einzelnen zeigen:

Fig. 1 ein beispielhaftes Wasserversorgungsnetz,

Fig. 2 ein Ablaufdiagramm eines exemplarischen Verfahrens zum Steuern eines Wasserversorgungsnetzes und

5 Fig. 3 Beispiele für virtuelle Kosten bei Absenkung des Füllstands unter den Sicherheitsfüllstand.

Fig. 1 zeigt ein Wasserversorgungsnetz 1 wie z. B. ein kommunales Versorgungsnetz zur Trinkwasserversorgung. Das Wasserversorgungsnetz 1 umfasst Knotenkomponenten 2 und Kantenkomponenten 3. An den Knotenpunkten 2 kann Wasser eingespeist, entnommen, verteilt oder gespeichert werden. Bei den Knotenkomponenten 2 kann es sich somit um Einspeiser 4 wie Brunnen, Quellen oder Fremdwasserlieferanten, Wasserverbraucher 5, um Wasserverteilungspunkte 6 und um Wasserbehälter 7 wie Tanks oder Becken handeln. Über die Kantenkomponenten 3 wird das Wasser zwischen den Knotenkomponenten 2 transportiert. Bei den Kantenkomponenten 2 kann es sich um passive Komponenten wie Rohre 8 und um aktive, steuerbare Komponenten wie Pumpen 9, Turbinen 10 oder Ventile 11 handeln. Mehrere Pumpen 9 oder Turbinen 10 können in einer Pumpstation 12 bzw. Turbinenstation 13 parallelgeschaltet sein. Die Pumpen 9 oder Turbinen 10 können geschaltet oder in Stufen oder stufenlos gesteuert werden. Ebenso können die Ventile 11 geschaltet (Schaltventile) oder gesteuert werden (Regelventile). Die steuerbaren Komponenten 9, 10, 11 werden über elektrische Energieversorger 14 gespeist, die üblicherweise einen Anschluss oder Übergabepunkt eines Energieversorgungsnetzes umfassen.

Die Steuerung der steuerbaren Kantenkomponenten, also hier z. B. der Pumpen 9, Turbinen 10 und Ventile 11, erfolgt nach Maßgabe eines Steuerplans (Fahrplan) 15, in dem eine zeitliche Abfolge der Ansteuerungen der steuerbaren Kantenkomponenten 9, 10, 11 festgelegt ist. Der Steuerplan 15 betrifft bevorzugt einen vorbestimmten Planungshorizont 16, der in einzelne Zeitscheiben 17 unterteilt werden kann. Der Planungshorizont 16 kann beispielsweise einen oder mehrere Tage umfassen, wobei eine Zeitscheibe 17 beispielsweise eine Stunde beträgt. Der Steuerplan 15 wird in einer Verarbeitungseinrichtung 18, z. B. in Form eines programmierbaren Mikrocomputers,

einer Steuervorrichtung 19 auf Basis von Randbedingungen derart bestimmt, dass in jeder Zeitscheibe 17 eine vorbestimmte Wasserbilanz des Wasserversorgungsnetzes im zeitlichen Mittel eingehalten wird. Zu den Randbedingungen gehören u. a. obere und untere Grenzen für Einspeisungen von Wasser in das Wasserversorgungsnetz in den einzelnen Zeitscheiben 17 und voraussichtliche Entnahmen von Wasser aus dem Wasserversorgungsnetz in den Zeitscheiben 17. Für jeden Wasser speichernden Knotenpunkt 7 wird als Randbedingung jeweils ein Mindestfüllstand  $h_{\min}$  vorgegeben, der nicht unterschritten werden darf, um die Wasserversorgung zu gewährleisten.

Die Steuervorrichtung 19 kann zentral oder dezentral ausgebildet und verfügt über eine Schnittstelle 20 zur Ansteuerung der steuerbaren Kantenkomponenten 9, 10, 11.

Fig 2 zeigt ein beispielhaft Ablaufdiagramm eines Verfahrens 21 zum Steuern des in Fig. 1 gezeigten Wasserversorgungsnetzes 1. Einzelne Schritte des Verfahrens 21 können in einer anderen als der angegebenen Reihenfolge durchgeführt werden. Das Verfahren 21 kann insbesondere, ganz oder in Teilen, auf der Steuervorrichtung 19 ausgeführt werden. Dazu kann die Steuervorrichtung 19 einen programmierbaren Mikrocomputer oder Mikrocontroller umfassen, und das Verfahren 21 kann zumindest teilweise in Form eines Computerprogrammprodukts mit Programmcodemitteln vorliegen.

