

(19)



(11)

**EP 4 571 188 A1**

(12)

## EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG

(43) Veröffentlichungstag:  
**18.06.2025 Patentblatt 2025/25**

(21) Anmeldenummer: **24216916.7**

(22) Anmeldetag: **02.12.2024**

(51) Internationale Patentklassifikation (IPC):  
**F23N 5/00** <sup>(2006.01)</sup>      **F23N 5/08** <sup>(2006.01)</sup>  
**F23B 30/00** <sup>(2006.01)</sup>      **F23G 7/10** <sup>(2006.01)</sup>

(52) Gemeinsame Patentklassifikation (CPC):  
**F23B 1/00; F23G 7/10; F23N 5/003; F23N 5/082;**  
**F23G 2207/103; F23G 2207/104; F23G 2207/105;**  
**F23G 2207/106; F23G 2209/26; F23N 2223/08;**  
**F23N 2229/20; F23N 2900/05001;**  
**F23N 2900/05002; F23N 2900/05003**

(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 ME MK MT NL**  
**NO PL PT RO RS SE SI SK SM TR**  
Benannte Erstreckungsstaaten:  
**BA**  
Benannte Validierungsstaaten:  
**GE KH MA MD TN**

(30) Priorität: **12.12.2023 DE 102023134832**

(71) Anmelder: **SiO2 Ventures GmbH**  
**80809 München Bayern (DE)**

(72) Erfinder:  
• **Dukanovic, Aleksandar**  
**80809 München (DE)**  
• **Miskovic, Aleksandar**  
**80809 München (DE)**  
• **Polzer, Matthias**  
**80809 München (DE)**

(74) Vertreter: **Hannke, Christian**  
**Hannke Bittner & Partner**  
**Patent- und Rechtsanwälte mbB**  
**Prüfeninger Straße 1**  
**93049 Regensburg (DE)**

(54) **VERFAHREN UND VORRICHTUNG ZUR VERBESSERUNG DES WIRKUNGSGRADS UND/ ODER DER REDUZIERUNG DER FEINSTAUBBILDUNG EINER VERBRENNUNG**

(57) Die Erfindung betrifft eine Vorrichtung (1) zur Analyse einer Verbrennung eines brennbaren Materials in einer Feuerstätte, mit einer einen optischen Sensor umfassende Sensoreinrichtung, welche zur Aufnahme eines Bildes und/oder einer Bildsequenz der Verbrennung vorgesehen und eingerichtet ist, und einer Rechereinrichtung, welche mit der Sensoreinrichtung in Datenverbindung steht oder zu welcher eine Datenverbindung ausbildbar ist, und welche mit einer Ausgabeeinrichtung in Datenverbindung steht oder zu welcher eine Datenverbindung ausbildbar ist, wobei die Ausgabeeinrichtung zur Ausgabe eines Signals vorgesehen und/oder eingerichtet ist, welches zu einem einen Wert korreliert, der für einen Wirkungsgrad der Verbrennung und/oder für eine bei der Verbrennung entstehende Feinstaubmenge charakteristisch ist. Weiterhin betrifft die Erfindung ein Verfahren zur Analyse einer Verbrennung eines brennbaren Materials in einer Feuerstätte sowie einen maschinenlesbaren Programmcode, welcher dieses Verfahren oder Teile davon codiert. Außerdem betrifft die Erfindung ein maschinenlesbares Speichermedium, auf welchem ein solcher maschinenlesbarer Programmcode gespeichert ist.

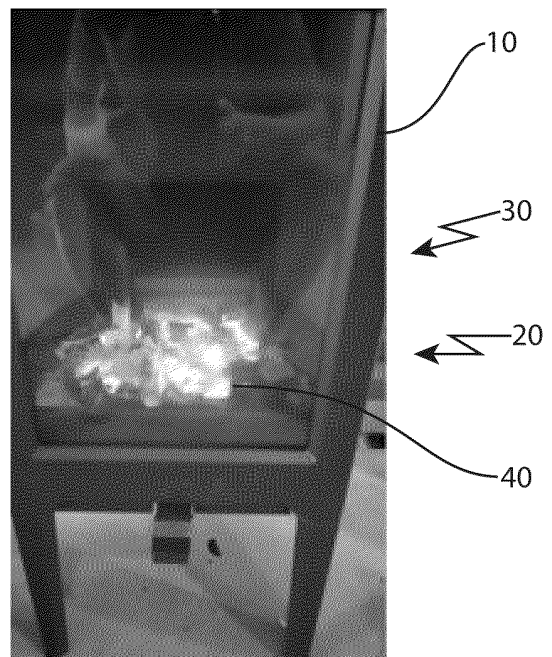


Fig. 1A

**EP 4 571 188 A1**

## Beschreibung

**[0001]** Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren und eine Vorrichtung zur Verbesserung des Wirkungsgrads und/oder der Reduzierung der Feinstaubbildung einer Verbrennung.

**[0002]** Aus dem Stand der Technik ist bekannt, dass einige Al-haltige Verbindungen wie beispielsweise  $Al_2O_3$ ,  $Al(OH)_3$ , Bauxit, Talkum und/oder Kaolin bzw. Kaolinit (aber auch kaolinhaltige Tone) bei der Verbrennung von Feststoffen als Additive zugesetzt werden können und die Bildung von Feinstaub reduzieren. Ebenfalls ist bekannt, dass der Wirkungsgrad einer Verbrennung durch eine Steuerung der Luft- bzw. Sauerstoffzufuhr erhöht werden kann.

**[0003]** So ist beispielsweise aus DE 10 2020 128 231 A1 eine Verbrennungsanlage bekannt, welche einen Kaolinit-speicher und Dosierer zur Abgabe von Kaolinit in den Verbrennungsprozess umfasst.

**[0004]** Weiterhin ist aus DE 10 2014 210 614 B4 bekannt, dass durch den Zusatz einer aluminiumhaltigen anorganischen Verbindung als ein asche- und/oder feinstaubvermindernden Additiv auch Rohstoffe wie zum Beispiel Schnitzel aus Kurzumtriebsplantagen (KUP), Stroh, Getreide und dergleichen für die Herstellung von Pellets für Heizzwecke in Kleinfeuerungsanlagen nutzbar gemacht werden können.

**[0005]** Außerdem ist aus EP 4 056 898 A1 bekannt, dass Parameter wie der Sauerstoffgehalt, die Abgastemperatur und die Brennkammertemperatur in einer Biomasse-Heizanlage ermittelt werden können und dazu genutzt werden können, die Biomasse-Heizanlage zu regeln. Für diese Regelung kann ein KI-Modell genutzt werden.

**[0006]** Die Anmelderin hat bei ihren internen, noch nicht veröffentlichten Untersuchungen festgestellt, dass der Effekt der Feinstaubreduzierung nicht in jedem Fall mit der Menge des Zusatzes eines feinstaubreduzierenden Materials korreliert. Insbesondere beim Einsatz von Scheitholz als Brennmaterial in Einzelraumfeuerstätten sind die erhaltenen Ergebnisse hinsichtlich der Feinstaubentwicklung stark schwankend. Sie führt dies auf verschiedene Effekte zurück, wobei als besonders kritisch Schwankungen im Verbrennungsverlauf eingestuft werden konnten. Diese Schwankungen im Verbrennungsverlauf treten insbesondere in Einzelraumfeuerstätten auf. Diese sind üblicherweise nicht mit Sensoren ausgestattet, um die für die Verbrennung relevanten Parameter messen und die Einzelraumfeuerstätte dementsprechend ansteuern bzw. regeln zu können.

**[0007]** Es besteht daher der Bedarf, eine Vorrichtung und ein Verfahren bereitzustellen, um einen in der Feuerstätte ablaufenden Verbrennungsprozess hinsichtlich dessen Wirkungsgrad und/oder der Feinstaubbildung zu bewerten und basierend auf einem Bewertungsergebnis eine Regelung der Feuerstätte beziehungsweise des in der Feuerstätte ablaufenden Verbrennungsprozess vornehmen zu können.

**[0008]** Sind im Ofen integrierte Sensoren vorhanden, wäre es dabei bevorzugt, Daten eines solchen Sensors in die Bewertung einfließen zu lassen. Vorzugsweise sollte jedoch unabhängig davon, ob in der Feuerstätte integrierten Sensoren zur Messung von Daten des in der Feuerstätte ablaufenden Verbrennungsprozesses zur Verfügung stehen oder nicht eine Bewertung hinsichtlich des Wirkungsgrads und/oder der Feinstaubbildung des Verbrennungsprozesses möglich sein.

**[0009]** Diese Aufgabe kann durch die Gegenstände der unabhängigen Patentansprüche gelöst werden. Bevorzugte Ausführungsformen sind im Folgenden als solche beschrieben und/oder Gegenstand der abhängigen Ansprüche.

**[0010]** Eine erfindungsgemäße Vorrichtung zur Analyse einer Verbrennung eines brennbaren Materials in einer Feuerstätte zeichnet sich dadurch aus, dass sie eine einen Sensor, beispielsweise einen optischen Sensor, umfassende Sensoreinrichtung umfasst, welche zur Aufnahme von Daten aus dem Verbrennungsprozess vorgesehen und eingerichtet ist, beispielsweise als (vorzugsweise kontinuierliche) Messung der Menge von Staub in der Abluft innerhalb des Ofens und/oder durch Aufnahme eines Bildes und/oder einer Bildsequenz der Verbrennung. Die Sensoreinrichtung kann im Ofen oder außerhalb des Ofens angeordnet sein. Sind mehrere Sensoren oder Sensoreinrichtungen vorhanden, können Daten einer oder mehrerer dieser Sensoren oder Sensoreinrichtungen zur Analyse der Verbrennung herangezogen werden.

**[0011]** Außerdem weist die Vorrichtung eine Rechneinrichtung auf, welche mit der Sensoreinrichtung und/oder den Sensoreinrichtungen in Datenverbindung steht oder zu welcher eine Datenverbindung ausbildbar ist, und welche mit einer Ausgabeeinrichtung in Datenverbindung steht oder zu welcher eine Datenverbindung ausbildbar ist. Die Ausgabeeinrichtung ist zur Ausgabe eines Signals vorgesehen und/oder eingerichtet, welches zu einem einen Wert korreliert, der für einen Wirkungsgrad der Verbrennung und/oder für eine bei der Verbrennung entstehende Feinstaubmenge charakteristisch ist.

