(19) Europäisches Patentamt
European Patent Office
Office européen des brevets

(11) **EP 2 920 515 B1**

(12) **EUROPÄISCHE PATENTSCHRIFT**

(45) Veröffentlichungstag und Bekanntmachung des Hinweises auf die Patenterteilung:
11.01.2017 Patentblatt 2017/02

(21) Anmeldenummer: **13798930.7**

(22) Anmeldetag: **14.11.2013**

(51) Int Cl.:
F23C 9/00 *(2006.01)* ***F23C 6/04*** *(2006.01)*
F23N 1/02 *(2006.01)*

(86) Internationale Anmeldenummer:
PCT/EP2013/003415

(87) Internationale Veröffentlichungsnummer:
WO 2014/075795 (22.05.2014 Gazette 2014/21)

(54) **CFD-SIMULATION EINES FEUERRAUMS MIT MEHREREN BRENNERN MIT GETRENNTER BERÜCKSICHTIGUNG DER VON DEN JEWEILIGEN BRENNERN STAMMENDEN BRENNSTOFF- UND LUFTANTEILE**

CFD SIMULATION OF A COMBUSTION CHAMBER WITH A PLURALITY OF BURNERS WITH SEPARATE CONSIDERATION OF THE FUEL AND AIR COMPONENTS ORIGINATING FROM EACH BURNER

SIMULATION CFD D'UN FOYER À PLUSIEURS BRÛLEURS EN TENANT COMPTE SÉPARÉMENT DES FRACTIONS DE COMBUSTIBLE ET D'AIR PROVENANT DE CHAQUE BRÛLEUR

(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

(30) Priorität: **16.11.2012 DE 102012022470**
02.01.2013 DE 102013000058
20.02.2013 DE 102013002940

(43) Veröffentlichungstag der Anmeldung:
23.09.2015 Patentblatt 2015/39

(73) Patentinhaber: **Merklein, Thomas**
91056 Erlangen (DE)

(72) Erfinder:
- **MERKLEIN, Thomas**
91056 Erlangen (DE)
- **MERKLEIN, Bastian**
91056 Erlangen (DE)

(74) Vertreter: **Schneider, Andreas**
Oberer Markt 26
92318 Neumarkt i.d.OPf. (DE)

(56) Entgegenhaltungen:
EP-A1- 0 773 408
DE-A1- 4 416 270
DE-A1-102008 056 672
US-A- 5 899 172
US-A1- 2011 056 416
US-A1- 2012 052 450

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents im Europäischen Patentblatt kann jedermann nach Maßgabe der Ausführungsordnung beim Europäischen Patentamt gegen dieses Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist. (Art. 99(1) Europäisches Patentübereinkommen).

EP 2 920 515 B1

Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Verbesserung der Verbrennung in einem Feuerraum, insbesondere eines Kraftwerks oder einer Industrieanlage, wobei mehrere Brenner in einer Brennerschicht angeordnet sind und wobei bei zumindest einem Teil der Brenner ein Brennstoff- und/oder Luftmassenstrom eingestellt werden kann. Es kann alternativ im Feuerraum auch nur ein einziger Brenner angeordnet sein. Es können auch mehrere Brennstoff- und Lufteinlässe in einer Brennerschicht oder in einer anderen Geometrie, wie z.B. vertikal oder spiralförmig, angeordnet sein. Es wird in einem darüberliegenden Zünd-/Ausbrandbereich eine örtliche Verteilung einer die Verbrennungsqualität charakterisierenden Kenngröße messtechnisch ermittelt. Es wird basierend auf der örtlichen Verteilung zumindest ein Gebiet mit einer hinsichtlich der Verbrennungsqualität ungünstigen Kenngröße identifiziert.

[0002] Die Erfindung betrifft weiterhin die Verwendung, d.h. die Anwendung eines derartigen Verfahrens zur Verbesserung der Verbrennung in einem fossilen, d.h. fossil befeuerten, thermischen Kraftwerk oder in einer Industrieanlage.

[0003] Schließlich betrifft die Erfindung eine Vorrichtung zur Durchführung eines derartigen Verfahrens.

[0004] Aus der Veröffentlichung der US-Patentanmeldung 2011/0056416A1 sind ein Verfahren sowie ein System zur Verbesserung der Verbrennung in einem Feuerraum eines thermischen Kraftwerks bekannt. Auch dort sind mehrere Brenner in einer Brennerschicht angeordnet, und es kann bei den Brennern ein Brennstoff- und/oder Luftmassenstrom eingestellt werden. Es wird vorgeschlagen, oberhalb der Brenner bzw. Nachbrenner mehrere Betriebsbedingungen wie Temperatur- und CO-Konzentrationswerte in einer gemeinsamen Bereichsebene zu erfassen. Werden Anomalien bei der Verbrennung festgestellt, so sollen diese basierend auf einem mathematischen Modell strömungsdynamisch auf den verursachenden Brenner zurückverfolgt werden können, um dann die Verbrennung durch Änderung des Brennstoff- und/oder Luftmassenstroms zu optimieren. Die örtliche Verteilung der CO-Konzentrationswerte als Maß für die Verbrennungsqualität kann an der Auslassöffnung des Feuerraums, welche den Brennern stromabwärts gegenüberliegt, überprüft werden (siehe FIG. 4A bis 4D).

[0005] Aus dem Stand der Technik sind Feuerräume bekannt, wie z.B. Feuerräume in einem fossilen thermischen Kraftwerk, in einem Drehrohrofen oder in einer anderen thermischen Anlage, die eine Vielzahl von Brennern aufweisen, wie z.B. acht, zehn, 16 oder 20. Der Feuerraum weist typischerweise einen rechteckigen oder quadratischen Querschnitt oder die Form eines Rohres auf.

[0006] Die Maße, wie z.B. die Kantenlänge, eines derartigen Feuerraums kann dabei in einem Bereich von 5 bis 25m oder sogar von 5 bis 50m liegen. Die Höhe eines derartigen Feuerraums kann sogar im Bereich von 10 bis 100m liegen, gemessen von der horizontalen Brennerebene, in der die Brenner umlaufend um den Feuerraum angeordnet sind. Bekannt sind auch Feuerräume mit weiteren, z.B. darüber liegenden Brennerbereichen, in der weitere Brenner sozusagen als weiterer Feuerkranz angeordnet sind. Bekannt sind auch Feuerräume mit einer weiteren, darüberliegenden Brennerebene, in der weitere Brenner sozusagen als weiterer Feuerkranz angeordnet sind. Bekannt ist auch, dass die jeweiligen Brenner Luft und den fossilen Brennstoff, wie z.B. Kohlestaub aus Braunkohle und/oder Steinkohle, oder Erdgas, leicht versetzt zum geometrischen Zentrum hin einblasen (siehe FIG 3). Dadurch wird eine verbrennungstechnisch günstigere Verwirbelung und Durchmischung des Luft-/Brennstoffsgemischs erreicht. Typischerweise erfolgt die Einblasung des Luft-/Brennstoffsgemischs zusätzlich unter einem kleinen Winkel nach "unten" im Bereich von 10° bis 20°, gemessen von der Horizontalebene. Dadurch verbleibt noch mehr Zeit für die Durchmischung des Luft-/Brennstoffgemischs. Der Brennstoff und die Luft wird üblicherweise vorgeheizt in den Feuerraum eingeblasen, wobei die Brennstofftemperatur vorzugsweise in einem Bereich von 150°C - 200°C und die Lufttemperatur um 300°C liegt.

[0007] Das gesamte, noch nicht gezündete Luft-/Brennstoffgemisch wird z.B. bei Kohlestaub befeuerten Kraftwerken zum Feuerraumzentrum hin thermisch mit hochgerissen. In diesem über der Brennschicht bzw. Brennerschicht liegenden Pyrolysebereich wird das gesamte noch nicht gezündete Luft-/Brennstoffgemisch durch endotherme Reaktionen in seine flüchtigen brennbaren Anteile zerlegt wird. Zugleich verdampft das noch im Brennstoff gebundene Wasser. Mit dem weiteren Aufsteigen des pyrolysierenden Gemischs bei zugleich weiter steigender Temperatur zündet letztendlich das gesamte Gemisch ab einer Temperatur von ca. 600° spontan. Oberhalb einer Temperatur von 750°C verbrennt das Gemisch sogar explosionsartig. Zum Schluss verbrennt bzw. verglüht in einem darüberliegenden, in einen Ausbrandbereich übergehenden Bereich noch Koks, d.h. quasi reiner Kohlenstoff, sofern noch ausreichend Sauerstoff vorhanden ist. Dieser Sauerstoff kann z.B. in Form von Luft über weitere Lüfter in dieser Ausbrandebene zugegeben werden, um den Ausstoß von Unverbranntem und von Kohlenmonoxid zu vermeiden.

[0008] Bekannt ist auch, den Zündbereich oder den Ausbrandbereich, bzw. den gesamten Zünd-/Ausbrandbereich dahingehend zu analysieren, wo sich Gebiete mit zu viel Sauerstoff respektive sich Gebiete mit zu viel Brennstoff befinden, typischerweise repräsentiert durch das sogenannte Luft-/Brennstoffverhältnis. Ein Verhältnis von 1 bedeutet, dass ausreichend Luft und folglich auch Sauerstoff vorhanden ist, um den dort vorliegenden Brennstoffanteil vollständig und somit optimal zu verbrennen. Verbrennungstechnisch ungünstige Gebiete sind folglich Gebiete mit einem Luft-/Brennstoffverhältnis von größer als 1, wie z.B. 1.2, was einem sogenannten "mageren" Luft-/Brennstoffgemisch entsprechen würde.

Analoge würde ein Luft-/Brennstoffverhältnis von kleiner als 1, wie z.B. 0.8, einem "fetten" Luft-/Brennstoffgemisch entsprechen. Es ist folglich zu wenig Luft für die Verbrennung vorhanden. Die lokale Temperaturverteilung ist ein weiterer wichtiger Faktor, der vor allem die Geschwindigkeit des Verbrennungsprozesses mitbestimmt. Bekannt sind weiterhin Drehrohröfen, die einen Feuerraum aufweisen. Ein derartiger O-fen wird für kontinuierliche Prozesse in der Verfahrenstechnik eingesetzt. Er weist ein Drehrohr auf, das in Längsrichtung leicht geneigt ist, sodass von einer Einlaufseite her eingebrachtes Aufgabegut innen längs entlang des umlaufenden Ofenrohrs zu einer Auslaufseite hin transportiert wird. Von der Auslaufseite her wird mit Brennern das Zünden des Brennstoffs erreicht, und über die Brenner ein geeignetes Temperaturprofil im Ofen eingestellt. Die Wärmezufuhr erfolgt somit von innerhalb des Ofens, wobei das Aufgabegut hierbei im direkten Kontakt mit dem entstehenden Rauchgas steht. Es kann bei zumindest einem Teil der Brenner der Brennstoff- und/oder Luftmassenstrom eingestellt werden, um die Qualität der Verbrennung zu verbessern. Dabei ist neben den Brennstoff- und Luftmengen und deren Durchmischung vor allem die Endtemperatur für die Qualität des Fertigguts eine wichtige Kenngröße.

[0009] Bewährt hat sich der Drehrohrofen von der Steine- und Erden-Industrie über die Grundstoffindustrie bis in den Chemie- und Entsorgungsbereich. Die Produkte, zu deren thermischer Behandlung der Drehrohrofen genutzt wird, sind vielfältige Massenschüttgüter wie zum Beispiel Zementklinker, Kalk, Dolomit, Magnesit, Schamotte, Titandioxid, Bariumsulfat, Strontium- und Bariumcarbonat, Kaolin, Eisenerz, Quarzsand, Petrolkoks, Gips und viele andere mehr.

[0010] Aus dem Stand der Technik sind weiterhin Messvorrichtungen bekannt, mittels derer eine örtliche Verteilung des Luft-/Brennstoffverhältnisses im Zünd-/Ausbrandbereich messtechnisch ermittelbar ist. Mit anderen Worten erlauben diese Messvorrichtungen einen vorzugsweise horizontalen Schnitt durch den Feuerraum im Zünd-/Ausbrandbereich. Dieser Schnitt bzw. Schnittbereich kann auch als Messebene oder Messebenenschicht bezeichnet werden. Es ist folglich für den verbrennungsrelevanten Bereich im Zünd-/Ausbrandbereich eine zweidimensionale Verteilung des dort vorherrschenden Luft-/Brennstoffverhältnisses ermittelbar. Technisch kann dies z.B. durch eine horizontal verfahrbare Lambdasonde bewerkstelligt, mittels welcher Messungen an einer Vielzahl von Messpunkten im Zünd-/Ausbrandbereich vorgenommen werden.

[0011] Aus dem Stand der Technik sind weiterhin Messvorrichtungen bekannt, wie z.B. Lasergitter oder Pyrometer, mittels welcher eine örtliche Verteilung der Temperatur im Zünd-/Ausbrandbereich messtechnisch ermittelbar ist. Die Temperatur ist eine weitere, die Verbrennungsqualität charakterisierende Kenngröße. Sie bestimmt vorwiegend, wie schnell das Luft-/Brennstoffgemisch mehr oder weniger explodiert. Die Temperatur entwickelt sich dabei mit dem vorhandenen Brennstoff und der Luft. Die Temperatur sollte aber nicht zu hoch sein (typischerweise unterhalb ab etwa 1400°C), da sonst die Asche "weich" wird und den Kessel verschmutzt. Zudem wird nachteilig umweltschädliches, sogenanntes "thermisches" NO_x gebildet.