In einem Schritt 22 können der Planungshorizont 16 und die Zeitscheiben 17 bestimmt werden.

In einem Schritt 23 können Einspeisegrenzen der Wassereinspeiser 4 bestimmt werden.

Parallel dazu können in einem Schritt 24 Entnahmen durch Wasserverbraucher 5 bestimmt bzw. vorhergesagt werden.

In einem Schritt 25 können Betriebskonfigurationen, insbesondere die Konfiguration der Kantenkomponenten 3 des Wasserversorgungsnetzes 1 bestimmt werden. Beispiele dafür sind die

Energieaufnahmen von Pumpen 9 oder Durchflüsse in den Rohren 8.

In einem Schritt 26 können Energiekosten bestimmt werden.

5 Diese können fix oder variabel sein, und im letztgenannten Fall für die Zeitscheiben 17 einzeln bestimmt werden. Die Energiekosten sind relevant für die Energie, die beispielsweise durch eine Pumpe 9 aufgenommen wird, wenn sie angesteuert bzw. eingeschaltet wird.

10

In einem Schritt 27 können Zustände von Knotenkomponenten 2 je Zeitscheibe 17 bestimmt werden. Beispiele dafür sind das maximale Behältervolumen bzw. der maximal zulässige Füllstand  $h_{\max}$  und der Mindestfüllstand  $h_{\min}$  von Behältern 7.

15

In einem Schritt 28 können Anfangszustände der Komponenten des Wasserversorgungsnetzes 1 bestimmt werden. Beispiele dafür sind die Stellungen von Ventilen 11 oder Füllstände in Behältern 7.

20

Auf Basis der in den Schritten 22 bis 28 gesammelten Informationen kann in einem Schritt 29 der Steuerplan 15 ermittelt werden. Die konkrete Bestimmung des Steuerplans 170 erfolgt bevorzugt als Optimierung innerhalb eines Suchraums, der durch die oben beschriebenen Randbedingungen vorgegeben ist. Detaillierte Beispiele für eine gemischt-ganzzahlige lineare Optimierung sind in der eingangs erwähnten EP 3 450 638 A1 beschrieben, auf die hier explizit Bezug genommen wird. Der ermittelte Steuerplan 15 kann in Teilen oder vollständig an die Steuervorrichtung 19 zur Steuerung des Wasserversorgungsnetzes 1 übergeben werden. Zusätzlich oder alternativ kann der Steuerplan 15 an das Leitstandpersonal ausgegeben werden, das anhand des Planes 17 Entscheidungen für die Steuerung vornehmen oder in die automatische Steuerung eingreifen kann.

35

Die Optimierung des Steuerplan 15 erfolgt anhand einer Zielfunktion, in der für jede steuerbare Kantenkomponente 9, 10, 11 die Anzahl ihrer Ansteuerungen mit einem Kostensatz für einen Energieverbrauch und/oder Verschleiß der jeweiligen



Kantenkomponente 9, 10, 11 multipliziert und anschließend die Summe über alle steuerbaren Kantenkomponenten 9, 10, 11 gebildet wird. Zusätzlich wird für jeden der Wasser speichernden Knotenpunkte 7 jeweils ein den Mindestfüllstand  $h_{\min}$  überschreitender Sicherheitsfüllstand  $h_{\text{sec}}$  festgelegt und die Zielfunktion für jeden Wasser speichernden Knotenpunkt 9 um jeweils einen weiteren Summanden in Form eines weiteren Kostensatzes ergänzt, der von dem Füllstand abhängig ist. Dieser weitere Kostenfaktor wird so gewählt bzw. gewichtet, dass er minimal, z. B. Null, ist, wenn der Füllstand dem Sicherheitsfüllstand  $h_{\text{sec}}$  entspricht oder über diesem liegt. Der weitere Kostenfaktor ist maximal, wenn der Füllstand den Mindestfüllstand  $h_{\min}$  erreicht, der, wie bereits erwähnt, nicht unterschritten werden darf.