**[0012]** Durch eine solche Vorrichtung ist es besonders einfach möglich, eine Verbrennung hinsichtlich ihres Wirkungsgrads und/oder der Feinstaubbildung zu analysieren und gegebenenfalls Maßnahmen zur Verbesserung der Verbrennung, also der Erhöhung des Wirkungsgrads und/oder der Reduzierung der produzierten Feinstaubmenge zu ergreifen.

**[0013]** In einer ersten bevorzugten Ausführungsform der Vorrichtung ist die Sensoreinrichtung, beispielsweise der optische Sensor, kein integraler Teil der Feuerstätte. Weiter bevorzugt ist die Sensoreinrichtung, beispielsweise der optische Sensor, in einem Gehäuse angeordnet, welches relativ zu der Feuerstätte, insbesondere relativ zu einer Brennkammer der Feuerstätte, in der die Verbrennung des brennbaren Materials stattfindet, bewegbar ist.

**[0014]** Dadurch ist es möglich, die Sensoreinrichtung, beispielsweise den optischen Sensor, so zu platzieren, dass eine

besonders genaue Analyse der Verbrennung möglich ist. Außerdem kann durch die Möglichkeit, den Sensor relativ zu der Feuerstelle zu bewegen, erreicht werden, dass ein Sensor zur Analyse einer Mehrzahl von Verbrennungen in verschiedenen Feuerstätten genutzt werden kann. Dadurch ergibt sich ein Kostenvorteil, da nicht jeder Feuerstätte mit einer solchen Sensoreinrichtung ausgestattet werden muss.

5 **[0015]** Die vorliegende Erfindung ist im Folgenden am Beispiel eines optischen Sensors beschrieben. Ein optischer Sensor ist dabei vorzugsweise Teil einer Sensoreinrichtung. Dementsprechend sollen die für das Beispiel des optischen Sensors offenbaren Aspekte der Erfindung allgemein auch für jegliche Art von Sensoreinrichtungen gelten. Eine solche Sensoreinrichtung kann einen oder mehrere (gegebenenfalls verschiedene) Sensoren aufweisen.

10 **[0016]** Vorzugsweise ist der optische Sensor, und vorzugsweise die Sensoreinrichtung in einem gemeinsamen Gehäuse mit einer Datenübertragungseinrichtung angeordnet. Eine solche Datenübertragungseinrichtung ist dazu vorgesehen und eingerichtet, eine bevorzugt zumindest abschnittsweise drahtlose Datenverbindung zu der Rechneinrichtung bereitzustellen.

15 **[0017]** Eine solche Datenübertragungseinrichtung kann demnach dazu verwendet werden, die vom Sensor erzeugten Daten an eine Rechneinrichtung zu übertragen. Eine Analyse der Sensordaten kann dann durch die Rechneinrichtung erfolgen. Dadurch kann die Einheit, die den optischen Sensor umfasst, besonders kompakt ausgeführt sein. Dies verbessert die Mobilität und Transportierbarkeit der Einheit, die den optischen Sensor umfasst. Darüber hinaus ist es vergleichsweise einfach, eine vom Sensor beabstandete Rechneinrichtung entsprechend der Bedürfnisse zu skalieren. So kann die Rechenleistung der Rechneinrichtung auch auf gegebenenfalls veränderte Anforderungen eingestellt werden.

20 **[0018]** In einer weiteren bevorzugten Ausführungsform der Vorrichtung ist ein Sensor, und vorzugsweise eine Sensoreinrichtung, integraler Teil der Feuerstätte. Dadurch ist es möglich, den (optischen) Sensor so zu platzieren, dass eine dem Ofen angepasste und replizierbare Messung stattfindet. Die Messgenauigkeit kann erhöht werden und - insbesondere, wenn eine relative Position des Sensors bezüglich der Brennkammer unverändert bleibt - kann eine Veränderung der Sensordaten eindeutig veränderten Bedingungen innerhalb der Brennkammer zugeordnet werden und  
25 äußere Einflüsse aufgrund einer veränderten Sensorposition weitgehend ausgeschlossen werden.

**[0019]** Vorzugsweise ist der (bevorzugt optische) Sensor über eine Datenübertragungseinrichtung mit der Rechneinrichtung verbunden oder verbindbar. Die Datenübertragungseinrichtung kann eine drahtlose und/oder kabelgebundene Datenübertragung bereitstellen. Die Datenübertragungseinrichtung kann in einem gemeinsamen Gehäuse mit dem Sensor angeordnet oder getrennt von diesem angeordnet sein. Sie kann (ggf. gemeinsam mit dem Sensor innerhalb des  
30 Ofens (beziehungsweise der Feuerstätte) angeordnet sein, ist jedoch vorzugsweise um thermische Belastung zu verringern außerhalb der Brennkammer, vorzugsweise auch außerhalb des Ofens angeordnet.

**[0020]** Eine solche Datenübertragungseinrichtung kann vorzugsweise dazu verwendet werden, ofenspezifisch dauerhaft und selektiv Optimierungen vorzunehmen.

35 **[0021]** Vorzugsweise ist mindestens ein von einem Sensor aus dem Verbrennungsprozess aufgenommenes Datum charakteristisch für einen Parameter der Verbrennung, welcher ausgewählt ist aus einer Gruppe, die ein Flammenbild, eine Temperatur, einen (Gas-) Druck, eine Brennstoffmenge, einen Brennstoffzustand (beispielsweise feucht/trocken) und eine eingestellte Gas- oder Luftzufuhr umfasst. Diese Parameter haben sich als besonders geeignet erwiesen, um die Qualität der Verbrennung zu beurteilen.

40 **[0022]** Vorzugsweise ist ein Sensor ein Abgassensor, welcher bevorzugt einen Parameter des Abgases bestimmt, welcher ausgewählt ist aus einer Gruppe, die einen CO-Gehalt, einen CO<sub>2</sub>-Gehalt, einen Feinstaubgehalt, einen Wasser(-dampf)-gehalt, einen Sauerstoffgehalt, einen Kohlenwasserstoffgehalt, einen Rußgehalt, einen Teergehalt, einen NO<sub>x</sub>-Gehalt, einen S<sub>x</sub>O<sub>y</sub>-Gehalt, einen (Unter-) Druck und eine (Strömungs-) Geschwindigkeit umfasst. Diese Parameter haben sich als besonders geeignet erwiesen, um einerseits das Abgas zu charakterisieren, andererseits aber auch Rückschlüsse auf die Qualität der Verbrennung schließen zu können.

45 **[0023]** Als besonders geeignete Sensoren zur Bestimmung eines oder mehrerer der oben genannten Parameter haben sich Sensoren als besonders geeignet erwiesen, die ausgewählt sind aus einer Gruppe, die NDIR Sensor (beispielsweise zur Bestimmung von CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, CO, C<sub>n</sub>H<sub>2n</sub>), optischer Sensor (Flammenbild), CCD-Sensor, Elektrochemische Sensoren (O<sub>2</sub>, CO), Absorptionshygrometer, Taupunktspiegelhygrometer, Aspirationshygrometer (Wasser, Feuchtigkeit), gravimetrischer Sensor (Partikel & Feinstaub), Lichtsensor / Laser Scattering / Lichtbrechung (Feinstaub und Gaspartikeln), Halbleitermembran (z.B. Schornsteinunterdruck), Thermoelement (Temperatur) und Lambdasonde umfasst. Derartige Sensoren sind ausreichend sensibel zur Detektion der relevanten Parameter, gut verfügbar und vergleichsweise günstig in der Anschaffung und Wartung.

50 **[0024]** Die Rechneinrichtung ist in beiden oben beschriebenen Ausführungsformen vorzugsweise Teil eines Computernetzwerks. Auch dadurch ist eine vereinfachte Skalierbarkeit gegeben, beispielsweise durch Auslagerung von Rechenleistung an zusätzliche Rechneinrichtungen im Computernetzwerk. Außerdem ist es möglich eine Rechneinrichtung zur Analyse der Sensordaten mehrerer verschiedener Sensoren verwenden, wodurch die Auslastung der Rechneinrichtung erhöht werden kann. Außerdem ist es möglich, der Rechneinrichtung während Zeiten der Nichtnutzung andere Aufgaben zuzuweisen, um deren Auslastung zu erhöhen.

**[0025]** Ist die Rechneinrichtung beispielsweise über das Internet mit dem optischen Sensor oder weiteren Rechneinrichtungen verbunden, keine Rechnerleistung auf mehrere Computer im Computernetzwerk verteilt werden. Dadurch ist eine Lastverteilung möglich und Analyseergebnisse können schneller bereitgestellt werden.

**[0026]** Bevorzugt umfasst die Sensoreinrichtung mehrere Sensoren, wobei durch mindestens zwei Sensoren voneinander verschiedene physikalischer Parameter der Verbrennung detektierbar sind. Dadurch ist es möglich, dass Parameter der Verbrennung durch einen Sensor detektiert werden, welche für den jeweils anderen Sensor nicht wahrnehmbar sind. So wäre beispielsweise denkbar, dass einer der Sensoren ein optischer Sensor ist, wohingegen ein anderer Sensor ein Temperatursensor oder ein Gassensor ist. Bei einer solchen Kombination könnte durch den optischen Sensor ein Flammenbild detektiert werden, wohingegen der andere Sensor ein Temperaturprofil des Verbrennungsprozesses oder eine Zusammensetzung des Abgases detektiert. Durch eine solche Kombination verschiedener Sensoren kann der Verbrennungsprozesses detaillierter analysiert werden und eine Anpassung der Verbrennungsparameter zu Optimierung des Verbrennungsprozesses und/oder der Feinstaubbildung ist leichter möglich.

