

(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES
PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges
Eigentum

Internationales Büro

(43) Internationales
Veröffentlichungsdatum
13. Dezember 2012 (13.12.2012)



(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2012/168074 A2

(51) Internationale Patentklassifikation: Nicht klassifiziert
(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2012/059575
(22) Internationales Anmeldedatum: 23. Mai 2012 (23.05.2012)

(25) Einreichungssprache: Deutsch
(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität: 10 2011 076 968.4 6. Juni 2011 (06.06.2011) DE

(71) Anmelder (für alle Bestimmungsstaaten mit Ausnahme von US): **SIEMENS AKTIENGESELLSCHAFT** [DE/DE]; Wittelsbacherplatz 2, 80333 München (DE).

(72) Erfinder; und

(75) Erfinder/Anmelder (nur für US): **BRÜCKNER, Jan** [DE/DE]; Habernhofer Weg 30, 91080 Uttenreuth (DE). **EFFERT, Martin** [DE/DE]; Nötherstr. 16A, 91058 Erlangen (DE). **THOMAS, Frank** [DE/DE]; Meisenweg 9b, 91056 Erlangen (DE).

(74) Gemeinsamer Vertreter: **SIEMENS AKTIENGESELLSCHAFT**; Postfach 22 16 34, 80506 München (DE).

(81) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare nationale Schutzrechtsart): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

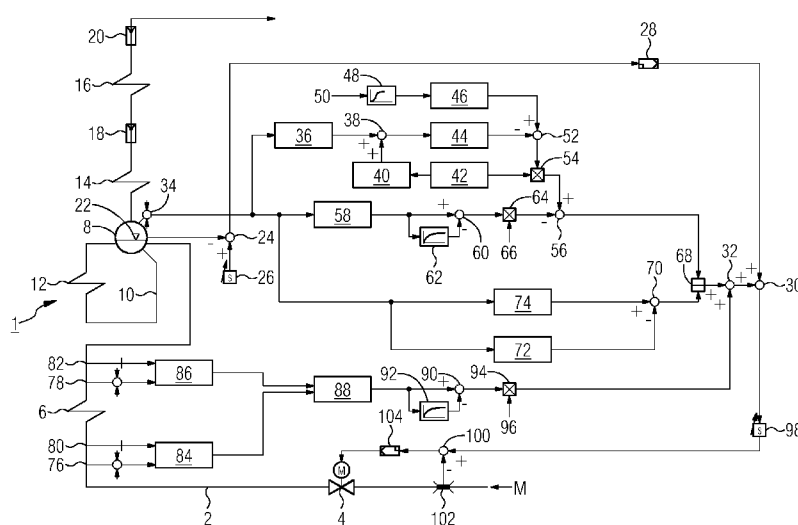
(84) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare regionale Schutzrechtsart): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), europäisches (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Veröffentlicht:

— ohne internationalen Recherchenbericht und erneut zu veröffentlichen nach Erhalt des Berichts (Regel 48 Absatz 2 Buchstabe g)

(54) Title: METHOD FOR OPERATING A RECIRCULATING WASTE HEAT STEAM GENERATOR

(54) Bezeichnung : VERFAHREN ZUM BETREIBEN EINES UMLAUF-ABHITZEDAMPFERZEUGERS



(57) Abstract: The invention relates to a method for operating a recirculating waste heat steam generator (1), in which in a pressure stage of the recirculating waste heat steam generator (1) the feed water mass flow is guided on the basis of a specified desired value in order to control the water level in a drum (8). Said method should give a recirculating waste heat steam generator a particularly high degree of efficiency and simultaneously a particularly high level of operational flexibility. For this purpose the thermal input introduced into an evaporator (12) of the pressure stage is used as input variable in the determination of the desired value.

(57) Zusammenfassung:

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

WO 2012/168074 A2



Ein Verfahren zum Betreiben eines Umlauf-Abhitzedampferzeugers (1), bei dem in einer Druckstufe des Umlauf-Abhitzedampferzeugers (1) zur Regelung des Wasserstandes in einer Trommel (8) der Speisewassermassenstrom anhand eines vorgegebenen Sollwerts geführt wird, soll einen besonders hohen Wirkungsgrad bei gleichzeitig besonders hoher betrieblicher Flexibilität eines Umlauf-Abhitzedampferzeugers ermöglichen. Dazu wird bei der Ermittlung des Sollwerts die in einen Verdampfer (12) der Druckstufe eingebrachte Wärmeleistung als Eingangsgröße verwendet.

Beschreibung

Verfahren zum Betreiben eines Umlauf-Abhitzedampferzeugers

5 Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Betreiben eines Umlauf-Abhitzedampferzeugers, bei dem in einer Druckstufe des Umlauf-Abhitzedampferzeugers zur Regelung des Wasserstandes in einer Trommel der Speisewassermassenstrom anhand eines vorgegebenen Sollwerts geführt wird.