15

Damit ergibt sich, vereinfacht, schließlich folgende Zielfunktion:

$$Z = w_{\text{real}} \cdot C_{\text{real}} + w_{\text{vir}} \cdot C_{\text{vir}} ,$$

20

wobei  $C_{\text{real}}$  die Summe der realen Kosten für den Energieverbrauch und das Schalten der schaltbaren Kantenkomponenten 9, 10, 11 und  $C_{\text{vir}}$  die Summe der virtuellen Kosten für unter dem Sicherheitsfüllstand  $h_{\text{sec}}$  liegende Füllstände der Wasser speichernden Knotenpunkte 7 bezeichnen. Die realen Kosten  $C_{\text{real}}$  und virtuellen Kosten  $C_{\text{vir}}$  können mit Gewichtungsfaktoren  $w_{\text{real}}$  bzw.  $w_{\text{vir}}$  unterschiedlich gewichtet werden.

25

Fig. 3 zeigt beispielhaft die Abhängigkeit der virtuellen Kosten  $C_{\text{vir}}$  von dem Füllstand  $h$ , wobei die Kurve 30 eine lineare Abhängigkeit wiedergibt und die Kurve 31 einen progressiven Anstieg der virtuellen Kosten  $C_{\text{vir}}$  mit zunehmender Annäherung des Füllstandes  $h$  an den Mindestfüllstand  $h_{\text{sec}}$  verdeutlicht.

35

Im Folgenden wird ausgehend von und Bezug nehmend auf das in der EP 3 450 638 A1 ausführlich beschriebene bekannte Verfahren eine Ausführungsform des Verfahrens 21 zum Steuern des Wasserversorgungsnetzes 1 genauer erläutert.

Die in der EP 3 450 638 A1 angegebene Liste von Parametern kann um die beiden folgenden Parameter erweitert werden:

- 5  $\psi_{v,t}^{min}$  Sicherheitsbestand an gespeichertes Wasservolumen (gemessen z. B. in  $m^3$ ) in der Knotenkomponente  $v$  während der Zeitscheibe  $t$  und insbesondere auch zum Ende der Zeitscheibe  $t$ ; der Sicherheitsbestand darf zwar prinzipiell unterschritten werden, ein entsprechendes Defizit an Wasservolumen im Vergleich zum Sicherheitsbestand wird allerdings mit (virtuellen) Strafkosten belegt; es sollte stets gelten  $\psi_{v,t}^{min} \geq \sigma_{v,t}^{min}$ ; für alle Knotenkomponenten, die keine Tanks sind, gilt stets  $\psi_{v,t}^{min} = 0$ .
- 10
- 15  $\gamma_{v,t}^{min}$  Kostensatz pro  $m^3$  Wasserdefizit beim gespeicherten Wasservolumen ( $w_{v,t}^{end}$  oder  $w_{v,t}^s$ ) im Vergleich zum Sicherheitsbestand  $\psi_{v,t}^{min}$  für die Knotenkomponente  $v$  während der Zeitscheibe  $t$ ; dieser Parameter entspricht dem virtuellen Strafkostensatz der im Modell für die Unterschreitung des gewünschten Wasservolumen-Sicherheitsbestands pro Kubikmeter Wasserdefizit zu zahlen ist.
- 20

Die in der EP 3 450 638 A1 angegebene Liste von Variablen kann um die folgenden Variablen erweitert werden:

25

- $x_{v,t}^+ \geq 0$  Variable zur Bestimmung einer positiven Abweichung des in der Knotenkomponente  $v$  zum Ende der Zeitscheibe  $t$  gespeicherten Wasservolumens  $w_{v,t}^{end}$  im Vergleich zum Sicherheitsbestand  $\psi_{v,t}^{min}$  (alle gemessen z. B. in  $m^3$ ),  $(v \in V, t \in T)$ .
- 30
- $x_{v,t}^- \geq 0$  Variable zur Bestimmung einer negativen Abweichung des in der Knotenkomponente  $v$  zum Ende der Zeitscheibe  $t$  gespeicherten Wasservolumens  $w_{v,t}^{end}$  im Vergleich zum Sicherheitsbestand  $\psi_{v,t}^{min}$  (alle gemessen z. B. in  $m^3$ ),  $(v \in V, t \in T)$ .
- 35

$y_{v,t}^+ \geq 0$  Variable zur Bestimmung einer positiven Abweichung  
 des in der Knotenkomponente  $v$  zum Zeitpunkt des po-  
 tentiellen Schaltzeitpunkts während der Zeitscheibe  
 $t$  gespeicherten Wasservolumens  $w_{v,t}^s$  im Vergleich zum  
 5 Sicherheitsbestand  $\psi_{v,t}^{min}$  (alle gemessen z. B. in  $m^3$ ),  
 ( $v \in V, t \in T$ ).