[0012] Weiterhin sind aus dem Stand der Technik Lasergitter als Messvorrichtungen bekannt, mittels welcher eine örtliche Verteilung der CO-, NO_x-, O_2-, CO_2-Anteile bzw. -Konzentrationswerte im Rauchgas gemessen werden können. Der jeweilige Anteilswert ist eine weitere, die Verbrennungsqualität charakterisierende Kenngröße. Die Messung erfolgt typischerweise dort, wo die Verbrennung quasi abgeschlossen ist und wo nur noch geringe Absorption vorhanden ist, d.h. im Zünd-/Ausbrandbereich und insbesondere im Ausbrandbereich.

[0013] Die zuvorgenannten Messvorrichtungen können auch miteinander kombiniert werden, wie z.B. aus Gründen der Plausibilität der erfassten Messwerte und/oder aus Gründen der Steigerung der Messgenauigkeit.

[0014] Vorzugsweise findet ein optisches Messverfahren Anwendung, wie z.B. ein kameragestütztes Messverfahren.

[0015] Aus der deutschen Offenlegungsschrift DE 197 10 206 A1 ist ein Verfahren und eine Vorrichtung zur Verbrennungsanalyse sowie Flammenüberwachung in einem Verbrennungsraum bekannt. Um sowohl die Temperaturverteilung als auch die Konzentrationsverteilung von im Verbrennungsprozess entstehenden Reaktionsprodukten sowie Parameter der Flamme besonders schnell erfassen zu können, wird ein Bild einer Flamme aufgenommen und aus ortsaufgelösten Intensitäten des Bildes für mindestens einen vorgebbaren Spektralbereich eine räumliche Verteilung eines den Verbrennungsprozess charakterisierenden Parameters ermittelt. Ein optisches System der Vorrichtung weist eine Linse zur Erfassung der Flamme sowie drei nachgeschaltete Strahlteiler auf. Die von der Linse erfassten Bündelstrahlen werden durch die Strahlteiler auf insgesamt vier Spektralbereiche aufgeteilt und jeweils einem CCD-Bildsensor zugeführt.

[0016] Aus der europäischen Patentanmeldung EP 1091175 A2 ist ein Verfahren sowie eine dazu korrespondierende Vorrichtung zur Bestimmung des Luftüberschusses bei einem Verbrennungsprozess bekannt, indem die Bildungsraten der bei der Verbrennung gebildeten Reaktionsprodukte CN und CO ermittelt werden. Anschließend wird das Verhältnis der ermittelten Bildungsraten als eine den Luftüberschuss im Sinne eines Luft-/Brennstoffverhältnisses repräsentierende Größe gebildet. Zur Erfassung der Strahlungsintensitäten sind zumindest vier Spezialkameras vorgesehen.

[0017] Auf Basis der messtechnisch ermittelten örtlichen Verteilung des Luft-/Brennstoffverhältnisses im Zünd-/Ausbrandbereich können Gebiete mit verbrennungstechnisch ungünstigem Luft-/Brennstoffverhältnis ermittelt werden, wie z.B. von Gebieten mit Verhältnis-

werten von größer 1.2 oder kleiner als 0.8.

[0018] Um die Verbrennung in den identifizierten Gebieten zu verbessern ist es bekannt, den Luftmassenstrom oder den Brennstoffstoff zu verändern, indem z.B. die Lüfterdrehzahl eines der Lüfter erhöht oder erniedrigt wird oder indem die eingeblasene Brennstoffmenge bei einem Brenner erhöht oder erniedrigt ist.

[0019] Problem dabei ist, dass aufgrund der Verwirbelung und der Vielzahl von Brennern nicht feststellbar ist, welcher der Brenner maßgeblich für die ungünstige Verbrennung "verantwortlich" ist. Daher wird nacheinander der Luft- oder Brennstoffmassenstrom lediglich nur an einem der Brenner verändert, um dann zu überprüfen, ob sich die Verbrennung in dem betrachteten Gebiet verbessert hat. Allerdings kann es bis zu 15 min dauern, bis die Auswirkungen der Änderung des Luft- oder Brennstoffmassenstroms im gesamten Feuerraum sich stationär im Verbrennungsprozess eingependelt haben. Der zeitliche Aufwand ist folglich enorm hoch.

[0020] Typischerweise ist der Verbrennungsprozess auch nicht sonderlich stabil. Hier führen z.B. unterschiedliche Brennstoffqualitäten dazu, dass sich der gesamte Verbrennungsprozess ändert und wiederum geändert stationär einpendelt. Auch der häufige Ausfall von einem oder mehreren Brennern, wie z.B. durch Servicearbeiten oder technischem Ausfall, führt zu einem geänderten Verbrennungsprozess und folglich zu unterschiedlichen Gebieten mit verbrennungstechnisch ungünstigem Luft-/Brennstoffverhältnis.

[0021] In dem Fachbuch "Simulation von Kraftwerken und wärmetechnischen Anlagen" von Bernd Epple et al., Springer Verlag Wien, 2009, sind verschiedene Methoden einer Feuerraumsimulation bekannt, wie z.B. auf Basis eines sogenannten CFD- Simulationsmodells (CFD für Computational Fluid Dynamics) für die numerische Strömungsmechanik. Basierend auf diesem Modell ist eine Strömungs- Pyrolyse- und Verbrennungs-Simulation eines Feuerraums möglich. Zur approximativen Lösung der dynamischen strömungsmechanischen Modellgleichungen ist die Anwendung einer Finite-Volumen-Methode beschreiben. Je nach Modellierungsaufwand und Rechnerleistung kann für jedes Volumenelement im modellierten Feuerraum die dort herrschende Temperatur, der Druck, die Strömungsgeschwindigkeit und Richtung der Verbrennungsgase sowie wie deren chemische Zusammensetzung wie Sauerstoffanteil, Anteil des pyrolysierten Brennstoffs sowie Anteil des bereits verbrannten Brennstoffs angegeben werden.

[0022] Ausgehend von dem eingangs genannten Stand der Technik ist es eine Aufgabe der Erfindung ein Verfahren anzugeben, welches eine verbesserte Verbrennung in einem Feuerraum erlaubt.

[0023] Es ist eine weitere Aufgabe der Erfindung ein Verfahren anzugeben, welches eine schnelle Korrektur des jeweiligen Brennstoff- und/oder Luftmassenstroms erlaubt, um die Verbrennung im Feuerraum wieder zu verbessern.

[0024] Es ist eine weiteren Aufgabe der Erfindung, geeignete Anwendungen des erfindungsgemäßen Verfahrens anzugeben.

[0025] Schließlich ist es eine Aufgabe der Erfindung, eine zum Verfahren korrespondierende Vorrichtung anzugeben.

[0026] Die Aufgabe der Erfindung wird mit den Merkmalen der unabhängigen Patentansprüche gelöst. Vorteilhafte Verfahrensvarianten, eine geeignete Verwendung sowie vorteilhafte Ausführungsformen der korrespondierenden Vorrichtung sind in den abhängigen Ansprüchen angegeben.

[0027] Erfindungsgemäß wird ein für eine Strömungs-, Pyrolyse- und Verbrennungssimulation wesentlicher Teil des Feuerraums in einem numerischen Simulationsmodell abgebildet, aufgeteilt in eine Vielzahl von Volumenelementen. Es wird bei der numerischen Simulation eines jeden Volumenelements die Herkunft der von jeweiligen Brennern stammenden Brennstoff- und Luftanteile fortlaufend und für sich getrennt mitberücksichtigt. Es wird eine der messtechnisch ermittelten örtlichen Verteilung im Simulationsmodell örtlich entsprechende Verteilung der Brennstoff- und Luftanteile ermittelt. Es wird für das jeweilige identifizierte Gebiet der hinsichtlich der ermittelten Brennstoff- und Luftanteile maßgebliche zumindest eine Brenner ermittelt, um die Verbrennung durch eine Korrektur des jeweiligen Brennstoff- und/oder Luftmassenstroms zu verbessern.

[0028] Dadurch ist auf Basis der numerischen Strömungs- Pyrolyse- und Verbrennungs-Simulation für jedes messtechnisch identifizierte Gebiet, welches eine hinsichtlich der Verbrennungsqualität ungünstige Kenngröße aufweist, vorteilhaft der für die ungünstige Verbrennung maßgeblich verantwortliche Brenner ermittelbar. Durch Korrektur des zugehörigen Luft- und/oder Brennstoffmassenstroms kann dann zumindest iterativ die dortige Verbrennung verbessert werden. Liegt z.B. das gemessene Luft-/Brennstoffverhältnis im identifizierten Gebiet z.B. bei 0.75, d.h. es ist zu wenig Luft für eine optimale Verbrennung vorhanden, so kann der Luftmassenstrom des ermittelten maßgeblich verantwortlichen Brenners erhöht werden, wie z.B. um 5%. Dabei kann der Luftmassenstrom umso mehr korrigiert werden, je größer das gemessene Luft-/Brennstoffverhältnis vom optimalen Verhältnis 1.0 entfernt ist. Im umgekehrten Fall, d.h. für den Fall, dass das gemessene Luft-/Brennstoffverhältnis im identifizierten Gebiet z.B. bei 1.25 liegt, d.h. es ist zu viel Luft für eine optimale Verbrennung vorhanden, so kann der Luftmassenstrom des ermittelten maßgeblich verantwortlichen Brenners verringert werden, wie z.B. um 10%.

[0029] Alternativ oder zusätzlich kann auch der Brennstoffmassenstrom erhöht oder erniedrigt werden. In technischer Hinsicht ist es in den meisten Fällen vorteilhaft, den Luftmassenstrom zu korrigieren, indem die Lüfterdrehzahl oder geeignete verstellbare Lüfterklappen verändert werden. Der Brennstoffmassenstrom bleibt dabei unverändert. Weist der jeweilige Brenner eine Brennstof-

feinbiasvorrichtung für den Brennstoffmassenstrom und zumindest einen zugeordneten, separaten Lüfter für den Luftmassenstrom auf, so ist es vorteilhaft, nur den Luftmassenstrom des Lüfters zu verändern.

[0030] Kernidee der Erfindung ist, dass bei der numerischen Strömungs- Pyrolyse- und Verbrennungs-Simulation für jedes "simulierte" Volumenelement der jeweilige brennerbezogene Ursprung des eingeblasenen Brennstoffs und der eingeblasenen Luft mitgeführt und während der Simulation auf die nächsten angrenzenden Volumenelemente übertragen werden. So kann ein Volumenelement, wie z.B. mit den Abmessungen 10cm x 10cm x 10cm, einen Brennstoffanteil von 5% von Brenner 1, 80% von Brenner 2,10% von Brenner 4 etc. aufweisen sowie einen Luftanteil von 60% vom Brenner 3, 30% von Brenner 6 etc. aufweisen. Mittels der numerischen Strömungs- Pyrolyse- und Verbrennungs-Simulation kann für dieses Volumenelement auf Basis der zuvorgenannten ursprungsbezogenen Anteile sowie weiterer vorliegenden Randbedingungen wie z.B. Lufttemperatur, Brennstofftemperatur, Strömungsgeschwindigkeiten und Drücke, die Pyrolyse sowie die Verbrennung schrittweise berechnet werden. Das Ergebnis einer Berechnung für dieses Volumenelement kann z.B. sein, dass der gesamte vorhandene Brennstoff bereits zu 95% pyrolisiert und zu 20% verbrannt ist, sowie bei einer Temperatur von 693°C bei einem Sauerstoffgehalt von 17,3% und bei einem aktuellen Strömungsvektor von Vx = 1m/s, Vy = -0,2m/s, Vz = 0,1m/s.

[0031] Es wird mit anderen Worten die von jeweiligen Brennern stammenden Brennstoff- und Luftanteile fortlaufend und für sich getrennt mitberücksichtigt.

[0032] Mittels der numerischen Strömungs- Pyrolyse- und Verbrennungs-Simulation sind zumindest die Herkünfte der Brennstoffe und Lüfte qualitativ für jedes Volumenelement ermittelbar. Dies ist aber völlig ausreichend, um die Verbrennung in den messtechnisch erfassten Gebieten mit ungenügendem Luft-/Brennstoffverhältnis gezielt korrigieren zu können.

[0033] Nach einer Verfahrensvariante wird dem Brennstoff und/oder der Luft für einen jeweiligen Brenner eine Substanz beigemischt.

[0034] Die Substanz kann z.B. an der Eingangsseite des jeweiligen Brenners eingebracht werden, wie z.B. in Pulverform oder in Form eines Granulats. Sie kann eingangsseitig z.B. mittels einer Förderschnecke eingebracht werden oder dort eingeblasen werden. Die Substanz kann alternativ auch an der Ausgangsseite des Brenners, d.h. in den Luftauslass eines Lüfters des jeweiligen Brenners oder in den Auslass einer Brennstoffeinblasvorrichtung des jeweiligen Brenners eingebracht werden. Sie kann dort gleichfalls in Pulverform oder in Form eines Granulats eingeblasen oder mittels einer Förderschnecke eingebracht werden. Die Substanz kann auch in flüssiger Form dort eingesprüht werden. Mit anderen Worten wird die Substanz in den Brennstoff- und/oder Luftmassenstrom des jeweiligen Brenners eingebracht. Alternativ oder zusätzlich kann die Substanz im gasförmigen Zustand in den Auslass einer Brennstoffeinblasvorrichtung des jeweiligen Brenners eingeblasen werden.