**[0027]** Vorzugsweise sind mindestens zwei Sensoren optische Sensoren. Dabei ist vorzugsweise jeder dieser mindestens zwei optischen Sensoren jeweils zur Aufnahme eines Bildes und/oder einer Bildsequenz der Verbrennung in einem von dem anderen dieser mindestens zwei optischen Sensoren verschiedenen Wellenlängenbereich vorgesehen und eingerichtet ist. Wird ein Bild oder eine Bildsequenz der Verbrennung bei verschiedenen Wellenlängenbereichen aufgezeichnet, können Flammen- und/oder Glutbilder verschiedener Wellenlängenbereiche zur Analyse herangezogen werden. Eine solche Betrachtung verschiedener Wellenlängenbereiche kann auch ein Aufschluss über die Temperaturverteilung innerhalb einer Flamme oder der Brennkammer bieten. Die Kenntnis eines Temperaturprofils ermöglicht es wiederum, Parameter innerhalb der Feuerstätte so zu steuern, dass die Verbrennung bei einem höheren Wirkungsgrad und/oder bei geringerer Feinstaubbildung abläuft. Denkbar wäre diesbezüglich beispielsweise, dass ein Gasstrom so gesteuert wird, dass in den Bereichen, in denen eine sehr geringe Verbrennungstemperatur detektiert wurde erhöht wird, sodass dort die Verbrennung beschleunigt wird.

**[0028]** Bevorzugt ist eine Vorrichtung bei der die Ausgabeeinrichtung

- eine Anzeigeeinrichtung ist, welche vorzugsweise in einem gemeinsamen Gehäuse mit dem Sensor und/oder der Sensoreinrichtung angeordnet ist und/oder zur Anzeige einer Handlungsempfehlung zur Erhöhung des Wirkungsgrads der Verbrennung und/oder der Verminderung der bei der Verbrennung entstehenden Feinstaubmenge vorgesehen und eingerichtet ist, oder
- eine Steuereinrichtung ist, durch welche ein Steuerbefehl an die Feuerstätte gebbar ist, welcher zu einer Erhöhung des Wirkungsgrads der Verbrennung und/oder der Verminderung der bei der Verbrennung entstehenden Feinstaubmenge korreliert.

**[0029]** Ist die Ausgabeeinrichtung eine Anzeigeeinrichtung, kann einem Benutzer darauf angezeigt werden, welche Schritte er unternehmen sollte, um den Wirkungsgrad der Verbrennung zu erhöhen und/oder eine Verminderung der bei der Verbrennung entstehenden Feinstaubmenge zu erwirken. Bei der Anzeigeeinrichtung könnte sich beispielsweise um einen Bildschirm handeln, welcher durch entsprechende animierte Grafiken anzeigt, welche Schritte möglichst durchgeführt werden sollten, um die gewünschte Wirkung zu erhalten.

**[0030]** In einer besonders bevorzugten Ausführungsform ist mindestens ein Sensor ein Teil eines Mobilfunkgeräts, beispielsweise eine Kamera des Mobilfunkgeräts, beispielsweise eines Smartphones. Über eine Datenverbindung (beispielsweise einer Mobilfunkverbindung, mobilen Datenverbindung (3G, 4G, UMTS, EDGE, 5G)) kann es mit einer externen Rechneinrichtung verbunden sein. Ergänzend oder alternativ dazu könnte als Rechneinrichtung auch ein Prozessor des Mobiltelefons dienen. Ein Bildschirm des Mobiltelefons könnte als Ausgabeeinrichtung fungieren.

**[0031]** Es hat sich als besonders vorteilhaft gezeigt, dass in einer Ausführungsform die Anzeigeeinrichtung in einem gemeinsamen Gehäuse mit dem Sensor und/oder der Sensoreinrichtung angeordnet sein kann. Da der Sensor ohnehin zur Detektion der Parameter der Verbrennung in der Nähe der Feuerstätte sein sollte, ist in diesem Fall auch die Anzeigeeinrichtung in der unmittelbaren Nähe der Feuerstätte. So hat die handhabende Person leicht Zugang zu der Feuerstätte und kann die notwendigen und auf der Anzeigeeinrichtung angezeigten Handlungsanweisungen unmittelbar umsetzen.

**[0032]** Ist die Ausgabeeinrichtung eine Steuereinrichtung, die einen Steuerbefehl an die Feuerstätte ausgeben kann, kann dieses Steuereinrichtung gegebenenfalls ohne dass eine Person involviert ist, die Feuerstätte so ansteuern, dass der Wirkungsgrad der Verbrennung erhöht wird und/oder die Verminderung der bei der Verbrennung entstehenden Feinstaubmenge eintritt. Beispielsweise könnte ein Regler zur Steuerung eines Zuluftstroms entsprechend angesteuert werden, um (gegebenenfalls lokal) eine schnellere Verbrennung und (lokale) höhere Temperatur zu erreichen.

**[0033]** Die Steuereinrichtung könnte auch einen Steuerbefehl senden, welcher eine Zuführung von Brenngut in die Brennkammer der Feuerstätte auslöst. Dies ist dann bevorzugt, wenn durch die Rechneinrichtung aus den Sensordaten berechnet wird, dass zur effizienten Aufrechterhaltung der Verbrennung weiteres Brennmaterial sinnvoll wäre.

**[0034]** Weiterhin ist ein Verfahren zur Analyse einer Verbrennung eines brennbaren Materials in einer Feuerstätte eine

Lösung der zugrundeliegenden Aufgabe. Dieses Verfahren ist durch die folgenden Schritte gekennzeichnet:

- Aufnehmen eines Datums aus dem Verbrennungsprozess und/oder eines Bildes und/oder einer Bildsequenz der Verbrennung durch eine einen Sensor umfassende Sensoreinrichtung,
- Übermitteln der Sensordaten an eine Rechneinrichtung,
- Klassifizieren der Sensordaten oder darauf basierender Daten durch die Rechneinrichtung,
- Ausgeben eines Signals, welches zu einem einen Wert korreliert, der für einen Wirkungsgrad der Verbrennung und/oder einer Feinstaubbildung charakteristisch ist.

**[0035]** Durch ein solches Verfahren kann besonders einfach analysiert werden, ob eine Verbrennung effizient abläuft und/oder die Feinstaubbildung innerhalb vorgegebener Grenzen liegt. Vorzugsweise wird dieses Verfahren in verschiedene Prozessabschnitte aufgeteilt, die lokal voneinander getrennt ablaufen. So ist insbesondere bevorzugt, dass das Aufnehmen des Datums durch den Sensor an einem anderen Ort erfolgt als das Klassifizieren der (Bild-) Daten durch die Rechneinrichtung. Insbesondere ist dazu die Rechneinrichtung nicht in einem gemeinsamen Gehäuse mit dem Sensor angeordnet. Insbesondere ist bevorzugt, dass die Rechneinrichtung über ein Computernetzwerk, beispielsweise über das Internet, mit dem Sensor verbunden ist.

**[0036]** Vorzugsweise werden von der (bevorzugt prozessor-basierten) Rechneinrichtung, durch die (bzw. mittels der) Sensoreinrichtung in Bezug auf die Verbrennung ermittelten, insbesondere örtlich, zeitlich und/oder thermisch aufgelöste, Verbrennungsdaten empfangen (insbesondere im Rahmen eines Computer-implementierten Verfahrensschritt). Unter "empfangen" kann dabei eine Datenübertragung etwa über einen digitalen Datenaustausch und/oder über ein (wenigstens teilweise und bevorzugt in seiner Gesamtheit) drahtgebundenes und/oder drahtloses Netzwerk verstanden werden. Weiterhin kann insbesondere unter "empfangen" auch ein Weiterleiten und/oder Abrufen von durch die Sensoreinrichtung ermittelte und/oder aufgenommene Umfelddaten verstanden werden.

**[0037]** Weiterhin ist die (insbesondere Prozessor-basierte) Rechneinrichtung dazu vorgesehen und eingerichtet ein Verfahren auszuführen (insbesondere in einem Computer-implementierten Verfahrensschritt) vorzugsweise ein Verarbeiten von für die Verbrennung charakteristischen Daten, bevorzugt unter Verwendung eines, insbesondere trainierbaren, Modells maschinellen Lernens. Dabei umfasst das Modell bevorzugt einen Satz, insbesondere trainierbarer, Parameter, welche auf Werte eingestellt sind, die als Ergebnis eines Trainingsprozesses gelernt wurden. Weiterhin wird (hierdurch bzw. durch das Verarbeiten) wenigstens eine Benachrichtigungsgröße ermittelt, welche für ein optisches Sensorsignal, insbesondere für eine Bedeutung des optischen Sensorsignals in Bezug auf die einen Wirkungsgrad einer Verbrennung und/oder einem Feinstabgehalt im Abgas, charakteristisch ist. Bevorzugt handelt es sich bei den für die Verbrennung charakteristischen Daten um die Sensordaten und insbesondere um aus von der wenigstens einen Sensoreinrichtung ermittelten und/oder erzeugten (Roh-)Sensordaten und/oder hiervon abgeleiteten Daten.

**[0038]** Bevorzugt erfolgt die Berechnung der Benachrichtigungsgröße unter Verwendung einer Prozeessoreinrichtung und/oder Datenverarbeitungseinrichtung, mittels Anwendung wenigstens eines (computerimplementierten) Computer-Vision-Verfahrens, in welchem (computer-implementierte) Wahrnehmungs- und/oder Erfassungsaufgaben ausgeführt werden, beispielsweise (computer-implementierte) 2D- und/oder 3D- Objekterkennungsverfahren und/oder (computer-implementierte) Verfahren zur semantischen Segmentierung und/oder (computer-implementierte) Objektklassifizierung ("Image classification") und/oder (computer-implementierte) Objektlokalisierung.

**[0039]** Bevorzugt werden die von dem Sensor und/oder der Sensoreinrichtung erfassten Daten in einer (temporären und/oder lokalen) Speichereinrichtung abgelegt, vorzugsweise einer Speichereinrichtung der Rechneinrichtung. Bei der Speichereinrichtung kann es sich dabei um einen Ringspeicher handeln. Bevorzugt werden lediglich die Bilddaten einer vorgegebenen Dauer eines Verbrennungsvorgangs, einer bestimmten Feuerstätte und/oder eines vorgegebenen Speicherplatzes (bevorzugt in der Speichereinrichtung der Rechneinrichtung) bereitgehalten. Besonders bevorzugt werden die Bilddaten nach Überschreiten der vorgegebenen Dauer eines Verbrennungsvorgangs und/oder des vorgegebenen Speicherplatzes überschrieben und/oder gelöscht.

