



(12) **EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG**

(43) Veröffentlichungstag:
11.04.2018 Patentblatt 2018/15

(51) Int Cl.:
F22B 35/00 (2006.01) F01K 13/02 (2006.01)

(21) Anmeldenummer: **16193135.7**

(22) Anmeldetag: **10.10.2016**

(84) Benannte Vertragsstaaten:
AL AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB GR HR HU IE IS IT LI LT LU LV MC MK MT NL NO PL PT RO RS SE SI SK SM TR
Benannte Erstreckungsstaaten:
BA ME
Benannte Validierungsstaaten:
MA MD

(71) Anmelder: **Uniper Technologies GmbH**
45896 Gelsenkirchen (DE)

(72) Erfinder:
• **PRABUCKI, Marc-Hendrik**
50708 Menden (DE)
• **KRÜGER, Uwe**
26382 Wilhelmshaven (DE)
• **ZINDLER, Henning**
38124 Braunschweig (DE)

(74) Vertreter: **Glawe, Delfs, Moll**
Partnerschaft mbB
von Patent- und Rechtsanwälten
Postfach 13 03 91
20103 Hamburg (DE)

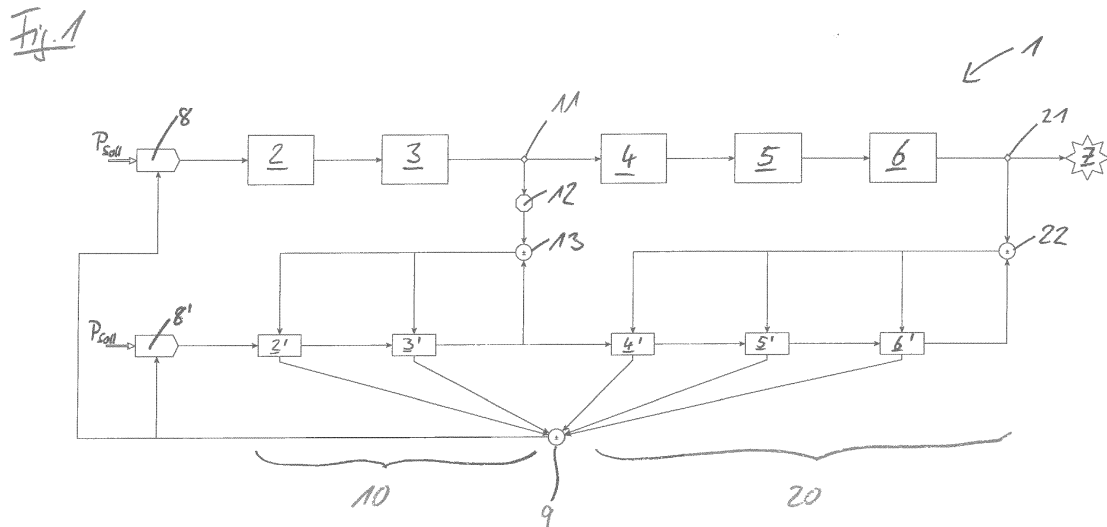
(54) **VERFAHREN ZUR REGELUNG EINES KOHLEKRAFTWERKS UND KOHLEKRAFTWERK**

(57) Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Regelung von Kohlekraftwerken (1) sowie ein Kohlekraftwerk (1).

Bei dem Verfahren zur Regelung eines Kohlekraftwerks (1) umfassend einen Kraftwerksblock mit einer Brennstoffzufuhr umfassend eine Kohlemühle (3) zum Mahlen von Kohle für einen kohlenstaubbefeuerten Dampferzeuger (4), dessen erzeugter Wasserdampf eine Turbine (5) zur Erzeugung elektrischer Energie durch einen damit verbundenen Generator (6) antreibt, und einer modellgestützten Blockregelung zur Anpassung der vom Kraftwerksblock erzeugten Leistung an einen vor-

gegebenen Sollwert (P_{Soll}) unter Zuhilfenahme eines Dampferzeuger-Turbinen-Modells (20), umfasst die Blockregelung eine Zustandsregelung (10) mit Beobachter für die Brennstoffzufuhr, wobei die Zustandsregelung (10) der Brennstoffzufuhr durch eine Messung des Kohlestaubmassenstrom zwischen Brennstoffzufuhr und Dampferzeuger (4) korrigiert und deren Ergebnis im Dampferzeuger-Turbinen-Modell (20) berücksichtigt wird.

Das erfindungsgemäße Kraftwerk (1) ist zur Durchführung dieses Verfahrens ausgebildet.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Regelung von Kohlekraftwerken sowie ein Kohlekraftwerk.

[0002] Der Ausbau sogenannter erneuerbarer Energien wird weltweit vorangetrieben, wobei der Anteil dieser Energien bei der Stromerzeugung ("Ökostrom") bereits eine nicht unerhebliche Größe einnimmt. Während die erneuerbaren Energien im Hinblick auf die Umweltverträglichkeit bspw. gegenüber der Energieerzeugung aus fossilen Brennstoffen Vorteile bietet, haftet den meisten erneuerbaren Energien der Nachteil an, dass die jeweiligen Erzeugungsanlagen häufig nicht frei steuerbar in der von ihnen erzeugten Leistung sind. So können Photovoltaikanlagen bei Nacht oder bei starker Bewölkung keine oder nur geringe elektrische Leistung bereitstellen, Windenergieanlagen können bei Flaute keine elektrische Leistung liefern. Gleichzeitig besteht der Wunsch, dass bei strahlendem Sonnenschein bzw. kräftigem Wind die von Photovoltaikanlagen bzw. Windenergieanlagen erzeugte elektrische Leistung möglichst vollständig genutzt wird, wozu sie in der Regel vollständig in das elektrische Versorgungsnetz einzuspeisen ist.

[0003] Für das elektrische Versorgungsnetz gilt wiederum die Anforderung, dass dieses immer - also auch in der Nacht und bei Flaute - verfügbar sein soll und unmittelbar auf beliebige Schwankungen in der Leistungseinspeisung - bspw. bei böigem Wind - oder plötzlichen Veränderungen in der Leistungsabnahme reagieren kann.

[0004] Um den letztgenannten Anforderungen gerecht zu werden, sind weiterhin konventionelle Kraftwerke, bspw. Kohlekraftwerke, erforderlich, die zum einen Energieengpässe bei den erneuerbaren Energien ausgleichen und zum anderen auf Schwankungen in der Leistungsabnahme schnell reagieren können. Aufgrund des Ausbaus der erneuerbaren Energien steigt der Bedarf an entsprechender Primär- und Sekundärregelreserve bzw. die diesbezüglichen Anforderungen an konventionelle Kraftwerke.

[0005] Im Stand der Technik - bspw. aus der VDI/VDE-Richtlinie 3508 "Blockregelung von Wärmekraftwerken" (September 2003) - sind Regelungen für konventionelle Kraftwerke bekannt, mit denen eine Primär- und Sekundärregelreserve grundsätzlich bereitgestellt werden kann. Unter anderem sind modellgestützte Blockregelungen bekannt, bei denen die Steuerung der Leistungsausgabe eines Kraftwerks, die maßgeblichen über einen PI-Regler (Proportionale-Integral-Regler) für die Brennstoffzufuhr erfolgt, durch die parallele Beobachtung eines Modells aus Dampferzeuger und Turbine optimiert werden kann.

