

(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
23. Dezember 2010 (23.12.2010)

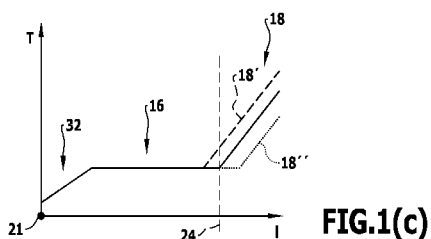
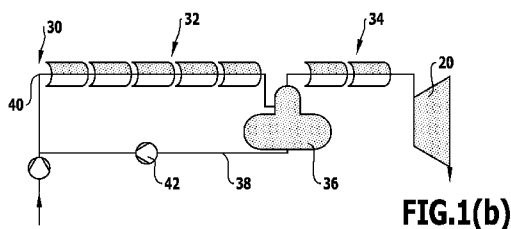
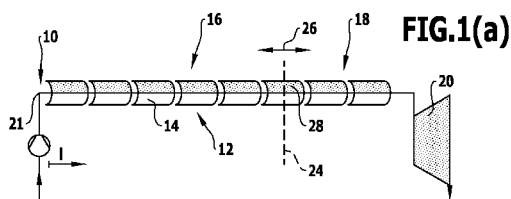
(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2010/145970 A2

- (51) Internationale Patentklassifikation: Nicht klassifiziert
- (21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2010/057982
- (22) Internationales Anmeldedatum: 8. Juni 2010 (08.06.2010)
- (25) Einreichungssprache: Deutsch
- (26) Veröffentlichungssprache: Deutsch
- (30) Angaben zur Priorität: 10 2009 025 455.2 15. Juni 2009 (15.06.2009) DE
- (71) Anmelder (für alle Bestimmungsstaaten mit Ausnahme von US): **DEUTSCHES ZENTRUM FÜR LUFT- UND RAUMFAHRT E.V.** [DE/DE]; Linder Höhe, 51147 Köln (DE).
- (72) Erfinder; und
- (75) Erfinder/Anmelder (nur für US): **FELDHOFF, Jan, Fabian** [DE/DE]; Hohentwielstrasse 178, 70199 Stuttgart (DE). **ECK, Markus** [DE/DE]; Talackerstrasse 8, 71229 Leonberg (DE).
- (74) **Anwalt: HOEGER, STELLRECHT & PARTNER;** Uhlandstrasse 14c, 70182 Stuttgart (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, 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, RO, RS, RU, 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, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, 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, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

(54) **Title:** METHOD FOR GENERATING SUPERHEATED STEAM IN A SOLAR THERMAL POWER PLANT, AND SOLAR THERMAL POWER PLANT

(54) **Bezeichnung :** VERFAHREN ZUR ERZEUGUNG VON ÜBERHITZTEM DAMPF AN EINEM SOLARTHERMISCHEN KRAFTWERK UND SOLARTHERMISCHES KRAFTWERK



(57) **Abstract:** The invention relates to a method for generating superheated steam in a solar thermal power plant, wherein steam is generated by solar energy in an evaporator area in a flow passage for heat transfer medium, and the steam is superheated by solar energy in a superheater area, wherein a terminal evaporation point of the evaporator area is positionally fixed in a control process, wherein a spatial temperature gradient in the superheater area and a temperature in the evaporator area are determined and the mass flow of heat transfer medium in the flow passage is adjusted as a function of the temperature gradients and the measured temperature in the evaporator area.

(57) **Zusammenfassung:** Verfahren zur Erzeugung von überhitztem Dampf an einem solarthermischen Kraftwerk, bei dem in einer Durchlaufstrecke für Wärmeträgermedium durch Solarenergie in einem Verdampferbereich Dampf erzeugt wird und in einem Überhitzerbereich durch Solarenergie der Dampf überhitzt wird, wobei ein Verdampfungsendpunkt des Verdampferbereichs in einem Regelungsverfahren örtlich fixiert wird, bei dem ein räumlicher Temperaturgradient in dem Überhitzerbereich und eine Temperatur im Verdampferbereich bestimmt werden und der Massenstrom an Wärmeträgermedium in der Durchlaufstrecke in Abhängigkeit des Temperaturgradienten und der gemessenen Temperatur im Verdampferbereich eingestellt wird.

WO 2010/145970 A2

Veröffentlicht:

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

**Verfahren zur Erzeugung von überhitztem Dampf
an einem solarthermischen Kraftwerk und
solarthermisches Kraftwerk**

5

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Erzeugung von überhitztem Dampf an einem solarthermischen Kraftwerk, bei dem in einer Durchlaufstrecke für
10 Wärmeträgermedium durch Solarenergie in einem Verdampferbereich Dampf erzeugt wird und in einem Überhitzerbereich durch Solarenergie der Dampf überhitzt wird.

Die Erfindung betrifft ferner ein solarthermisches Kraftwerk mit einer Dampf-
15 erzeugungsstufe, wobei die Dampferzeugungsstufe mindestens einen Kollektorstrang mit einer Durchlaufstrecke für Wärmeträgermedium mit einem Verdampferbereich und einem Überhitzerbereich umfasst.

Am Übergang von dem Verdampferbereich zu dem Überhitzerbereich liegt der
20 Verdampfungsstadium. Grundsätzlich können schwankende Energieeinträge durch Schwankungen in der solaren Bestrahlung zu einer Änderung des Orts des Verdampfungsstadiums führen. Schwankungen dieses Orts, an dem die Verdampfung in Überhitzung übergeht, können zu hohen oszillierenden Temperaturgradienten in axialer Richtung innerhalb eines entsprechenden
25 Führungsrohrs führen. Dies wiederum hat radiale und tangential Schwankungen zur Folge. Solche Temperaturgradienten verursachen thermische Spannungen in den entsprechenden Werkstoffen eines Führungsrohrs. Diese thermischen Spannungen verringern die Dauerfestigkeit der betroffenen
Komponenten stark.

30

Beispielsweise aus der DE 101 52 968 C1 ist ein solarthermisches Kraftwerk bekannt, welches mindestens einen Solarkollektorstrang mit einem Verdampferstrang und einem Überhitzerstrang umfasst. Es ist eine Rezirkula-

- 2 -

tionsleitung vorgesehen, mittels der flüssiges Wärmeübertragungsmedium aus dem Verdampferstrang rezirkulierbar ist. Bei dem Rezirkulationskonzept ist ein Abscheider vorgesehen, welcher aus dem von dem Verdampferstrang ge-
5 lieferten Zwei-Phasen-Gemisch flüssiges Wärmeübertragungsmedium und Dampf voneinander trennt, wobei das flüssige Wärmeübertragungsmedium rezirkuliert wird und der Dampf dem Überhitzer zugeführt wird. Dadurch lässt sich der Verdampfungsendpunkt fixieren.

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren der eingangs ge-
10 nannten Art bereitzustellen, mit dem sich der Verdampfungsendpunkt mit geringem konstruktiven Aufwand fixieren lässt.

Diese Aufgabe wird bei dem eingangs genannten Verfahren erfindungsgemäß dadurch gelöst, dass ein Verdampfungsendpunkt des Verdampferbereichs in
15 einem Regelungsverfahren örtlich fixiert wird, wobei ein räumlicher Temperaturgradient in dem Überhitzerbereich und eine Temperatur im Verdampferbereich bestimmt werden und der Massenstrom an Wärmeträgermedium in der Durchlaufstrecke in Abhängigkeit des Temperaturgradienten und der gemessenen Temperatur im Verdampferbereich eingestellt wird.

20 Es hat sich gezeigt, dass durch Nutzung des Temperaturgradienten im Überhitzerbereich und zusätzliche Nutzung einer gemessenen Temperatur im Verdampferbereich sich eine stabile Regelung realisieren lässt, bei der die räumliche Schwankungsbreite des Verdampfungsendpunkts in einem engen
25 Bereich liegt.