10

Ein Abhitzedampferzeuger ist ein Wärmetauscher, der Wärme aus einem heißen Gasstrom zurückgewinnt. Abhitzedampferzeuger kommen häufig in Gas- und Dampfturbinenanlagen (GuD-Anlagen) zum Einsatz, die überwiegend der Stromerzeugung dienen. Dabei
15 umfasst eine moderne GuD-Anlage üblicherweise ein bis vier Gasturbinen und mindestens eine Dampfturbine, wobei entweder jede Turbine jeweils einen Generator antreibt (Mehrwellenanlage) oder eine Gasturbine mit der Dampfturbine auf einer gemeinsamen Welle einen einzigen Generator antreibt (Einwellenanlage). Die heißen Abgase der Gasturbine werden dabei in
20 dem Abhitzedampferzeuger zur Erzeugung von Wasserdampf verwendet. Der Dampf wird anschließend der Dampfturbine zugeführt. Üblicherweise entfallen ca. zwei Drittel der elektrischen Leistung auf die Gasturbine und ein Drittel auf den
25 Dampfprozess.

Analog zu den verschiedenen Druckstufen einer Dampfturbine umfasst auch der Abhitzedampferzeuger eine Mehrzahl von Druckstufen mit unterschiedlichen thermischen Zuständen des
30 jeweils enthaltenen Wasser-Dampf-Gemisches. In jeder dieser Druckstufen durchläuft das Strömungsmedium auf seinem Strömungsweg zunächst Economizer, die Restwärme zur Vorwärmung des Strömungsmediums nutzen, und anschließend verschiedene Stufen von Verdampfer- und Überhitzerheizflächen. Im Verdampfer
35 wird das Strömungsmedium verdampft und der erhaltene Dampf im Überhitzer weiter erhitzt.

In heutigen GuD-Anlagen werden in der überwiegenden Anzahl Umlauf-Abhitzedampferzeuger in allen Druckstufen eingesetzt, bei denen der Abhitzedampferzeuger eine zentrale Trommel aufweist, die mit allen drei wasserseitigen Abschnitten des
5 Dampfherstellers, dem Verdampfer, dem Economizer und den Überhitzer in Verbindung steht. Die flüssige Phase verbleibt stets in der Trommel und wird kontinuierlich dem Verdampfer über Fallrohre zugeführt. Dampfblasen steigen zur Wasseroberfläche auf und werden oben aus der Trommel abgezogen. Der
10 produzierte Dampf wird durch Nachspeisen von Speisewasser vom Economizer aufgefüllt. So wird das Wasserniveau in der Trommel annähernd konstant gehalten.

In Umlaufverdampfern mit üblicher Trommelgröße wird der Speisewasserdurchfluss heute überwiegend mit einer so genannten
15 Drei-Komponenten-Regelung bereitgestellt. In Abhängigkeit des Frischdampfmassenstromes wird der Sollwert für den Speisewassermassenstrom gewählt. Das übergeordnete Ziel dieser Speisewasserregelung ist die Einhaltung des gewünschten Wasserstands in der Trommel. Aus diesem Grund dient der aktuelle
20 Trommelwasserstand als Korrekturregelgröße, der je nach Abweichung zum gewünschten Wert eine richtungsgemäße Änderung des Speisewassermassenstroms bewirkt. Aufgrund des großen Wasserspeichers in der Trommel (Puffervolumen), der ein lang-
25 sames Verhalten des Korrekturreglers gestattet, sind aus Sicht eines schwankungsarmen und zulässigen Wasserstands in der Trommel auch kritische transiente Vorgänge wie zum Beispiel schnelle Laständerungen in Grenzen beherrschbar.

30 Von modernen Kraftwerken werden aber einerseits hohe Wirkungsgrade gefordert, was mit einer Erhöhung der Dampfparameter schon durch höhere Gasturbinenaustrittstemperaturen einhergeht, und andererseits eine möglichst flexible Betriebsweise. Wegen der hohen Drücke und Temperaturen weisen
35 Trommeln bei großen Kesseln sehr große Wandstärken auf. Diese führen wiederum bei schnellem Aufwärmen oder Abkühlen zu Thermospannungen, die bis an die Belastungsgrenze des Werkstoffes gehen können. Dickwandige Trommeln beschränken daher

die maximal zulässigen An- und Abfahrgradienten des Dampferzeugers. Um die Wandstärken auf ein akzeptables Maß zu beschränken, ist der Trommeldurchmesser zu verringern.

5 Reduziert sich daher aufgrund höherer Anforderungen hinsichtlich der Dampfparameter sowie der Anlagenflexibilität der Trommeldurchmesser, steigen die Anforderungen an das Speisewasserregelungskonzept und somit auch an die Füllstandsregelung von Dampftrommeln in Umlaufverdampfern. Eine träge Dreikomponenten-Regelung, die bei großen Puffervolumen noch ver-
10 nünftige Resultate liefert, ist hier unter Umständen nicht mehr sinnvoll anwendbar.

Es ist daher Aufgabe der Erfindung, ein Verfahren der oben
15 genannten Art anzugeben, welches einen besonders hohen Wirkungsgrad bei gleichzeitig besonders hoher betrieblicher Flexibilität eines Umlauf-Abhitzedampferzeugers ermöglicht.

Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß gelöst, indem bei der Ermittlung des Sollwerts, anhand dessen der Speisewassermassenstrom geführt wird, die in einem Verdampfer der Druckstufe
20 eingebrachte Wärmeleistung als Eingangsgröße verwendet wird.