[0035] Die Substanz hinterlässt während der Verbrennung im Feuerraum eine (optisch signifikante) Leuchtspur, wobei mittels eines spektral auf die Leuchtspur abgestimmten optischen Messsystems die örtliche und zeitliche Ausbreitung der Substanz erfasst wird. Mit anderen Worten wird die Ausbreitung der Substanz im Feuerraum zeitlich und/oder räumlich durch das optische Messsystem erfasst. Es wird eine mit der tatsächlichen Ausbreitung der Substanz einhergehende tatsächliche Ausbreitung des vom jeweiligen Brenner stammenden Brennstoffs und der vom jeweiligen Brenner stammenden Luft im numerischen Simulationsmodell als Randbedingung übernommen. Durch die Anpassung des numerischen Simulationsmodells an die tatsächliche Ausbreitung sind die gesuchten Gebiete mit dem ungenügenden Luft-/Brennstoffverhältnis zuverlässiger ermittelbar.

[0036] Es können hierzu die von dem optischen Messsystem erfassten Daten der einzelnen Leuchtspuren für die jeweiligen Brennstoff- und/oder Luftmassenströme getrennt in räumliche Verteilungen und deren Ausbreitungsgeschwindigkeit umgerechnet werden, aufgeteilt in eine Vielzahl von Volumenelementen. Die so berechneten Leuchtspuren verschiedener Brennstoff- und/oder Luftmassenströme können dann in einem Leuchtspurmodell gespeichert werden. Je nach Modellierungsaufwand und Rechnerleistung kann, soweit messtechnisch möglich, kann für jedes Volumenelement im modellierten Feuerraum die dort herrschende Strömungsgeschwindigkeit und Richtung der Verbrennungsgase sowie wie Zuordnung zu den Brennstoff- und/oder Luftmassenströmen bezüglich der verschiedenen Brennstoff und/oder Lufteinlässen angegeben werden.

[0037] Vorzugsweise wird die Substanz nicht nur dem Brennstoff und/oder der Luft für einen einzigen Brenner sondern für mehrere Brenner beigemischt. Dies kann z.B. zyklisch für eine Auswahl aus allen Brennern, wie z.B. jeder zweite oder jeder dritte Brenner, oder für alle Brenner erfolgen, wie z.B. reihum. Durch die zeitlich aufeinander folgende Beimischung kann die örtliche und zeitliche Ausbreitung der leuchtenden Substanz im Feuerraum mittels des optischen Messsystems erfasst werden, d.h. nachverfolgt werden. Da die Zeitpunkte der Beimischung der Substanz für die jeweiligen Brenner bekannt sind, können die verschiedenen Herkünfte des Brennstoffs und/oder der Luft den jeweiligen Brennern zugeordnet werden. Die Übereinstimmung des numerischen Simulationsmodells mit den wirklichen Strömungsverhältnissen im Feuerraum wird dadurch weiter vorteilhaft erhöht. Dadurch können die gesuchten Gebiete mit dem ungenügenden Luft-/Brennstoffverhältnis noch zuverlässiger ermittelt werden und noch gezielter Korrekturen an dem Brennstoffmassenstrom und/oder Luftmassenstrom des zumindest einen maßgeblichen Brenners zur Optimierung der Verbrennung vorgenom-

men werden.

[0038] Es können auch andere messtechnisch erfasste Größen, wie z.B. die Temperaturverteilung, die Verteilung des Luft-/Brennstoffverhältnis im Feuerraum und die Massenströme an den Brennern im Leuchtspurmodell zusätzlich hinterlegt werden. Es können auch mehrere, spektral unterschiedlich leuchtende Substanzen zeitgleich dem Brennstoff und/oder der Luft unterschiedlicher Brenner beigemischt werden, so dass die Substanzen während der Verbrennung im Feuerraum unterschiedliche, jeweils optisch signifikante Leuchtspuren hinterlassen, wie z.B. rot, blau oder grün. Die örtliche und zeitliche Ausbreitung der Substanzen kann dann mittels eines spektral auf die Leuchtspuren abgestimmten optischen Messsystems erfasst werden. Hierzu kann das optische Messsystem z.B. eine Reihe von Spektralfiltern aufweisen, die auf die dominante emittierte Spektrallinie der jeweiligen Substanz abgestimmt sind.

[0039] Wie aus der Chemie bekannt ist, können mit einigen Substanzen Verfärbungen einer Flamme erreicht werden. Z.B. bewirkt Lithium eine rote Verfärbung, Natrium eine gelbe, Barium eine grüne und Kupferchlorid eine blaue Verfärbung. Dabei werden jeweils eine oder mehrere Spektrallinien im Spektrum erzeugt. Vorzugsweise werden Substanzen verwendet, die bei thermischer Anregung im grünen oder blauen mit hoher Intensität strahlen, da sie dann von der intensiven thermischen Strahlung im roten und infraroten Spektralbereich mit optischen Filtern getrennt und unterschieden werden können.

[0040] Unter Umständen können die die Verbrennungsqualität charakterisierenden Kenngrößen nicht in allen Bereichen des Brennraums gemessen werden und die Leuchtspuranalyse nicht für alle Bereiche ausgewertet werden. Es kann daher alternativ oder zusätzlich mit einer Verbrennungsrechnung und/oder mit einem Strömungsmodell auch für Bereiche, die nicht messtechnisch erfasst werden konnten und/oder für die keine Leuchtspuranalyse durchgeführt werden konnte, eine Berechnung der Kenngrößen für die Verbrennungsgüte erfolgen. Mit einem solchen Leuchtspurmodell bzw. um ein solches erweitertes CFD-Simulationsmodell kann für das jeweilige identifizierte Gebiet der hinsichtlich der ermittelten Kenngrößen maßgebliche zumindest eine Brenner ermittelt werden, um die Verbrennung durch eine Korrektur des jeweiligen Brennstoff- und/oder Luftmassenstroms zu verbessern.

[0041] Nach einer Verfahrensvariante wird wiederholt, vorzugsweise zyklisch, der zumindest eine maßgebliche Brenner ermittelt und automatisiert der jeweilige Brennstoff- und/oder Luftmassenstrom korrigiert. Dadurch ist ohne menschliches Zutun automatisiert eine weitgehend optimale Verbrennung im Feuerraum bewerkstelligbar.

[0042] Einer weiteren Verfahrensvariante nach werden der Feuerraum, die geometrische Anordnung und Ausrichtung der Brenner im Feuerraum, deren aktuell vorgegebener Geschwindigkeitseinblasvektor, deren jeweiliger aktuell vorgegebener Wert für den Brennstoff- und Luftmassenstrom und/oder die aktuell vorgegebene Temperatur des jeweiligen Brennstoff- und Luftmassenstroms im numerischen Simulationsmodell abgebildet. Dadurch stimmen die simulierten Bedingungen im Feuerraum aufgrund der Vielzahl vorgegebener bzw. messbarer Randbedingungen zumindest qualitativ, mit den tatsächlich vorherrschenden realen Bedingungen im Feuerraum überein.

[0043] Nach einer vorteilhaften Verfahrensvariante ist das Strömungs-, Pyrolyse- und Verbrennungs-Simulationsmodell ein Computational-Fluid-Dynamics-Simulationsmodell (CFD), welches die dynamischen Strömungs-, Pyrolyse- und Verbrennungsvorgänge im Feuerraum durch strömungsmechanische Modellgleichungen wie Navier-Stokes-, Euler- oder Potentialgleichungen beschreibt. Die Verwendung derartiger Modelle ist in der Strömungsmechanik, wie z.B. im Triebwerkbereich bei Flugzeugen oder bei Gasturbinen im Kraftwerksbereich, seit langem bekannt und ausgereift. Aufgrund der heute zur Verfügung stehenden Computerrechenleistung ist eine genaue und zugleich schnelle Modellierung sowie Simulation möglich.

[0044] Insbesondere wird zur approximativen Lösung der Navier-Stokes-, Euler- oder Potentialgleichungen des Computational-Fluid-Dynamics-Simulationsmodells eine Finite-Volumen-Methode verwendet. Eine derartige Methode ist gleichfalls weitverbreitet und anerkannt.

[0045] Nach einer weiteren Verfahrensvariante ist die die Verbrennungsqualität charakterisierende, messtechnisch ermittelte Kenngröße ein Luft-/Brennstoffverhältnis. Es kann selbstverständlich alternativ auch der Kehrwert sein, d.h. ein Brennstoff-/Luftverhältnis sein. Alternativ oder zusätzlich kann die Kenngröße eine Temperatur sein, welche mittels eines Pyrometers, eines Lasergitters oder mittels eines horizontal verfahrbaren Temperatursensors erfasst wird. Die Kenngröße kann alternativ oder zusätzlich der CO-, NO_x-, O_2- oder CO_2-Anteil bzw. - Konzentrationswert dem im Zünd-/Ausbrandbereich vorliegenden Rauchgas sein. Aus diesen jeweiligen Anteils- oder Konzentrationswerten kann dann letztendlich ein das Brennstoff-/Luftverhältnis oder Luft-/Brennstoffverhältnis bzw. repräsentierender Wert abgeleitet werden. Ist z.B. die örtliche Verteilung von Sauerstoff, also von O_2, ungleichmäßig, so wird in Gebieten mit zu viel Luft NO_x gebildet, während in Gebieten mit zu wenig Luft wegen der dortigen unvollständigen Verbrennung CO gebildet wird. Hier sind CO und NO_x quasi Gegenspieler, deren gegenläufiges Verhalten in den Anteils- bzw. Konzentrationswerten vorteilhaft verwendet werden kann, um daraus als weitere Kenngröße für die Verbrennungsqualität einen das Brennstoff-/Luftverhältnis repräsentierenden Wert abzuleiten.

[0046] Nach einer bevorzugten Verfahrensvariante wird zur messtechnischen Ermittlung der örtlichen Verteilung des Luft-/Brennstoffverhältnisses im Zünd-/Ausbrandbereich ein kameragestütztes Verfahren verwendet. Insbesondere werden die Bildungsraten der bei der Verbrennung gebildeten chemischen Reaktionsprodukt-

te CN (Cyanid) und CO (Kohlenstoffmonoxid) ermittelt, wobei das Verhältnis der ermittelten Bildungsraten als eine das Luft-/Brennstoffverhältnis repräsentierende Größe gebildet wird. CN ist dabei im Verbrennungsprozess umso mehr vorhanden, je mehr Luftüberschuss bei der Verbrennung vorliegt. Gegensätzlich dazu ist umso mehr CO vorhanden, je mehr Luftmangel bei der Verbrennung vorliegt.

[0047] Bei den chemischen Reaktionsprodukten handelt es um gasförmige Radikale, die typischerweise bei einem Hochtemperaturprozess von mehr als 1000 °C bei der Verbrennung von Kohlenwasserstoff entstehen. Anstelle von CN und CO kann auch eine andere geeignete Paarung für die Repräsentation des Luft-/Brennstoffverhältnis herangezogen werden, wie z.B. aus der Menge der C_2-, CH-, CHOH-, CHO-, NH-, OH- oder O_2-Radikale.

[0048] Die Erfassung der Bildungsraten kann z.B. mittels Spezialkameras erfolgen, denen ein optisches Sperrfilter mit einem vorgebbaren Durchlasswellenbereich für eine charakteristische Spektrallinie des jeweiligen Reaktionsproduktes vorgeschaltet. Dadurch ist hinsichtlich der Emission eines chemischen Reaktionsproduktes eine besonders hohe Selektivität möglich. Typischerweise weist ein solches Sperrfilter einen Durchlasswellenbereich im Bereich von ca. 5 bis 20 nm auf. So liegt beispielsweise das spezifische Frequenzband einer der Spektrallinien für CO (Kohlenstoffmonoxid) im Bereich von 445 bis 455 nm und für das Reaktionsprodukt CN (für Cyanid) im Bereich von 415 bis 425 nm. Den Sperrfiltern kann darüber hinaus ein IR-Filter, das heißt ein Infrarot-Filter, vorgeschaltet sein, um einen Großteil der eintreffenden Wärmestrahlung auszufiltern. Beide Filter können auch in einem einzigen Sperrfilter integriert sein. Die beiden Bildungsraten, wie vorzugsweise für CO und CN, werden aus der Differenz eines jeweiligen Bandenstrahlungswerts und eines jeweiligen Temperaturstrahlungswerts gebildet, letzterer vorzugsweise mittels einer Verhältnispyrometrie.

[0049] Das zuvor beschriebene Verfahren kann vorteilhaft zur Verbesserung der Verbrennung in einem fossilen thermischen Kraftwerk oder in einem Drehrohrofen angewendet werden

[0050] Nach einer weiteren Verfahrensvariante wird zur messtechnischen Ermittlung der örtlichen Verteilung des Luft-/Brennstoffverhältnisses im Zünd-/Ausbrandbereich sowie zur optischen Erfassung der bei der Ausbreitung der Substanz emittierten Leuchtspur ein gemeinsames kameragestütztes Verfahren verwendet. Ein derartiges kameragestütztes Verfahren ist z.B. aus der europäischen Patentanmeldung EP 1091175 A2 bekannt. Vorzugsweise wird in diesem Fall Kupferchlorid in Kombination mit dem dort offenbarten Messsystem verwendet, um die räumliche Zuordnung zu den Brennstoff- und/oder Luftauslässen zu erhalten. Über das zeitliche Verhalten der Leuchtspuren des Kupferchlorid im Brennraum kann zusätzlich die Strömungsgeschwindigkeit abgeschätzt werden.

[0051] Es kann anstelle des in der europäischen Patentanmeldung EP 1091 175 A2 beschriebenen Kamerasystems auf ein Lasermessgitter verwendet werden. Dieses Messgitter kann somit sowohl zur messtechnischen Ermittlung der örtlichen Verteilung des Luft-/Brennstoffverhältnisses im Zünd-/Ausbrandbereich sowie zur Erfassung der bei der Ausbreitung der Substanz emittierten Leuchtspur und/oder Absorptionsspur gleichfalls im Zünd-/Ausbrandbereich verwendet werden.