Da beispielsweise ein Abscheider und eine Fördereinrichtung für die Rezirkulation von Kondensat im Vergleich zum Rezirkulationskonzept nicht notwendig sind, lässt sich ein solarthermisches Kraftwerk, bei dem das erfindungsgemäße
30 Verfahren durchgeführt wird, mit geringeren Investitionskosten realisieren.

- 3 -

Das Gesamtsystem weist dabei geringere Wärmeverluste auf, da keine Zuleitungen und Ableitungen zu einem entsprechenden Abscheider benötigt werden.

- 5 Beispielsweise auch bei einem sehr schnellen starken Anstieg des Energieeintrags in einen Kollektorstrang kann durch eine schnelle Erhöhung des Massenstroms die Verschiebung des Verdampfungsendpunkts verhindert werden. Bei Systemen mit Abscheider ist in einem solchen Fall ein hoher Überschuss an flüssigem Wärmeträgermedium im Verdampferbereich notwendig,
10 welcher höhere Pumpverluste verursacht.

Die durch Fixierung des Verdampfungsendpunkts erreichte Verminderung der Materialbelastungen erlaubt einen sicheren, langfristigen Betrieb mit einem Durchlaufkonzept.

15

Der erzeugte überhitzte Dampf wird beispielsweise zur Erzeugung von elektrischem Strom genutzt oder als Prozessdampf.

- Insbesondere wird zur Fixierung des Verdampfungsendpunkts der Massenstrom des Wärmeträgermediums in der Durchlaufstrecke geregelt. Der
20 Massenstrom lässt sich auf einfache Weise über Reglerventile einstellen.

- Günstigerweise ist eine Regelgröße im Regelungsverfahren die räumliche Lage des Verdampfungsendpunkts, wobei eine Führungsgröße (Sollwert) ein definierter Ort ist. Aus der Ermittlung des Temperaturgradienten und der Temperatur im Verdampferbereich lässt sich der Istwert bestimmen und aus der
25 Abweichung zu dem Sollwert lässt sich eine Stellgröße bilden, mit der wiederum der Massenstrom eingestellt werden kann.

- 30 Insbesondere beeinflusst eine Stellgröße im Regelungsverfahren den Massenstrom des Wärmeträgermediums in der Durchlaufstrecke. Die Stellgröße ist beispielsweise ein Ventilhub von einem oder mehreren Regelventilen.

- 4 -

Bei einer Ausführungsform werden im Regelungsverfahren der Temperaturgradient und die gemessene Temperatur im Verdampferbereich auf einen räumlichen Schnittpunkt extrapoliert und eine oder mehrere Stellgrößen werden durch eine Abweichung des Schnittpunkts von einer vorgegebenen räumlichen Lage des Verdampfungsendpunkts bestimmt. Dieser Schnittpunkt charakterisiert einen Istwert und die Abweichung zu dem Sollwert bildet die Stellgröße.

Günstigerweise wird die Temperatur im Verdampferbereich außerhalb eines Vorwärmbereichs gemessen. Im Vorwärmbereich nimmt das flüssige Wärmeträgermedium noch sensible Wärme auf.

Der Temperaturgradient im Überhitzerbereich wird vorteilhafterweise aus den gemessenen Temperaturen an mindestens zwei beabstandeten Orten im Überhitzerbereich ermittelt. Dadurch lässt sich der Temperaturanstieg im Überhitzerbereich bestimmen. Dies wiederum ermöglicht eine Extrapolation zur Bestimmung des Istwerts für den Verdampfungsendpunkt.

Bei einer vorteilhaften Ausführungsform wird flüssiges Wärmeträgermedium in den Verdampferbereich geregelt eingespritzt. Dadurch lässt sich der Massenstrom in der entsprechenden Durchlaufstrecke beeinflussen. Die Regelungsqualität lässt sich dadurch verbessern. Weiterhin lässt sich die Regelschnelligkeit stark erhöhen.

Insbesondere erfolgt die Einspritzung zwischen der Temperaturmessstelle im Verdampferbereich und dem Verdampfungsendpunkt. Dadurch ergibt sich eine optimierte Regelung.

Es ist ferner vorteilhafterweise vorgesehen, dass eine Austrittstemperatur am Überhitzerbereich auf einen konstanten Wert geregelt wird. Dadurch ergibt sich ein optimierter Wirkungsgrad für eine nachgeschaltete Turbine. Durch die Fixierung des Verdampfungsendpunkts kann die Austrittstemperatur ohne zu-

- 5 -

sätzliche Maßnahmen variieren. Durch die entsprechende Regelung lässt sich die Austrittstemperatur fixieren.

Insbesondere wird dazu in den Überhitzerbereich geregelt flüssiges Wärmeträgermedium eingespritzt. Die Einspritzmenge bestimmt die Austrittstemperatur.

Der Erfindung liegt ferner die Aufgabe zugrunde, ein solarthermisches Kraftwerk der eingangs genannten Art bereitzustellen, welches in Alternative zu dem Rezirkulationskonzept eine Fixierung des Verdampfungsendpunkts ermöglicht.

Diese Aufgabe wird bei dem eingangs genannten solarthermischen Kraftwerk erfindungsgemäß dadurch gelöst, dass ein erster Temperatursensor vorgesehen ist, welcher an dem Verdampferbereich angeordnet ist, ein zweiter Temperatursensor und ein dritter Temperatursensor vorgesehen sind, welche beabstandet zueinander an dem Überhitzerbereich angeordnet sind, eine Massenstromregelungseinrichtung vorgesehen ist, durch welche der Massenstrom an Wärmeträgermedium in der Durchlaufstrecke einstellbar ist, und eine Regelungseinrichtung vorgesehen ist, welche signalwirksam mit dem ersten Temperatursensor, dem zweiten Temperatursensor und dem dritten Temperatursensor verbunden ist, aus einer zweiten Temperatur und einer dritten Temperatur einen räumlichen Temperaturgradienten bestimmt und die Massenstromregelungseinrichtung entsprechend ansteuert zur örtlichen Fixierung eines Verdampfungsendpunkts.

Das erfindungsgemäße solarthermische Kraftwerk weist die bereits im Zusammenhang mit dem erfindungsgemäßen Verfahren erläuterten Vorteile auf.

Weitere vorteilhafte Ausgestaltungen des erfindungsgemäßen solarthermischen Kraftwerks wurden ebenfalls bereits im Zusammenhang mit dem erfindungsgemäßen Verfahren erläutert.

- 6 -

Insbesondere ist an einem Anfang der Durchlaufstrecke ein Regelventil angeordnet, welches durch die Regelungseinrichtung angesteuert ist. Das Regelventil bildet einen Teil der Massenstromregelungseinrichtung. Über das Regelventil lässt sich auf einfache Weise der Massenstrom regeln und dadurch lässt
5 sich auch bei variierenden Einstrahlungsbedingungen auf einfache Weise der Verdampfungsendpunkt fixieren.

Bei einer vorteilhaften Ausführungsform ist eine Einspritzeinrichtung zur Einspritzung von flüssigem Wärmeträgermedium mit mindestens einer Einspritz-
10 stelle in den Verdampferbereich vorgesehen. Die Einspritzeinrichtung ist Teil der Massenstromregelungseinrichtung. Über sie lässt sich der Massenstrom einstellen. Es lässt sich dadurch die Regelqualität erhöhen und die Regelungs-
geschwindigkeit lässt sich erhöhen.

15 Insbesondere ist die Einspritzeinrichtung durch die Regelungseinrichtung angesteuert. Dadurch lässt sich der Verdampfungsendpunkt auf optimierte Weise fixieren.