$y_{v,t}^- \geq 0$  Variable zur Bestimmung einer negativen Abweichung  
 des in der Knotenkomponente  $v$  zum Zeitpunkt des po-  
 tentiellen Schaltzeitpunkts während der Zeitscheibe  
 $t$  gespeicherten Wasservolumens  $w_{v,t}^s$  im Vergleich zum  
 10 Sicherheitsbestand  $\psi_{v,t}^{min}$  (alle gemessen z. B. in  $m^3$ ),  
 ( $v \in V, t \in T$ ).

Es können weiterhin folgende zusätzlichen Nebenbedingungen  
 15 (2a) und (2b) festgelegt werden:

$$(2a) \quad w_{v,t}^{end} = \psi_{v,t}^{min} + x_{v,t}^+ - x_{v,t}^- \quad (v \in V, t \in T)$$

Die Nebenbedingung (2a) definiert die Abweichung der in der  
 20 Knotenkomponente  $v$  zum Endzeitpunkt der Zeitscheibe  $t$  gespei-  
 cherten Wassermenge  $w_{v,t}^{end}$  im Vergleich zum in dieser Zeit-  
 scheibe definierten Sicherheitsbestand  $\psi_{v,t}^{min}$ . Beim Unter-  
 schreiten dieses Sicherheitsbestands nimmt in der Optimal-  
 lösung die Variable  $x_{v,t}^+$  aufgrund der Kostenminimierung stets  
 25 den Wert 0 an, so dass der positive Wert der Variable  $x_{v,t}^-$  so  
 gering wie möglich ausfällt (und somit der tatsächlichen Be-  
 stands-Unterschreitung entspricht).

$$(2b) \quad w_{v,t}^s = \psi_{v,t}^{min} + y_{v,t}^+ - y_{v,t}^- \quad (v \in V, t \in T)$$

30 Die Nebenbedingung (2b) entspricht der Nebenbedingung (2a)  
 mit dem Unterschied, dass hier nicht der Endzeitpunkt der  
 Zeitscheibe  $t$  betrachtet wird, sondern der potentielle  
 Schaltzeitpunkt der Kantenkomponente  $v$  innerhalb dieser Zeit-  
 35 scheibe.

Die Zielfunktion kann um den folgenden Summanden (25a) erwei-  
 tert werden:

$$(25a) \quad \sum_{v \in V} \left( \sum_{t \in T} \gamma_{v,t}^{min} \cdot (x_{v,t}^- + y_{v,t}^-) \right)$$

Formel (25a) beschreibt die virtuellen Kosten, die mit Unterschreitungen des Sicherheitsbestands  $\psi_{v,t}^{min}$  assoziiert sind. Hierfür werden alle den Sicherheitsbestand unterschreitenden Wasservolumina, die innerhalb des Planungshorizonts auftreten, addiert und anschließend mit dem zugehörigen Kostensatz multipliziert.