[0006] Allerdings können bei einer Blockregelung gemäß diesem Stand der Technik Varianzen in der Brennstoffqualität oder Verschleißerscheinungen nicht unmittelbar berücksichtigt werden, weshalb Kraftwerke mit einer entsprechenden Blockregelung regelmäßig konservativ - also auf die Annahme einer minderen Brennstoff-

qualität und eines mittleren Verschleiß hin - betrieben werden. Ein entsprechender konservativer Betrieb geht jedoch häufig zu Lasten der Primär- und Sekundärregelreserve, zumindest jedoch zu Lasten der Reaktionsgeschwindigkeit des Kraftwerks auf Anforderung an entsprechende Regelreserve.

[0007] Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren zum Betrieb eines Kohlekraftwerks sowie ein entsprechendes Kohlekraftwerk zu schaffen, mit dem die Primär- und Sekundärregelreserve gegenüber dem Stand der Technik erhöht, zumindest aber das Reaktionsverhalten des Kraftwerks auf Regulationsanforderungen verbessert werden kann.

[0008] Gelöst wird diese Aufgabe durch ein Verfahren gemäß dem Hauptanspruch sowie ein Kraftwerk gemäß dem nebengeordneten Anspruch 13. Vorteilhafte Weiterbildungen sind Gegenstand der abhängigen Ansprüche.

[0009] Demnach betrifft die Erfindung ein Verfahren zur Regelung eines Kohlekraftwerks umfassend einen Kraftwerksblock mit einer Brennstoffzufuhr umfassend eine Kohlemühle zum Mahlen von Kohle für einen kohlenstaubbefeuerten Dampferzeuger, dessen erzeugter Wasserdampf eine Turbine zur Erzeugung elektrischer Energie durch einen damit verbundenen Generator antreibt, und einer modellgestützten Blockregelung zur Anpassung der vom Kraftwerksblock erzeugten Leistung an einen vorgegebenen Sollwert unter Zuhilfenahme eines Dampferzeuger-Turbinen-Modells, wobei die Blockregelung eine Zustandsreglung mit Beobachter für die Brennstoffzufuhr umfasst, die Zustandsregelung der Brennstoffzufuhr durch eine Erfassung des Kohlestaubmassenstrom zwischen Brennstoffzufuhr und Dampferzeuger korrigiert und deren Ergebnis im Dampferzeuger-Turbinen-Modell berücksichtigt wird.

[0010] Die Erfindung betrifft weiterhin ein Kohlekraftwerk umfassend einen Kraftwerksblock mit einer Brennstoffzufuhr umfassend eine Kohlemühle zum Mahlen von Kohle für einen kohlenstaubbefeuerten Dampferzeuger, dessen erzeugter Wasserdampf eine Turbine zur Erzeugung elektrischer Energie durch einen damit verbundenen Generator antreibt, und einer modellgestützten Blockregelung zur Anpassung der vom Kraftwerksblock erzeugten Leistung an einen vorgegebenen Sollwert, wobei eine Vorrichtung zur Erfassung des Kohlestaubmassenstrom zwischen Brennstoffzufuhr und Dampferzeuger vorgesehen ist und die Blockregelung zur Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens ausgebildet ist.

[0011] Die Erfindung hat erkannt, dass die Primär- und Sekundärregelreserve eines Kohlekraftwerks, zumindest aber dessen Reaktionsverhalten bzw. die Größe der möglichen Leistungssprünge auf Regulationsanforderung erhöht werden können, wenn die Regelung des Kraftwerks zeitvariante Gegebenheiten des Kraftwerks bzw. der Brennstoffzufuhr berücksichtigt. Zu den zeitvarianten Gegebenheiten gehören sowohl Veränderungen der Brennstoffqualität selbst (bspw. bei Wechsel der Kohle-

sorte) als auch Veränderungen aufgrund von Verschleiß, maßgeblich in der Kohlemühle. Es handelt sich also um Gegebenheiten, die sich während des laufenden Betriebs verändern können.

[0012] Dabei hat die Erfindung weiterhin erkannt, dass eine einfache Ergänzung des aus dem Stand der Technik, bspw. der VDI/VDE-Richtlinie 3508 (September 2003) bekannten Dampferzeuger/Turbinenmodell um ein Mühlenmodell nicht ausreicht, um die besagten Verbesserung zu erreichen. Bei einem entsprechenden erweiterten Beobachtermodell wäre nämlich die Regelstrecke zu lang, um eine für diesen Zweck ausreichend hohe Qualität des Modells sicherstellen zu können.

[0013] Erfindungsgemäß ist daher eine Zustandsregelung mit Beobachter für die Brennstoffzufuhr vorgesehen, die unmittelbar durch eine Erfassung des Kohlestaubmassenstroms zwischen Brennstoffzufuhr und Dampferzeuger korrigiert wird. In anderen Worten wird die Brennstoffzufuhr durch ein Modell abgebildet, welches unmittelbar überprüft und bei Bedarf korrigiert wird, bevor das Ergebnis dieses Modells innerhalb der Blockregelung in die Regelung der nachfolgenden Komponenten, also dem Dampferzeuger und der Turbinen-Generator-Kombination, einfließt.

[0014] Indem die Zustandsregelung für die Brennstoffzufuhr unmittelbar anhand des Kohlestaubmassenstroms überprüft und korrigiert wird, können zeitvariante Gegebenheiten wie eine Veränderung der Qualität der Kohle oder aber Verschleiß in der Kohlemühle berücksichtigt werden, wobei die nachfolgende Regelung des Dampferzeugers und der Turbine bereits auf Basis von überprüften oder korrigierten Werte für den Brennstoffstrom erfolgen kann. In der Folge kann die Regelung des Kohlekraftwerks im Hinblick auf die Bereitstellung von Primär- und Sekundärregelreserve insgesamt verbessert werden.

[0015] Für das erfindungsgemäße Verfahren ist ein die Brennstoffzufuhr auch im Hinblick auf zeitvariante Gegebenheiten gut abbildendes Modell - insbesondere der Kohlemühle - wichtig. Nachfolgend wird ein besonders bevorzugtes Modell für die Brennstoffzufuhr beschrieben, wobei es grundsätzlich auch noch andere geeignete Modelle, insbesondere für andere Mühlenbauarten als Vertikalmühlen, gibt.

[0016] Das bevorzugte Modell für die Brennstoffzufuhr ist nämlich für Kraftwerke vorgesehen, deren Kohlemühle eine Vertikalmühle mit internem Siebter ist. Bei entsprechenden Vertikalmühlen handelt es sich bspw. um Walz- oder Kugelmühlentypen, bei denen das Mahlwerkzeug auf einem horizontal angeordneten Mahlteller kreisförmig entlanglaufen, wobei entweder der Mahlteller oder das Mahlwerkzeug um eine vertikale Achse rotiert. Von einem über einen den Mahlteller umgebenden Düsenring strömt ein Primärluftstrom nach oben, der seitlich vom Mahlteller austretendes Mahlgut nach oben zu einem Siebter transportiert. Wenn es nicht bereits vorher auf den Mahlteller zurückgeworfen wurde, wird spätestens durch den Siebter noch zu grobes Mahlgut wieder zentral

auf den Mahlteller zurückgegeben, wo auch frisches Mahlgut aufgegeben wird, während ausreichend fein gemahlenes Mahlgut ausgegeben wird.