Die Erfindung geht dabei von der Überlegung aus, dass eine
25 Erhöhung der betrieblichen Flexibilität eines Umlauf-Abhitzedampferzeugers mit wirkungsgradbedingt besonders geringem Trommeldurchmesser durch eine geeignete Regelung des Füllstands der Trommel erreicht werden kann. Insbesondere ist eine umso höhere Flexibilität möglich, je schneller Schwankungen des Trommelwasserstands durch eine geeignete Speisewasserregelung effektiv ausgeglichen und somit minimiert werden
30 können.

Um dies zu erreichen, sollte die Speisewassermenge hinsichtlich
35 des Trommelwasserstands nicht erst dann angepasst werden, wenn bereits eine Änderung des Trommelwasserstands festgestellt wurde, sondern in der Art einer prädiktiven Regelung bereits im Vorfeld an zu erwartende Änderungen des Wasser-

standes angepasst werden. Dabei ist der Wasserstand in der Trommel im Wesentlichen davon abhängig, wie viel Strömungsmedium im Verdampfer tatsächlich verdampft wird und demzufolge über den Economizer nachzuspeisen ist. Der Dampf- bzw.

5 Wasseranteil des Strömungsmediums am Verdampferaustritt hängt dabei vom Wärmeeintrag in den Verdampfer ab. Somit eignet sich der Wärmeeintrag in den Verdampfer als prädiktive Korrekturgröße zur Regelung des Wasserstands in der Trommel. Bei der Ermittlung des Sollwerts für den Speisewassermassenstrom
10 sollte daher die in den Verdampfer eingebrachte Wärmeleistung als Eingangsgröße verwendet werden.

Vorteilhafterweise werden bei der Bestimmung der in den Verdampfer der Druckstufe eingebrachten Wärmeleistung der Rauchgasmassenstrom und die Differenz der spezifischen Enthalpie
15 des Rauchgases am Ein- und Austritt des Verdampfers der Druckstufe verwendet. Die Ermittlung der in den Verdampfer eingebrachten Wärmeleistung erfolgt also über eine rauchgasseitige Wärmebilanzierung des Verdampfers. Werte für den
20 Rauchgasmassenstrom können hierbei beispielsweise aus der Blockleitebene zur Verfügung gestellt werden, da diese direkt vom aktuellen Betriebszustand einer typischerweise vorge-schalteten Gasturbine abhängig sind.

25 Bei der Ermittlung der spezifischen Enthalpie des Rauchgases am Eintritt des Verdampfers der Druckstufe wird vorteilhafterweise die Temperatur des Rauchgases am Eintritt des Verdampfers der Druckstufe als Eingangsgröße verwendet. Aus dieser lässt sich die spezifische Enthalpie durch einen einfachen linearen Zusammenhang ermitteln, sofern die Rauchgaszusammensetzung bekannt ist. Die Temperatur kann dabei direkt
30 durch entsprechende Messeinrichtungen am Verdampfereintritt gemessen werden.

35 In besonders vorteilhafter Ausgestaltung wird jedoch bei der Ermittlung der Temperatur des Rauchgases am Eintritt des Verdampfers der Druckstufe die Rauchgastemperatur am Eintritt des Dampferzeugers verwendet. Durch eine derartige Abschät-

zung der Rauchgastemperatur am Verdampfereintritt kann auf teure rauchgasseitige Messeinrichtungen verzichtet werden. Ermöglicht wird dies durch die spezielle Eigenschaft von Umlauf-Dampferzeugern, dass das Strömungsmedium durchgängig

5 Sättigungsbedingungen unterliegt und somit am Verdampferaustritt nicht überhitzt ist. Damit sinkt die Anzahl abhängiger Parameter, da z. B. eine mögliche Überhitzung des Strömungsmediums am Verdampferaustritt nicht berücksichtigt werden muss. Dadurch kann im Zuge eines thermodynamischen Design-

10 Reviews im Vorfeld ein Parameterkennfeld ermittelt werden, mithilfe dessen auf Basis der Rauchgastemperatur am Dampferzeugereintritt in Verbindung mit einem geeigneten Lastsignal (vorteilhafterweise dem Rauchgasmassenstrom) ein charakteristischer Kennwert für die Rauchgastemperatur am Verdampfereintritt bestimmt werden kann. Dies ermöglicht eine vergleichsweise fehlerunanfällige Ermittlung der Temperatur des Rauchgases am Verdampfereintritt ohne zusätzliche Messeinrichtung.

15

20 Vorteilhafterweise wird die spezifische Enthalpie des Rauchgases am Eintritt des Verdampfers der Druckstufe zeitverzögert verwendet. Durch eine derartige Zeitverzögerung, die regeltechnisch mit einem Zeitverzögerungsglied höherer Ordnung (PTn) erreicht werden kann, kann die zeitliche Verzögerung,

25 mit der rauchgasseitige Temperaturänderungen auch für das Strömungsmedium im Verdampfer spürbar werden, nachgebildet werden.