10

## Patentansprüche

1. Verfahren (21) zum Steuern eines Wasserversorgungsnetzes (1), das Knotenkomponenten (2; 4, 5, 6, 7) und Kantenkomponenten (3; 8, 9, 10, 11) umfasst,  
5 wobei an den Knotenpunkten (2; 4, 5, 6, 7) Wasser eingespeist, entnommen oder gespeichert wird und über die Kantenkomponenten (3; 8, 9, 10, 11) das Wasser zwischen den Knotenkomponenten (2; 4, 5, 6, 7) transportiert wird,  
10 wobei mehrere der Kantenkomponenten (9, 10, 11) bezüglich ihres Durchflussverhaltens für das Wasser steuerbar sind und nach Maßgabe eines Steuerplans (15) gesteuert werden, der eine zeitliche Abfolge von Ansteuerungen der steuerbaren Kantenkomponente (9, 10, 11) enthält,  
15 wobei der Steuerplan (15) auf Basis von Randbedingungen bestimmt wird, die für jeden Wasser speichernden Knotenpunkt (7) jeweils einen Mindestfüllstand ( $h_{\min}$ ) enthalten, der nicht unterschritten werden darf, und  
wobei der Steuerplan (15) anhand einer Zielfunktion optimiert  
20 wird, in der für jede steuerbare Kantenkomponente (9, 10, 11) die Anzahl ihrer Ansteuerungen mit einem Kostensatz für einen Energieverbrauch und/oder Verschleiß der jeweiligen Kantenkomponente (9, 10, 11) multipliziert und anschließend die Summe über alle steuerbaren Kantenkomponenten (9, 10, 11) ge-  
25 bildet wird,  
dadurch gekennzeichnet,  
dass für jeden der Wasser speichernden Knotenpunkte (7) jeweils ein den Mindestfüllstand ( $h_{\min}$ ) überschreitender Sicherheitsfüllstand ( $h_{\text{sec}}$ ) festgelegt wird und dass die Zielfunktion für jeden Wasser speichernden Knotenpunkt (7) um jeweils  
30 einen weiteren Summanden in Form eines von dem Füllstand abhängigen weiteren Kostensatzes ergänzt wird, der bei einem dem Sicherheitsfüllstand ( $h_{\text{sec}}$ ) entsprechenden Füllstand minimal und bei einem dem Mindestfüllstand ( $h_{\min}$ ) entsprechenden  
35 Füllstand maximal ist.

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass der weitere Kostensatz nach Maßgabe einer vorgegebenen Funktion in Abhängigkeit von der Differenz zwischen dem Füllstand

und dem Mindestfüllstand ( $h_{\min}$ ) oder Sicherheitsfüllstand ( $h_{\text{sec}}$ ) des jeweiligen, Wasser speichernden Knotenpunkts (7) berechnet wird.

- 5 3. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Funktion eine lineare Funktion ist.
4. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Kostensätze für den jeweiligen Energieverbrauch und/oder Verschleiß und die weiteren Kostensätze für den jeweiligen Füllstand mit unterschiedlichen Gewichtungsfaktoren versehen werden.
- 10 5. Vorrichtung (19) zum Steuern eines Wasserversorgungsnetzes (1), das Knotenkomponenten (2; 4, 5, 6, 7) und Kantenkomponenten (3; 8, 9, 10, 11) umfasst, wobei an den Knotenpunkten (2; 4, 5, 6, 7) Wasser eingespeist, entnommen oder gespeichert wird, über die Kantenkomponenten (3; 8, 9, 10, 11) das Wasser zwischen den Knotenkomponenten (2; 4, 5, 6, 7) transportiert wird und mehrere der Kantenkomponenten (9, 10, 11) bezüglich ihres Durchflussverhaltens für das Wasser steuerbar sind,
- 15 wobei die Vorrichtung (19) dazu ausgebildet ist, die steuerbaren Kantenkomponenten (9, 10, 11) nach Maßgabe eines Steuerplans (15) zu steuern und
- 20 wobei die Vorrichtung (19) eine Verarbeitungseinrichtung (18) umfasst, die dazu eingerichtet ist,
- den Steuerplan (15) in Form einer zeitlichen Abfolge von Ansteuerungen der steuerbaren Kantenkomponenten (9, 10, 11) auf Basis von Randbedingungen zu erstellen, die für jeden Wasser speichernden Knotenpunkt (7) jeweils einen Mindestfüllstand ( $h_{\text{sec}}$ ) enthalten, der nicht unterschritten werden darf, und
  - den Steuerplan (15) anhand einer Zielfunktion zu optimieren, in der für jede steuerbare Kantenkomponente (9, 10, 11) die Anzahl ihrer Ansteuerungen mit einem Kostensatz für einen Energieverbrauch und/oder Verschleiß der jeweiligen Kantenkomponente (9, 10, 11) multipliziert und anschließend
- 35

die Summe über alle steuerbaren Kantenkomponenten (9, 10, 11) gebildet wird, dadurch gekennzeichnet, dass die Verarbeitungseinrichtung (18) ferner dazu eingerichtet ist, für jeden der Wasser speichernden Knotenpunkte (7) jeweils einen den Mindestfüllstand ( $h_{\min}$ ) überschreitenden Sicherheitsfüllstand ( $h_{\text{sec}}$ ) festzulegen und die Zielfunktion für jeden Wasser speichernden Knotenpunkt (7) um jeweils einen weiteren Summanden in Form eines von dem Füllstand abhängigen weiteren Kostensatzes zu ergänzen, der bei einem dem Sicherheitsfüllstand ( $h_{\text{sec}}$ ) entsprechenden Füllstand minimal und bei einem dem Mindestfüllstand ( $h_{\min}$ ) entsprechenden Füllstand maximal ist.