[0017] Für das Modell einer solchen Vertikalmühle ist der Mahlteller der Mühle von innen nach außen in wenigstens zwei, vorzugsweise zwei bis sechs, weiter vorzugsweise zwei bis vier, weiter vorzugsweise drei Ringe unterteilt, wobei die Unterteilung des Mahltellers vorzugsweise in Ringe mit äquidistantem Abstand erfolgt. Letzteres erleichtert die Ermittlung jener Modellparameter, die aus geometrischen Zusammenhängen bestimmt werden können.

[0018] Für das Modell wird weiterhin die zu mahlende Kohle in wenigstens zwei Feinheitsgruppen unterteilt. Es hat sich dabei gezeigt, dass zwei Feinheitsgruppen häufig bereits ausreichen, um ein ausreichend exaktes Modell der Kohlemühle zu schaffen, wobei gleichzeitig die Komplexität des Modells gering gehalten werden kann. Die Kohle wird dabei in eine Grobfraction und eine Feinfraction unterteilt.

[0019] Bei dem bevorzugten Modell wird die Bewegung der Kohle bzw. der Kohlepartikel für jede Feinheitsgruppe getrennt über jeden Ring des Mahltellers einzeln abgebildet. In anderen Worten entsteht also für jede Feinheitsgruppe eine eigene Kette von Abbildungen der Ringe des Mahltellers. Die Kohle bzw. die Kohlepartikel, die den äußersten Ring des Mahltellers durchlaufen haben, werden wieder wenigstens einem Ring des Mahltellers in derselben Feinheitsgruppe zugeführt. Durch diese Rückführung wird die Umwälzung innerhalb der Mühle durch den Primärluftstrom abgebildet. Bei dem wenigstens einen Ring kann es sich beispielsweise und ggf. exklusiv um den innersten Ring handeln.

[0020] Um die Zerkleinerung der Kohle in der Mühle abzubilden, ist zwischen zwei Ringen des Mahltellers ein anteiliger Übergang von einer gröberen zu einer feineren Feinheitsgruppe vorgesehen, wobei der nicht übergegangene Anteil im Modell dem äußeren der beiden Ringe der gröberen Feinheitsgruppe zugeführt wird.

[0021] Zur Abbildung des Siebters ist wenigstens an der feinsten Feinheitsgruppe hinter dem äußersten Ring des Mahltellers weiterhin eine anteilige Abscheidung von Kohle vorgesehen, wobei der nicht-abgeschiedene Teil den Kohlestaubmassenstrom zwischen Brennstoffzufuhr und Dampferzeuger wiedergibt. In diesem Fall wird also nur der abgeschiedene Teil der betroffenen Feinheitsgruppe zu wenigstens einem Ring, vorzugsweise dem innersten Ring des Mahltellers eben dieser Feinheitsgruppe zurückgeführt. Der Anteil der nicht-abgeschiedenen Kohle lässt sich erneut in Abhängigkeit des Primärluftstroms der Kohlemühle, der regelmäßig als Messwert oder Steuerungsgröße der Kohlemühle vorliegt, ermitteln. Auch können andere momentane Einstellungen für den Betrieb des internen Siebters bei der Ermittlung des Anteils der nicht-abgeschiedenen Kohle berücksichtigt werden.

[0022] Die einzelnen Ringe des Mahltellers in jeder Feinheitsgruppe sind vorzugsweise als gesonderte PT1-

Glieder abgebildet. Durch die Verwendung von PT1-Gliedern ist es möglich, die Speicherfähigkeit der Kohlemühle - also die Möglichkeit, die Menge der in der Kohlemühle zirkulierenden Kohlen als Speicher zu nutzen - abzubilden. Insbesondere in Zusammenhang mit der Ermittlung der Anteile beim anteiligen Übergang zwischen Feinheitsgruppen und/oder beim anteiligen Abscheiden in Abhängigkeit des Primärluftstroms kann auch die Variabilität dieser Speicherfähigkeit einer Kohlemühle gut im Modell abgebildet werden.

[0023] Für die Überprüfung und evtl. Korrektur der Zustandsregelung für die Brennstoffzufuhr wird der Kohlestaubmassenstrom zwischen Brennstoffzufuhr und Dampferzeuger herangezogen. Es sind grundsätzlich geeignete Messmethoden und Sensoren für eben diesen Kohlestaubmassenstrom bekannt. Allerdings hat sich gezeigt, dass das Messergebnis entsprechender Kohlestaubmassenstrommessungen häufig stark stochastisch schwankt. Es ist daher bevorzugt, wenn die Erfassung des Kohlestaubmassenstroms einen Kalman-Filter zur Entfernung von bei der Messung auftretenden Störungen umfasst. Die Verwendung eines Kalman-Filters bietet gegenüber anderen Glättungsverfahren (bspw. gleitender Mittelwert oder Verwendung eines PT1-Gliedes) den Vorteil, dass das Zeitverhalten des Messsignals nicht oder nur unwesentlich verzögert wird. Das durch den Kalman-Filter verarbeitete Messsignal kann also unmittelbar zur Überprüfung und eventuellen Korrektur der Zustandsregelung für die Brennstoffzufuhr genutzt werden. Die Verwendung eines Kalman-Filters erfordert dabei eine Modellierung der Brennstoffzufuhr bzw. des Mahlprozesses, die bspw. durch das oben beschriebene Modell möglich ist.

[0024] So kann bei einer Abweichung der Zustandsregelung für die Brennstoffzufuhr von dem gemessenen Kohlenstaubmassenstrom das Modell der Brennstoffzufuhr und insbesondere der Kohlemühle korrigiert werden, um so das Modell ständig an sich verändernde Gegebenheiten anzupassen.

[0025] In den Fällen, in denen eine als Vertikalmühle ausgestaltete Kohlemühle durch das oben beschriebene bevorzugte Modell abgebildet wird, ist es bevorzugt, wenn für jede Abbildung der Ringe des Mahltellers in jeder Feinheitsgruppe gesonderte Korrekturfaktoren bereitgestellt werden, die in dem Modell geeignet berücksichtigt werden. So kann das Modell dynamisch an die tatsächlichen Gegebenheiten angepasst werden, wobei eine ausreichend exakte Abbildung der Kohlemühle sichergestellt bleibt.

[0026] Die einzelnen Korrekturfaktoren können vorzugsweise mit Hilfe der Riccati-Gleichung oder dem Verfahren nach Ackermann berechnet werden. Die Riccati-Gleichung ist - sofern dem Fachmann nicht ohnehin geläufig - bspw. in "Regelungstechnik", Jan Lunze, 5. Auflage, 2008, Kapitel 7.2.2 (Seite 288-290) beschrieben. Das Verfahren nach Ackermann ist in dem Beitrag "Der Entwurf linearer Regelungssysteme im Zustandsraum", J. Ackermann in "Regelungstechnik", 20. Jahr-

gang (1972), Heft 7, Seiten 297-300 offenbart.