**[0040]** Die Auswertung der Bilddaten erfolgt in der Auswerteeinrichtung bevorzugt unter Ausnutzung eines künstlichen neuronalen Netzwerks beziehungsweise einer künstlichen Intelligenz (KI).

**[0041]** Vorzugsweise ist das System künstlicher Intelligenz zumindest dazu eingerichtet und trainiert, einen, vorzugsweise mehrere für den Verbrennungsprozess charakteristischen Parameter aus den Sensordaten herzuleiten, wobei der charakteristische (oder die charakteristischen) Parameter ausgewählt sind aus einer Gruppe, die eine Flammentemperatur, ein Flammenbild eine Brennstoffmenge und einen Brennstoffzustand umfasst.

**[0042]** Vorzugsweise ist das System künstlicher Intelligenz dazu eingerichtet und trainiert, eine Flamme zu erkennen. Es hat sich gezeigt, dass die Erkennung einer Flamme alleine auf Basis einer Farbfilterung nicht ausreicht, um sicher eine Flamme zu bestimmen. Ebenso ist es nicht möglich, eine Flamme sicher auf Basis starrer Regeln zu Farb- und/oder Helligkeitsänderungen zu erkennen, da beispielsweise auch Farbänderungen beim Farbwechsel von LED-Lampen ein ähnliches Muster einer Farb- und/oder Helligkeitsänderungen aufweisen können.

**[0043]** Es hat sich jedoch gezeigt, dass eine Bilderklassifizierung durch ein System künstlicher Intelligenz (nach

Training) sehr gut in der Lage ist, eine Flamme in einem Bild zu erkennen und vorzugsweise auch deren Position zu bestimmen. Als besonders robust hat sich ein solches System gezeigt, wenn Videodaten zur Verfügung stehen. Einerseits ist es mit Videodaten besonders leicht möglich genügend Datensätze zum Trainieren der KI zu erzeugen. Durch die (zumindest für außenstehende) nahezu chaotisch wechselnde Form und Farbe einer Flamme ist es einer KI jedoch bei Videodaten auch mit besonders hoher Wahrscheinlichkeit möglich in jedem Frame/Bild des Videos eine Flamme (und vorzugsweise auch deren Position) korrekt zu erkennen.

[0044] Wie oben beschrieben ist es bevorzugt, dass durch das System künstlicher Intelligenz eine Position einer Flamme bestimmbar ist. Dadurch ist es möglich, eine sogenannte "Region of Interest" (ROI) zu bestimmen. Diese kann dann genauer analysiert werden. Die Beschränkung auf eine solche Region in einem Bild oder Video verringert den Arbeitsaufwand und damit benötigte Rechenleistung, (Arbeits-) Speicher und Rechenzeit.

[0045] Vorzugsweise wird in der ROI eine Farbfilterung durchgeführt. Dafür werden die Farbinformationen vorzugsweise in HSV- (hue, saturation, value) Farbraum konvertiert. Es hat sich gezeigt, dass für eine weitergehende Analyse (gegebenenfalls unabhängig voneinander) die H-Werte vorzugsweise zwischen 19% und 95% liegen, S-Werte vorzugsweise über 65% liegen und V-Werte bevorzugt über 70% liegen.

[0046] Vorzugsweise werden die einzelnen Pixel nach einem Helligkeitswert gefiltert. Es hat sich gezeigt, dass es vorteilhaft ist, Pixel mit einem Graustufenwert von mindestens 230 von 255 herauszufiltern und für die weitere Analyse heranzuziehen. Eine solche Filterung ermöglicht es, eine Flamme auch unter schlechten Umgebungsbedingungen erkennen zu können, beispielsweise in einer schlechteren Lichtumgebung, wie beispielsweise verstärkter Rauchbildung oder auf dunklen Aufnahmen.

[0047] Vorzugsweise wird nach einer auf der oben beschriebenen Pixelauswahl basierenden Erkennung der zu einer Flamme gehörenden Pixel aus diesen Pixeln ein Signal und/oder eine Funktion erstellt. Dafür werden Pixeln, die als zu einer Flamme gehörend erkannt wurden, jeweils der Wert 1 zugeordnet, anderen Pixeln der Wert 0. Bei einer Betrachtung im 2-dimensionalen Raum wird die Position der Flamme durch x- und y-Werte der mit dem Wert 1 belegten Punkte (Pixel) beschrieben.

[0048] Eine Bewegung der Flamme kann durch einen Vergleich dieser Werte ermittelt werden, welche auf Basis zweier zu unterschiedlichen Zeitpunkten aufgenommener Bilder (Frames) wie oben beschrieben berechnet sind. Dabei bilden vorzugsweise die von einem ersten Frame bestimmten x- und y-Werte eine ursprüngliche Position der Flamme ab. Eine Veränderung der x- und/oder y-Werte, die auf Basis zweier verschiedener Frames ermittelt wurden stehen für eine Bewegung der Flamme. Amplitude und Frequenz (sofern die Zeitdifferenz zwischen der Aufnahme der betrachteten Frames bekannt ist) dieser Bewegung können wichtige Hinweise auf Eigenschaften der Verbrennung liefern. So können beispielsweise Parameter wie eine hohe Amplitude und/oder Frequenz einem sogenannten "Flackern" der Flamme zugeordnet werden, was ein Zeichen für eine ungünstige und/oder zu starke Gaszufuhr und damit ineffiziente Verbrennung sein kann.

[0049] Das Training kann beispielsweise anhand verschiedener Bildsequenzen erfolgen, die nach obigem Muster analysiert werden und dann beispielsweise anhand von durch Fachexpertenmeinung und/oder (Abgas-) Messungen bestimmten (Qualitäts-) Klassen der Feuerung zugeordnet werden. Beispielsweise könnte eine Frequenz des Flackerns ("Flacker-Grad") ein zur Bewertung relevanter Parameter sein.

[0050] Der "Flacker-Grad" wird vorzugsweise mittels eine Autokorrelationsfunktion des Signals bestimmt. Die Funktion wird vorzugsweise sowohl für das ursprüngliche (Sensor-) Signal als auch für die absoluten Werte durchgeführt. Die resultierenden Signale unterscheiden sich in Abhängigkeit des "Flacker-Grads". Beispielhafte Werte für eine Flamme mit lediglich geringen Flammenbewegungen (also geringem Flacker-Grad) und für eine Flamme mit starker und/oder schneller Flammenbewegung (also hohem Flacker-Grad) sind in Tabelle 1 dargestellt:

Tabelle 1

Visuelle Bewertung der Flammenbewegung	Durchschnittswert einer Autokorrelationsfunktion des ursprünglichen Signals	Durchschnittswert der Beträge einer Autokorrelationsfunktion des ursprünglichen Signals	Durchschnittswert einer Autokorrelationsfunktion der Beträge des ursprünglichen Signals
ruhig / gering	1.72e-06	8.96e-05	3.50e-04
schnell / stark	-3.01e-06	4.0e-4	1.99e-3

[0051] Wie der Tabelle 1 zu entnehmen ist, sind bei einer Verbrennung mit schnellen / starken Flammenbewegungen (also hohem Flacker-Grad) die Schwankung der Werte sehr hoch und deswegen eine Betrachtung des Durchschnittswerts einer Autokorrelationsfunktion des ursprünglichen Signals nicht immer zielführend. Es hat sich daher gezeigt, dass die Nutzung der absoluten Werte (Beträge) einer Autokorrelationsfunktion des ursprünglichen Signals aussagekräftiger ist. Die Durchschnittswerte einer Autokorrelationsfunktion der Beträge (beziehungsweise der absoluten Werte) des

ursprünglichen Signals unterscheiden sich ausreichend stark, um die verschiedenen Flammenbilder sicher voneinander unterscheiden zu können.

**[0052]** Wegen besonderer Charakteristik der Signale ist es vorteilhaft auch weitere Parameter zu betrachten. Neben den in Tabelle 1 dargestellten Durchschnittswerten der unterschiedlichen verarbeiteten (oder ursprünglichen) Signale, hat es sich als vorteilhaft gezeigt, außerdem Varianzen und/oder Frequenzspektren der Signale in Betracht zu ziehen.

**[0053]** Vorzugsweise findet eine weitere Verarbeitung der (durch die Verarbeitung neu) gewonnenen Signale statt. Es hat sich gezeigt, dass dadurch die Robustheit der Ergebnisse verbessert werden kann. Insbesondere ist eine Verallgemeinerung der Signale und bessere Vergleichbarkeit gegeben. So können beispielsweise Einflussfaktoren wie eine Flammengröße und/oder eine Distanz zwischen Flamme und Sensor bei der Bewertung der Ergebnisse verringert werden. So ist auch ein Vergleich einer Nahaufnahme eines Feuers mit einer Distanzaufnahme eines Feuers möglich, obwohl eine Nahaufnahme absolut eine viel größere Flächenänderungen aufweist als eine Distanzaufnahme, da die Flächen der als relevant eingestuft Pixel unterschiedlich sind.

**[0054]** Vorzugsweise werden zur Bewertung durch das System künstlicher Intelligenz diesem eine Vielzahl von Daten bereitgestellt. Diese sind vorzugsweise mindestens 3, vorzugsweise 4, weiter bevorzugt 5, mehr bevorzugt 6, insbesondere bevorzugt 7 meist bevorzugt alle Daten aus einer Gruppe, die eine Varianz, einen Mittelwert, einen Frequenzgang, eine Frequenz-Amplitude, ein Frequenzspektrum, ein Ausgangssignal (Verhältnis Feuer / Frame), eine Änderung eines Ausgangssignals und eine Autokorrelationsfunktion umfasst. Wenn eine KI mehrere oder sogar alle diese Daten (beispielsweise zur Bestimmung eines Ausgangs) zur Verfügung hat, ist eine besonders genaue Analytik möglich und beispielsweise eine Veränderung einer Entfernung zwischen Sensor und Flamme kann korrekt erkannt und deren Einfluss herausgerechnet werden.