Bei einer konstruktiv günstigen Ausführungsform umfasst die Einspritz-
20 einrichtung ein Regelventil. Dadurch lässt sich auf einfache Weise der Massenstrom beeinflussen.

Günstigerweise liegt die mindestens eine Einspritzstelle der Einspritzeinrichtung zwischen einem Temperaturmesspunkt des ersten Temperatursensors
25 und dem Verdampfungsendpunkt. Dadurch ergibt sich ein optimierter Regelprozess.

Es ist ferner günstig, wenn eine Einspritzeinrichtung zur Einspritzung von flüssigem Wärmeträgermedium mit mindestens einer Einspritzestelle in dem
30 Überhitzerbereich vorgesehen ist. Dadurch lässt sich die Austrittstemperatur von überhitztem Wärmeträgermedium insbesondere auf einen konstanten Wert einregeln.

- 7 -

Günstigerweise ist eine solare Kollektoreinrichtung vorgesehen, an welcher die Durchlaufstrecke angeordnet ist. Die solare Kollektoreinrichtung kann auf unterschiedliche Weise ausgebildet sein. Sie kann beispielsweise einen oder mehrere Rinnenkollektoren umfassen. Grundsätzlich ist beispielsweise auch
5 die Realisierung über einen Turmreceiver möglich.

Die Dampferzeugungsstufe ist insbesondere fluidwirksam mit mindestens einer Turbine verbunden. Es lässt sich dadurch auf einfache Weise elektrischer Strom erzeugen.

10

An dem erfindungsgemäßen solarthermischen Kraftwerk ist insbesondere das erfindungsgemäße Verfahren durchführbar.

15

Die nachfolgende Beschreibung bevorzugter Ausführungsformen dient im Zusammenhang mit den Zeichnungen der näheren Erläuterung der Erfindung. Es zeigen:

20

Figur 1(a) eine schematische Darstellung des Durchlaufkonzepts zur solaren Erzeugung von überhitztem Dampf (Stand der Technik);

25

Figur 1(b) eine schematische Darstellung des Rezirkulationskonzepts zur solaren Erzeugung von überhitztem Dampf (Stand der Technik);

30

Figur 1(c) schematisch den Temperaturverlauf an einer Durchlaufstrecke bei der Erzeugung von überhitztem Dampf;

Figur 2 eine schematische Blockbilddarstellung eines ersten Ausführungsbeispiels eines erfindungsgemäßen solarthermischen Kraftwerks;

- 8 -

Figur 3 eine schematische Blockschaltbilddarstellung eines zweiten Ausführungsbeispiels eines erfindungsgemäßen solarthermischen Kraftwerks; und

5 Figur 4 schematisch den Verlauf der Temperatur über der Länge an einer Durchlaufstrecke im Zusammenhang mit dem Ausführungsbeispiel eines erfindungsgemäßen Verfahrens.

Bei einem solarthermischen Kraftwerk wird Wärmeträgermedium durch Solar-
10 energie erhitzt. Das erhitzte Wärmeträgermedium treibt eine Turbine an, wodurch an einem Generator ein elektrischer Strom erzeugt wird.

Bei einem Durchlaufprozess (Figur 1(a)), welcher aus dem Stand der Technik bekannt ist, ist eine Durchlaufstrecke 10 vorgesehen, an welcher eine solare
15 Kollektoreinrichtung 12 angeordnet ist. Die solare Kollektoreinrichtung 12 ist beispielsweise durch eine Mehrzahl von Rinnenkollektoren 14 gebildet, welche seriell angeordnet sind. Bei der Durchströmung dieser Rinnenkollektoren 14 durch Wärmeträgermedium wird konzentrierte Solarstrahlung auf entsprechende Absorberrohre gerichtet und in den Absorberrohren strömendes
20 Wärmeträgermedium wird erhitzt.

Bei dem Durchlaufkonzept umfasst die Durchlaufstrecke 10 einen Verdampferbereich 16, in welchem nach einer entsprechenden Vorwärmung flüssiges
Wärmeträgermedium solar verdampft wird. An den Verdampferbereich 16
25 schließt sich ein Überhitzerbereich 18 an, an welchem in dem Verdampferbereich 16 erzeugter Dampf überhitzt wird. Aus dem Überhitzerbereich 18 austretendes überhitztes Wärmeträgermedium wird einer Turbine 20 zugeführt.

30 In Figur 1(c) ist schematisch der Temperaturverlauf über der Länge l entlang der Durchlaufstrecke 10 gezeigt. Ein Anfang der Durchlaufstrecke ist mit 21 bezeichnet. In einem Betriebsmodus mit solarer Einstrahlung schließt sich an den Anfang 21 zunächst ein Vorwärmbereich 22 an, in welchem ein Tempera-

- 9 -

turanstieg und insbesondere mindestens näherungsweise linearer Temperaturanstieg erfolgt. Daran schließt sich der Verdampferbereich 16 an, in welchem die Verdampfung erfolgt. In dem Verdampferbereich 16 ist die Temperatur mindestens näherungsweise ortsunabhängig. Der Verdampferbereich 16 endet mit einem Verdampfungsendpunkt 24. In dem Vorwärmbereich 22 nimmt das Wärmeträgermedium sensible Wärme auf. In dem Verdampferbereich 16 nimmt es latente Wärme auf.

Auf den Verdampfungsendpunkt 24 folgt der Überhitzerbereich 18. Im Überhitzerbereich 18 nimmt das dampfförmige Wärmeträgermedium sensible Wärme auf. Die Temperatur steigt in dem Überhitzerbereich längs der Durchlaufstrecke 10 an. Der Anstieg ist mindestens näherungsweise linear.

In der Durchlaufstrecke 10 erfolgt eine Direktverdampfung. Das in die Durchlaufstrecke 10 eingeleitete flüssige Wärmeträgermedium wird längs der Durchlaufstrecke 10 solar vorgewärmt, verdampft und überhitzt. Der überhitzte Dampf wird der Turbine 20 bereitgestellt. Bei einem solarthermischen Kraftwerk schwankt der solare Energieeintrag. Dadurch verändert sich bei dem Durchlaufkonzept, wie es anhand der Figur 1(a) erläutert ist, der Ort des Verdampfungsendpunkts 24. Dies ist in Figur 1(a) durch den Doppelpfeil mit dem Bezugszeichen 26 angedeutet. Diese Schwankungen im Ort des Verdampfungsendpunkts 24 führen zu hohen oszillierenden Temperaturgradienten innerhalb eines Rohrs 28 der Durchlaufstrecke 10. Die Oszillation entsteht zunächst in axialer Richtung (in einer Richtung parallel zur Längsrichtung der Durchlaufstrecke 10) und infolge davon entstehen auch oszillierende Temperaturgradienten in radialer und tangentialer Richtung. Diese Temperaturgradienten verursachen wiederum thermische Spannungen im Werkstoff des Rohrs 28. Dadurch wird die Dauerfestigkeit der betroffenen Komponenten verringert.

30

Wenn im Vergleich zum Idealfall die Bestrahlung zu groß ist oder der Massenstrom an Wärmeträgermedium zu gering ist, dann verschiebt sich der Verdampfungsendpunkt 24 in Richtung zu dem Anfang 21 hin. Dies ist in

- 10 -

Figur 1(c) durch die Kurve 18' angedeutet. Wenn die Bestrahlung zu gering ist oder der Massenstrom zu groß ist, dann verschiebt sich der Verdampfungs-
endpunkt 24 weg von dem Anfang 21. Dies ist in Figur 1(c) durch die Kurve
mit dem Bezugszeichen 18" angedeutet. Eine Schwankung des Massenstroms
5 und/oder eine Schwankung der Einstrahlungsbedingungen führt zu einer
ständigen Fluktuation des Verdampfungsendpunkts 24.