[0027] Die Brennstoffzufuhr kann neben der Kohlemühle auch noch einen Kohlezuteiler umfassen, der dann auch entsprechend im Modell der Brennstoffzufuhr abgebildet werden muss. Die Modellierung eines Kohlezuteilers ist jedoch vergleichsweise trivial, weshalb nicht näher darauf eingegangen werden muss.

[0028] Die eigentliche Leistungsregelung durch die Blockregelung bei dem erfindungsgemäßen Verfahren kann unter Zuhilfenahme eines Dampferzeuger-Turbinen-Modells als Zustandsregelung mit Beobachter ausgestaltet sein, wobei die Leistungsregelung durch das tatsächliche Leistungssignal überprüft bzw. korrigiert wird.

[0029] Zu Erläuterung des erfindungsgemäßen Kohlekraftwerks wird auf die vorstehenden Ausführungen verwiesen.

[0030] Die Erfindung wird nun anhand einer vorteilhaften Ausführungsform unter Bezugnahme auf die beigefügten Zeichnungen beispielhaft beschrieben. Es zeigen:

Figur 1: eine schematische Darstellung eines erfindungsgemäßen Kohlekraftwerks mit einer Regelung gemäß dem erfindungsgemäßen Verfahren;

Figur 2: schematische Darstellung der Kohlemühle des Kohlekraftwerks aus Figur 1; und

Figur 3: schematische Darstellung des Modells der Kohlemühle aus Figur 2.

[0031] In Figur 1 ist die Blockregelung 10 eines erfindungsgemäßen Kohlekraftwerks 1, dessen Blockregelung zur Durchführung des nachfolgend noch näher erläuterten erfindungsgemäßen Verfahrens ausgebildet ist, schematisch dargestellt.

[0032] Das Kohlekraftwerk 1 umfasst eine Brennstoffzufuhr mit einem Kohlezuteiler 2 und einer als Vertikalmühle ausgebildete Kohlemühle 3, einen Dampferzeuger 4, eine Turbine 5 und einen Generator 6, die sämtlich in Reihe geschaltet sind. Der Kohlezuteiler 2 liefert Grobkohle an die Kohlemühle 3, wo sie zu Kohlenstaub verarbeitet wird. Der Kohlenstaub wird in den Dampferzeuger 4 zur Erzeugung von Dampf verwendet, mit dem wiederum die Turbine 5 angetrieben wird. Die Turbine 5 ist derart mit dem Generator 6 verbunden, dass die mechanische Energie der Turbine 5 in elektrische Energie gewandelt wird, welche wiederum in das Netz 7 eingespeist werden kann.

[0033] Auch wenn selbstverständlich die Betriebsparameter der einzelnen Komponenten 2-6 des Kraftwerks 1 während des Betriebs angepasst werden können (bspw. Speisewassermassenstrom, Verbrennungsluft, etc.), was Auswirkungen auf die erzeugte und ans Netz 7 abgegebene Leistung haben kann, erfolgt die Veränderung der Leistungsabgabe des Kohlekraftwerks 1 maßgeblich durch Anpassung der Brennstoffzufuhr und

sonit primär durch Ansteuerung des Kohlezuteilers 2. Aus Gründen der Übersichtlichkeit ist in Figur 1 daher lediglich die Regelung des Kohlezuteilers 2 dargestellt, während auf eine detaillierte Darstellung der Steuer- und Regelkreise der nachfolgenden Komponenten 3-6 verzichtet wurde.

[0034] Es ist allgemein bekannt, dass der Kohlezuteiler 2 über einen PI-Regler 8 in Abhängigkeit eines Leistungssollwertes P_{Soll} geregelt wird. Weiterhin ist - bspw. aus der VDI/VDE-Richtlinie 3508 (September 2003) - bekannt, dass diese einfache Vorsteuerung auf Basis eines Proportional-Integral-Reglers 8 durch ein Dampferzeuger-Turbinen-Modell 20 verfeinert werden kann.

[0035] In diesem Dampferzeuger-Turbinenmodell 20 sind der Dampferzeuger 4, die Turbine 5 und der Generator 6 des Kohlekraftwerks 1 durch geeignete Modelle 4', 5', 6' abgebildet, um die Prozesse in diesen Komponenten bei einer Veränderung der Sollleistung P_{Soll} abzubilden und daraus Leistungskorrekturen für den PI-Regler abzuleiten, die helfen, das letztendliche Regelungsziel - also die Leistung P_{Soll} - möglichst schnell, möglichst ohne Überspringen und/oder möglichst komponentenschonend zu erreichen. Dazu werden aus den einzelnen Modellen 4', 5', 6' Korrekturwerte abgeleitet, die in einem Modul 9 zu einem Leistungskorrekturwert verknüpft und von diesem dem PI-Regler 8 zur Verfügung gestellt werden.

[0036] Die Modelle 4', 5', 6' werden laufend über eine Rückführung der Abweichung der durch über die Modelle 4', 5', 6' errechneten Leistung mit der tatsächlich erzeugten und ins Netz 7 eingespeisten Leistung überprüft. Dazu wird die tatsächlich ins Netz 7 eingespeiste Leistung über einen geeigneten Sensor 21 erfasst dessen Messergebnis im Modul 22 der über die Modelle 4', 5', 6' errechneten Leistung abgeglichen wird. Die Differenz der beiden Leistungen wird den Modellen 4', 5', 6' rückgeführt, die daraufhin angepasst werden können.

[0037] Bei dem erfindungsgemäßen Kraftwerk 1 wird das Dampferzeuger-Turbinenmodell 20 anders als im Stand der Technik mit der Sollleistung P_{Soll} als maßgeblichem Eingangswert betrieben, sondern vielmehr mit einem Eingangswert, der die Brennstoffzufuhr in Form eines Kohlenstaubmassenstroms abbildet. Dieser Wert für den Kohlenstaubmassenstrom stammt aus einer Zustandsregelung 10 mit Beobachter für die Brennstoffzufuhr.

[0038] Die Zustandsregelung 10 mit Beobachter für die Brennstoffzufuhr umfasst ein Modell 2' des Kohlezuteilers 2 und ein Modell 3' der als Vertikalmühle ausgebildeten Kohlemühle 3, die in Reihe geschaltet sind. Das Modell 2' für den Kohlezuteiler 2 wird dabei - analog zu dem realen Kohlezuteiler 2 - mit einem von einem PI-Regler 8' in Abhängigkeit von der Sollleistung P_{Soll} ermittelten Eingangswert versorgt. Das Ergebnis des Kohlemühlenmodells 3' ist ein Kohlenstaubmassenstrom, der dem Dampferzeuger-Turbinenmodell 20 als Eingangsgröße zur Verfügung gestellt wird. Ähnlich wie zu den Modelle 4', 5', 6' des Dampferzeuger-Turbinenmodell 20 werden

auch aus den Modellen 2' und 3' Korrekturwerte abgeleitet, die in einem Modul 9 bei der Ermittlung des Leistungskorrekturwerts berücksichtigt werden.