30 Grundsätzlich ist es möglich, die Temperatur des Rauchgases auch am Austritt des Verdampfers direkt zu messen. In besonders vorteilhafter Ausgestaltung des Verfahrens wird jedoch bei der Ermittlung der spezifischen Enthalpie des Rauchgases am Austritt des Verdampfers die Sättigungstemperatur des Strömungsmediums als Eingangsgröße verwendet. Hierdurch kann

35 ebenfalls auf eine separate Messung mit entsprechend teuren und aufwändigen Messeinrichtungen verzichtet werden. Anstelle einer Messgröße wird hier in Abhängigkeit der Sättigungstemperatur des Strömungsmediums im Verdampfer die Rauchgastempe-

ratur abgeschätzt und ebenfalls als Funktion der vorliegenden Gaszusammensetzung in eine zugehörige Rauchgasenthalpie umgerechnet. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Rauchgastemperatur am Verdampferaustritt minimal größer als die Sättigungstemperatur des Fluids im Verdampfer ist, und sich diese Temperaturdifferenz mit sinkender Last ebenfalls reduziert.

Unabhängig von der Art der rauchgasseitigen Temperaturermittlung am Verdampferein- und austritt kann mit dem bisher beschriebenen Verfahren die vom Rauchgas an die Verdampferheizfläche abgegebene Wärmeleistung genau bestimmt werden. Neben dieser Gesamtwärmeaufnahme des Verdampfers sollte für die Ermittlung des Speisewassermassenstromes zusätzlich die Aufwärmspanne (Enthalpiedifferenz) des Strömungsmediums im Verdampfer verwendet werden, d. h. vorteilhafterweise wird bei der Ermittlung des Sollwerts die Enthalpiedifferenz des Strömungsmediums zwischen Ein- und Austritt des Verdampfers der Druckstufe als Eingangsgröße verwendet. Diese werden ermittelt aus der Enthalpie des Sattdampfes (bezogen auf den gemessenen Trommeldruck) bzw. der strömungsmediumsseitig gemessenen Enthalpie am Verdampfereintritt.

Letztere kann dabei über eine funktionale Umrechnung der Messgrößen Druck und Temperatur ermittelt werden. Wird die Enthalpie auf diese Weise für den Verdampfereintritt bestimmt, so kann eine geringfügige Unterkühlung, wie sie üblicherweise am Verdampfereintritt bei Umlaufsystemen vorliegt, in der Wärmebilanz angemessen berücksichtigt werden. Ist eine separate Messung der Temperatur und des Drucks am Verdampfereintritt nicht vorgesehen bzw. nicht möglich, kann vereinfachend auch die Enthalpie des Sattwassers (ebenfalls bezogen auf den gemessenen Trommeldruck) verwendet werden. Wird schließlich das verdampferseitige Wärmeangebot durch die so gewonnene mediumsseitige Enthalpiedifferenz dividiert, ist zumindest für den stationären Lastbetrieb der benötigte Speisewassermassenstrom, der als Basis für die Füllstandsregelung herangezogen werden soll, für jeden Betriebszustand bekannt.

Die bisher beschriebenen Maßnahmen ermöglichen es, die Abweichung des tatsächlichen Trommel-Wasserstands zum vorgegebenen Sollwert als Korrekturregelgröße des mit der prädiktiven Speisewassermassenstromermittlung generierten Durchflusses zu verwenden. Dabei ist jedoch zu beachten, dass ein Eingriff dieses Korrekturreglers aus Gründen der Reglerstabilität trotz der bereits beschriebenen Verbesserungen immer noch sehr langsam und mit geringer Reglerverstärkung durchgeführt werden sollte. Besonders starke temporäre Abweichungen zum vorgegebenen Sollwert, die sich aufgrund physikalischer Mechanismen in Folge hochgradig instationärer Betriebsweise des Abhitzekessels ergeben, können für diesen Korrekturregelkreis unter Umständen noch immer nicht vermieden werden. Um die Trommel vor Über- oder Leerlauf zuverlässig zu schützen, sollten zur Stabilisierung vorteilhafterweise weitere Optimierungsmaßnahmen der Speisewassersollwertermittlung getroffen werden, die im Folgenden beschrieben werden.

Ändern sich bei instationären Vorgängen der Systemdruck und somit simultan die Sättigungstemperatur des Fluids im Verdampfer, ändert sich ebenfalls die Materialtemperatur der Verdampferrohre. Resultierend wird thermische Energie in die Rohrwände ein- oder aus den Rohrwänden gespeichert. Verglichen mit der bilanzierten Rauchgaswärme steht demnach für den Verdampfungsprozess des Strömungsmediums je nach Richtung der Druckänderung temporär mehr (Druckabsenkung) oder weniger Wärme (Druckerhöhung) zur Verfügung. Bei vorgegebener Aufwärmspanne des Strömungsmediums im Verdampfer (das Medium durchläuft vollständig das Zweiphasengebiet) sollte daher zur Vorausberechnung des benötigten Speisewassermassenstromes dieser nicht unerhebliche Einfluss im Regelungskonzept berücksichtigt werden.

Dazu wird vorteilhafterweise bei der Ermittlung des Sollwerts die zeitlich verzögerte Sättigungstemperatur des Strömungsmediums in der Druckstufe als Eingangsgröße verwendet. Durch ein Differenzierglied erster Ordnung (DT1-Element) lässt sich dieser physikalische Effekt nämlich regelungstechnisch abbil-

den. Dabei wird näherungsweise vorausgesetzt, dass bei einer Modifizierung des Systemdrucks die zeitliche Änderung sowohl der Temperatur des Strömungsmediums als auch die der Rohrwand identisch sind. Als Eingang des Differenzierglieds wird demnach die aus dem gemessenen Trommeldruck berechnete Sättigungstemperatur des Strömungsmediums verwendet.