[0052] Schließlich wird die Aufgabe der Erfindung durch eine zum Verfahren korrespondierende Vorrichtung gelöst.

[0053] Die Vorrichtung weist erfindungsgemäß Mittel zur Erfassung eines Istwertes zumindest des aktuellen Brennstoff- und/oder Luftmassenstroms eines jeweiligen Brenners auf. Sie umfasst Mittel zur Ausgabe eines Sollwertes an eine Stelleinrichtung für den Brennstoff- und/oder Luftmassenstroms eines jeweiligen Brenners auf. Weiterhin weist sie Messmittel zur Ermittlung einer im Zünd-/Ausbrandbereich vorliegenden örtlichen Verteilung einer die Verbrennungsqualität charakterisierenden Kenngröße, insbesondere des Luft-/Brennstoffverhältnisses auf. Schließlich umfasst die Vorrichtung rechnergestützte Mittel zur Simulation reagierender Strömungen in einem Feuerraum mittels eines numerischen Strömungs-, Pyrolyse- und Verbrennungs-Simulationsmodells, zur Ermittlung einer der messtechnisch ermittelten örtlichen Verteilung im Simulationsmodell örtlich entsprechenden Verteilung der Brennstoff- und Luftanteile, zur Identifikation zumindest eines dortigen Gebiets mit einer hinsichtlich der Verbrennungsqualität ungünstigen Kenngröße, insbesondere mit einem verbrennungstechnisch ungünstigen Luft-/Brennstoffverhältnis, zur Ermittlung des maßgeblichen zumindest einen Brenners hinsichtlich der simulierten Brennstoff- und Luftanteile sowie zur Ausgabe eines korrigierten Sollwertes für den Brennstoff- und/oder Luftmassenstroms an die Stelleinrichtung eines jeweiligen Brenners.

[0054] Der Istwert des aktuellen Brennstoffmassenstroms kann z.B. mittelbar aus der Drehzahl einer dem Brenner vorgeschalteten Kohlemühle oder unmittelbar von einem Gaszähler bei Erdgas als Brennstoff abgeleitet werden. Der Luftmassenstrom kann z.B. aus der Lüfterdrehzahl eines Lüfters als separater Teil eines Brenners auf Basis der technischen Kenndaten des Lüfters abgeleitet werden. Die Temperaturwerte für den Brennstoffmassenstrom und Luftmassenstrom können z.B. mittels eines Temperatursensors erfasst werden. Der jeweilige Sollwert kann ein Zahlenwert sein, wie z.B. eine Prozentzahl im Bereich von 0% und 100% sein. Eine Prozentzahl von 0 kann z.B. einem gestellten Brennstoffmassenstrom von 0 sein, d.h. es wird in diesem Fall die Brennstoffzufuhr eines Brenners ausgeschaltet. 100% dagegen entsprechen einer maximal möglichen Fördermenge des Brenners bzw. der Brennstoffeinblasvorrichtung.

[0055] Als rechnergestützte Mittel kommt vorzugsweise ein Computer, wie z.B. ein industrietauglicher PC in

Frage, auf dem mehrere Programme ausgeführt werden können. Die Simulation reagierender Strömungen im Feuerraum mittels des numerischen Strömungs-, Pyrolyse- und Verbrennungs-Simulationsmodells, die Ermittlung einer der messtechnisch ermittelten örtlichen Verteilung im Simulationsmodell örtlich entsprechenden Verteilung der Brennstoff- und Luftanteile, die Identifikation zumindest eines dortigen Gebiets mit einem verbrennungstechnisch ungünstigen Luft-/Brennstoffverhältnis, die Ermittlung des maßgeblichen zumindest einen Brenners hinsichtlich der simulierten Brennstoff- und Luftanteile sowie die Ausgabe eines korrigierten Sollwertes für den Brennstoff- und/oder Luftmassenstroms an die Stelleinrichtung eines jeweiligen Brenners erfolgt vorzugsweise in Form ausführbarer Softwareprogramme sowie in Form hinterlegter Modelldaten, die von einem Mikroprozessor der rechnergestützten Mittel ausgeführt bzw. verarbeitet werden.

[0056] Nach einer alternativen Ausführungsform weist die Vorrichtung die Mittel zur Erfassung eines Istwertes zumindest des aktuellen Brennstoff- und/oder Luftmassenstroms eines jeweiligen Brenners auf. Sie weist die Mittel zur Ausgabe eines Sollwertes an eine Stelleinrichtung für den Brennstoff- und/oder Luftmassenstroms eines jeweiligen Brenners auf. Sie weist zudem Mittel zum individuellen Ansteuern eines Beimischers zum Beimischen einer Substanz in den Brennstoff und/oder in der Luft eines jeweiligen Brenners auf, wobei die Substanz während der Verbrennung im Feuerraum eine Leuchtspur hinterlässt.

[0057] Der jeweilige Beimischer ist vorzugsweise elektrisch über die Mittel ansteuerbar. Der Beimischer kann z.B. eine Förderschnecke sein. Es kann z.B. eine druc kluftgestützte Einblasvorrichtung, über welche die Substanz über ein elektrisch ansteuerbares Druckluftventil eingeblasen werden kann.

[0058] Die Vorrichtung weist weiterhin ein kameragestütztes Messsystem zur Ermittlung einer im Zünd-/Ausbrandbereich vorliegenden örtlichen Verteilung einer die Verbrennungsqualität charakterisierenden Kenngröße sowie zur optischen Erfassung einer spektral signifikanten und sich örtlich sowie zeitlich ausbreitenden Leuchtspur auf. Weiterhin weist die Vorrichtung rechnergestützte Mittel auf. Sie sind vorgesehen zur Simulation reagierender Strömungen in einem Feuerraum mittels eines numerischen Strömungs-, Pyrolyse- und Verbrennungs-Simulationsmodells und zur Übernahme der tatsächlichen Ausbreitung des vom jeweiligen Brenner stammenden Brennstoffs und der vom jeweiligen Brenner stammenden Luft auf Basis der erfassten Ausbreitung der Leuchtspur als Randbedingung im numerischen Simulationsmodell. Die rechnergestützten Mittel sind weiterhin vorgesehen zur Ermittlung einer der messtechnisch ermittelten

[0059] örtlichen Verteilung im Simulationsmodell örtlich entsprechenden Verteilung der Brennstoff- und Luftanteile . Die rechnergestützten Mittel sind zudem vorgesehen zur Identifikation zumindest eines dortigen Gebiets mit einer hinsichtlich der Verbrennungsqualität ungünstigen Kenngröße. Die rechnergestützten Mittel sind weiterhin vorgesehen zur Ermittlung des maßgeblichen zumindest einen Brenners hinsichtlich der simulierten Brennstoff- und Luftanteile. Schließlich sind die rechnergestützten Mittel vorgesehen zur Ausgabe eines korrigierten Sollwertes für den Brennstoff- und/oder Luftmassenstroms an die Stelleinrichtung eines jeweiligen Brenners.

[0060] Nach einer Ausführungsform sind die rechnergestützten Mittel dazu eingerichtet, wiederholt, vorzugsweise zyklisch, den zumindest eine maßgebliche Brenner zu ermitteln und automatisiert einen korrigierten Sollwert für den Brennstoff- und/oder Luftmassenstrom an die Stelleinrichtung eines jeweiligen Brenners auszugeben. Die Ermittlung des zumindest einen maßgeblichen Brenners kann z.B. dadurch erfolgen, dass die mittels des Simulationsmodells ermittelten Brennstoff- und Luftanteile von den jeweiligen Brennern in den Volumenelementen im Zünd-/Ausbrandbereich auf maximale Anteilswerte hin untersucht werden. Vorzugsweise erfolgt dies nur bei den Volumenelementen, welche der örtlichen Verteilung ungünstiger Luft-/Brennstoffverhältnisse entsprechen.

[0061] Nach einer weitere Ausführungsform sind im numerischen Strömungs-, Pyrolyse- und Verbrennungsmodell, auf dessen Basis die reagierenden Strömungen in einem Feuerraum durch die rechnergestützten Mittel simuliert werden, der Feuerraum, die geometrische Anordnung und Ausrichtung der Brenner im Feuerraum , deren aktuell vorgegebener Geschwindigkeitseinblasvektor, deren jeweiliger aktuell vorgegebener Wert für den Brennstoff- und Luftmassenstrom und/oder die aktuell vorgegebene Temperatur des jeweiligen Brennstoff- und Luftmassenstroms abgebildet.

[0062] Nach einer weiteren Ausführungsform ist das Strömungs-, Pyrolyse- und Verbrennungs-Simulationsmodell ein Computational-Fluid-Dynamics-Simulationsmodell. Ein solches Modell ist zur Beschreibung dynamischer Strömungs-, Pyrolyse- und Verbrennungsvorgänge im Feuerraum durch strömungsmechanische Modellgleichungen wie Navier-Stokes-, Euler- oder Potentialgleichungen vorgesehen.

[0063] Nach einer weiteren Ausführungsform ist die Verwendung einer Finite-Volumen-Methode zur approximativen Lösung der Navier-Stokes-, Euler- oder Potentialgleichungen des Computational-Fluid-Dynamics-Simulationsmodells vorgesehen.

[0064] Einer weiteren Ausführungsform sind die Messmittel zur messtechnischen Ermittlung der örtlichen Verteilung des Luft-/Brennstoffverhältnisses im Zünd-/Ausbrandbereich als kameragestütztes Messsystem realisiert, bei dem die Bildungsraten der bei der Verbrennung gebildeten chemischen Reaktionsprodukte, wie z.B. von CN und CO, ermittelbar sind. Das Verhältnis der ermittelten Bildungsraten kann dabei das Luft-/Brennstoffverhältnis repräsentieren. Die Messmittel kann alternativ auch die eingangs beschriebene verfahrbare Lambda-

sonde umfassen.

[0065] Einer weiteren Ausführungsform zufolge ist der jeweilige Brenner ein konzentrisch aufgebauter Rundbrenner. Der jeweilige Brenner kann auch eine Brennstoffeinblasvorrichtung sowie einen darunterliegenden und/oder darüberliegenden Lüfter umfassen.

[0066] Die Aufgabe der Erfindung wird weiterhin durch eine zum erfindungsgemäßen Verfahren korrespondierende Vorrichtung gelöst.

[0067] Die Erfindung sowie vorteilhafte Ausführungen der Erfindung werden im Weiteren anhand der nachfolgenden Figuren näher beschrieben. Es zeigen

FIG 1 ein Beispiel für einen Feuerraum eines Kraftwerks mit acht Brennern in einer Brennschicht,

FIG 2 eine beispielhafte Ausführungsform der Brenner im Feuerraum mit jeweils einer Brennstoffeinblasvorrichtung und jeweils zwei zugeordneten Lüftern,

FIG 3 eine Aufsicht auf die Brenner gemäß FIG 2 mit sieben von den acht Brennern im Betrieb,

FIG 4 ein Beispiel für eine messtechnisch ermittelte örtliche Verteilung eines in einem Zünd-/Ausbrandbereich gemäß FIG 1 herrschenden Luft-/Brennstoffverhältnisses mit vier Gebieten mit verbrennungstechnisch ungünstigem Luft-/Brennstoffverhältnis,

FIG 5 eine der örtlichen Verteilung gemäß FIG 4 örtlich entsprechende Verteilung der von den Brennern stammenden Brennstoff- und Luftanteile auf Basis eines numerischen Strömungs-, Pyrolyse- und Verbrennungs-Simulationsmodells gemäß der Erfindung, und

FIG 6 ein Beispiel für Vorrichtung zur Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens zur Korrektur des Brennstoff- und/oder Luftmassenstroms der jeweiligen Brenner in einem Feuerraum.

[0068] FIG 1 zeigt ein Beispiel für einen Feuerraum 1 eines Kraftwerks mit acht Brennern 2 in einer Brennschicht E. Der Feuerraum 1 weist einen rechteckigen Querschnitt auf. Es sind beispielhaft acht Brenner 2 in einer gemeinsamen horizontalen Brennebene BE angeordnet, in welcher Luft sowie Brennstoff durch die Brenner 2 eingeblasen wird. Mit P ist ein darüberliegender Pyrolysebereich B und mit ZA ein in einen Zünd-/Ausbrandbereich übergehender Bereich bezeichnet. Mit Z selbst ein Zündbereich und mit A ein Ausbrandbereich bezeichnet. Die Grenzen zwischen den jeweiligen Bereichen sind dabei fließend und dienen in dieser Darstellung nur dem besseren Verständnis. Mit dem Bezugszeichen 5 sind schließlich Messkameras bezeichnet, die in einer Messebene M zur messtechnischen Erfassung des Zünd-/Ausbrandbereichs ZA angeordnet sind und sozusagen in den Feuerraum 1 hineinschauen. Die Messkameras 5 sind Teil eines kameragestützten Messsystems, welches zur messtechnischen Erfassung einer örtlichen Verteilung des im Zünd/Ausbrandbereich ZA herrschenden Luft-/Brennstoffverhältnisses vorhanden ist. Mit x,y,z sind die Achsen eines kartesischen Koordinatensystems bezeichnet. Die Brennebene BE sowie die Messebene M liegen somit in einer xy-Ebene. Jeweils senkrecht dazu ist die z-Achse.