Beim Rezirkulationskonzept (welches in Figur 1(b) schematisch dargestellt ist)
ist eine Durchlaufstrecke 30 in einen Verdampferstrang 32 und einen Über-
10 hitzerstrang 34 aufgeteilt. Zwischen dem Verdampferstrang 32 und dem Über-
hitzerstrang 34 ist ein Abscheider 36 angeordnet. Ein Ausgang des Ver-
dampferstrangs 32 führt in den Abscheider 36. Von dem Abscheider 36 ist der
Überhitzerstrang 34 fortgeführt. Ein weiterer Ausgang des Abscheiders 36 ist
fluidwirksam mit einer Leitung 38 verbunden. Diese Leitung 38 wiederum ist
15 fluidwirksam mit einem Anfang 40 des Verdampfungsstrangs 32 verbunden. In
der Leitung 38 ist vorzugsweise eine Pumpe 42 angeordnet. Die Leitung 38
bildet eine Rezirkulationsleitung, durch welche flüssiges Wärmeträgermedium
von einem Ausgang des Verdampfungsstrangs 32 an den Anfang 40 rezirku-
liert wird.

20 Durch die Position des Abscheiders 36 wird der Verdampfungsendpunkt ge-
wissermaßen hardwaremäßig festgelegt.

Ein erstes Ausführungsbeispiel eines erfindungsgemäßen solarthermischen
25 Kraftwerks, welches in Figur 2 gezeigt und mit 44 bezeichnet ist, umfasst eine
Dampferzeugungsstufe 45 mit einer Mehrzahl von parallel angeordneten
Durchlaufstrecken 46 (46a, 46b, usw.). Es folgt ein Verdampferbereich 50 mit
einer solaren Kollektoreinrichtung 52. Die solare Kollektoreinrichtung 52 um-
fasst beispielsweise eine Mehrzahl von Rinnenkollektoren.

30 Auf den Verdampferbereich 50 folgt in der Durchlaufstrecke 46 ein Überhitzer-
bereich 54. Dieser ist ebenfalls an der solaren Kollektoreinrichtung 52 ange-
ordnet. Zwischen dem Verdampferbereich 50 und dem Überhitzerbereich 54

liegt der Verdampfungsendpunkt 56. Dieser kann innerhalb eines Rinnenkollektors liegen. Wie untenstehend noch näher erläutert wird, ist es das Ziel bei dem erfindungsgemäßen Regelungsverfahren, den Verdampfungsendpunkt 56 räumlich, d. h. längs der Durchlaufstrecke 10, zu fixieren und dadurch den
5 Verdampfungsendpunkt 56 örtlich festzulegen.

An die Überhitzerbereiche 54 der Durchlaufstrecken 46 schließt sich eine Sammeleinrichtung 58 an. In dieser wird der überhitzte Dampf der Kollektorstränge der parallelen Durchlaufstrecken 46 gesammelt.

10

Die Sammeleinrichtung 58, welche Eingänge entsprechend der Mehrzahl der Durchlaufstrecken 46 aufweist, ist mit einem Ausgang 60 fluidwirksam an einen Leistungsblock 62 gekoppelt. Der Leistungsblock 62 umfasst (mindestens) eine Turbine und einen Generator für elektrischen Strom.

15

Von dem Leistungsblock 62 führt eine Rückleitung 64 zu einer als Ganzes mit 66 bezeichneten Aufteilungseinrichtung, durch welche der Strom an flüssigem Wärmeträgermedium auf die einzelnen Durchlaufstrecken 46 aufgeteilt wird.

20 Dem Überhitzerbereich 54 ist eine als Ganzes mit 68 bezeichnete Einspritzeinrichtung zugeordnet. Durch diese lässt sich flüssiges Wärmeträgermedium in den Überhitzerbereich 54 einspritzen, um eine Austrittstemperatur an überhitztem Dampf aus dem Überhitzerbereich 54 einstellen zu können. Dies wird untenstehend noch näher erläutert. Dadurch kann die Eintrittstemperatur von
25 überhitztem Dampf in den Leistungsblock 62 fixiert werden.

Die Einspritzeinrichtung 68 umfasst beispielsweise jeweils ein der entsprechenden Durchlaufstrecke 46 zugeordnetes Regelventil 70. Durch ein solches Regelventil 70 ist die Menge des eingespritzten flüssigen Wärmeträgermediums einstellbar (einschließlich der Einstellmöglichkeit, dass kein
30 flüssiges Wärmeträgermedium eingespritzt wird).

- 12 -

Die Einspritzeinrichtung 68 weist an der jeweiligen Durchlaufstrecke 46 eine Einspritzstelle 72 auf, welche, wie untenstehend noch näher erläutert wird, Temperatursensoren, welche Temperaturmesswerte zur Durchführung des erfindungsgemäßen Regelungsverfahrens bereitstellen, nachgeordnet ist.

5

An der Leitung 64 ist eine Abzweigung 73 angeordnet, von welcher eine Leitung 74 abzweigt, mit welcher wiederum die Regelventile 70 der jeweiligen Durchlaufstrecken 46 fluidwirksam verbunden sind. Durch die Abzweigung 73 lässt sich flüssiges Wärmeträgermedium auskoppeln und zur Einspritzung in die Überhitzerbereiche 54 der Durchlaufstrecken 46 verwenden.

10

An der Rückleitung 64 ist eine Pumpe 76 zur Förderung des Wärmeträgermediums angeordnet.

15

Das solarthermische Kraftwerk 44 umfasst eine Regelungseinrichtung 78. Durch diese erfolgt eine derartige Regelung, dass der Verdampfungsendpunkt 56 örtlich fixiert wird.

20

An dem Verdampferbereich 50 ist ein erster Temperatursensor 80 angeordnet. Dieser misst die Temperatur im dampfförmigen Wärmeträgermedium. Der erste Temperatursensor 80 ist dabei außerhalb eines Vorwärmbereichs angeordnet.

25

Im Überhitzerbereich sind ein zweiter Temperatursensor 82 und ein dritter Temperatursensor 84 beabstandet zueinander angeordnet. Der entsprechende Abstand ist in Figur 2 mit L bezeichnet. Dieser Abstand kann dabei größer, gleich oder kleiner als die Länge beispielsweise eines Rinnenkollektors sein. Der zweite Temperatursensor 82 und der dritte Temperatursensor 84 sind bezogen auf die Strömungsrichtung von Wärmeträgermedium in einer Durchlaufstrecke 46 vor der Einspritzstelle 72 angeordnet. Der erste Temperatursensor 80, der zweite Temperatursensor 82 und der dritte Temperatursensor 84 sind signalwirksam mit der Regelungseinrichtung 78 verbunden. Die entsprechenden Temperaturmesswerte (T_1 , T_2 und T_3) dieser Temperatursensoren

30

- 13 -

werden an die Regelungseinrichtung 78 zur weiteren Auswertung und Bearbeitung übergeben.

Die Regelventile 48 der Durchlaufstrecke 46 bilden eine Massenstromregelungseinrichtung 86. Diese Regelventile 48 erlauben eine Einstellbarkeit des Massenstroms in den jeweiligen Durchlaufstrecken 46. Die Regelventile 48 sind durch die Regelungseinrichtung 78 angesteuert, so dass über die Regelungseinrichtung 78 der Massenstrom an Wärmeträgermedium einstellbar ist.

Die Regelungseinrichtung 78 ist beispielsweise signalwirksam mit der Einspritzeinrichtung 68 und insbesondere deren Regelventile 70 verbunden. Die Regelungseinrichtung 78 steuert die Regelventile 70 an. Es kann für die Regelung der Überhitzereinspritzung auch eine von der Regelungseinrichtung 78 getrennte Einrichtung vorgesehen sein.