[0039] Der über die Modelle 2' und 3' ermittelte Kohlenstaubmassenstrom wird zusätzlich auch mit dem realen Kohlenstaubmassenstrom zwischen Kohlemühle 3 und Dampferzeuger 4 verglichen, um bei Abweichungen die Zustandsregelung 10 mit Beobachter für die Brennstoffzufuhr anzupassen. Dazu wird der reale Kohlenstaubmassenstrom zwischen Kohlemühle 3 und Dampferzeuger 4 von einem geeigneten Sensor 11 erfasst und mit dem modellbasiert ermittelten Kohlenstaubmassenstrom in dem Modul 13 abgeglichen. Eine evtl. Abweichung wird den Modellen 2' und 3' zurückgeführt, die daraufhin so angepasst werden, dass die Abweichungen reduziert werden.

[0040] Im Regelfall schwankt der vom Sensor 11 erfasste Kohlenstaubmassenstrom stark stochastisch. Um das Messergebnis dennoch für den Abgleich mit dem modellbasiert ermittelten Kohlenstaubmassenstrom nutzen zu können, ist ein Kalman-Filter 12 vorgesehen. Der Kalman-Filter 12 bietet gegenüber anderen Glättungsmethoden den Vorteil, dass das Zeitverhalten des geglätteten Werts praktisch nicht verändert wird.

[0041] Indem die Zustandsregelung 10 mit Beobachter für die Brennstoffzufuhr unmittelbar anhand des vom Sensor 11 erfassten Kohlenstaubmassenstroms überprüft und korrigiert wird, kann die Zustandsregelung 10 im laufenden Betrieb ohne Weiteres an sich ändernde Gegebenheiten angepasst werden. Bei den sich ändernden Gegebenheiten kann es sich insbesondere um Schwankungen in den Eigenschaften der durch den Kohlezuteiler 2 zugeleiteten Kohle sowie um Verschleißerscheinungen innerhalb der Kohlemühle 3 handeln. Beide genannten Gegebenheiten haben maßgeblichen Einfluss auf den letztendlich dem Dampferzeuger 4 zugeführten Kohlenstaubmassenstrom.

[0042] Damit die Zustandsregelung 10 mit Beobachter für die Brennstoffzufuhr diese möglichst exakt abbilden kann, sind geeignete Modelle 2' und 3' für den Kohlezuteiler 2 und die Kohlemühle 3 erforderlich. Da der letztendlich dem Dampferzeuger 4 zugeführte Kohlenstaubmassenstrom maßgeblich von den Prozessen in der als Vertikalmühle ausgebildeten Kohlemühle 4 abhängt, ist die Qualität des Modells 4' der Kohlemühle 4 von besonderer Bedeutung.

[0043] Zum besseren Verständnis ist zunächst eine Vertikalmühle mit internem Siebter ausgebildete Kohlemühle 3, wie sie beim Kraftwerk 1 gemäß Figur 1 verwendet wird, in Figur 2 skizziert. Das dazugehörige Modell 3', welches die für das erfindungsgemäße Verfahren erforderliche Qualität bietet, wird nachfolgend anhand der Figur 3 erläutert.

[0044] Bei der Kohlemühle 3 in Figur 2 handelt es sich um eine Walzringmühle mit internem Siebter 34, bei der Walzen 30 als Mahlwerkzeug auf einem horizontal angeordneten Mahlteller 31 kreisförmig entlanglaufen. Der Mahlteller 31 rotiert dazu um eine vertikale Achse 32.

Von einem über einen den Mahlteller 31 umgebenen Düsenring 33 strömt ein Primärluftstrom nach oben, der seitlich vom Mahlteller 31 austretende gemahlene Kohle nach oben zu einem Sieb 34 transportiert. Wenn es nicht bereits vorher ausgefallen ist, wird spätestens durch den Sieb 34 noch zu grobe Kohle wieder zentral auf den Mahlteller 31 zurückgegeben. Ausreichend feingemahlene Kohle wird an den Dampferzeuger 4 ausgegeben. Vom Kohlezuteiler 2 kommende, noch zu mahlende Kohle wird ebenfalls zentral auf den Mahlteller 31 aufgegeben.

[0045] In Figur 3 ist das Modell 3' der als Vertikalmühle ausgestalteten Kohlemühle 3 gemäß Figur 2 gezeigt.

[0046] Zur Bildung des Modells 3' ist der Mahlteller 31 der Kohlemühle 3 (vgl. Figur 2) in drei äquidistante Ringe R1, R2, R3 eingeteilt. Außerdem wird die Kohle in der Kohlemühle 3 in zwei Feinheitgruppen unterschieden, nämlich in eine Grobfraction (G) und eine Feinstaubfraction (F).

[0047] Die Bewegung der Kohle durch die Kohlemühle 3 wird im Modell für jede Feinheitgruppe G, F getrennt über jeden Ring R1, R2, R3 des Mahltellers 31 getrennt dargestellt, wobei hierfür einzelne PT1-Glieder 35 vorgesehen sind, die in Figur 3 entsprechend ihrer Zuordnung zu einem Ring R1, R2, R3 sowie - als Index - zu einer Feinheitgruppe G, F bezeichnet sind.

[0048] Von dem Kohlezuteiler 2 bzw. dessen Modell 2' stammende Kohle durchläuft zunächst als Grobfraction G die Ringe R1_G, R2_G, R3_G. Nach dem Durchlaufen des letzten Rings R3_G - was mit dem seitlichen Austreten der Kohle vom Mahlteller 31 vergleichbar ist (vgl. Figur 2) - wird sie den Ringen R1_G, R2_G, R3_G derselben Feinheitgruppe - also der Grobfraction G - wieder zugeführt, wobei die Zuteilung zu den einzelnen Ringen R1_G, R2_G, R3_G mithilfe von Anteilsfaktoren 36 erfolgt, die in der Summe 1 ergeben. Beispielsweise können dabei die einzelnen Anteilsfaktoren 36 untereinander gleich sein. Es ist aber auch möglich, dass einzelne Anteilsfaktoren 36 dauerhaft den Wert 0 haben.

[0049] Um die tatsächliche Zerkleinerung der Kohle in der Kohlemühle 3 bzw. deren Mahlfunktion abzubilden, ist zwischen den Ringen R2_G, R3_G ein anteiliger Übergang von der Grobfraction G zur Feinstaubfraction F gemäß den Anteilsfaktoren 37 vorgesehen. Die Anteilsfaktoren 37 ergeben in der Summe 1 und sind insbesondere Abhängig von dem Primärluftstrom in der Kohlemühle 3 (vgl. Figur 2).

[0050] Der übergegangene Teil der Kohle wird dem Kreislauf für die Feinstaubfraction, der durch die Ringe R1_F, R2_F, R3_F abgebildet ist, zugeführt, der ähnlich zu demjenigen der Grobfraction ausgebildet ist. Allerdings wird zurückgeführte Kohle nicht auf die Ringe R1_F, R2_F, R3_F verteilt, sondern ausschließlich dem Ring R1_F zugeführt.