[0069] FIG 2 zeigt eine beispielhafte Ausführungsform der Brenner 2 im Feuerraum 1 mit jeweils einer Brennstoffeinblasvorrichtung 3 und mit jeweils zwei zugeordneten Lüftern 4. Es ist dabei jeweils ein Lüfter 4 direkt oberhalb und ein weiterer Lüfter 4 direkt unterhalb der zugehörigen Brennstoffeinblaseinrichtung 3 angeordnet. Von den Lüftern 4 ist lediglich nur das viereckige Lufteintrittsfenster und von der Brennstoffeinblasrichtung 3 lediglich eine runde, konzentrische Öffnung im Feuerraum 1 zu sehen. Die Brennstoffeinblaseinrichtung 3 ist zudem symbolisiert durch eine Flamme dargestellt, auch wenn in dieser Brennschicht E noch keine offene Verbrennung stattfindet. Diese findet erst im Zünd-/Ausbrandbereich statt.

[0070] FIG 3 zeigt eine Aufsicht auf die Brenner gemäß FIG 2 mit sieben von den acht Brennern 2_1-2_8 im Betrieb. In dieser Darstellung ist erkennbar, dass Luft sowie Brennstoff leicht versetzt zum geometrischen Zentrum eingeblasen wird, um eine gezielte Verwirbelung und Durchmischung des Luft-/Brennstoffgemisches zu erzielen. Mit $\dot{m}_{B1}$-$\dot{m}_{B8}$ ist der vom jeweiligen Brenner 2_1-2_8 eingeblasene Brennstoffmassenstrom und mit $\dot{m}_{L1}$-$\dot{m}_{L8}$ der vom jeweiligen Brenner 2_1-2_8 eingeblasene Luftmassenstrom bezeichnet. Es handelt sich bei diesen physikalischen Größen um zeitabhängige Größen mit der Einheit Kilogramm pro Sekunde (kg/s), symbolisiert durch den Punkt über der physikalischen Bezeichnung der Masse m. Mit v_1-v_8 ist der jeweilige Geschwindigkeitseinblasvektor sowohl für die Luft als auch für den Brennstoff bezeichnet. Der Geschwindigkeitseinblasvektor v_1-v_8 selbst weist drei kartesische, nicht weiter gezeigte skalare Geschwindigkeitswerte v_x, v_y, v_z auf, die auf das gemäß FIG 1 zugrunde gelegte Koordinatensystem x,y,z bezogen sind. Der Einfachheit halber wurde für den eingeblasenen Brennstoff eine gemeinsame Brennstofftemperatur T_B und für die Luft eine gemeinsame Lufttemperatur T_L eingetragen. Selbstverständlich können bei jedem Lüfter 4 und bei jeder Brennstoffeinblasvorrichtung 3 des jeweiligen Brenners 2_1-2_8 die aktuelle Temperatur sowie separate Geschwindigkeitseinblasvektoren für die Luft vom jeweiligen Lüfter 4 und für den Brennstoff von der jeweiligen Brennstoffeinblasvorrichtung 3 angegeben bzw. erfasst werden.

[0071] Im Beispiel der FIG 3 ist weiterhin der Brenner 2_4 gestrichelt dargestellt. Dies symbolisiert, dass der gezeigte Brenner 2_4 nicht in Betrieb ist. Gründe hierfür können ein technischer Ausfall, Revisionsarbeiten oder ein

Teillastbetrieb sein.

[0072] FIG 4 zeigt ein Beispiel für eine messtechnisch ermittelte örtliche Verteilung V_R eines in einem Zünd-/Ausbrandbereich ZA gemäß FIG 1 herrschenden Luft-/Brennstoffverhältnisses mit vier Gebieten G1-G4 mit verbrennungstechnisch ungünstigem Luft-/Brennstoffverhältnis. Die gezeigte zweidimensionale Darstellung in der xy-Ebene zeigt Gebiete G1-G4 mit einem verbrennungstechnisch ungünstigem Luft-/Brennstoffverhältnis. So zeigen die schraffierten Gebiete G1, G2 ein Luft-/Brennstoffverhältnis von weniger als 0.8. In Richtung zum Gebietsinneren nimmt dabei das Luft-/Brennstoffverhältnis im Sinne von Höhenlinien noch weiter ab, wie z.B. im Gebietszentrum auf einen Wert von 0.6. Analog zeigen die nichtschraffierten Gebiete G3, G4 ein Luft-/Brennstoffverhältnis von mehr als 1.2. In Richtung zum Gebietsinneren nimmt dabei das Luft-/Brennstoffverhältnis im Sinne von Höhenlinien noch weiter zu, wie z.B. im Gebietszentrum auf einen Wert von 1.4.

[0073] FIG 5 zeigt eine der örtlichen Verteilung V_R gemäß FIG 4 örtlich entsprechende Verteilung V_S der von den Brennern stammenden Brennstoff- und Luftanteile A_{B1}-A_{B8}, A_{L1}-A_{L8} auf Basis eines numerischen Strömungs-, Pyrolyse- und Verbrennungs-Simulationsmodells gemäß der Erfindung.

[0074] Die in der FIG 5 gezeigten Gebiete G1-G4, die sich im Raster eines Volumenelements dV des Simulationsmodells erstrecken, entsprechen in etwa den Gebieten G1-G4 in FIG 4 mit den dort extremen Werten für das Luft-/Brennstoffverhältnis. Diese nun identifizierten, verbrennungstechnisch ungünstigen Gebiete G1-G4 werden nun hinsichtlich ihrer Brennstoff- und Luftanteile A_{B1}-A_{B8}, A_{L1}-A_{L8} untersucht. Genauer gesagt, werden die jeweiligen, zu den identifizierten Gebieten G1-G4 zugehörigen Volumenelemente dV untersucht. Da gemäß der Erfindung bei der numerischen Simulation eines jeden Volumenelements dV die Herkunft der von jeweiligen Brennern stammenden Brennstoff- und Luftanteile A_{B1}-A_{B8}, A_{L1}-A_{L8} fortlaufend und bereits für sich getrennt mitberücksichtigt wurden, kann nun für jedes Gebiet G1-G4 der maßgebliche Brenner 2 ermittelt werden. Dies ist typischerweise der Brenner 2, dessen Brennstoff- oder Luftanteil A_{B1}-A_{B8}, A_{L1}-A_{L8} im Vergleich zu den Brennstoff- und Luftanteilen A_{B1}-A_{B8}, A_{L1}-A_{L8} der anderen Brenner 2 maximal ist. So kann z.B. für das Gebiet G1 in FIG 5, welches gemäß FIG 4 ein Luft-/Brennstoffverhältnis von 0.6 aufweist, also zu "fett" ist, 60% des Brennstoffs ausschliesslich von nur einem Brenner 2 stammen und 30% der Luft hauptsächlich von einem anderen Brenner 2 stammen. Im vorliegenden Fall ist es dann besonders geeignet, den Brennstoffmassenstrom des Brenners 2 mit dem 60%-Anteil zu reduzieren, um die Verbrennung dort zu verbessern. Es kann auch beispielsweise für dieses Gebiet G1 in FIG 5 z.B. 50% der Luft von nur einem Brenner 2 stammen und sich die Brennstoffanteile in etwa gleichmässig auf alle Brenner 2 verteilen. In diesem Fall ist es besonders geeignet, den Luftmassenstrom bei diesem maßgeblichen Brenner 2 mit dem 30%-Luftanteil zu erhöhen, um die Verbrennung dort zu verbessern. Vorzugsweise werden bei mehreren identifizierten Gebieten G1-G4 die Gebiete G1-G4 hinsichtlich des Luft- und Brennstoffmassenstroms nacheinander korrigiert.

[0075] FIG 6 zeigt ein Beispiel für eine Vorrichtung 10 zur Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens zur Korrektur des Brennstoff- und/oder Luftmassenstroms $\dot{m}_{B1}$-$\dot{m}_{B8}$, $\dot{m}_{L1}$-$\dot{m}_{L8}$ der jeweiligen Brenner 2_1-2_8 in einem Feuerraum 1. Mit dem Bezugszeichen 11 sind Mittel zur Erfassung eines Istwertes IW, mit 12 Mittel zur Ausgabe eines Sollwertes SW, mit 13 Messmittel und mit 14 rechnergestützte Mittel, wie z.B. ein Computer, bezeichnet. Die erfassten Istwerte IW sind dabei aktuelle, z.B. über eine Kraftwerksleittechnik empfangene Luftmassenstromwerte $\dot{m}_{L1}$-$\dot{m}_{L8}$, Brennstoffmassenstromwerte $\dot{m}_{B1}$-$\dot{m}_{B8}$ sowie Temperaturmesswerte T_B, T_L. Die Messmittel 13 sind im vorliegenden Beispiel durch ein kameragestütztes Messsystem mit vier Kameras 5 realisiert. Ausgabeseitig stellt dieses System eine örtliche Verteilung V_R des gemessenen Luft-/Brennstoffverhältnisses λ im Zünd-/Ausbrandbereich ZA bereit, wie z.B. als zweidimensionales Datenfeld λ_{xy} entsprechend der xy-Ebene der Messebene M. Die rechnergestützten Mittel 14 weisen beispielhaft ein als Datenmodell hinterlegtes numerisches Simulationsmodell CFD für die Strömungs-, Pyrolyse- und Verbrennungssimulation des Feuerraums 1 auf. Ausgabeseitig gibt das numerische Simulationsmodell CFD die den jeweiligen Brennern 2 zuordenbaren Brennstoff- und Luftanteile A_{B1}-A_{B8}, A_{L1}-A_{L8} aus. Ferner umfassen die rechnergestützten Mittel 14 einen Identifizierungsblock ID, um entsprechende Gebiete G1-G4 aus der örtlichen Verteilung V_R der vom Messsystem 13 bereitgestellten Luft-/Brennstoffverhältniswerte λ_{xy} zu identifizieren. Ein Vergleichsblock CMP der rechnergestützten Mittel 14 vergleicht nun Brennstoff- und Luftanteile A_{B1}-A_{B8}, A_{L1}-A_{L8} in Volumenelementen dV, die örtlich den identifizierten Gebieten G1-G4 entsprechen, untereinander auf maximale und minimale Anteilswerte hin, um den maßgeblichen Brenner 2 bzw. die maßgebliche Brennstoffeinblasvorrichtung 3 oder den maßgeblichen Lüfter 4 zu ermitteln. Darauf basierend wird für den betreffenden Brenner 2 ein geänderter Sollwert ΔSW an die Mittel 12 zur Ausgabe eines Sollwertes SW ausgegeben, wie z.B. wieder über die Kraftwerksleittechnik, um die Verbrennung durch eine Korrektur des jeweiligen Brennstoff- und/oder Luftmassenstroms $\dot{m}_B$, $\dot{m}_L$ zu verbessern. Nach einer vorgegebenen Wartezeit, wie z.B. von 10 Minuten, erfolgt eine Überprüfung, ob die Ausgabe des geänderten Sollwertes SW zu einer Verbesserung der Verbrennung geführt hat. Dies kann iterativ erfolgen, bis ein Optimum für die Verbrennung gefunden worden ist. Im Anschluss kann das nächste identifizierte Gebiet G1-G4 in gleicher Weise iterativ optimiert werden. Es kann auch nur ein einziges Gebiet G1-G4 mit maximal mit verbrennungstechnisch maximal ungünstigem Luft-/Brennstoffverhältnis λ, ermittelt werden und dieses Gebiet G1-G4 dann optimiert

werden. Nach der iterativen Optimierung erfolgt die Identifikation eines neuen Gebiets G1-G4 mit nun verbrennungstechnisch maximal ungünstigem Luft-/Brennstoffverhältnis λ.

[0076] Das erfindungsgemäße Verfahren sowie die korrespondierende Vorrichtung 10 ist besonders vorteilhaft auch für Fälle, in denen ein oder mehrere Brenner 2 ausgefallen sind oder bewusst im Teillastbereich nicht betrieben werden. Hier kann durch gezielte Ansteuerung des Luft-/Brennstoffmassenstroms der anderen Brenner 2 wiederum eine optimale Verbrennung bewerkstelligt werden.