**[0055]** Vorzugsweise wird die KI auf verschiedene Öfen trainiert. Denkbar ist diesbezüglich beispielsweise, dass die KI auf bestimmte (vorzugsweise die am häufigsten vorkommenden) Ofen eingelernt wird. Dazu werden bevorzugt für den/die einzulernenden Ofentyp/en ein einzulernendes Flammenmuster erzwungen (beispielsweise unter Laborbedingungen / am Prüfstand). Diese/s Flammenmuster wird/werden dann als charakteristisch für bestimmte Brennvorgänge und/oder Ofentypen abgespeichert. Wird im Realbetrieb in einem solchen Ofentyp eine ähnlicher Flammentyp detektiert, kann ein solches abgespeichertes Mustersignal als eine Kreuzkorrelationsfunktion für das detektierte Signal (-muster) dienen und einem Ofenbediener eine Rückmeldung geben, inwieweit das aktuell detektierte Flammenmuster, von demjenigen abweicht, welches im Labor / am Prüfstand detektiert wurde.

**[0056]** Bevorzugt wird ein Rauschpegel des Flackerns der detektierten Flamme bestimmt. Dies hat sich als vorteilhaft erwiesen, da sich daraus ein Signalfilter bilden lässt. Eine Faltung mit dem Signalfilter kann als Ergebnis den oder die Ausreißer ergeben, welche wiederum weitere KI-Features (also KI-Merkmale, nämlich Merkmale und/oder Eingabeparameter die zum Training einer KI geeignet sind oder tatsächlich zum Training verwendet werden) darstellen und woraus weitere Hinweise auf das Flammenbild abgeleitet werden können.

**[0057]** In einer bevorzugten Variante werden aus den als relevant zur Bewertung des Verbrennungsprozessen eingestuft Pixeln die Farbwerte für die Temperaturbezeichnung analysiert. Vorzugsweise werden die Flammenfarben in verschiedenen Farbräumen bestimmt, bevorzugt in mindestens zwei Farbräumen ausgewählt aus HSV, RGB und LAB Farbraum. Die Werte der einzelnen Parameter werden vorzugsweise als KI-Features im Training verwendet.

**[0058]** Ebenfalls ist es möglich und in einigen Ausführungsformen bevorzugt, ein wie oben bestimmtes (zeitliches) Signal mittels einer Fouriertransformation in eine Spektralfunktion umgewandelt. Dies ermöglicht eine Verallgemeinerung der Signale, die nicht mehr von den tatsächlich gemessenen Sensorsignalen oder daraus abgeleiteten Größen z.B. von der Flammengröße abhängig sind. Dadurch ist es ebenfalls möglich, Einflüsse wie beispielsweise die Entfernung des (optischen) Sensors von der Flamme bei der Ermittlung der Sensordaten herauszurechnen. Wie oben bereits dargelegt, würde beispielsweise eine Analyse einer Nahaufnahme eines Feuers (bei gleichem Flammenmuster) eine (betragsmäßig) sehr viel größere Flächen-änderung ergeben auf als eine Fernaufnahme, da die Pixeloberflächen unterschiedlich sind. Nach Fouriertransformation und der Betrachtung von Frequenzbereichen sind diese Variablen normiert und dementsprechend ein besserer Vergleich der unter verschiedenen Bedingungen (beispielsweise Entfernungen) aufgenommenen Sensordaten möglich. Verschiedene Signale können beispielsweise in einem Spektrogramm dargestellt werden.

**[0059]** Ist ein Feuer erkannt, können weitere für den Verbrennungsprozess relevante Daten bestimmt werden. So ist es beispielsweise möglich, eine in der Brennkammer vorhandene Brennstoffmenge aus dem (beispielsweise wie oben beschrieben bestimmten) ROI zu bestimmen. Es hat sich als vorteilhaft gezeigt, dass der Brennstoff in der Brennkammer (auch als Feuerraum bezeichnet) eine Hälfte, vorzugsweise 1/3 der Höhe des Feuerraums nicht überschreitet. Sollte zu viel Brennstoff in der Brennkammer sein, kann ein Warnsignal ausgegeben werden.

**[0060]** Vorzugsweise wird zur Bestimmung der in der Brennkammer vorhandene Brennstoffmenge zunächst die ROI bestimmt. Diese Bestimmung liefert einerseits Informationen über den Ort der Brennkammer und die Flammenform. Bei Betrachtung dieser Parameter über einen Zeitraum lässt sich daraus mit großer Genauigkeit die Höhe des Feuerraums ermitteln, da diese meistens mit der Position der höchsten (detektierten) Flamme übereinstimmt. Gleichzeitig ist der Feuerraum aufgrund der darin befindlichen Flamme oftmals heller als die Umgebung oder eine äußere Brennkammer-

begrenzung. Somit ist eine recht genaue Bestimmung der Dimension der Brennkammer und der Menge des darin befindlichen Brennstoffs möglich. Zu viel Brennstoff und/oder eine schlechte Verteilung des Brennstoffs im Feuerraum können einen negativen Einfluss auf die Effizienz und/oder den Wirkungsgrad des Verbrennungsprozesses haben. Ebenso kann höhere Rußbildung und auch erhöhte Feinstaubemission verursacht werden.

5 **[0061]** Bevorzugt erfolgt auch eine Bestimmung eines Brennstoffzustands. Dies erfolgt vorzugsweise optisch durch ein System künstlicher Intelligenz. Eine (optische) Bestimmung des Brennstoffzustands ist dann besonders gut möglich, wenn eine Flamme detektierbar ist und somit besonders gute Bedingungen / Lichtverhältnisse zur Bestimmung eines Brennstoffzustands mittels visueller KI vorliegen. Vorzugsweise werden dabei der Brennstoff und/oder auf dem Brennstoff detektierbare Muster zur Bewertung herangezogen. Die Muster können vorzugsweise in Form von Rechtecken und/oder  
10 Dreiecken bestimmt werden, indem man mit visueller KI die dunkleren Ecken auf einem Brennstoff, beispielsweise einem Holzsplit analysiert. Je nach Stärke und Größe dieser (dunkleren) Grenzlinien lässt sich bestimmen, ob der Brennstoff eher eine kompakte oder brüchige Form hat.

**[0062]** Es hat sich gezeigt, dass eine Bewertung eines Brennstoffzustands insbesondere vorteilhaft ist, um einen Zeitpunkt zu bestimmen, zu dem weiterer Brennstoff in die Brennkammer zugeführt werden sollte. Ebenso können auch  
15 Hinweise auf eine eventuell nicht optimale Luft-(bzw. Gas-) -zufuhr /-regelung abgeleitet werden. Es hat sich gezeigt, dass einem kompakteren Brennstoff mehr Luft zugeführt werden sollte als einem brüchigen Brennstoff. Damit lassen sich weiterhin Wirkungsgrad, aber auch die Effizienz des Brennstoffverbrauchs optimieren. Die Optimierung hat direkten Einfluss auf Feinstaubemissionen, denn bei weniger verbranntem Brennstoff wird auch weniger Feinstaub produziert. So sorgt beispielsweise eine angepasste Luftregelung bei brüchigem Brennstoff dafür, dass der Brennstoff langsamer  
20 verbrennt, wobei der Wirkungsgrad des Ofens gleich bleibt oder steigt.

**[0063]** Bevorzugt wird wenigstens ein Benachrichtigungssignal zur Steuerung der Ausgabereinrichtung (beispielsweise zur Anzeige einer Handlungsanweisung auf einer Anzeigereinrichtung und/oder der Ausgabe eines Steuersignals) in Abhängigkeit der wenigstens einen Benachrichtigungsgröße bereitgestellt (insbesondere in einem Computer-implementierten Verfahrensschritt). Denkbar ist, dass es sich bei dem Benachrichtigungssignal um ein an einen Benutzer, etwa  
25 einen zur Steuerung der Feuerstätte befähigte Person und/oder eine andere Person, zu übermittelndes Signal.

**[0064]** In einer bevorzugten Variante des Verfahrens ist vorgesehen, dass es sich bei der Speichereinrichtung um eine externe Speichereinrichtung, insbesondere eine Cloud-basierte und/oder eine zentrale Speichereinrichtung, handelt. Dies hat den Vorteil, dass die Speicherkapazität besonders einfach und bevorzugt Feuerstättenunabhängig auf geänderte Anforderungen bezüglich der Speicherkapazität angepasst werden kann.

30 **[0065]** Alternativ oder ergänzend dazu ist einer bevorzugten Variante des Verfahrens vorgesehen, dass es sich bei der Rechereinrichtung um eine vom Sensor beabstandete Rechereinrichtung, insbesondere eine Cloud-basierte und/oder eine zentrale Rechereinrichtung, handelt. Dies hat den Vorteil, dass die Rechenkapazität besonders einfach und bevorzugt feuerstättenunabhängig auf geänderte Anforderungen bezüglich der Rechenkapazität angepasst werden kann. Insbesondere die Berücksichtigung hoch aufgelöster 3D-(Bild-)Daten des Verbrennungsprozesses sowie eventuell  
35 zu berücksichtigender meteorologischen Daten (insbesondere Luftdruck und Windgeschwindigkeit) sowie die Vorhersage von meteorologischen Daten für einen bestimmten Zeitabschnitt kann sehr große Datenmengen umfassen und rechenintensiv sein, so dass eine in ein gemeinsames Gehäuse mit der Sensoreinrichtung integrierte Rechereinrichtung dazu nicht oder zumindest nicht in einer annehmbaren Zeit in der Lage ist. Weiterhin hat eine Cloud-basierte und/oder eine zentrale Rechereinrichtung den Vorteil, dass eventuell fehlerhafte Daten von einer einzelnen Feuerstätte als solche  
40 identifiziert werden können und entsprechend (nicht) bei einem Training eines Modells maschinellen Lernens berücksichtigt werden.

**[0066]** Bevorzugt wird in Abhängigkeit des Benachrichtigungssignal wenigstens eine Steuerungsfunktion der Feuerstätte, insbesondere automatisch, gesteuert und/oder, insbesondere automatisch, ausgeführt. Beispielsweise könnte es sich hierbei um eine Steuerung der Sauerstoffzufuhr und/oder des Brennstoffs handeln.