[0051] Hinter dem äußersten Ring R3_F für die Feinstaubfraction ist zur Abbildung des Siebers jedoch eine anteilige Abscheidung von Kohle vorgesehen, die durch die Anteilsfaktionen 38 abgebildet ist, die in der Summe

1 ergeben. Der eine Anteil wird - wie beschrieben - dem ersten Ring R1_F zugeführt, während der andere Teil den Kohlestaubmassenstrom zwischen Kohlemühle 3 und Dampferzeuger 4 bzw. der jeweiligen Modelle 3', 4' wiedergibt. Die Anteilsfaktionen 38 lassen sich bspw. in Abhängigkeit des Primärluftstroms in der Kohlemühle 3 bestimmen.

[0052] Der gemäß Modell 3' ermittelte Kohlestaubmassenstrom wird außerdem mit dem von dem Kalman-Filter 12 stammenden tatsächlichen Kohlestaubmassenstrom zwischen Kohlemühle 3 und Dampferzeuger 4 durch das Modul 13 abgeglichen. Jedwede Abweichungen zwischen diesen beiden Werten wird in Form von Korrekturfaktoren 41 in das Modell 3' eingespeist, wobei die Korrekturfaktoren mit Hilfe der Riccati-Gleichung oder dem Verfahren nach Ackermann berechnet werden. Indem das Modell 3' der Kohlemühle 3 unmittelbar über den tatsächlichen Kohlestaubmassenstrom zwischen Kohlemühle 3 und Dampferzeuger 4 abgeglichen wird, kann es veränderte Gegebenheiten, wie bspw. Wechsel der Kohlesorte oder Verschleiß in der Kohlemühle 3, unmittelbar abbilden, ohne dass es aufwendiger manueller Nachjustierung des Modells 3' bedarf.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Regelung eines Kohlekraftwerks (1) umfassend einen Kraftwerksblock mit einer Brennstoffzufuhr umfassend eine Kohlemühle (3) zum Mahlen von Kohle für einen kohlenstaubbefeuerten Dampferzeuger (4), dessen erzeugter Wasserdampf eine Turbine (5) zur Erzeugung elektrischer Energie durch einen damit verbundenen Generator (6) antreibt, und einer modellgestützten Blockregelung zur Anpassung der vom Kraftwerksblock erzeugten Leistung an einen vorgegebenen Sollwert (P_{Soll}) unter Zuhilfenahme eines Dampferzeuger-Turbinen-Modells (20),

dadurch gekennzeichnet, dass

die Blockregelung eine Zustandsregelung (10) mit Beobachter für die Brennstoffzufuhr umfasst, wobei die Zustandsregelung (10) der Brennstoffzufuhr durch eine Erfassung des Kohlestaubmassenstroms zwischen Brennstoffzufuhr und Dampferzeuger (4) korrigiert und deren Ergebnis im Dampferzeuger-Turbinen-Modell (20) berücksichtigt wird.

2. Verfahren nach Anspruch 1,

dadurch gekennzeichnet, dass

die Kohlemühle (3) eine Vertikalmühle mit internem Sieb (34) ist und der Beobachter der Zustandsregelung (10) für die Brennstoffzufuhr ein Modell (3') der Kohlemühle (3) umfasst, wobei das Modell (3') die Eigenschaften aufweist:

- der Mahlteller (31) der Kohlemühle (3) ist von innen nach außen in wenigstens zwei Ringe

- (R1, R2, R3) unterteilt;
 - die Kohle ist in wenigstens zwei Feinheitgruppen (F, G) unterteilt;
 - die Bewegung der Kohle wird für jede Feinheitgruppe (F, G) getrennt über jeden Ring (R1, R2, R3) des Mahltellers 31 einzeln abgebildet (R1_G, R2_G, R3_G, R1_F, R2_F, R3_F), wobei die Kohle nach Durchlaufen des äußersten Ringes (R3_G, R3_F) des Mahltellers wieder wenigstens einem Ring (R1_G, R2_G, R3_G, R1_F) des Mahltellers 31 in derselben Feinheitgruppe (F, G) zugeführt wird;
 - zwischen zwei Ringen (R2_G, R3_G) des Mahltellers (31) ein anteiliger Übergang von einer größeren zu einer feineren Feinheitgruppe (G, F) vorgesehen ist, wobei der nicht übergegangene Anteil dem äußeren der beiden Ringe (R2_G, R3_G) der größeren Feinheitgruppe (G) zugeführt wird; und
 - wenigstens bei der feinsten Feinheitgruppe (F) hinter dem äußersten Ring (R3_F) des Mahltellers (31) eine anteilige Abscheidung von Kohle vorgesehen ist, wobei der nicht-abgeschiedene Teil den Kohlestaubmassenstrom zwischen Brennstoffzufuhr und Dampferzeuger (4) wiedergibt.
3. Verfahren nach Anspruch 2,
dadurch gekennzeichnet, dass
 die Ringe (R1, R2, R3) des Mahltellers (31) als PT1-Glieder abgebildet sind, wobei für jede Feinheitgruppe (F, G) ein eigenes PT1-Glied pro Ring (R1_G, R2_G, R3_G, R1_F, R2_F, R3_F) des Mahltellers 31 vorgesehen ist.
4. Verfahren nach Anspruch 2 oder 3,
dadurch gekennzeichnet, dass
 die Unterteilung des Mahltellers (31) in Ringe (R1, R2, R3) mit einem äquidistanten Abstand erfolgt.
5. Verfahren nach einem der Ansprüche 2 bis 4,
dadurch gekennzeichnet, dass
 der Mahlteller (31) in zwei bis sechs, vorzugsweise zwei bis vier, weiter vorzugsweise in drei Ringe (R1, R2, R3) unterteilt ist.
6. Verfahren nach einem der Ansprüche 2 bis 5,
dadurch gekennzeichnet, dass
 die Kohle in zwei Feinheitgruppen (F, G) unterteilt sind.
7. Verfahren nach einem der Ansprüche 2 bis 6,
dadurch gekennzeichnet, dass
 die Anteile (38, 39) beim anteiligen Übergang und/oder beim anteiligen Abscheiden in Abhängigkeit des Primärluftstroms ermitteln wird.
8. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche
- che,
dadurch gekennzeichnet, dass
 die Erfassung des Kohlestaubmassenstroms einen Kalman-Filter (12) zur Entfernung von bei der Messung auftretenden Störungen umfasst.
9. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche,
dadurch gekennzeichnet, dass
 das Modell (3') der Kohlemühle (3) durch das Ergebnis der Messung des Kohlestaubmassenstroms korrigiert wird, wobei vorzugsweise für jede Abbildung der Ringe (R1, R2, R3) des Mahltellers (31) in jeder Feinheitgruppe (F, G) vorzugsweise gesonderte Korrekturfaktoren (41) bereitgestellt werden.
10. Verfahren nach Anspruch 9,
dadurch gekennzeichnet, dass
 die Korrekturfaktoren (41) mit Hilfe der Riccati-Gleichung oder dem Verfahren nach Ackermann berechnet werden.
11. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche,
dadurch gekennzeichnet, dass
 die Brennstoffzufuhr einen Kohlezuteiler (2) umfasst.
12. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche,
dadurch gekennzeichnet, dass
 die Leistungsregelung durch die Blockregelung unter Zuhilfenahme eines Dampferzeuger-Turbinen-Modells (20) als Zustandsregelung mit Beobachter ausgestaltet ist, wobei die Leistungsregelung durch das tatsächliche Leistungssignal korrigiert wird.
13. Kohlekraftwerk (1) umfassend einen Kraftwerksblock mit einer Brennstoffzufuhr umfassend eine Kohlemühle (3) zum Mahlen von Kohle für einen kohlestaubbefeuerten Dampferzeuger (4), dessen erzeugter Wasserdampf eine Turbine (5) zur Erzeugung elektrischer Energie durch einen damit verbundenen Generator (6) antreibt, und einer modellgestützten Blockregelung zur Anpassung der vom Kraftwerksblock erzeugten Leistung an einen vorgegebenen Sollwert (P_{Soll}),
dadurch gekennzeichnet, dass
 eine Vorrichtung (11) zur Messung des Kohlestaubmassenstroms zwischen Brennstoffzufuhr und Dampferzeuger (4) vorgesehen ist und die Blockregelung zur Durchführung des Verfahrens nach einem der vorhergehenden Ansprüche ausgebildet ist.
14. Vorrichtung nach Anspruch 13,
dadurch gekennzeichnet, dass
 die Brennstoffzufuhr einen Kohlezuteiler (2) umfasst.