Wird der Ausgang dieses Differenziergliedes mit der Masse der gesamten Verdampferrohre einschließlich aller zum Verdampfersystem dazugehörigen Rohrleitungen (wie beispielsweise Fall- und Steigleitungen, Ein- und Austrittssammler und die Trommel selbst) und der spezifischen Wärmekapazität des Verdampfermaterials multipliziert, können die in der Rohrwand ein- bzw. ausgespeicherten Wärmemengen quantifiziert werden. Durch die Wahl einer geeigneten Zeitkonstanten dieses Differenzierglieds lässt sich das zeitliche Verhalten der beschriebenen Speichereffekte relativ genau nachbilden, so dass dieser auf instationären Vorgängen beruhende zusätzliche Effekt des Ein- bzw. Ausspeicherns von Wärme der Metallmassen direkt berechnet werden kann. Der auf diese Weise ermittelte Wärmestromkorrekturwert wird zu weiteren Berücksichtigung von der rauchgasseitigen Gesamtwärmeaufnahme des Verdampfers subtrahiert.

In weiterer vorteilhafter Ausgestaltung wird bei der Ermittlung des Sollwerts die zeitlich verzögerte Dichte des Strömungsmediums in der Druckstufe als Eingangsgröße verwendet. Bei transienten Vorgängen im Wasser-/Dampfkreislauf ändern sich nämlich auch thermodynamische Zustandswerte wie z. B. Druck und Temperatur. Mit diesen Änderungen sind zwangsläufig in jeder Heizfläche des Abhitzedampferzeugers Änderungen des spezifischen Volumens bzw. der Dichte des Strömungsmediums verknüpft. Nimmt z. B. aufgrund eines Lastwechsels das spezifische Volumen des Strömungsmediums in einer Heizfläche ab (d. h. die Dichte nimmt zu), kann diese temporär massenmäßig mehr Fluid aufnehmen. Umgekehrt kann die Heizfläche bei sinkender Dichte weniger Fluid aufnehmen.

Dieser Effekt zeigt sich besonders bei Heizflächen mit einem hohen Anteil von unverdampftem Strömungsmedium, d. h. bei Umlaufdampferzeugern insbesondere in den Economizerheizflächen, die zur Optimierung der Füllstandsregelung der Trommel berücksichtigt werden sollten. Treten hier wie geschildert im instationären Betrieb fluidseitige Ein- und Ausspeichereffekte auf, so resultieren daraus unmittelbar Massenstromschwankungen am Economizeraustritt, was zwangsläufig mit einem schwankenden Trommelwasserstand verknüpft ist. Durch eine geeignete Speisewasserführung können diese Schwankungen wirkungsvoll kompensiert werden und somit Abweichungen des Trommelwasserstands vom vorgegebenen Sollwert effektiv vermindert werden.

Durch zusätzliche Messungen von Temperatur und Druck am Eintritt der ersten bzw. am Austritt der letzten Economizerheizfläche lässt sich die Fluiddicke an diesen Stellen ermitteln. Über eine geeignete Umrechnung kann ein repräsentatives Dichtemittel bestimmt werden. Eine Änderung dieses Dichtemittels ist somit ein Indikator fluidseitiger Ein- und Ausspeichereffekte, die durch ein weiteres Differenzierglied erster Ordnung (DT1) quantitativ erfasst werden können. Wird eine geeignete Verstärkung (vorzugsweise das komplette Volumen der Economizerheizflächen) und eine geeignete Zeitkonstante (vorzugsweise die halbe Durchlaufzeit des Strömungsmediums durch die Economizerheizflächen (lastabhängig)) für dieses Differenzierglied gewählt, kompensiert das so generierte Korrektursignal die fluidseitigen Speichereffekte im Economizer. Dabei ist das auf diese Weise ermittelte Korrektursignal dem aus der Wärmebilanz errechneten Speisewassermassenstrom additiv zu überlagern. Auf diese Weise können Schwankungen des Trommelwasserstands weiter reduziert werden.

Die Beschränkung der Dichtemessung auf den Economizer geht von der Erkenntnis aus, dass Schwankungen der mittleren Dichte im Verdampfer selbst (z. B. über Änderungen der Eintrittsunterkühlung) keine nennenswerten Auswirkungen auf den Trommelwasserstand haben. Schwankungen in der mittleren Dichte

gleichen sich in Umlaufsystemen nämlich durch unterschiedliche Umlaufzahlen im Verdampfersystem aus, so dass der Trommelwasserstand davon unberührt bleibt. Daher ist eine gesonderte Berücksichtigung von Dichteänderungen im Verdampfer für
5 eine optimierte Füllstandsregelung nicht erforderlich.

In vorteilhafter Ausgestaltung kommt ein mit dem oben beschriebenen Verfahren betriebener Umlauf-Abhitzedampferzeuger in einem Gas- und Dampfturbinenkraftwerk zum Einsatz.

10

Die mit der Erfindung erzielten Vorteile bestehen insbesondere darin, dass durch eine prädiktive Speisewassersollwertermittlung in einem Umlauf-Abhitzedampferzeuger Abweichungen des Trommelfüllstands zum vorgegebenen Sollwert auf ein Minimum beschränkt werden, so dass die maximal möglichen Last-
15 änderungsgeschwindigkeiten derartiger Systeme erheblich vergrößert werden. In der Tat ermöglicht ein derartiges Verfahren eine Verbesserung der Anlagendynamik, die mit reduzierten Trommeldurchmessern bei einer Füllstandsregelung nach dem
20 heutigen Stand der Technik nicht umsetzbar ist. Das vorliegende Verfahren stellt diesbezüglich eine wesentliche Verbesserung der heutigen Füllstandsregelung dar.