15

In Figur 2 sind die Verbindungen zwischen der Regelungseinrichtung 78 und Elementen der Durchlaufstrecken 46 nur noch für die Durchlaufstrecke 46a gezeigt. Die gleichen Verbindungen existieren für die anderen Durchlaufstrecken.

20

Erfindungsgemäß wird überhitzter Dampf wie folgt erzeugt:

Flüssiges Wärmeträgermedium (insbesondere Speisewasser) wird auf die einzelnen parallelen Durchlaufstrecken 46 aufgeteilt. In den jeweiligen Durchlaufstrecken 46 wird Wärmeträgermedium in einem Vorwärmbereich 88 (Figur 4) vorgewärmt. In diesem Bereich nimmt das Wärmeträgermedium im Wesentlichen sensible Wärme auf.

An den Vorwärmbereich 88 schließt sich der Verdampferbereich 50 an. In diesem Bereich nimmt das Wärmeträgermedium im Wesentlichen latente Wärme auf. Es erfolgt eine Verdampfung. In dem Überhitzerbereich 54 erfolgt die Überhitzung.

Die Temperatur T_1 wird durch den ersten Temperatursensor 80 vor dem Verdampfungsendpunkt 56 gemessen. Der zweite Temperatursensor 82 misst die entsprechende Temperatur T_2 und der dritte Temperatursensor 84 die Temperatur T_3 in dem Überhitzerbereich 54 nach dem Verdampfungsendpunkt 56.

5

Die Regelungseinrichtung 78 bestimmt den Gradienten $\Delta T/L = (T_3 - T_2)/L$ in dem Überhitzerbereich 54. Der Temperaturwert T_1 wird zu größeren Längen l hin extrapoliert und der Gradient zu kleineren Längen hin. Der Schnittpunkt wird bestimmt. Dieser Schnittpunkt entspricht einem Istwert für die Lage des Verdampfungsendpunkts 56. Der Abstand zu dem Sollwert (Führungsgröße), nämlich der vorgegebenen Lage des Verdampfungsendpunkts 56, wird bestimmt. Dieser Abstand wiederum bestimmt eine Stellgröße zur Beeinflussung des Massenstroms an der entsprechenden Durchlaufstrecke 46. Die Stellgröße ist beispielsweise ein Ventilhub des entsprechenden Regelventils 48. Entsprechend der Abweichung wird in einem kontinuierlichen Regelungsprozess der Massenstrom erniedrigt oder erhöht, um den Istwert dem Sollwert anzugleichen. Der Massenstrom an jeder Durchlaufstrecke 46 wird ausgehend von dem ermittelten Temperaturgradienten $\Delta T/L$ und der gemessenen Temperatur T_1 eingestellt, um den Verdampfungsendpunkt 56 örtlich zu fixieren. Diese örtliche Fixierung ist gewissermaßen eine "Software-Fixierung".

10

15

20

In Figur 4 ist schematisch mit dem Bezugszeichen 90a ein erster Fall mit hoher Bestrahlung und mit dem Bezugszeichen 90b ein zweiter Fall mit geringer Bestrahlung im Temperaturverlauf über der Länge l gezeigt. Der Fall mit geringerer Bestrahlung (90b) weist einen längeren Vorwärmbereich auf. Der Gradient im Überhitzerbereich 54 ist kleiner als für den Fall 90a. Dies erfordert es für den Fall 90b im Vergleich zu dem Fall 90a, den Massenstrom in der entsprechenden Durchlaufstrecke 46 zu erniedrigen.

25

30

Die Regelungseinrichtung 78 steuert auch die Einspritzeinrichtung 68 an. Ziel ist es, an einem Ausgang 92 der Durchlaufstrecke 46 und damit am Ausgang des Überhitzerbereichs 54 eine bestimmte Temperatur (angepasst an die Turbine des Leistungsblocks 62) einzustellen und auch zu fixieren. Dies kann

- 15 -

durch geregelte Einspritzung einer bestimmten Menge an flüssigem Wärmeträgermedium erfolgen.

Ein zweites Ausführungsbeispiel eines erfindungsgemäßen solarthermischen Kraftwerks, welches in Figur 3 schematisch gezeigt und dort mit 94 bezeichnet ist, ist grundsätzlich gleich aufgebaut wie das solarthermische Kraftwerk 44. Für gleiche Elemente werden gleiche Bezugszeichen verwendet. Es ist eine zusätzliche Einspritzeinrichtung 96 vorgesehen, durch welche flüssiges Wärmeträgermedium in den Verdampferbereich 50 einspritzbar ist. An den jeweiligen Durchlaufstrecken 46 ist dabei eine Einspritzstelle 98 in dem Verdampferbereich 50 dem ersten Temperatursensor 80 nachfolgend angeordnet, d. h. die jeweilige Einspritzstelle 98 liegt zwischen dem ersten Temperatursensor 80 und dem Verdampfungsendpunkt 56.

Die Einspritzeinrichtung weist beispielsweise jeder Durchlaufstrecke 46 zugeordnet ein Regelventil 100 auf. Die Regelventile 100 sind fluidwirksam mit der Rückleitung 64 verbunden. Beispielsweise führt von einer Abzweigung 102 eine Leitung 104 zu den Regelventilen 100 der Durchlaufstrecken 46. Die Abzweigung 102 wiederum ist beispielsweise an der Rückleitung 64 angeordnet oder an der Leitung 74.

Die Regelungseinrichtung 78 steuert die Einspritzeinrichtung 96 mit den Regelventilen 100 an.

Die Einspritzeinrichtung 96 bildet eine Massenstromregelungseinrichtung. Durch sie ist der Massenstrom an Wärmeträgermedium in der Durchlaufstrecke 46 beeinflussbar. Die Regelventile 48 bilden dann eine erste Massenstromregelungseinrichtung 86 und die Einspritzeinrichtung 96 bildet eine zweite Massenstromregelungseinrichtung 106.

30

Durch die Einspritzeinrichtung 96, d. h. durch Vorsehen der zweiten Massenstromregelungseinrichtung 106, lässt sich die Regelqualität verbessern und die Regelschnelligkeit erhöhen.

Bei der erfindungsgemäßen Lösung lässt sich der Verdampfungs-
endpunkt 56 durch ein Regelungsverfahren örtlich fixieren, um Oszillationen des Ver-
dampfungsendpunkts 56 bei schwankendem solaren Energieeintrag zu mini-
mieren. Die parallel angeordneten Durchlaufstrecken sind Kollektorstränge.
5 Für jeden Kollektorstrang (für jede Durchlaufstrecke 46) wird der Ver-
dampfungsendpunkt 56 fixiert.

Durch Extrapolation des ermittelten Temperaturgradienten im Verdampfer-
bereich 54 in Richtung Kollektorstrangeintritt wird ein Istwert für den Ver-
dampfungsendpunkt ermittelt, um auf den Sollwert (Führungsgröße) zu
regeln. Geregelt wird dabei der Massenstrom an Wärmeträgermedium in dem
jeweiligen Kollektorstrang, d. h. in der jeweiligen Durchlaufstrecke 60. Der
Massenstrom wird dabei durch Einstellung der in die jeweilige Durchlaufstrecke
15 60 eingekoppelten Menge an flüssigem Wärmeträgermedium realisiert. Dies
erfolgt primär über die erste Massenstromregelungseinrichtung 46 mit den
Regelventilen 48. Zusätzlich kann noch eine zweite Massenstromregelungs-
einrichtung 106 mit den Regelventilen 100 vorgesehen sein.

Bei der erfindungsgemäßen Lösung wird zusätzlich noch die gemessene
Temperatur T_1 zur Bestimmung des Istwerts für den Verdampfungsendpunkt
ermittelt. Es ergibt sich dadurch eine stabile Regelung und im Realbetrieb
kann die Schwankungsbreite des Verdampfungsendpunkts 56 auf einen sehr
kleinen Bereich eingeschränkt werden.