15. Vorrichtung nach Anspruch 13,
dadurch gekennzeichnet, dass
eine Vorrichtung (21) zur Messung der ins Netz (7)
eingespeisten Leistung vorgesehen ist.

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

Fig. 1

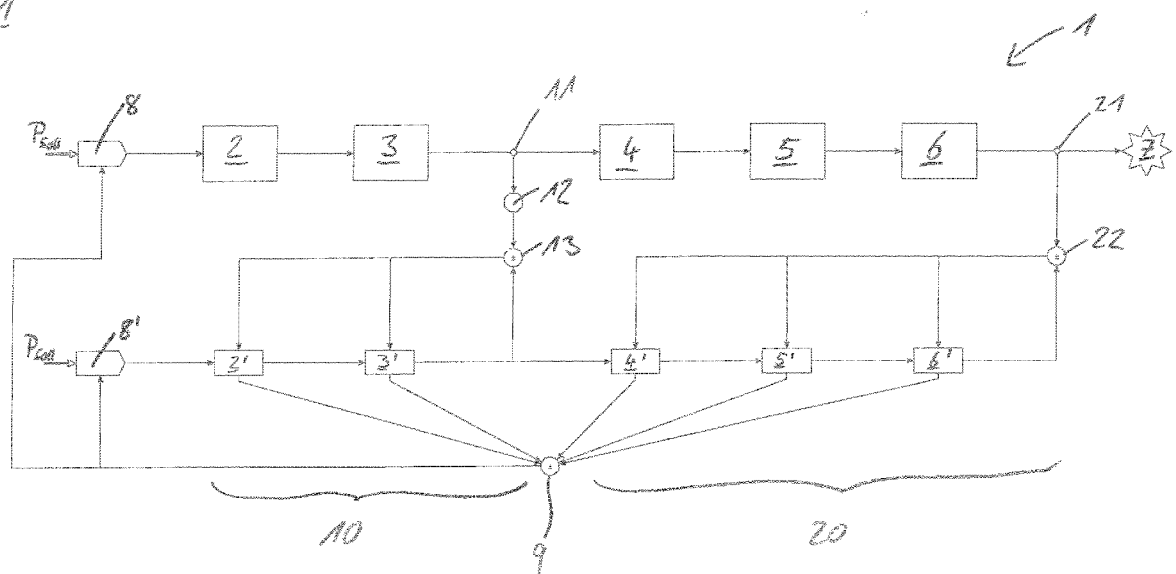


Fig. 2

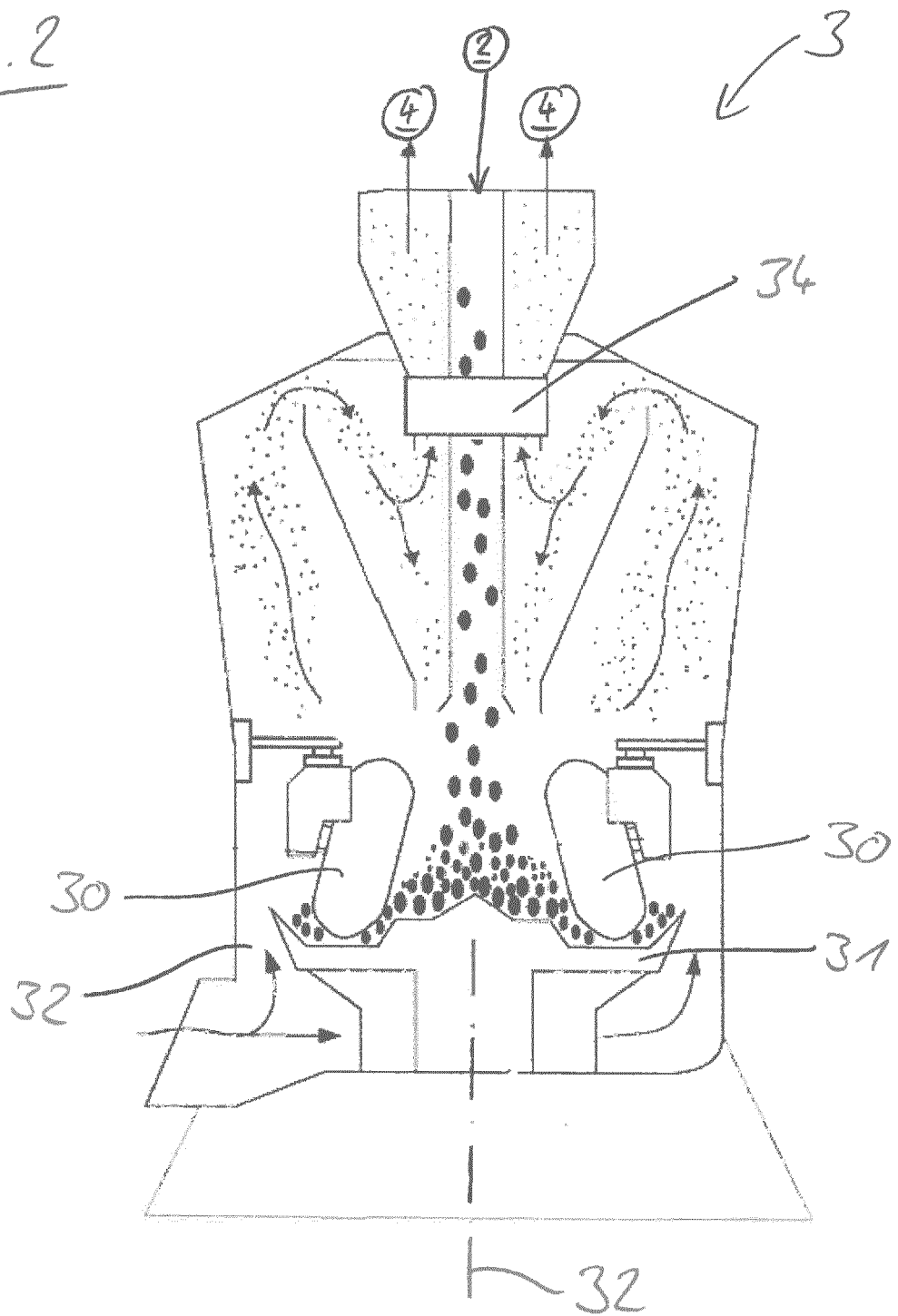
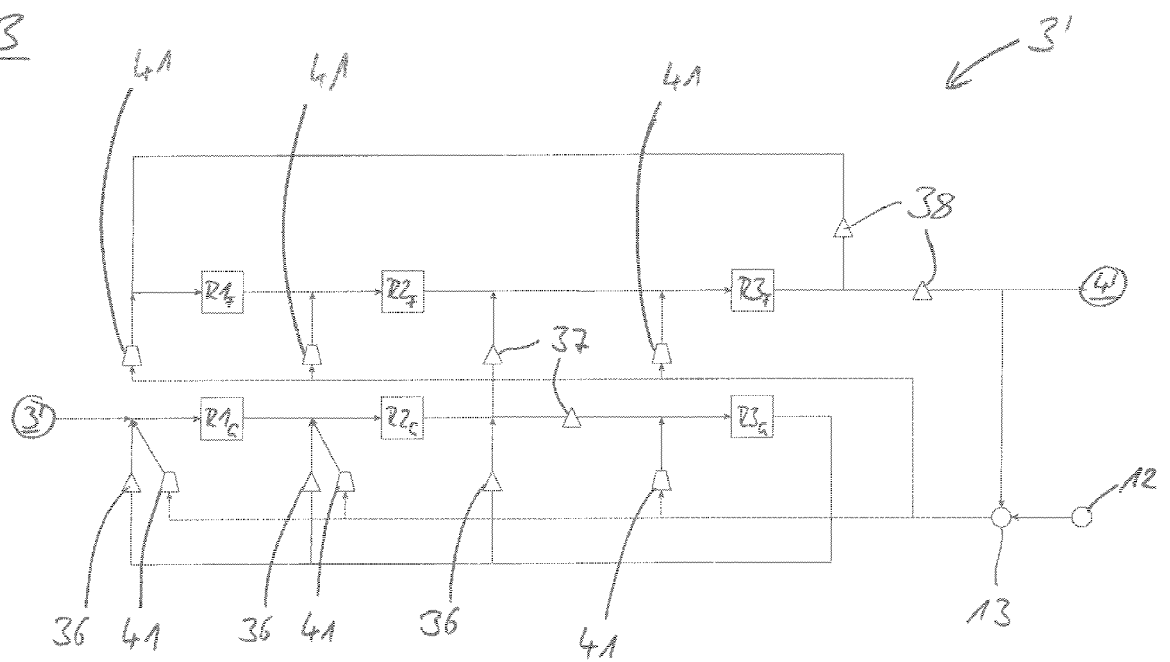