Bezugszeichenliste

[0077]

1	Feuerraum, Brennraum, Verbrennungsraum
2, 2_1-2_8	Brenner
3	Brennstoffeinblasvorrichtung
4	Lüfter
5	Messkamera, Videokamera
10	Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens
11	Mittel zur Erfassung eines Istwertes
12	Mittel zur Ausgabe eines Sollwertes
13	Messmittel
14	rechnergestützte Mittel, Computer
A	Ausbrandbereich
A_B, A_{B1}-A_{B8}	Brennstoffanteil
A_L, A_{L1}-A_{L8}	Luftanteil
BE	Brennerebene
CFD	numerisches Simulationsmodell
CMP	Vergleichsblock
dV	Volumenelement
E	Brennschicht
F	Flamme
G1-G4	verbrennungstechnisch ungünstige Gebiete
ID	Identifizierungsblock
IW	Istwert
λ	Luft-/Brennstoffverhältnis
λ_{xy}	Luft-/Brennstoffverhältnis in der xy-Ebene
M	Messebene
$\dot{m}_B$, $\dot{m}_{B1}$-$\dot{m}_{B8}$	Brennstoffmassenstrom
$\dot{m}_L$, $\dot{m}_{L1}$-$\dot{m}_{L8}$	Luftmassenstrom
P	Pyrolysebereich
SW	Sollwert
ΔSW	korrigierter Sollwert
T_1-T_8	Flammentemperatur
T_B	Brennstofftemperatur
T_L	Lufttemperatur
V	Verbrennungsraumvolumen
v, v_1-v_8	Geschwindigkeitseinblasvektor
V_R	messtechnisch ermittelte örtliche Verteilung
V_S	örtliche Verteilung im Simulationsmodell
x,y,z	Bezugskoordinaten
Z	Zündbereich
ZA	Zünd-/Ausbrandbereich

Patentansprüche

1. Verfahren zur Verbesserung der Verbrennung in einem Feuerraum (1), insbesondere eines Kraftwerks, wobei mehrere Brenner (2) in einer Brennerschicht (E) oder in einer anderen Geometrie angeordnet sind und wobei bei zumindest einem Teil der Brenner (2) ein Brennstoff- und/oder Luftmassenstrom ($\dot{m}_B$, $\dot{m}_L$) eingestellt werden kann, wobei in einem darüberliegenden Zünd-/Ausbrandbereich (ZA) eine örtliche Verteilung (V_R) einer die Verbrennungsqualität charakterisierenden Kenngröße (λ, T) messtechnisch ermittelt wird, und wobei basierend auf der örtlichen Verteilung (V_R) zumindest ein Gebiet (G1-G4) mit einer hinsichtlich der Verbrennungsqualität ungünstigen Kenngröße (λ, T) identifiziert wird,
dadurch gekennzeichnet,

   - **dass** ein für eine Strömungs-, Pyrolyse- und Verbrennungssimulation wesentlicher Teil des Feuerraums (1) in einem numerischen Simulationsmodell (CDF) abgebildet wird, aufgeteilt in eine Vielzahl von Volumenelementen (dV),
   - **dass** bei der numerischen Simulation eines jeden Volumenelements (dV) die Herkunft der von jeweiligen Brennern (2) stammenden Brennstoff- und Luftanteile (A_B, A_L) fortlaufend und für sich getrennt mitberücksichtigt wird,
   - **dass** eine der messtechnisch ermittelten örtlichen Verteilung (V_R) im Simulationsmodell (CFD) örtlich entsprechende Verteilung (V_S) der Brennstoff- und Luftanteile (A_B, A_L) ermittelt wird, und
   - **dass** für das jeweilige identifizierte Gebiet (G1-G4) der hinsichtlich der ermittelten Brennstoff- und Luftanteile (A_B, A_L) maßgebliche zumindest eine Brenner (2) ermittelt wird, um die Verbrennung durch eine Korrektur des jeweiligen Brennstoff- und/oder Luftmassenstroms ($\dot{m}_B$, $\dot{m}_L$) zu verbessern.

2. Verfahren nach Anspruch 1, wobei dem Brennstoff und/oder der Luft für einen jeweiligen Brenner (2) eine Substanz beigemischt wird, wobei die Substanz während der Verbrennung im Feuerraum (1) eine Leuchtspur hinterlässt, wobei mittels eines spektral auf die Leuchtspur abgestimmten optischen Messsystems die örtliche und zeitliche Ausbreitung der Substanz erfasst wird und wobei eine mit der tatsächlichen Ausbreitung der Substanz einhergehende tatsächliche Ausbreitung des vom jeweiligen

Brenner (2) stammenden Brennstoffs und der vom jeweiligen Brenner (2) stammenden Luft im numerischen Simulationsmodell (CDF) als Randbedingung übernommen wird.

3. Verfahren nach Anspruch 2, wobei die Verfahrensschritte gemäß Anspruch 2 bei jedem einzelnen der Brenner (2) insbesondere wiederholt angewendet werden.

4. Verfahren nach einem der vorherigen Ansprüche, wobei wiederholt, vorzugsweise zyklisch, der zumindest eine maßgebliche Brenner (2) ermittelt wird und wobei automatisiert der jeweilige Brennstoff- und/oder Luftmassenstrom ($\dot{m}_B$, $\dot{m}_L$) korrigiert wird.

5. Verfahren nach einem der vorherigen Ansprüche, wobei der Feuerraum (1), die geometrische Anordnung und Ausrichtung der Brenner (2) im Feuerraum (1), deren aktuell vorgegebener Geschwindigkeitseinblasvektor (v), deren jeweiliger aktuell vorgegebener Wert für den Brennstoff- und Luftmassenstrom ($\dot{m}_B$, $\dot{m}_L$) und/oder die aktuell vorgegebene Temperatur (T_B, T_L) des jeweiligen Brennstoff- und Luftmassenstroms ($\dot{m}_B$, $\dot{m}_L$) im numerischen Simulationsmodell (CFD) abgebildet werden.

6. Verfahren nach einem der vorherigen Ansprüche, wobei das Strömungs-, Pyrolyse- und Verbrennungs-Simulationsmodell ein Computational-Fluid-Dynamics-Simulationsmodell (CFD) ist, welches die dynamischen Strömungs-, Pyrolyse- und Verbrennungsvorgänge im Feuerraum (1) durch strömungsmechanische Modellgleichungen wie Navier-Stokes-, Euler- oder Potentialgleichungen beschreibt.

7. Verfahren nach Anspruch 6, wobei zur approximativen Lösung der Navier-Stokes-, Euler- oder Potentialgleichungen des Computational-Fluid-Dynamics-Simulationsmodells (CDF) eine Finite-Volumen-Methode verwendet wird.

8. Verfahren nach einem der vorherigen Ansprüche, wobei die die Verbrennungsqualität charakterisierende, messtechnisch ermittelte Kenngröße (λ, T) ein Luft-/Brennstoffverhältnis (λ), eine Temperatur (T) und/oder der CO-, NO_x-, O_2- oder CO_2-Anteil in dem im Zünd-/Ausbrandbereich (ZA) vorliegenden Rauchgas ist.

9. Verfahren nach Anspruch 8, wobei zur messtechnischen Ermittlung der örtlichen Verteilung des Luft-/Brennstoffverhältnisses (λ) im Zünd-/Ausbrandbereich (ZA) ein kameragestütztes Verfahren verwendet wird, bei dem die Bildungsraten der bei der Verbrennung gebildeten chemischen Reaktionsprodukte CN und CO ermittelt werden, wobei das Verhältnis der ermittelten Bildungsraten als eine das Luft-/Brennstoffverhältnis (λ) repräsentierende Größe gebildet wird.

10. Verfahren nach einem der vorherigen Ansprüche 2 bis 8, wobei zur messtechnischen Ermittlung der örtlichen Verteilung des Luft-/Brennstoffverhältnisses (λ) im Zünd-/Ausbrandbereich (ZA) sowie zur optischen Erfassung der bei der Ausbreitung der Substanz emittierten Leuchtspur ein gemeinsames kameragestütztes Verfahren verwendet wird.

11. Verwendung des Verfahrens nach einem der vorherigen Ansprüche zur Verbesserung der Verbrennung in einem fossilen thermischen Kraftwerk oder in einer Industrieanlage.

12. Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 10, wobei die Vorrichtung hierzu aufweist

- Mittel (11) zur Erfassung eines Istwertes (IW) zumindest des aktuellen Brennstoff- und/oder Luftmassenstroms ($\dot{m}_B$, $\dot{m}_L$) eines jeweiligen Brenners (2),
- Mittel (12) zur Ausgabe eines Sollwertes (SW) an eine Stelleinrichtung für den Brennstoff- und/oder Luftmassenstroms ($\dot{m}_B$, $\dot{m}_L$) eines jeweiligen Brenners (2),
- Messmittel (13) zur Ermittlung einer im Zünd-/Ausbrandbereich (ZA) vorliegenden örtlichen Verteilung (V_R) einer die Verbrennungsqualität charakterisierenden Kenngröße (λ, T), und
- rechnergestützte Mittel (14)

  - zur Simulation reagierender Strömungen in einem Feuerraum (1) mittels eines numerischen Strömungs-, Pyrolyse- und Verbrennungs-Simulationsmodells (CFD),
  - zur Ermittlung einer der messtechnisch ermittelten örtlichen Verteilung (V_R) im Simulationsmodell (CFD) örtlich entsprechenden Verteilung (V_S) der Brennstoff- und Luftanteile (A_B, A_L),
  - zur Identifikation zumindest eines dortigen Gebiets (G1-G4) mit einer hinsichtlich der Verbrennungsqualität ungünstigen Kenngröße (λ, T),
  - zur Ermittlung des maßgeblichen zumindest einen Brenners (2) hinsichtlich der simulierten Brennstoff- und Luftanteile (A_B, A_L, sowie
  - zur Ausgabe eines korrigierten Sollwertes (SW') für den Brennstoff- und/oder Luftmassenstroms ($\dot{m}_B$,$\dot{m}_L$) an die Stelleinrichtung eines jeweiligen Brenners (2).

13. Vorrichtung nach Anspruch 12 zur Durchführung des Verfahrens nach einem der Ansprüche 2 bis 10, wobei die Vorrichtung hierzu aufweist

- Mittel zum individuellen Ansteuern eines Beimischers zum Beimischen einer Substanz in den Brennstoff und/oder in der Luft eines jeweiligen Brenners (2), wobei die Substanz während der Verbrennung im Feuerraum (1) eine Leuchtspur hinterlässt,
- ein kameragestütztes Messsystem (13) zur Ermittlung einer im Zünd-/Ausbrandbereich (ZA) vorliegenden örtlichen Verteilung (V_R) einer die Verbrennungsqualität charakterisierenden Kenngröße (λ, T) sowie zur optischen Erfassung einer spektral signifikanten und sich örtlich sowie zeitlich ausbreitenden Leuchtspur, und
- die rechnergestützten Mittel (14)zur Simulation reagierender Strömungen im Feuerraum (1) mittels des numerischen Strömungs-, Pyrolyse- und Verbrennungs-Simulationsmodells (CFD) und zur Übernahme der tatsächlichen Ausbreitung des vom jeweiligen Brenner (2) stammenden Brennstoffs und der vom jeweiligen Brenner (2) stammenden Luft auf Basis der erfassten Ausbreitung der Leuchtspur als Randbedingung im numerischen Simulationsmodell (CDF).

14. Vorrichtung nach Anspruch 12 oder 13, wobei der jeweilige Brenner (2) eine Brennstoffeinblasvorrichtung (3) sowie einen darunterliegenden und/oder darüberliegenden Lüfter (4) umfasst.

Claims

1. Method for improving the combustion in a combustion chamber (1), in particular of a power plant, wherein a plurality of burners (2) are arranged in a burner layer (E) or in another geometry and wherein a fuel and/or air mass flow ($\dot{m}_B$, $\dot{m}_L$) may be adjusted in at least some of the burners (2), wherein a local distribution (V_R) of a characteristic (λ, T) characterizing the combustion quality is ascertained by metrological means in an overlying ignition/combustion region (ZA) and wherein at least one area (G1-G4) with an inexpedient characteristic (λ, T) in respect of the combustion quality is identified on the basis of the local distribution (V_R),
characterized

- **in that** part of the combustion chamber (1) essential for a flow, pyrolysis and combustion simulation is mapped to a numerical simulation model (CDF), subdivided into a multiplicity of volume elements (dV),
- **in that** the origin of the fuel and air portions (A_B, A_L) originating from the respective burners (2) are also considered continuously and separately in the numerical simulation of each volume element (dV),
- **in that** a distribution (V_S) of the fuel and air portions (A_B, A_L) locally corresponding to the local distribution (V_R) in the simulation model (CFD) ascertained by metrological means is ascertained, and
- **in that** the at least one burner (2) which is decisive in respect of the ascertained fuel and air portions (A_B, A_L) is ascertained for the respectively identified area (G1-G4) in order to improve the combustion by correcting the respective fuel and/or air mass flow ($\dot{m}_B$, $\dot{m}_L$).

2. Method according to Claim 1, wherein a substance is added to the fuel and/or the air for a respective burner (2), wherein the substance leaves a luminous trace during the combustion in the combustion chamber (1), wherein the local and temporal propagation of the substance is captured by means of an optical measuring system matched spectrally to the luminous trace and wherein an actual propagation of the fuel originating from the respective burner (2) and of the air originating from the respective burner (2) accompanying the actual propagation of the substance are included as boundary conditions in the numerical simulation model (CDF) .

3. Method according to Claim 2, wherein the method steps according to Claim 2 are applied, in particular repeatedly, at each individual burner (2).

4. Method according to one of the preceding claims, wherein the at least one decisive burner (2) is ascertained repeatedly, preferably cyclically, and wherein the respective fuel and/or air mass flow ($\dot{m}_B$, $\dot{m}_L$) is corrected in an automated manner.

5. Method according to one of the preceding claims, wherein the combustion chamber (1), the geometric arrangement and alignment of the burners (2) in the combustion chamber (1), their current predetermined blowing-in velocity vector (v), their respective currently predetermined value for the fuel and air mass flow ($\dot{m}_B$, $\dot{m}_L$) and/or the current predetermined temperature (T_B, T_L) of the respective fuel and air mass flow ($\dot{m}_B$, $\dot{m}_L$) is mapped in the numerical simulation model (CFD) .

6. Method according to one of the preceding claims, wherein the flow, pyrolysis and combustion simulation model is a computational fluid dynamics simulation model (CFD), which describes the dynamic flow, pyrolysis and combustion processes in the combustion chamber (1) by fluid mechanical model equations such as the Navier-Stokes equation, the Euler equation or potential equations.

7. Method according to Claim 6, wherein a finite volume method is used for the approximate solution of the Navier-Stokes equation, Euler equation or potential equations of the computational fluid dynamics simulation model (CDF).

8. Method according to one of the preceding claims, wherein the characteristic (A, T) characterizing the combustion quality and ascertained by metrological means is an air/fuel ratio (λ), a temperature (T) and/or the CO, NO_x, O_2 or CO_2 content in the flue gas present in the ignition/combustion region (ZA).

9. Method according to Claim 8, wherein a camera-assisted method is used for the metrological ascertainment of the local distribution of the air/fuel ratio (λ) in the ignition/combustion region (ZA), with the formation rates of the chemical reaction products CN and CO formed during the combustion being ascertained in said camera-assisted method, wherein the ratio of the ascertained formation rates is formed as a variable representing the air/fuel ratio (A).