Die Erfindung wird anhand einer Zeichnung näher erläutert.
25 Darin zeigt die Figur eine schematische Darstellung einer Druckstufe eines Umlauf-Abhitzedampferzeugers mit einer Regelschaltung nach dem vorliegenden Verfahren.

Vom Umlauf-Abhitzedampferzeuger 1 ist in der schematischen
30 Darstellung der FIG nur eine einzige Druckstufe gezeigt. Das im Folgenden beschriebene Verfahren kann in jeder Druckstufe zur Anwendung kommen. Weiterhin zeigt die FIG lediglich die strömungsmediumsseitige Verschaltung der einzelnen Heizflächen, wobei die rauchgasseitige Verschaltung nicht dargestellt
35 stellt ist.

Strömungsmedium M strömt typischerweise aus einem nicht näher gezeigten Kondensatvorwärmer in den Strömungsweg 2 des Um-

lauf-Abhitzedampferzeugers 1. Der Massenstrom des Strömungsmediums M wird von einem Speisewasserregelventil 4 gesteuert. Die Speisewasserpumpe des Kreislaufs ist nicht näher dargestellt. Zunächst tritt das Strömungsmedium M in den Economizer 6 ein, der rauchgasseitig im kältesten Bereich angeordnet ist. Die Darstellung in der FIG kann beim Economizer 6 wie auch bei den weiteren noch zu beschreibenden Heizflächen auch für eine Mehrzahl von Heizflächen stehen, die seriell oder parallel angeordnet sind.

Nach der Vorwärmung im Economizer 6 strömt das Strömungsmedium M in die Trommel 8. Von hier strömt flüssiges Strömungsmedium M über Fallrohre 10 in den Verdampfer 12, wo es durch den Wärmeübertrag vom Rauchgas teilverdampft wird. Nach dem Durchfluss durch den Verdampfer 12 wird das Strömungsmedium M wieder in die Trommel 8 geführt, wo der nicht verdampfte, flüssige Teil verbleibt und erneut dem Verdampfer 12 zugeführt wird, während der verdampfte Teil aus der Trommel 8 nach oben abgeleitet wird. Der verdampfte Teil des Strömungsmediums M wird durch das über die Economizer 6 zugeführte Strömungsmedium M ersetzt, so dass sich im Idealfall ein konstanter Füllstand in der Trommel 8 einstellt.

Die FIG zeigt einen Naturumlauf-Abhitzekessel, der ohne zusätzliche Umwälzpumpe im Umlauf des Verdampfers 12 auskommt. Das im Folgenden beschriebene Verfahren kann aber auch in einem Zwangumlauf-Abhitzekessel zur Anwendung kommen.

Das verdampfte Strömungsmedium M aus der Trommel 8 tritt in die Überhitzer 14, 16 ein, denen jeweils noch eine Einspritzvorrichtung 18, 20 zur Temperaturregelung nachgeschaltet ist. Hier wird das Strömungsmedium M überhitzt und auf die gewünschte Austrittstemperatur gebracht und anschließend in einer nicht näher gezeigten Dampfturbine entspannt. Von dort wird es einem Kondensator zugeführt und dem Strömungsweg 2 über den Kondensatvorwärmer erneut zugeführt.

Bei instationären Lastvorgängen kann der Füllstand in der Trommel 8 schwanken. Da einerseits wegen einer besonders hohen Anlagenflexibilität kleine Trommelwandstärken bevorzugt werden, aber andererseits aufgrund eines hohen Wirkungsgrads besonders hohe Dampfparameter wünschenswert sind, sollte die Trommel 8 mit möglichst kleinem Innendurchmesser ausgelegt werden. Dies erfordert aber eine Minimierung der Füllstandsschwankungen in der Trommel 8, die durch die im Folgenden dargestellte Regelung gewährleistet ist.

Eine Füllstandsmesseinrichtung 22 misst den Füllstand in der Trommel 8 und gibt den ermittelten aktuellen Füllstand als Signal an ein Subtrahierglied 24. Hier wird der aktuelle Füllstand in der Trommel 8 von dem an einem Füllstandssollwertgeber 26 eingestellten Wert subtrahiert, so dass am Ausgang des Subtrahierglieds 24 die Abweichung des Füllstandes vom Sollwert anliegt. Der Ausgang des Subtrahierglieds 24 ist mit einem Reglerglied 28 verbunden, das als P- oder PI-Regler ausgestaltet sein kann, d. h. bei ausreichend großer Abweichung des Füllstands vom Sollwert ein (im letzteren Fall zur Abweichung proportionales) Signal ausgibt.

Diesem bereits durch die Abweichung vom Sollwert des Füllstands der Trommel 8 bestimmten Signal werden in Addiergliedern 30, 32 weitere Korrektursignale aufaddiert, die eine prädiktive Regelung der von der Speisepumpe 4 geförderten Menge an Strömungsmedium M ermöglichen sollen, so dass Abweichungen des Füllstands der Trommel 8 vom Sollwert bereits im Vorfeld vermieden oder minimiert werden.