45 **[0067]** Weiterhin wird das zugrundeliegende Problem durch ein Verfahren zur Regelung einer Verbrennung eines brennbaren Materials in einer Feuerstätte gelöst. Dabei wird basierend auf einem Ergebnis der Analyse einer Verbrennung nach dem oben beschriebenen Verfahren zur Analyse einer Verbrennung eines brennbaren Materials in einer Feuerstätte eine Information bereitgestellt. Diese korreliert zu einem Regelbefehl, welcher wiederum zu einem höheren Wirkungsgrad der Verbrennung und/oder einer verringerten Feinstaubbildung während Verbrennung korreliert.

50 **[0068]** Vorzugsweise wird einem Nutzer auf einer Ausgabereinrichtung, vorzugsweise einer optischen Ausgabereinrichtung wie beispielsweise einem Bildschirm, eine Regelungsempfehlung der Feuerstätte und/oder eine Empfehlung für eine Zuführung eines Additivs und/oder eines Brennstoffs in eine Brennkammer ausgegeben.

**[0069]** Bevorzugt ist die Ausgabereinrichtung eine optische Ausgabereinrichtung, welche auch als eine Anzeigereinrichtung oder Bildschirm bezeichnet wird. Auf einer solchen wird vorzugsweise eine Handlungsanweisung und/oder  
55 Regelungsempfehlung als ein graphisches (Bild-)Element und insbesondere ein Symbol bzw. in der graphischen Ausgestaltung eines Symbols bzw. eines Sinnbildes dargestellt. Dies bietet den Vorteil, dass diese sowohl von Personen, etwa einer zur Steuerung der Feuerstätte befähigten Person, als auch maschinell intuitiv bzw. schnell und zuverlässig erfassbar sind.

**[0070]** Alternativ oder ergänzend zu der Ausgabe einer Regelempfehlung an einen Nutzer kann der Feuerstätte ein Steuerbefehl gesendet werden. Vorzugsweise führt ein solcher Steuerbefehl dazu, dass der Brennkammer ein Brennstoff und/oder ein Additiv und/oder Sauerstoff zugeführt wird.

**[0071]** Vorzugsweise weist das Additiv, welches eine asche- und/oder feinstaubreduzierende Wirkung bei der Verbrennung des Brennstoffs auf. Das Additiv kann auch zusammen mit einem Brennstoff beispielsweise in Form eines Brennstoff und Additiv enthaltenden Presslings, beispielsweise eines Pellets oder Briquettes, eingebracht werden. Das Additiv ist vorzugsweise ausgewählt aus einer Gruppe, die Kaolin, Metakaolin, Halloysit, Dickit und Nakrit, thermisch aktivierte Dreischichtsilikate und/oder Kombinationen dieser Substanzen umfasst.

**[0072]** Vorzugsweise wird das Additiv zusammen mit einem Brennstoff in Form eines Briquettes oder Pellets bereitgestellt. Es wurde gefunden, dass dies besonders vorteilhaft ist, da das Additiv kontinuierlich während des Verbrennungsprozesses freigesetzt werden kann und somit auch bei der gemeinsamen Verfeuerung mit anderen Brennstoffen wie beispielsweise Scheitholz ein Verbrennungsprozess eine dauerhaft niedrige Feinstaubbildung gewährleistet werden kann. Auch bei einer mechanischen Ascheaufwirbelungen durch Zerfallen abgebrannter Holzscheite steht das feinstaubreduzierende Additiv in einer Brennkammer jederzeit in ausreichender Menge zur Verfügung, um die gewünschte Feinstaubreduzierung zu erreichen. Die Konfektionierung in Form eines Pellets oder Briquettes,

**[0073]** Der Begriff "Brikett" soll im Rahmen dieser Erfindung in seiner üblichen Definition, nämlich als aus bestimmtem feinkörnigem Stoff gepresstes Formstück (in Quader- oder Eiform) verstanden werden. Briquettes unterscheiden sich von anderen gepressten Formstücken wie beispielsweise Pellets in ihrer deutlich größeren Ausgestaltung. Während Pellets eine sehr kleine Form eines meist geraden Kreiszyllinders mit einem Durchmesser von unter ca. 2 cm aufweisen und durch "Pelletierung" erhalten werden, weist ein Brikett selbst in seiner geringsten Ausdehnungsrichtung eine Größe von meist deutlich über 2 cm auf, beispielsweise mindestens 3 cm, vorzugsweise  $\geq 4$  cm, meist bevorzugt  $\geq 5$  cm. Entlang seiner größten Ausdehnungsrichtung weist ein Brikett bei dessen Ausgestaltung in Eiform meist mindestens 5 cm auf. Die kleinste übliche Handelsform von Briquettes sind die sogenannten 3-Zöller, welche gemäß ihres Namens eine Ausdehnung in deren Hauptstreckungsrichtung von etwa 7,5 cm haben.

**[0074]** Wie oben erwähnt, umfasst das Additiv vorzugsweise eine oder mehrere Substanzen, welche aus einer Gruppe ausgewählt ist, die, Metakaolin, Halloysit, Dickit und Nakrit, thermisch aktivierte Dreischichtsilikate und/oder Kombinationen dieser Substanzen umfasst. Diese Substanzen haben sich als besonders wirksam im Hinblick auf eine asche- und/oder feinstaubreduzierender Wirkung gezeigt. Vorzugsweise ist mindestens eine dieser Substanzen thermisch aktiviert. In der thermisch aktivierten Form kann eine nochmals gesteigerte Wirksamkeit erreicht werden. Wird die entsprechende Substanz bereits in der thermisch aktivierten Form eingebracht, muss die thermische Aktivierung nicht mehr während des Brennvorgangs in der Feuerstätte erfolgen. Dies gewährleistet, dass die besonders aktive Form schneller zur Verfügung steht und während des Verbrennungsvorgangs nicht thermische Energie zur Umwandlung des Additivs in die thermisch aktivierte Form notwendig ist. Damit kann der Wirkungsgrad der Verbrennung insgesamt erhöht werden.

**[0075]** Die thermische Aktivierung des Additivs vor der Verbrennung des Briquettes hat sich weiterhin als vorteilhaft gezeigt, da dabei eine Umsetzung beispielsweise von Kaolin zu Metakaolin erfolgt, welcher besonders zur Bindung von Feinstaub bei geringer Temperatur geeignet ist. Es wird davon ausgegangen, dass auch bei den bekannten Zusammensetzungen während des Verbrennungsprozesses eine zumindest teilweise thermische Aktivierung stattfindet. Diese erfolgt jedoch erst bei vergleichsweise hohen Verbrennungstemperaturen, die in einigen Bereichen des Brennraums und/oder der Flamme beziehungsweise des Feuers eventuell nicht erreicht werden. Bei Zusammensetzungen ohne ein thermisch aktiviertes Additiv kann daher die Feinstaubbildung in Abhängigkeit von der Flammentemperatur und dem Ort der Verbrennung in der Brennkammer nicht sicher reduziert werden

**[0076]** Es ist denkbar und in einigen Ausführungsformen bevorzugt, dass das Brikett ein weiteres Additiv umfasst, welches die Feinstaubbildung reduziert. Dieses weitere Additiv ist vorzugsweise ausgewählt aus einer Gruppe, die  $Al_2O_3$ ,  $Al(OH)_3$ , Bauxit, Talkum, Kaolin, Kaolinit und kaolinhaltige Tone, Metakaolin, thermisch aktivierte Dreischichtsilikate, Flugasche und Mikrosilica und/oder Kombinationen dieser Substanzen umfasst. Es hat sich gezeigt, dass durch das Vorhandensein einer zweiten, die Feinstaubbildung reduzierenden Komponente (im Folgenden auch als "zweites Additiv" bezeichnet) die Reduzierung der Feinstaubbildung bereits bei sehr geringen Verbrennungstemperaturen, beispielsweise  $\leq 650^\circ C$ ,  $\leq 600^\circ C$ ,  $\leq 550^\circ C$  oder sogar bereits  $\leq 500^\circ C$  und/oder bei unvollständiger Verbrennung, beispielsweise durch geringe Sauerstoffzufuhr, deutlich reduziert werden kann. Auch bei hoher Verbrennungstemperatur und ausreichender Sauerstoffzufuhr hat sich der Zusatz eines zweiten Additivs als vorteilhaft erwiesen, da sie die Aschebildung verbessert und durch die Vermeidung des Zusammenklumpens oder zumindest die Verringerung der Neigung der Asche zum Zusammenklumpen eine langfristig gute Sauerstoffzufuhr durch den Brennstoff und den Brennraum ermöglicht.

**[0077]** Bevorzugt enthält das Brikett  $Al_2O_3$  und/oder Aluminiumhydroxid und/oder Aluminiumoxidhydroxid und/oder Bauxit jedoch in einem Gewichtsanteil von  $\leq 5\%$ , vorzugsweise  $\leq 3\%$ , weiter bevorzugt  $\leq 2\%$ , meist bevorzugt  $\leq 1\%$  und insbesondere bevorzugt keinen Zusatz von  $Al_2O_3$  und/oder Aluminiumhydroxid und/oder Aluminiumoxidhydroxid und/oder Bauxit. Als "keinen Zusatz enthaltend" soll in diesem Zusammenhang verstanden werden, dass eine solche Komponente einem Brikett (beziehungsweise einer Mischung, aus der ein Brikett gepresst wird) nicht aktiv zugesetzt wird,

sondern - sofern überhaupt vorhanden - eine solche Komponente einem Brikett lediglich als Verunreinigung einer anderen Komponente beigelegt wird. Dadurch kann vermieden werden, dass die Asche übermäßig hohe Anteile Aluminium enthält und/oder Aluminiumverbindungen bei der Verbrennung entstehen, die gegebenenfalls in das Abgas gelangen können. Dies sollte insbesondere aufgrund der verstärkten Gesundheitsbedenken hinsichtlich einiger Aluminiumverbindungen verhindert werden.