Fig. 3





EUROPÄISCHER RECHERCHENBERICHT

 Nummer der Anmeldung
 EP 16 19 3135

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

EINSCHLÄGIGE DOKUMENTE			
Kategorie	Kennzeichnung des Dokuments mit Angabe, soweit erforderlich, der maßgeblichen Teile	Betrifft Anspruch	KLASSIFIKATION DER ANMELDUNG (IPC)
X	US 2008/230637 A1 (HAVLENA VLADIMIR [CZ] ET AL) 25. September 2008 (2008-09-25) * Zusammenfassung; Abbildungen 1-5 * * Absätze [0012] - [0014], [0017], [0021] - [0024], [0027] - [0033], [0035] *	1-15	INV. F22B35/00 F01K13/02
X	US 4 577 270 A (SUGANO AKIRA [JP] ET AL) 18. März 1986 (1986-03-18) * Zusammenfassung; Abbildungen 1, 2, 6 * * Spalte 2, Zeile 9 - Spalte 3, Zeile 43 * * Spalte 9, Zeile 64 - Spalte 10, Zeile 54 * * Spalte 12, Zeilen 3-43 *	1-15	
X	US 4 177 950 A (SMITH WILLIAM J [US]) 11. Dezember 1979 (1979-12-11) * Zusammenfassung; Abbildungen 1-3 * * Spalte 2, Zeile 32 - Spalte 3, Zeile 60 *	1-15	
			RECHERCHIERTE SACHGEBIETE (IPC)
			F22B F01K
Der vorliegende Recherchenbericht wurde für alle Patentansprüche erstellt			
Recherchenort München		Abschlußdatum der Recherche 27. April 2017	Prüfer Varelas, Dimitrios
KATEGORIE DER GENANNTEN DOKUMENTE X : von besonderer Bedeutung allein betrachtet Y : von besonderer Bedeutung in Verbindung mit einer anderen Veröffentlichung derselben Kategorie A : technologischer Hintergrund O : mündliche Offenbarung P : Zwischenliteratur		T : der Erfindung zugrunde liegende Theorien oder Grundsätze E : älteres Patentedokument, das jedoch erst am oder nach dem Anmeldedatum veröffentlicht worden ist D : in der Anmeldung angeführtes Dokument L : aus anderen Gründen angeführtes Dokument & : Mitglied der gleichen Patentfamilie, übereinstimmendes Dokument	

EPO FORM 1503 03.82 (P04C03)

**ANHANG ZUM EUROPÄISCHEN RECHERCHENBERICHT
 ÜBER DIE EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG NR.**

EP 16 19 3135

5 In diesem Anhang sind die Mitglieder der Patentfamilien der im obengenannten europäischen Recherchenbericht angeführten Patentdokumente angegeben.
 Die Angaben über die Familienmitglieder entsprechen dem Stand der Datei des Europäischen Patentamts am
 Diese Angaben dienen nur zur Unterrichtung und erfolgen ohne Gewähr.

27-04-2017

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
US 2008230637 A1	25-09-2008	US 2008230637 A1	25-09-2008
		US 2010327090 A1	30-12-2010
		WO 2008115911 A1	25-09-2008
US 4577270 A	18-03-1986	AU 552901 B2	26-06-1986
		CA 1191234 A	30-07-1985
		DE 3126331 A1	08-04-1982
		JP H0127337 B2	29-05-1989
		JP S5716719 A	28-01-1982
		US 4577270 A	18-03-1986
US 4177950 A	11-12-1979	JP S5836632 B2	10-08-1983
		JP S54132860 A	16-10-1979
		US 4177950 A	11-12-1979

EPO FORM P0461

Für nähere Einzelheiten zu diesem Anhang : siehe Amtsblatt des Europäischen Patentamts, Nr.12/82

IN DER BESCHREIBUNG AUFGEFÜHRTE DOKUMENTE

Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde ausschließlich zur Information des Lesers aufgenommen und ist nicht Bestandteil des europäischen Patentdokumentes. Sie wurde mit größter Sorgfalt zusammengestellt; das EPA übernimmt jedoch keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.

In der Beschreibung aufgeführte Nicht-Patentliteratur

- Regelungstechnik. 2008, 288-290 [0026]
- **J. ACKERMANN.** Der Entwurf linearer Regelungssysteme im Zustandsraum. *Regelungstechnik*, 1972, 297-300 [0026]