## Zusammenfassung

## Verfahren und Vorrichtung zum Steuern eines Wasserversorgungsnetzes

5

Bei einem Wasserversorgungsnetzes (1), das Knotenkomponenten (2; 4, 5, 6, 7) und Kantenkomponenten (3; 8, 9, 10, 11) umfasst, wobei an den Knotenpunkten Wasser eingespeist, entnommen oder gespeichert wird und über die Kantenkomponenten das Wasser zwischen den Knotenkomponenten transportiert wird, werden bezüglich ihres Durchflussverhaltens für das Wasser steuerbare Kantenkomponenten (9, 10, 11) nach Maßgabe eines Steuerplans (15) gesteuert.

10

15

Der Steuerplan wird auf Basis von Randbedingungen bestimmt und anhand einer Zielfunktion optimiert, in der für jede steuerbare Kantenkomponente die Anzahl ihrer Ansteuerungen mit einem Kostensatz für einen Energieverbrauch und/oder Verschleiß der jeweiligen Kantenkomponente multipliziert und anschließend die Summe über alle steuerbaren Kantenkomponenten gebildet wird.

20

25

Erfindungsgemäß wird für jeden der Wasser speichernden Knotenpunkte (7) jeweils ein einen Mindestfüllstand ( $h_{\min}$ ) überschreitender Sicherheitsfüllstand ( $h_{\text{sec}}$ ) festgelegt und die Zielfunktion für jeden Wasser speichernden Knotenpunkt (7) um jeweils einen weiteren Summanden in Form eines von dem Füllstand abhängigen weiteren Kostensatzes ergänzt, der bei einem dem Sicherheitsfüllstand ( $h_{\text{sec}}$ ) entsprechenden Füllstand minimal und bei einem dem Mindestfüllstand ( $h_{\min}$ ) entsprechenden Füllstand maximal ist.