**[0078]** Das zweite Additiv unterscheidet sich vorzugsweise zumindest in einer Eigenschaft von dem ersten Additiv. Das erste und zweite Additiv können sich durch eine verschiedene chemische Zusammensetzung bei Auswahl verschiedener Verbindungen aus der jeweils oben definierten Gruppe chemischer Verbindungen unterscheiden. Es besteht jedoch alternativ oder ergänzend dazu auch die Möglichkeit, dass sich das erste und das zweite Additiv in mindestens einer anderen Eigenschaft voneinander unterscheidet. Dies könnte beispielsweise ein unterschiedlicher (Kristall-) Wassergehalt sein. Ein anderer beispielhafter Unterschied zwischen der ersten und der zweiten Komponente könne die (mittlere) Partikelgröße (vorzugsweise  $d_{50}$  (Sedigraph)) darstellen. Derartige Unterschiede zwischen des ersten und des zweiten Additivs führen bevorzugt dazu, dass sie während der Verbrennung eines Briketts zu verschiedenen Zeiten ihr Aktivitätsmaximum erreichen. Für die oben genannten Beispiele konnte gezeigt werden, dass Partikel mit höherem (Kristall-) Wassergehalt und/oder Partikel mit einer größeren (mittleren) Partikelgröße ihr Aktivitätsmaximum bei höherer Temperatur im Verbrennungsraum und/oder zu späteren Zeiten während eines Verbrennungsprozesses erreichen.

**[0079]** Vorzugsweise ist das Additiv bei einer Temperatur im Bereich von etwa 600 - 900°C bevorzugt 650 - 800°C behandelt. Bei dieser Temperatur erfolgt beispielsweise bei Kaolin eine Umsetzung zu Metakaolin. Vorzugsweise wird während dieser thermischen Behandlung eine Umsetzung hervorgerufen, bei der eine Freisetzung von zuvor gebundenem Kristallwasser stattfindet. Ergänzend oder alternativ zu der Behandlung bei der oben genannten Temperatur erfolgt die thermische Behandlung vorzugsweise über einen Zeitraum von 1 - 90 Minuten, bevorzugt 5 - 75 Minuten, insbesondere bevorzugt 10 - 60 Minuten. Wie an diesen Werten zu erkennen ist, benötigt es einige Zeit, bis eine ausreichende oder (nahezu) vollständige Umsetzung zu der reaktiven Komponente erfolgt ist, die besonders wirkungsvoll den bei einer Verbrennung entstehenden Feinstaub binden und/oder reduzieren kann.

**[0080]** Daraus folgt unweigerlich, dass ohne eine thermische Aktivierung des Additivs dieses zu bestimmten Zeiten (beispielsweise am Beginn eines Verbrennungsprozesses und/oder unmittelbar nach Zugabe eines Briketts) nicht genügend der thermisch aktivierten, besonders reaktiven Komponente vorhanden ist, um die Bildung von Feinstaub wirksam zu reduzieren.

**[0081]** Erfahrungen zeigen, dass bei unkontrolliert ablaufenden Verbrennungen in einer Brennkammer Temperaturen eines sehr großen Temperaturbereichs auftreten können. Dieser Temperaturbereich umfasst üblicherweise Temperaturen von etwa 100 - 1000°C. In diesem Temperaturbereich kann lokal die Temperatur zur Bildung der besonders zur Reduzierung des Feinstaubes geeigneten reaktiven Komponente (beispielsweise Metakaolin) nicht ausreichend sein, oder aber lokal zu hoch sein und so eine weitere Umsetzung zu Silikaten mit verringerter Reaktivität erfolgen. Die Verteilung der Temperatur in einer Brennkammer ist - falls überhaupt - nur in begrenztem Maße steuerbar, so dass beispielsweise die Bildung von Metakaolin während der Verbrennung nicht kontrolliert oder gesteuert werden kann. Analog gilt dies oftmals auch für die Verweildauer, die während einer Verbrennung von wenigen Sekunden bis zu mehreren Stunden dauern kann. Während einer zu kurzen Verweildauer kann oftmals nicht genügend der reaktiven Komponente gebildet werden, während bei zu langer Verweildauer eine Deaktivierung der reaktiven Komponente (beispielsweise des Metakaolins) erfolgen kann.

**[0082]** Vorzugsweise ist das Additiv zur Bindung von feinstaubbildenden Na- und/oder K-Salzen bereits bei Verbrennungstemperaturen  $\leq 650^\circ\text{C}$  geeignet. Dadurch wird die gesamte Zusammensetzung in die Lage versetzt, bereits bei so geringen Verbrennungstemperaturen die Feinstaubbildung zu reduzieren.

**[0083]** Vorzugsweise enthält das Pellet oder Brikett keinen Bindemittelzusatz. Es hat sich gezeigt, dass in den meisten Fällen bereits der bei der Herstellung der Pellets oder Briketts anzuwendende Pressdruck ausreicht, um das Produkt zu einem stabilen Verbund zu formen. Auf ein Bindemittel kann dann verzichtet werden. Dies ist nicht nur aus Kostengründen vorteilhaft, da Bindemittel meist (bezogen auf dessen Gewicht) zu den teureren Komponenten gehören, sondern vermeidet auch, dass bei der Verbrennung eventuell schädliche Verbrennungsprodukte des Bindemittels erzeugt werden.

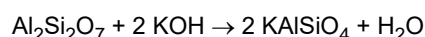
**[0084]** Bei der Verbrennung von organischen Brennstoffen, beispielsweise Biomasse, entstehende Feinstäube enthalten insbesondere Alkalimetallverbindungen, beispielsweise Natrium- oder Kaliumverbindungen. Von besonderer Bedeutung sind beispielsweise Alkalimetallhydroxide, -chloride und -sulfate. Auch wenn einige der bei der Verbrennung entstehenden Substanzen zum Zeitpunkt der Verbrennung gasförmig sind, können sie während der Abkühlung der Verbrennungsgase kondensieren oder als Feststoff ausfallen, sich zu größeren Partikeln zusammenlagern und so als Feinstaubemission austreten.

**[0085]** Vorzugsweise ist der Brennstoff ausgewählt aus einer Gruppe, die Holzpartikel, beispielsweise Hackschnitzel, Hobelspäne oder Sägemehl; halmgutartige Biomasse, beispielsweise Stroh, Heu, Spelzen, Gras, Kleie oder Hanf; Torf; Obst- oder gemüsekerne oder -steine, beispielsweise Kirschsteine oder Olivenkerne; Getreide; Nussschalen, beispielsweise Walnuss- oder Kokosnussschalen; Treber oder Trester, beispielsweise Obst-, Gemüse oder Pflanzenbestandteiltrester, vorzugsweise Kaffeebohrentrester, Malztreber oder Olivenpresstrester; biogene Reststoffe; Braunkohle,

beispielsweise Braunkohlekoks oder Braunkohlepulver; Trockenschlempe (DDGS); Steinkohle, beispielsweise Steinkohlekoks oder Steinkohlepulver; Holzkohle, vorzugsweise Holzkohlepulver; Hefezellen; Pflanzenfasern; Cellulosefasern; Papier und Petrolkoks umfasst. Bei diesen Brennstoffen kann die Feinstaubbildung und insbesondere die Bildung der oben genannten Alkalimetallverbindungen, insbesondere der Natrium- oder Kaliumverbindungen besonders effizient reduziert werden. Insbesondere ist bevorzugt, dass der Brennstoff ein cellulosehaltiger Brennstoff ist. Bei derartigen Brennstoffen hat das Additiv besonders gute Wirksamkeit hinsichtlich der asche- und/oder feinstaubreduzierenden Wirkung gezeigt.

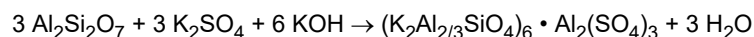
**[0086]** Der oben beschriebene Prozess der Bildung von Alkalimetallverbindungen kann durch den basierend auf dem Analyseergebnis gesteuerten Zusatz eines Additivs oder additivhaltigen Pellets oder Briketts zu einer Verbrennung oder als Brennstoff verhindert oder zumindest reduziert werden. Dies kann insbesondere damit erklärt werden, dass bei der Verbrennung entstehende Alkaliverbindungen, wie im Folgenden beispielhaft an einer Reaktion von Metakaolin mit KOH dargelegt ist, aus dem Abgas abgefangen und zu schwerflüchtigen Komponenten umgesetzt werden können.

**[0087]** Im erwähnten Beispiel reagiert Metakaolin mit KOH gemäß der folgenden Reaktionsgleichung zu einem schwerflüchtigen Kaliumaluminiumsilikat und Wasser:



**[0088]** Das Kaliumaluminiumsilikat ist bis zu sehr hohen Temperaturen stabil und kann so als Asche aus der Brennkammer entfernt werden. Desweiteren begünstigt ein gebildeter Kaliumaluminiumsilikatpartikel - insbesondere während der Abkühlung des Abgases, beispielsweise in einem Schornstein oder einem Wärmetauscher - die Anlagerung weiterer Substanzen aus dem Abgas, beispielsweise weiterer Kaliumaluminiumsilikatpartikel, so dass die Partikel wachsen und aus dem Abgas ausfallen oder leicht daraus abgetrennt werden können (beispielsweise durch Zentrifugation).

**[0089]** Auch andere Substanzen wie beispielsweise Kaliumsulfat oder -chlorid können so in hochtemperaturstabile Substanzen umgewandelt und somit gebunden werden:



**[0090]** Die oben genannten Reaktionen sind am Beispiel von Metakaolin gezeigt. Die Bindung der Feinstaubbildenden Substanzen ist jedoch mit allen Substanzen möglich, die ausreichend hochtemperaturbeständige und leicht aus dem Abgas ausfallende oder abtrennbare Reaktionsprodukte ausbilden. Silikate, Aluminosilikate und silikathaltige Komponenten haben sich als besonders geeignet gezeigt.