25 Durch eine zusätzlich vorgesehene Einspritzung an entsprechenden Einspritz-
stellen 98 lässt sich die Regelqualität verbessern und die Regelschnelligkeit
stark erhöhen.

30 Durch die Fixierung des Verdampfungsendpunkts 56 ist eine Regelung der
Ausgangstemperatur der jeweiligen Kollektorstränge notwendig. Es wird dabei
insbesondere auf eine konstante Austrittstemperatur geregelt.

- 17 -

Die erfindungsgemäße Lösung lässt sich kostengünstiger realisieren als eine Lösung nach dem Rezirkulationskonzept. Darüber hinaus treten geringere Wärmeverluste des Gesamtsystems auf. Es ist grundsätzlich möglich, die örtliche Lage des Verdampfungsendpunkts 56 "softwaremäßig" einzustellen und
5 beispielsweise auch näher an den Anfang eines Kollektorstrangs zu schieben. Es ergeben sich geringe Materialbelastungen und damit auch ein länger möglicher Anlagenbetrieb bei verbesserter Regelbarkeit.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Erzeugung von überhitztem Dampf an einem solarthermischen Kraftwerk, bei dem in einer Durchlaufstrecke für Wärmeträgermedium durch Solarenergie in einem Verdampferbereich Dampf erzeugt wird und in einem Überhitzerbereich durch Solarenergie der Dampf überhitzt wird, wobei ein Verdampfungsendpunkt des Verdampferbereichs in einem Regelungsverfahren örtlich fixiert wird, bei dem ein räumlicher Temperaturgradient in dem Überhitzerbereich und eine Temperatur im Verdampferbereich bestimmt werden und der Massenstrom an Wärmeträgermedium in der Durchlaufstrecke in Abhängigkeit des Temperaturgradienten und der gemessenen Temperatur im Verdampferbereich eingestellt wird.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass zur Fixierung des Verdampfungsendpunkts der Massenstrom des Wärmeträgermediums in der Durchlaufstrecke geregelt wird.
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass eine Regelgröße im Regelungsverfahren die räumliche Lage des Verdampfungsendpunkts ist, wobei eine Führungsgröße ein definierter Ort ist.
4. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass eine Stellgröße im Regelungsverfahren den Massenstrom des Wärmeträgermediums in der Durchlaufstrecke bestimmt.

- 19 -

5. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass im Regelungsverfahren der Temperaturgradient und die gemessene Temperatur im Verdampfungsbereich auf einen räumlichen Schnittpunkt extrapoliert werden und eine oder mehrere Stellgrößen durch eine Abweichung des Schnittpunkts von einer vorgegebenen räumlichen Lage des Verdampfungsendpunkts bestimmt werden.
6. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Temperatur im Verdampferbereich außerhalb eines Vorwärmbereichs gemessen wird.
7. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass der Temperaturgradient aus den gemessenen Temperaturen an mindestens zwei beabstandeten Orten im Überhitzerbereich ermittelt wird.
8. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass flüssiges Wärmeträgermedium in den Verdampferbereich geregelt eingespritzt wird.
9. Verfahren nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, dass die Einspritzung zwischen der Temperaturmessstelle und dem Verdampfungsendpunkt erfolgt.
10. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass eine Austrittstemperatur am Überhitzerbereich auf einen konstanten Wert geregelt wird.
11. Verfahren nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, dass in den Überhitzerbereich geregelt flüssiges Wärmeträgermedium eingespritzt wird.

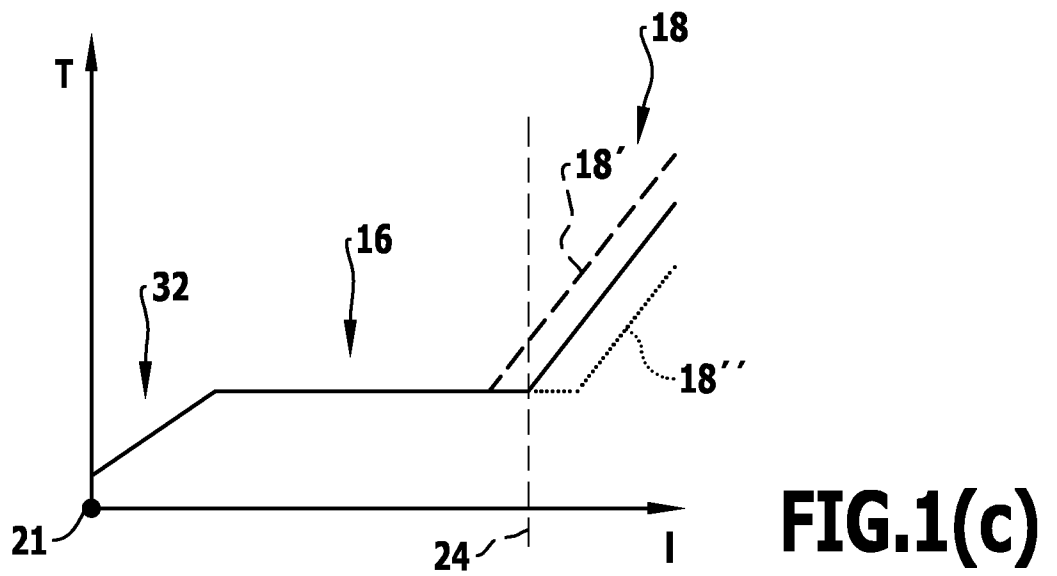
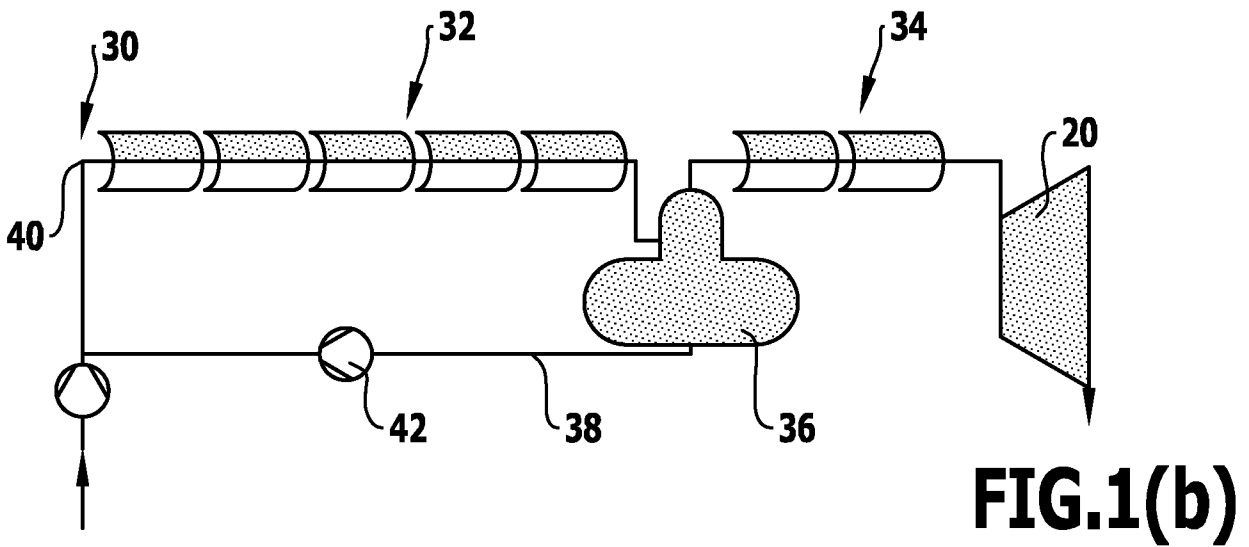
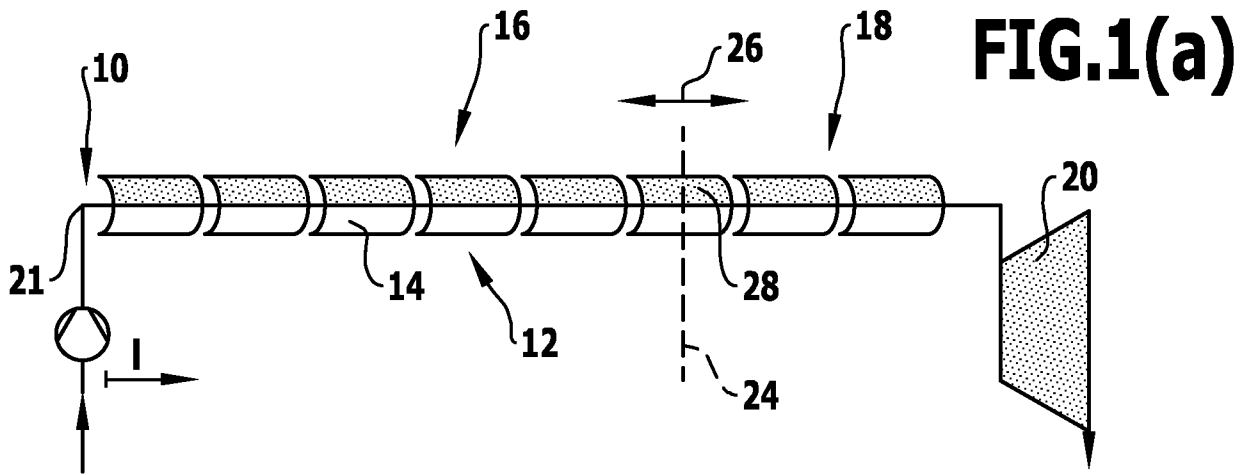
- 20 -