30

Figur 1



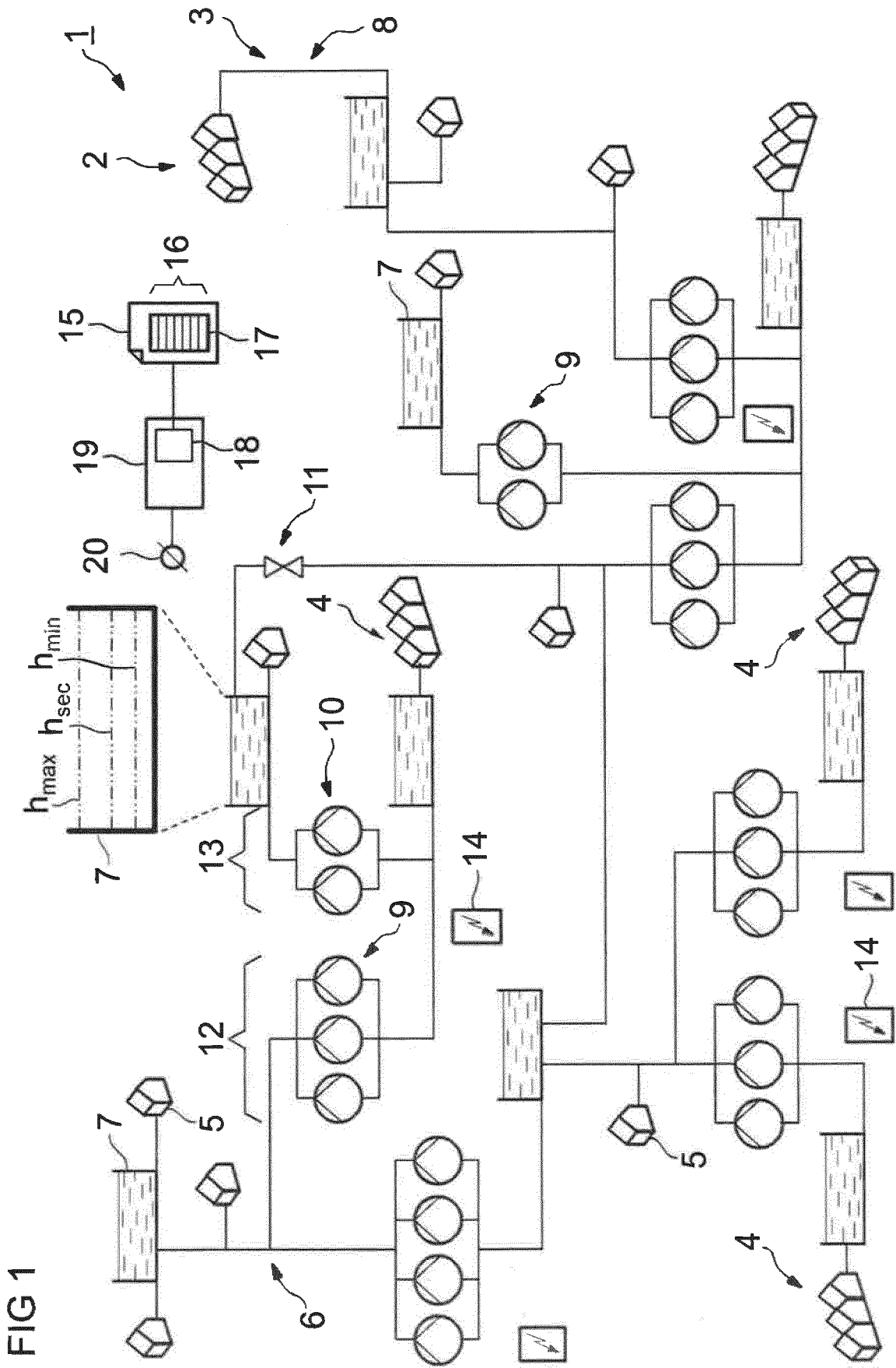


FIG 1

FIG 2

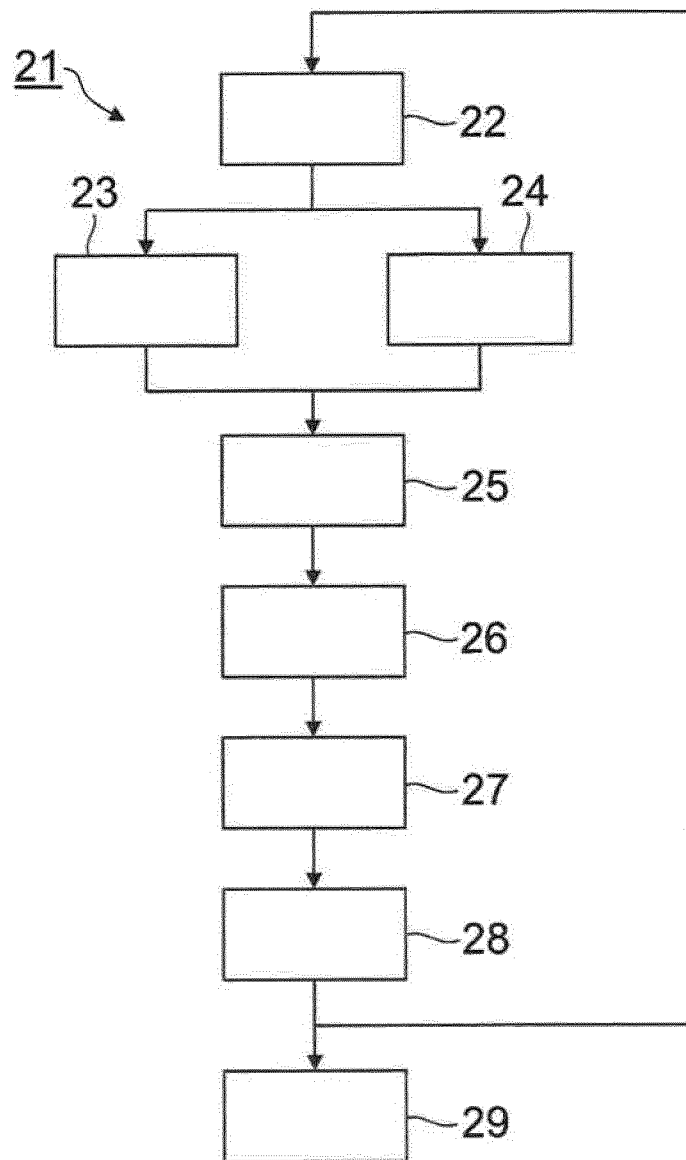


FIG 3