10. Method according to one of the preceding Claims 2 to 8, wherein a common camera-assisted method is used for the metrological ascertainment of the local distribution of the air/fuel ratio (λ) in the ignition/combustion region (ZA) and for the optical capture of the luminous trace emitted during the propagation of the substance.

11. Use of the method according to one of the preceding claims for improving the combustion in a fossil-fuel-based thermal power plant or in an industrial installation.

12. Apparatus for carrying out the method according to one of Claims 1 to 10, wherein, to this end, the apparatus comprises

- means (11) for capturing an actual value (IW) of at least the current fuel and/or air mass flow ($\dot{m}_B$, $\dot{m}_L$) of a respective burner (2),
- means (12) for outputting an intended value (SW) to an actuator for the fuel and/or air mass flow ($\dot{m}_B$, $\dot{m}_L$) of a respective burner (2),
- measuring means (13) for ascertaining a local distribution (V_R), present in the ignition/combustion region (ZA), of a characteristic (λ, T) characterizing the combustion quality and
- computer-assisted means (14)

  - for simulating reacting flows in a combustion chamber (1) by means of a numerical flow, pyrolysis and combustion simulation model (CFD),
  - for ascertaining a distribution (V_S) of the fuel and air portions (A_B, A_L) locally corresponding to the local distribution (V_R) in the simulation model (CFD) ascertained by metrological means,
  - for identifying at least one area (G1-G4) therein which has an inexpedient characteristic (λ, T) in respect of the combustion quality,
  - for ascertaining the decisive at least one burner (2) in respect of the simulated fuel and air portions (A_B, A_L) and
  - for outputting the corrected intended value (SW') for the fuel and/or air mass flow ($\dot{m}_B$, $\dot{m}_L$) to the actuator of the respective burner (2).

13. Apparatus according to Claim 12 for carrying out the method according to one of Claims 2 to 10, wherein, to this end, the apparatus comprises

  - means for individually actuating a mixer for adding a substance into the fuel and/or into the air of the respective burner (2), wherein the substance leaves a luminous trace during the combustion in the combustion chamber (1),
  - a camera-assisted measuring system (13) for ascertaining a local distribution (V_R), present in the ignition/combustion region (ZA), of a characteristic (λ, T) characterizing the combustion quality and for optically capturing a spectrally significant luminous trace propagating both spatially and temporally and
  - the computer-assisted means (14) for simulating reacting flows in a combustion chamber (1) by means of a numerical flow, pyrolysis and combustion simulation model (CFD) and for adopting the actual propagation of the fuel originating from the respective burner (2) and of the air originating from the respective burner (2) as a boundary condition in the numerical simulation model (CDF) on the basis of the captured propagation of the luminous trace.

14. Apparatus according to Claim 12 or 13, wherein the respective burner (2) comprises a fuel injection apparatus (3) and an underlying or overlying fan (4).

Revendications

1. Procédé d'amélioration de la combustion dans un foyer (1), en particulier d'une centrale électrique, dans lequel
plusieurs brûleurs (2) sont disposés en une couche (E) de brûleurs ou suivant une autre géométrie et
les débits massiques de combustible et/ou d'air ($\dot{m}_B$. $\dot{m}_L$) pouvant être réglés sur au moins une partie des brûleurs (2),
une répartition locale (V_R) d'une grandeur caracté-

ristique (λ, T) qui caractérise la qualité de la combustion étant déterminée par technique de mesure dans une zone d'allumage/de combustion (ZA) située au-dessus et
au moins un domaine (G1-G4) ayant une grandeur caractéristique (λ, T) défavorable en ce qui concerne la qualité de combustion étant identifié sur la base de la répartition locale (V_R),
caractérisé en ce que
une partie du foyer (1) essentielle pour une simulation des écoulements, de la pyrolyse et de la combustion est représentée dans un modèle numérique de simulation (CDF) divisé en plusieurs éléments de volume (dV),
en ce que dans la simulation numérique de chaque élément de volume (dV), la provenance des apports de combustible et d'air (A_B, A_L) provenant de chaque brûleur (2) est suivie en permanence et prise en compte séparément des autres,
en ce qu'une répartition (V_S) des apports de combustible et d'air (A_B, A_L) qui correspond localement dans le modèle de simulation (CFD) à la répartition locale (V_R) déterminée par technique de mesure est déterminée et
en ce que pour chaque domaine (G1-G4) identifié, l'au moins un brûleur (2) déterminant pour les apports de combustible et d'air (A_B, A_L,) qui ont été déterminés est déterminé pour améliorer la combustion par correction du débit massique de combustible et/ou d'air ($\dot{m}_B$, $\dot{m}_L$) concerné.

2. Procédé selon la revendication 1, dans lequel une substance est ajoutée au combustible et/ou à l'air pour un brûleur (2) concerné, la substance laissant dans le foyer (1) une trace lumineuse lors de sa combustion, la propagation locale et temporelle de la substance étant saisie au moyen d'un système de mesure optique accordé spectralement à la trace lumineuse et une propagation effective du combustible provenant du brûleur (2) concerné et de l'air provenant du brûleur (2) concerné qui découle de la propagation effective de la substance étant incorporée en tant que condition aux limites dans le modèle de simulation numérique (CDF).

3. Procédé selon la revendication 2, dans lequel les étapes de procédé selon la revendication 2 sont appliquées en particulier de manière répétée pour chacun des brûleurs (2).

4. Procédé selon l'une des revendications précédentes, dans lequel le ou les brûleurs déterminants (2) sont déterminés de manière répétée, de préférence cycliquement, et le débit massique de combustible et/ou d'air ($\dot{m}_B$, $\dot{m}_L$) est corrigé de manière automatique.

5. Procédé selon l'une des revendications précédentes, dans lequel le foyer (1), l'agencement géométrique et l'orientation des brûleurs (2) dans le foyer (1), leur vecteur (v) de vitesse d'injection effectif prédéterminé, leur valeur effective respective prédéterminée du débit massique de combustible et d'air ($\dot{m}_B$, $\dot{m}_L$) et/ou la température effective prédéterminée (T_B, T_L) du débit massique de combustible et d'air ($\dot{m}_B$, $\dot{m}_L$) sont représentées dans le modèle de simulation numérique (CFD).

6. Procédé selon l'une des revendications précédentes, dans lequel le modèle de simulation d'écoulement, de pyrolyse et de combustion est un modèle de simulation de dynamique des fluides par calcul (CFD) qui décrit les processus dynamiques d'écoulement, de pyrolyse et de combustion, dans le foyer (1) par des équations de modélisation de mécanique des écoulements, par exemple des équations de Navier-Stokes, d'Euler ou de potentiel.

7. Procédé selon la revendication 6, dans lequel une méthode à volumes finis est utilisée pour résoudre de manière approchée les équations de Navier-Stokes, d'Euler ou de potentiel du modèle de simulation de dynamique des fluides par calcul.

8. Procédé selon l'une des revendications précédentes, dans lequel la grandeur caractéristique (λ, T), déterminée par technique de mesure, qui caractérise la qualité de la combustion est un rapport air-combustible (λ), une température (T) et/ou la teneur en CO, en NO_x, en O_2 ou en CO_2 des gaz de fumée présents dans la zone d'allumage/de combustion (ZA).

9. Procédé selon la revendication 8, dans lequel pour déterminer par technique de mesure la répartition locale du rapport air-combustible (λ) dans la zone d'allumage/de combustion (ZA), on utilise un procédé assisté par caméra dans lequel les taux de formation des produits chimiques de réaction CN et CO formés lors de la combustion sont déterminés, le rapport entre les taux de formation déterminés étant formé sous la forme d'une grandeur qui représente le rapport air/combustible (λ) .

10. Procédé selon l'une des revendications 2 à 8 qui précèdent, dans lequel on utilise un procédé conjoint assisté par caméra pour déterminer par technique de mesure la répartition locale du rapport air/combustible (λ) dans la zone d'allumage/de combustion (ZA) ainsi que pour saisir optiquement la trace lumineuse émise lors de la propagation de la substance.

11. Utilisation du procédé selon l'une des revendications précédentes pour améliorer la combustion dans une centrale thermique à combustible fossile ou dans une installation industrielle.

12. Ensemble en vue de la mise en oeuvre du procédé selon l'une des revendications 1 à 10, l'ensemble présentant dans ce but :

des moyens (11) permettant de saisir la valeur effective (IW) d'au moins le débit massique effectif de combustible et/ou d'air ($\dot{m}_B$, $\dot{m}_L$) d'un brûleur (2) concerné,
des moyens (12) qui délivrent une valeur de consigne (SW) à un dispositif de réglage du débit massique de combustible et/ou d'air ($\dot{m}_B$, $\dot{m}_L$) d'un brûleur (2) concerné,
des moyens de mesure (13) qui déterminent une répartition locale (V_R) dans la zone d'allumage et de combustion (ZA) d'une grandeur caractéristique (λ, T) qui caractérise la qualité de combustion et
des moyens (14) assistés par ordinateur
pour simuler des écoulements réactifs dans un foyer (1) au moyen d'un modèle numérique de simulation des écoulements, de la pyrolyse et de la combustion (CFD),
pour déterminer une répartition (V_S) des apports de combustible et d'air (A_B, A_L) qui correspond localement dans le modèle de simulation (CFD) à la répartition locale (V_R) déterminée par technique de mesure,
pour identifier au moins un domaine (G1-G4) qui s'y trouve, ayant une grandeur caractéristique (λ, T) défavorable en ce qui concerne la qualité de combustion,
pour déterminer le ou les brûleurs (2) déterminants pour les apports simulés de combustible et d'air (A_B, A_L) et
pour délivrer une valeur de consigne corrigée (SW') du débit massique de combustible et/ou d'air ($\dot{m}_B$, $\dot{m}_L$) au dispositif de réglage d'un brûleur (2) concerné.

13. Ensemble selon la revendication 12 en vue de la mise en oeuvre du procédé selon l'une des revendications 2 à 10, l'ensemble présentant dans ce but :

des moyens de commande individuelle d'un mélangeur qui mélange une substance au combustible et/ou à l'air d'un brûleur (2) concerné, la substance laissant une trace lumineuse pendant sa combustion dans le foyer (1),
un système de mesure (13) assisté par caméra qui détermine une répartition locale (V_R) présente dans la zone d'allumage et de combustion (ZA) d'une grandeur caractéristique (λ, T) qui caractérise la qualité de combustion, et pour saisir optiquement une trace lumineuse spectralement significative et se propageant localement ainsi que temporellement et
les moyens (14) assistés par calculateur pour la simulation d'écoulements réactifs dans le foyer (1) au moyen du modèle (CFD) de simulation numérique des écoulements, de la pyrolyse et de la combustion et pour faire intervenir la propagation effective du combustible provenant du brûleur (2) concerné et de l'air provenant du brûleur (2) concerné sur la base de la propagation saisie de la trace lumineuse comme condition aux limites dans le modèle de simulation numérique (CDF).

14. Ensemble selon la revendication 12 ou 13, dans lequel le brûleur (2) concerné comporte un ensemble (3) d'injection de combustible ainsi qu'un ventilateur (4) situé en dessous et/ou au-dessus de cet ensemble.