12. Solarthermisches Kraftwerk mit einer Dampferzeugungsstufe (45), umfassend mindestens einen Kollektorstrang mit einer Durchlaufstrecke (46) für Wärmeträgermedium mit einem Verdampferbereich (50) und einem Überhitzerbereich (54), einen ersten Temperatursensor (80), welcher an dem Verdampferbereich (50) angeordnet ist, einen zweiten Temperatursensor (82) und einen dritten Temperatursensor (84), welche beabstandet zueinander an dem Überhitzerbereich (54) angeordnet sind, eine Massenstromregelungseinrichtung (86; 106), durch welche der Massenstrom an Wärmeträgermedium in der Durchlaufstrecke (46) einstellbar ist, und eine Regelungseinrichtung (78), welche signalwirksam mit dem ersten Temperatursensor (80), dem zweiten Temperatursensor (82) und dem dritten Temperatursensor (84) verbunden ist, aus einer zweiten Temperatur (T_2) und einer dritten Temperatur (T_3) einen räumlichen Temperaturgradienten ($\Delta T/L$) bestimmt und die Massenstromregelungseinrichtung (86; 106) zur Fixierung eines Verdampfungsendpunkts (56) ansteuert.
13. Solarthermisches Kraftwerk nach Anspruch 12, dadurch gekennzeichnet, dass an einem Anfang der Durchlaufstrecke (46) ein Regelventil (48) angeordnet ist, welches durch die Regelungseinrichtung (78) angesteuert ist.
14. Solarthermisches Kraftwerk nach Anspruch 12 oder 13, gekennzeichnet durch eine Einspritzeinrichtung (96) zur Einspritzung von flüssigem Wärmeträgermedium mit mindestens einer Einspritzstelle (98) in den Verdampferbereich (50).
15. Solarthermisches Kraftwerk nach Anspruch 14, dadurch gekennzeichnet, dass die Einspritzeinrichtung (96) durch die Regelungseinrichtung (78) angesteuert ist.

- 21 -

16. Solarthermisches Kraftwerk nach Anspruch 14 oder 15, dadurch gekennzeichnet, dass die Einspritzeinrichtung (96) ein Regelventil (100) umfasst.
17. Solarthermisches Kraftwerk nach einem der Ansprüche 14 bis 16, dadurch gekennzeichnet, dass die mindestens eine Einspritzstelle (98) der Einspritzeinrichtung (96) zwischen einem Temperaturmesspunkt des ersten Temperatursensors (80) und dem Verdampfungsendpunkt (56) liegt.
18. Solarthermisches Kraftwerk nach einem der Ansprüche 12 bis 17, gekennzeichnet durch eine Einspritzeinrichtung (68) zur Einspritzung von flüssigem Wärmeträgermedium mit mindestens einer Einspritzstelle (72) in den Überhitzerbereich (54).
19. Solarthermisches Kraftwerk nach einem der Ansprüche 12 bis 18, gekennzeichnet durch eine solare Kollektoreinrichtung (52), an welcher die Durchlaufstrecke (46) angeordnet ist.
20. Solarthermisches Kraftwerk nach einem der Ansprüche 12 bis 19, dadurch gekennzeichnet, dass die Dampferzeugungsstufe (45) fluidwirksam mit mindestens einer Turbine verbunden ist.
21. Solarthermisches Kraftwerk nach einem der Ansprüche 12 bis 20, dadurch gekennzeichnet, dass mittels der Regelungseinrichtung (78) das Dampferzeugungsverfahren gemäß einem der Ansprüche 1 bis 11 durchgeführt ist.