Zunächst wird hierfür der Druck in der Trommel 8 von einer Druckmesseinrichtung 34 gemessen und der Regelung bereitgestellt. Aus dem Druck wird in einem Rechenglied 36 die Satteldampf Temperatur ermittelt. Zu dieser wird in einem Addierglied 38 die in einem Rechenglied 40 ermittelte Temperaturdifferenz am so genannten pinch point addiert, die genau die Temperaturdifferenz zwischen gesättigtem Strömungsmedium und Rauchgastemperatur am gasseitigen Verdampferaustritt dar-

stellt, so dass sich hier die Rauchgastemperatur am Austritt des Verdampfers 12 ergibt. Da die Temperaturdifferenz am pinch point lastabhängig ist, erhält das Rechenglied 40 als Eingangssignal den Rauchgasmassenstrom von einem Geberglied 42. Dieser kann gemessen oder von der Blockleitebene bereitgestellt werden.

Aus der am Ausgang des Addierglieds 38 anliegenden Temperatur des Rauchgasmassenstroms am gasseitigen Verdampferaustritt berechnet bei bekannter Rauchgaszusammensetzung das Rechenglied 44 die spezifische Rauchgasenthalpie am gasseitigen Verdampferaustritt. Die spezifische Rauchgasenthalpie am gasseitigen Verdampfereintritt hingegen wird im Rechenglied 46 aus der im pTn-Verzögerungsglied 48 zeitverzögerten gemessenen oder abgeschätzten Rauchgastemperatur am gasseitigen Verdampfereintritt 50 ermittelt. Die Abschätzung ist speziell bei Umlaufdampferzeugern möglich, wobei anhand eines Parameterkennfeldes bei gegebener Last die Rauchgastemperatur am Verdampfereintritt aus der Rauchgastemperatur am Eintritt des Abhitze-Umlaufdampferzeugers 1 ermittelt wird. Das Parameterkennfeld wird im Vorfeld anhand von Messungen bestimmt, kann aber in alternativer Ausführungsform auch durch geeignete Berechnungen ermittelt werden.

Die an Ein- und Austritt des Verdampfers 12 ermittelten spezifischen Enthalpien aus den Rechengliedern 46 bzw. 44 werden im Subtrahierglied 52 voneinander subtrahiert. Die Differenz wird an ein Multiplizierglied 54 gegeben, wo sie mit dem Rauchgasmassenstrom aus dem Geberglied 42 multipliziert wird. Somit liegt am Ausgang des Multipliziergliedes 54 die vom Rauchgas an den Verdampfer 12 abgegebene Wärmeleistung an.

Von dieser wird im Subtrahierglied 56 noch die Wärmemenge abgezogen, die nicht an das Strömungsmedium M, sondern an die Bauteile des Verdampfers 6 abgegeben wird. Diese wird ermittelt aus der im Rechenglied 58 errechneten Sättigungstemperatur, wobei als Eingang wiederum die Druckmesseinrichtung 34 dient. Von dem Ausgangssignal des Rechenglieds 58 wird im

Subtrahierglied 60 das in einem pT1-Verzögerungsglied 62 verzögerte Ausgangssignal des Rechenglieds 58 abgezogen. Dadurch liegt bei einer plötzlichen Änderung des Drucks zunächst ein Signal am Ausgang des Subtrahierglieds 60 an, dass mit der
5 Zeit abnimmt und das Aufwärmen oder Abkühlen der Rohrwände des Verdampfers 12 modelliert. Das Ausgangssignal wird in einem Multiplizierglied 64 mit einer für die Masse der wärmeaufnehmenden Bauteile des Verdampfers 12 charakteristischen Kennzahl 66 multipliziert und subtraktiv auf das Subtrahier-
10 glied 56 geschaltet.

Dieses im Subtrahierglied 56 anliegende, für das Wärmeangebot an das Strömungsmedium M im Verdampfer 12 charakteristische Signal wird in einem Dividierglied 68 durch die Verdampfungs-
15 enthalpie des Strömungsmediums M im Verdampfer 12 geteilt, die im Subtrahierglied 70 als Differenz aus der Enthalpie des Sattwassers und des Sattedampfes gebildet wird, die in den Rechengliedern 72 bzw. 74 ermittelt wird. Als Eingang der Rechenglieder 72 und 74 dient jeweils die Druckmesseinrichtung
20 34. In einer verbesserten, in der FIG jedoch nicht gezeigten Ausführungsform werden Druck und Temperatur zur Ermittlung der Enthalpie am Verdampfereintritt direkt gemessen, dies erfordert jedoch zusätzliche Messeinrichtungen.

Der so ermittelte Quotient im Dividierglied 68 ist ein Indikator für zukünftige Füllstandsänderungen in der Trommel 8 und wird dem Addierglied 32 zugeführt. Einen weiteren wichtigen Einfluss auf den Füllstand haben durch Dichteänderungen des Strömungsmediums M im Economizer 6 verursachte strömungs-
30 mediumsseitige Ein- und Ausspeicherungseffekte, die im Addierglied 32 hinzuaddiert werden.