FIG 1

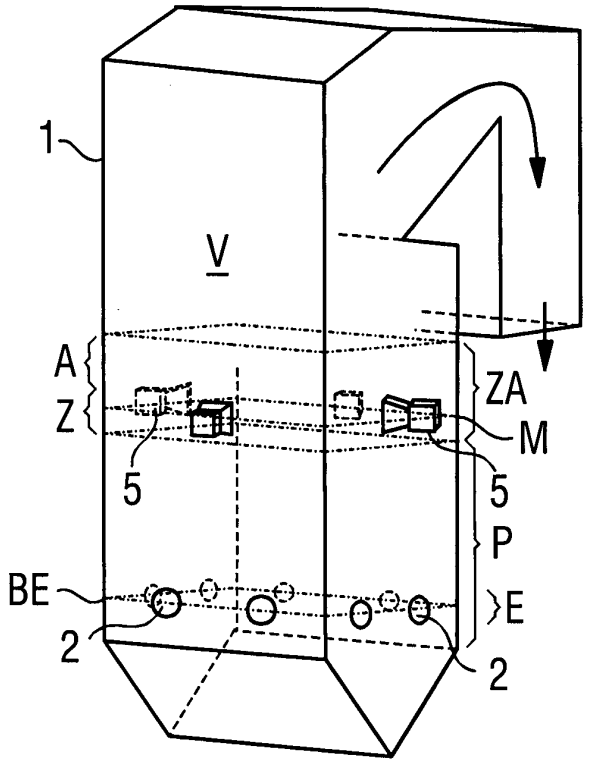


FIG 2

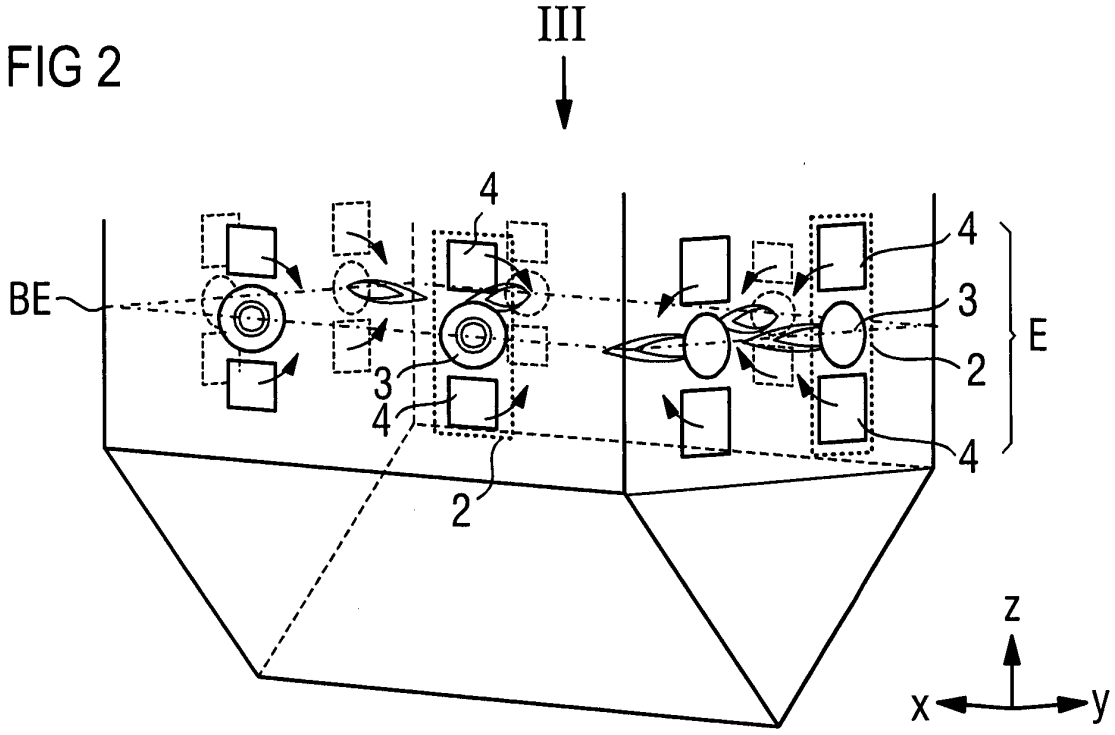


FIG 3

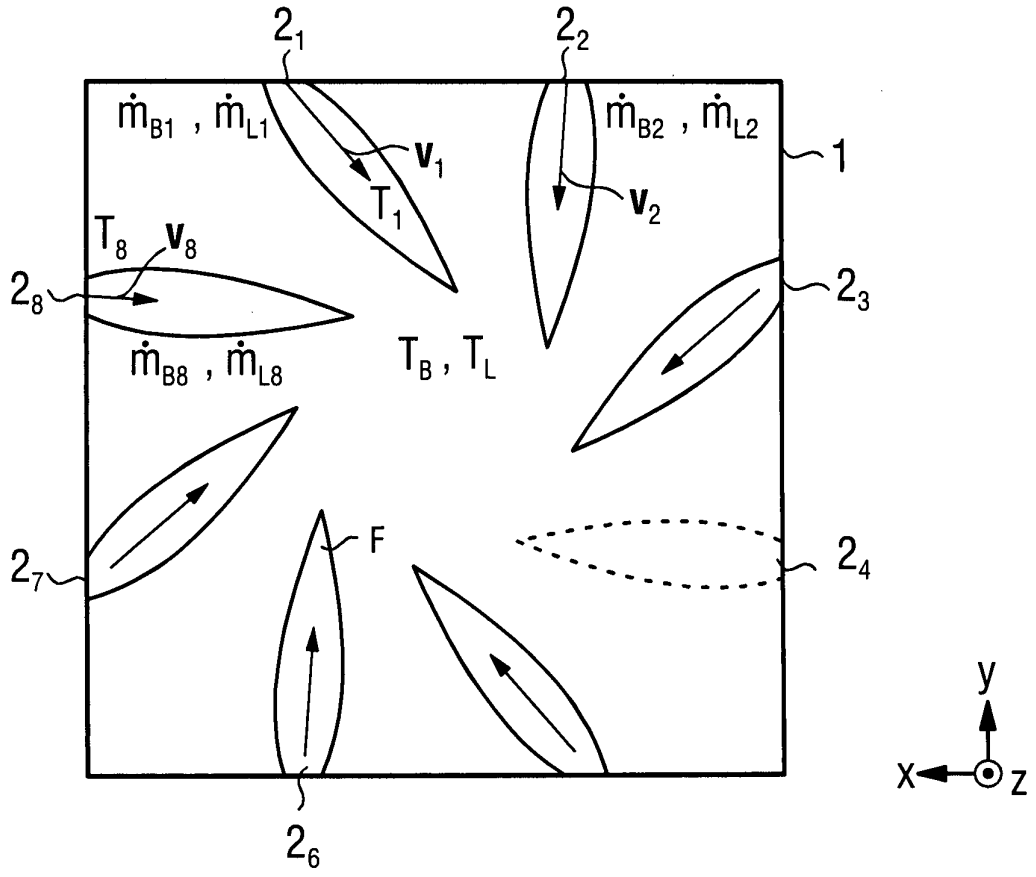

2₁
2₂
ṁB1 , ṁL1
ṁB2 , ṁL2
v1
v2
T1
1
T8
v8
28
23
ṁB8 , ṁL8
TB , TL
F
27
24
26
y
x
z

FIG 4

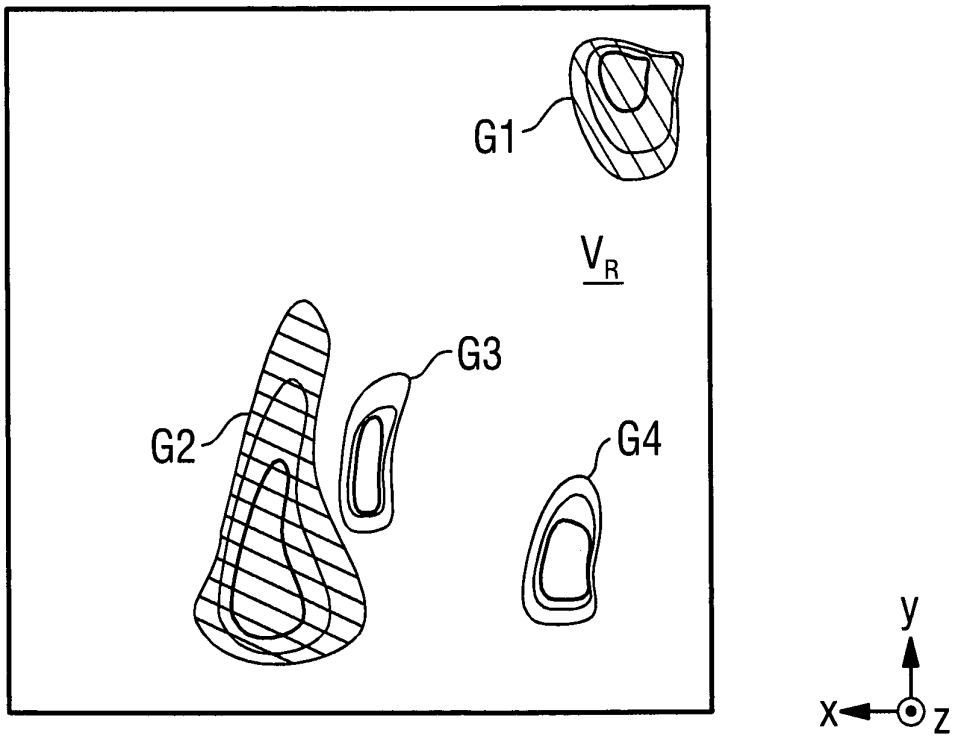

G1
VR
G3
G2
G4
y
x
z

FIG 5

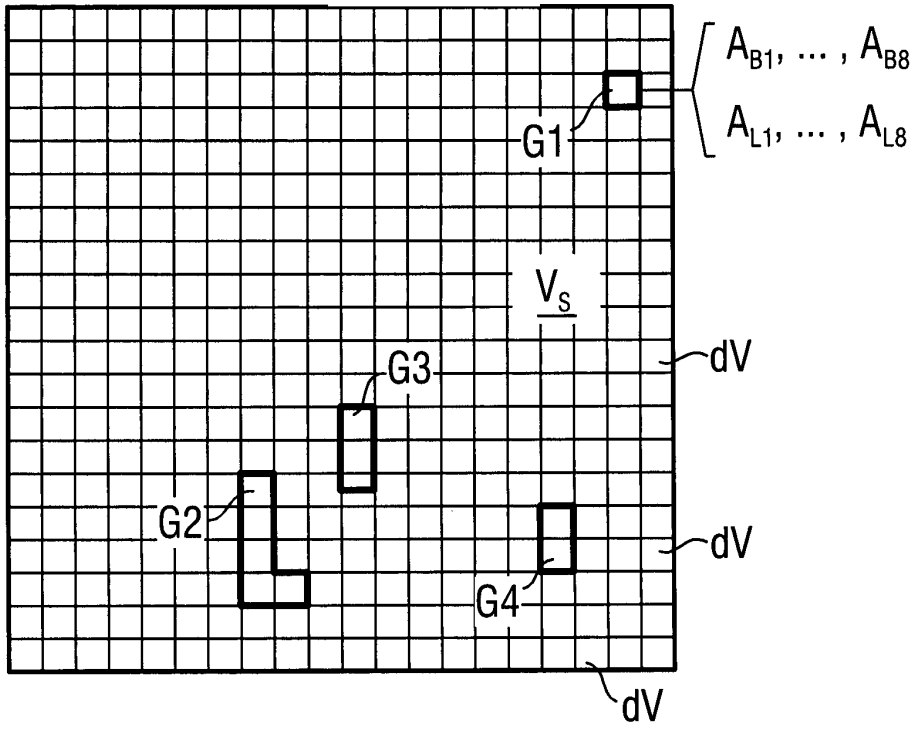
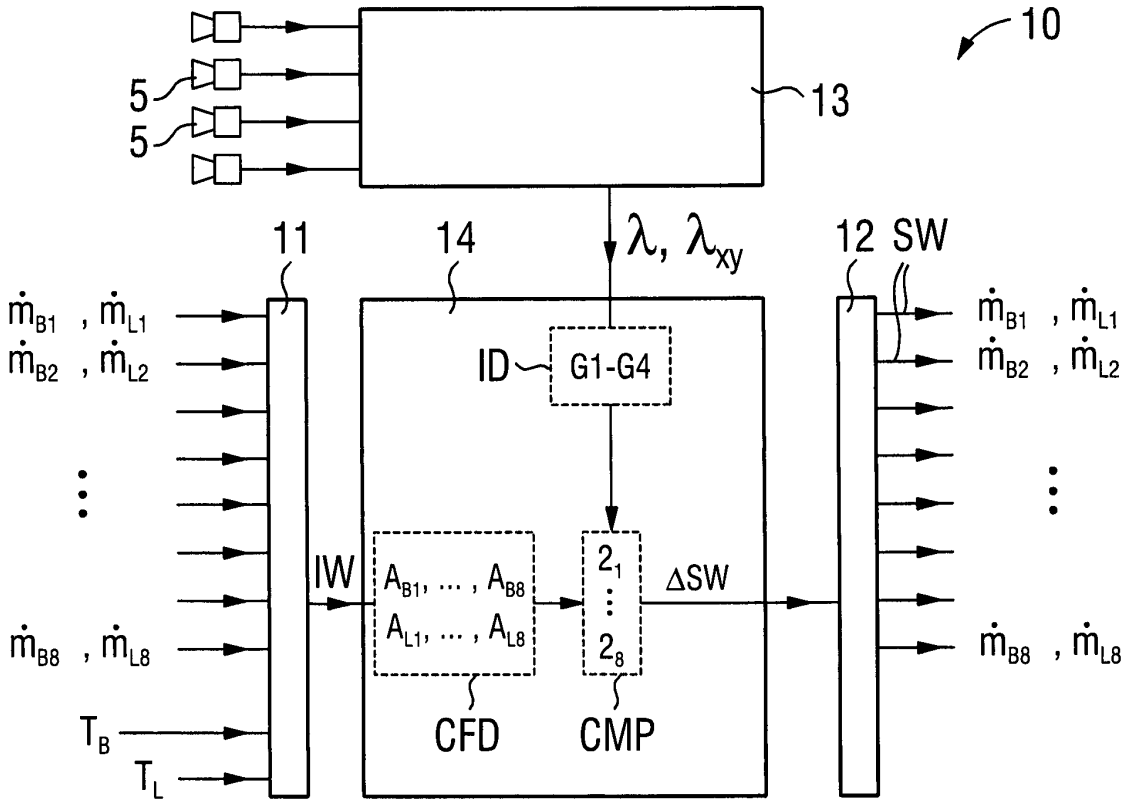

$A_{B1}, \ldots, A_{B8}$
$A_{L1}, \ldots, A_{L8}$
G1
V_S
dV
G3
G2
dV
G4
dV

FIG 6


10
5
5
13
11
14
λ, λ_{xy}
12 SW
$\dot{m}_{B1}$, $\dot{m}_{L1}$
$\dot{m}_{B2}$, $\dot{m}_{L2}$
ID
G1-G4
IW
$A_{B1}, \ldots, A_{B8}$
$A_{L1}, \ldots, A_{L8}$
2_1
2_8
ΔSW
$\dot{m}_{B8}$, $\dot{m}_{L8}$
T_B
T_L
CFD
CMP

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 Patentdokumente

- US 20110056416 A1 **[0004]**
- DE 19710206 A1 **[0015]**
- EP 1091175 A2 **[0016] [0050] [0051]**

In der Beschreibung aufgeführte Nicht-Patentliteratur

- **VON BERND EPPLE et al.** Simulation von Kraftwerken und wärmetechnischen Anlagen. Springer Verlag Wien, 2009 **[0021]**