$\frac{1}{4}$



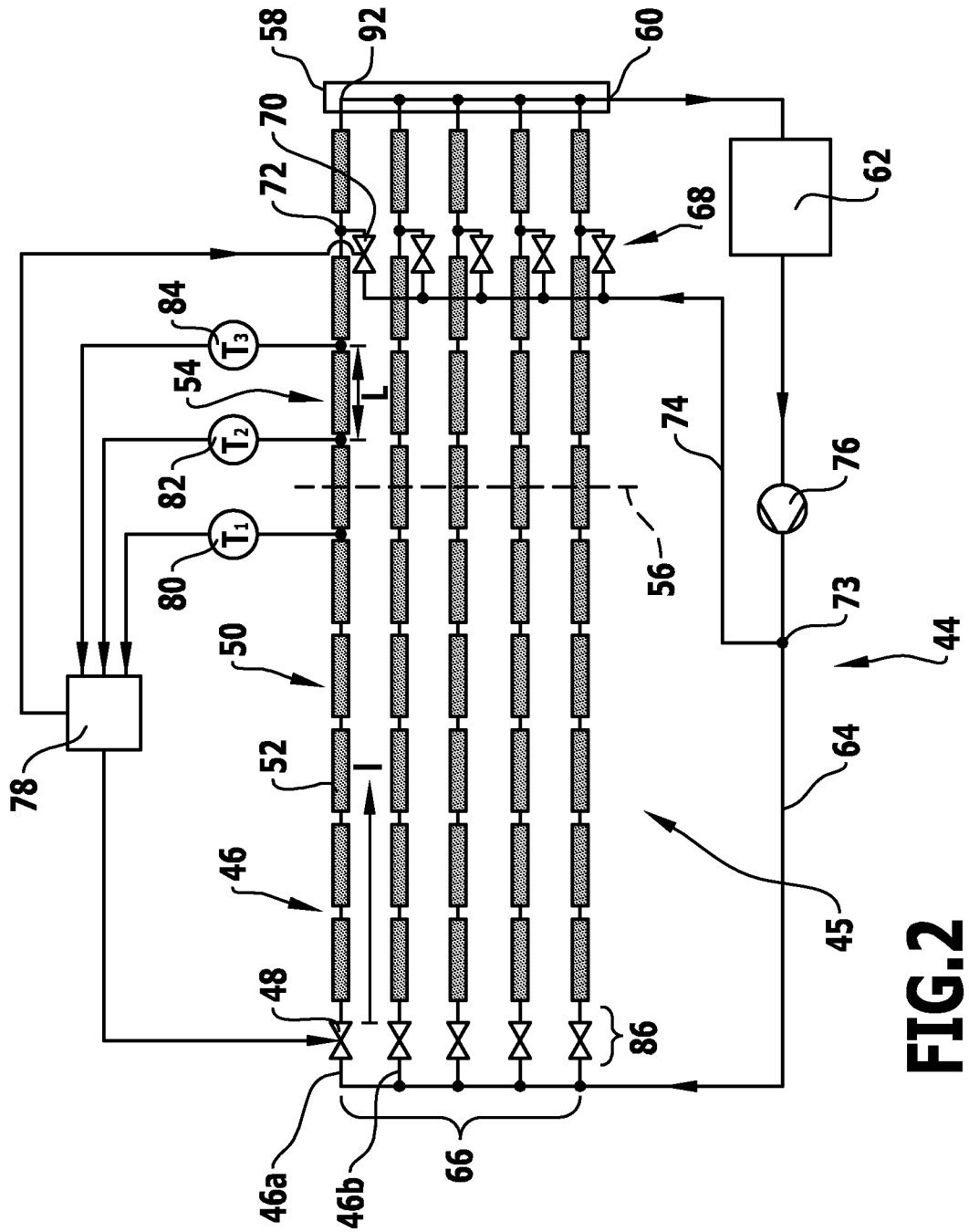


FIG.2

3/4

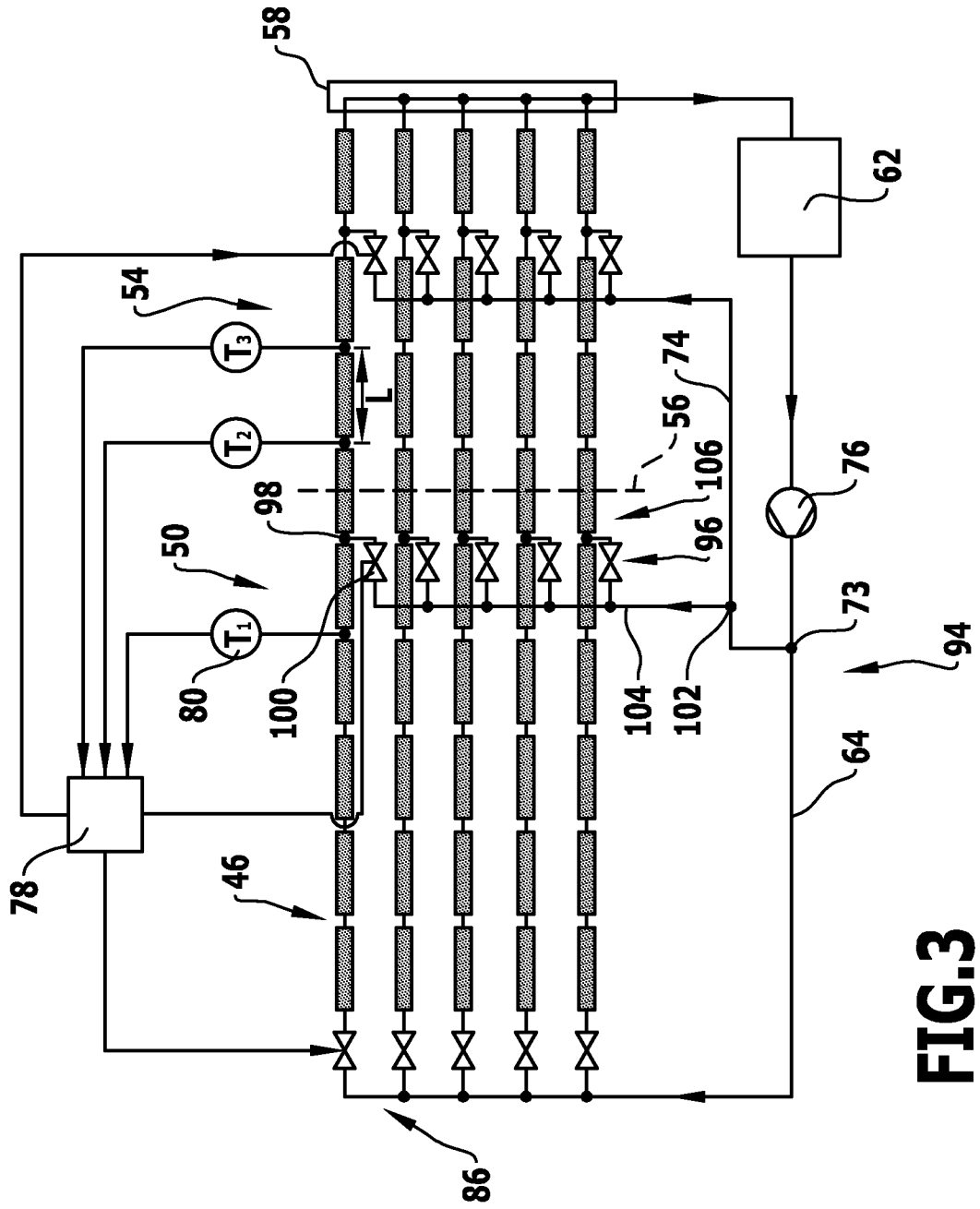


FIG.3

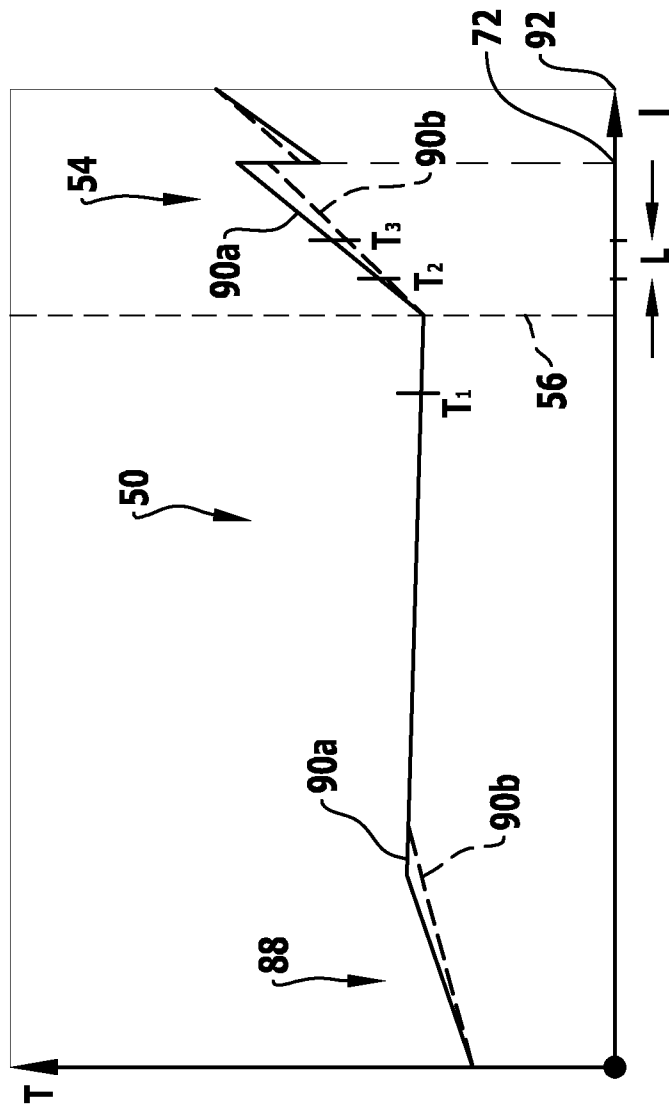


FIG. 4