Ermittelt werden diese Ein- und Ausspeicherungseffekte über eine Messung von Druck und Temperatur des Strömungsmediums M
35 vor und nach dem Economizer 6 in den Druckmesseinrichtungen 76 bzw. 78 und Temperaturmesseinrichtungen 80 bzw. 82. Aus deren Eingangssignalen wird jeweils im Rechenglied 84 die Dichte am Economizereintritt und im Rechenglied 86 die Dichte

am Economizeraustritt ermittelt. Aus deren Signalen bildet das Rechenglied 88 eine charakteristische mittlere Dichte des Strömungsmediums im Economizer 6. Auch hier wird von dem Ausgangssignal des Rechenglieds 88 im Subtrahierglied 90 das in
5 einem pT1-Verzögerungsglied 92 verzögerte Ausgangssignal des Rechenglieds 88 abgezogen. Dadurch liegt bei einer plötzlichen Änderung der Dichte zunächst ein Signal am Ausgang des Subtrahierglieds 90 an, dass mit der Zeit abnimmt und das das
10 Ein- und Ausspeichern von Strömungsmedium in den Economizer 6 modelliert. Das Ausgangssignal wird in einem Multiplizierglied 94 mit einer für das Volumen der Heizflächen des Economizers 6 charakteristischen Kennzahl 96 multipliziert und auf das Addierglied 32 geschaltet.

15 Diese Korrekturgrößen werden über das Addierglied 30 auf das Füllstandsabweichsignal aus dem Regelglied 28 geschaltet und in ein Geberglied 98 gegeben, wo daraus ein Sollwert für den Speisewassermassenstrom bereitgestellt wird. Dieser wird auf ein Subtrahierglied 100 gegeben, in dem der in einer Massenstrommesseinrichtung 102 strömungsmediumsseitig vor dem Spei-
20 sewasserregelventil 4 gemessene Massenstrom des Strömungsmediums M abgezogen wird. Das Abweichsignal wird einem PI-Regelglied 104 zugeführt, das bei einer entsprechenden Abweichung die Durchflussmenge des Speisewasserregelventils 4 kor-
25 rigiert.

Durch die dargestellte Regelung bzw. das dargestellte Regelverfahren ist es möglich, durch die Minimierung von Füllstandsschwankungen in der Trommel 8 auch in Umlauf-Abhitze-
30 dampferzeugern 1 mit kleiner Trommel 8 und damit hohen möglichen Dampfparametern und Wirkungsgraden eine hohe betriebliche Flexibilität zu gewährleisten.

Patentansprüche

1. Verfahren zum Betreiben eines Umlauf-Abhitzedampferzeugers (1), bei dem in einer Druckstufe des Umlauf-Abhitzedampferzeugers (1) zur Regelung des Wasserstandes in einer Trommel (8) der Speisewassermassenstrom anhand eines vorgegebenen Sollwerts geführt wird, wobei bei der Ermittlung des Sollwerts die in einen Verdampfer (12) der Druckstufe eingebrachte Wärmeleistung als Eingangsgröße verwendet wird.
2. Verfahren nach Anspruch 1, bei dem bei der Bestimmung der in den Verdampfer (12) der Druckstufe eingebrachten Wärmeleistung der Rauchgasmassenstrom und die Differenz der spezifischen Enthalpie des Rauchgases am Ein- und Austritt des Verdampfers (12) der Druckstufe verwendet werden.
3. Verfahren nach Anspruch 2, bei dem bei der Ermittlung der spezifischen Enthalpie des Rauchgases am Eintritt des Verdampfers (12) der Druckstufe die Temperatur des Rauchgases am Eintritt des Verdampfers (12) der Druckstufe als Eingangsgröße verwendet wird.
4. Verfahren nach Anspruch 3, bei dem bei der Ermittlung der Temperatur des Rauchgases am Eintritt des Verdampfers (12) der Druckstufe die Rauchgastemperatur am Eintritt des Umlauf-Abhitzedampferzeugers (1) verwendet wird.
5. Verfahren nach einem der Ansprüche 2 bis 4, bei dem die spezifische Enthalpie des Rauchgases am Eintritt des Verdampfers (12) der Druckstufe zeitverzögert verwendet wird.
6. Verfahren nach einem der Ansprüche 2 bis 5, bei dem bei der Ermittlung der spezifischen Enthalpie des Rauchgases am Austritt des Verdampfers (12) die Sättigungstemperatur des Strömungsmediums (M) als Eingangsgröße verwendet wird.

7. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem bei der Ermittlung des Sollwerts die Enthalpiedifferenz des Strömungsmediums (M) zwischen Ein- und Austritt des Verdampfers (12) der Druckstufe als Eingangsgröße verwendet

5 wird.

8. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem bei der Ermittlung des Sollwerts die zeitlich verzögerte Sättigungstemperatur des Strömungsmediums (M) in der Druck-

10 stufe als Eingangsgröße verwendet wird.

9. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem bei der Ermittlung des Sollwerts die zeitlich verzögerte Dichte des Strömungsmediums (M) in der Druckstufe als Ein-

15 gangsgröße verwendet wird.

10. Umlauf-Abhitzedampferzeuger (1) mit Mitteln zum Ausführen des Verfahrens nach einem der vorhergehenden Ansprüche.

20

11. Gas- und Dampfturbinenkraftwerk mit einem Umlauf-Abhitzedampferzeuger (1) nach Anspruch 10.