**[0091]** Als besonders bevorzugt hat sich eine Ausführungsform gezeigt, bei der das Additiv in partikulärer Form eingesetzt wird oder in dieser Form in einem Pellet oder Brikett vorliegt. Vorzugsweise weisen die Partikel des Additivs eine Partikelgröße (Sedigraph)  $d_{95} \leq 100 \mu\text{m}$ , bevorzugt  $\leq 50 \mu\text{m}$ , weiter bevorzugt  $\leq 20 \mu\text{m}$  und insbesondere bevorzugt  $\leq 10 \mu\text{m}$  auf. Ergänzend oder alternativ dazu sind Partikelgrößen  $d_{95} \geq 1 \mu\text{m}$ , bevorzugt  $\geq 2 \mu\text{m}$ , weiter bevorzugt  $\geq 3 \mu\text{m}$  und insbesondere bevorzugt  $\geq 5 \mu\text{m}$  bevorzugt. Durch diese Mindestgrößen kann die Handhabbarkeit verbessert werden und insbesondere vermieden werden, dass diese Partikel selbst bei der Handhabung als Feinstaub in die Umgebung gelangen.

**[0092]** Bevorzugt wird die Partikelgröße durch Mahlung und gegebenenfalls nachfolgende Siebung und/oder Sichtung eingestellt.

**[0093]** In einer bevorzugten Ausführungsform wird das Additiv zusammen mit mindestens einer weiteren Substanz, beispielsweise einen Hilfsstoff, eingesetzt. Als weitere Substanz beziehungsweise Hilfsstoff sind sowohl organische als auch anorganische Hilfsstoffe denkbar. Je nach Anwendung kann der (Gewichts-) Anteil der Hilfsstoffe im Verhältnis zum Additiv in einem sehr großen Bereich von 99,9 - 0,1 vorzugsweise 99-1 weiter bevorzugt 75 - 25 ausgewählt werden. Insbesondere wenn ein Hilfsstoff ebenfalls ein Brennstoff ist, kann dessen Gewichtsanteil deutlich über 75 %, beispielsweise über 90 %,  $\geq 95 \%$  oder sogar  $\geq 98 \%$  sein und insbesondere in sehr großem Überschuss gegenüber dem Additiv vorliegen. Der Hilfsstoff dient insbesondere dazu, eine verzögerte und/oder kontinuierliche Freisetzung des Additivs über einen langen Zeitraum zu ermöglichen. Dadurch kann dessen asche- und/oder feinstaubreduzierende Wirkung über einen langen Zeitraum entfaltet beziehungsweise aufrecht gehalten werden.

**[0094]** Dieser Effekt, nämlich eine verzögerte und/oder kontinuierliche Freisetzung des Additivs über einen langen Zeitraum zu ermöglichen kann auch erreicht werden, indem das Additiv anders als oben beschrieben nicht als Pulver, sondern als Granulat zugegeben wird. Ein entsprechendes Granulat kann in Abmischung mit den oben genannten Materialien erfolgen aber auch als Reinstoff eingesetzt werden, letzterer mit oder ohne Bindemittel, trocken oder feucht, bevorzugt als pures Additiv und/oder bevorzugt mit einer Restfeuchtigkeit von  $< 30 \text{ Ma-\%}$ , weiter bevorzugt  $< 20 \text{ Ma-\%}$ , insbesondere bevorzugt  $< 13 \text{ Ma-\%}$  und meist bevorzugt  $< 5 \text{ Ma-\%}$  Feuchtigkeit. Die (mittlere) Korngröße  $d_{50}$  (z.B. mittels a) Trockensiebung mit einem Siebturm oder b) Laserbeugungs-Partikelgrößenanalyse) des Granulates ist  $> 0,5 \text{ mm}$ , bevorzugt  $> 3 \text{ mm}$ , meist bevorzugt  $> 5 \text{ mm}$  und  $< 50 \text{ mm}$ . Das Granulat kann aus einer Extrusion, einer Sprühtrocknung einer Aufbaugranulierung oder einem Zerkleinerungsprozess kommen. Die Form kann rund, zylindrisch oder kantig sein.

Vorteilhaft sind Mischungen aus verschiedenen (mittleren) Korngrößen.

**[0095]** Vorzugsweise wird das Additiv durch die Steuerungseinrichtung der Brennkammer in einem Mengenanteil zugeführt, sodass das Additiv mit einem (Gewichts-) Anteil bezogen auf die gesamte zur Feuerung eingesetzte Masse (also einschließlich des Brennstoffs) vorzugsweise im Bereich von 0,1 - 5 Gew.-% liegt. Dieser Anteil wurde als besonders effektiv befunden, um die Menge des sonst bei der Verbrennung des Brennstoffs üblicherweise entstehenden Feinstaub effizient zu reduzieren. Insbesondere hat sich ein Anteil von 0,5 - 4 Gew.-%, weiter bevorzugt 0,75 - 3 Gew.-% und besonders bevorzugt 1 - 2,5 Gew.-% als besonders effizient erwiesen. Am Beispiel eines wie oben beschriebenen Pellets oder Briketts mit beispielsweise 40 Gew.-% des Additivs bedeutet dies, dass etwa 1 Gewichtsanteil Pellets oder Briketts auf 20 Gewichtsanteile des übrigen Brennstoffs eingesetzt werden sollte, um zu einem (Gewichts-) Anteil des Additivs bezogen auf die gesamte zur Feuerung eingesetzte Masse von 1,9 Gew.-% zu gelangen.

**[0096]** Bezüglich der Feuerstätte bestehen weder bei der Verwendung einer wie oben beschriebenen Vorrichtung noch bei der Durchführung des oben beschriebenen Verfahrens keinerlei Einschränkungen. Ein Vorteil der Vorrichtung - insbesondere bei beabstandeter Anordnung der Rechneinrichtung - ist, dass sie äußerst flexibel einsetzbar ist. Sie ist beispielsweise in Einzelfeuerstätten, Einzelraumfeueranlagen (z.B. einem Kamin im Wohnzimmer) oder Kesselanlagen jeder Größe (beispielsweise Zentralheizung von Ein- oder Mehrfamilienhäusern) und in größeren Heiz- oder Heizkraftwerken verwendbar. Auch die Anwendung bei Feuerstätten im Außenbereich, wie insbesondere mit Holz, Kohle, Briketts, Pellets oder anderen (bevorzugt festen) Brennstoffen betriebenen, ist eine solche Vorrichtung einsetzbar und das Verfahren anwendbar und vorteilhaft. Bei einer solchen Feuerstätte kann es sich beispielsweise um eine Feuerstätte aus einer Gruppe handeln, die eine Grill-Feuerstelle jeder Art, eine Feuerschale, eine Lagerfeuerstelle, einen Feuerkorb, einen Feuertisch und einen Außenkamin umfasst.

**[0097]** Durch ein, wie oben beschriebenes Verfahren und/oder eine, wie oben beschriebene Vorrichtung ist es möglich, die Menge an Feinstaub bei einer Verbrennung eines Feststoffs um mindestens 10 %, bevorzugt mindestens 25 %, weiter bevorzugt mindestens 50 % und in vielen Fällen, die besonders bevorzugt sind, sogar um 75 % oder mehr zu reduzieren. Die diesbezüglich genannten Prozentangaben beziehen sich (wie auch alle anderen im Rahmen dieser Offenbarung genannten Prozentangaben, soweit nicht etwas anderes definiert ist) jeweils auf Gewichtsprozent. Als Basisgröße dient in diesem Fall die Menge gebildeten Feinstaub bei einer Verbrennung eines brennbaren Materials ohne Zusatz eines wie oben beschriebenen Additivs.

**[0098]** In vielen Fällen führt der Zusatz eines wie oben beschriebenen Additivs auch zu einer Erhöhung des Wirkungsgrads der Verbrennung eines Brennstoffs und damit auch zu einer Reduzierung des CO-Gehalts in der Abluft. Dies kann unter anderem auf das verbesserte Ascheversinterungsverhalten und die damit einhergehende bessere Versorgung mit Frischluft und/oder Sauerstoff und die damit einhergehende vollständigere Verbrennung und somit höhere Energieeffizienz zurückgeführt werden.

**[0099]** Vorzugsweise kann durch eine wie oben beschriebene Vorrichtung und ein wie oben beschriebenes Verfahren eine Kostenersparnis erreicht werden, da der Wirkungsgrad erhöht wird und oftmals auf eine Abgasnachbehandlung beziehungsweise Abgasreinigung verzichtet werden kann. Selbst wenn eine Abgasnachbehandlung oder Abgasreinigung notwendig ist, können die dazu notwendigen Anlagen und Einrichtungen kleiner beziehungsweise weniger aufwändig ausgelegt sein.

**[0100]** Bevorzugt ist eine wie oben beschriebene Vorrichtung dazu eingerichtet, geeignet und/oder bestimmt, ein wie oben beschriebenes Verfahren sowie alle im Zusammenhang mit dem Verfahren beschriebene Verfahrensschritte einzeln oder in Kombination miteinander oder einzelne Verfahrensschritte unter der Verwendung der oben beschriebenen Vorrichtung auszuführen. Umgekehrt kann das Verfahren mit allen im Rahmen der Vorrichtung beschriebenen Merkmalen einzeln oder in Kombination miteinander durchgeführt werden.

**[0101]** Optional kann eine wie oben beschriebene Vorrichtung dazu eingerichtet, geeignet und/oder bestimmt sein, ein wie oben beschriebenes Verfahren sowie alle im Zusammenhang mit dem Verfahren beschriebene Verfahrensschritte auch mit anderen Verfahren zur Feinstaubreduzierung aus Verbrennungsprozessen zu kombinieren, wie z.B. Filtrationsverfahren, Zyklonverfahren oder elektrostatische Verfahren, insbesondere im Abluftstrom eingebaute elektrostatische Abscheider.

**[0102]** Weiterhin ist die Erfindung auf einen maschinenlesbaren Programmcode gerichtet, welcher ein wie oben beschriebenes Verfahren oder Teilen davon codiert oder eine Anweisung zur Durchführung eines wie oben beschriebenen Verfahrens oder Teilen davon codiert.

**[0103]** Außerdem ist die Erfindung auf ein maschinenlesbares Speichermedium gerichtet auf welchem ein wie vorstehend beschriebener maschinenlesbarer Programmcode gespeichert ist. bei dem Speichermedium kann es sich beispielsweise um einen Magnetspeicher, ein magneto-optische Speicher, einen optischen Speicher oder einen Festkörperspeicher, beispielsweise Flash-Speicher

**[0104]** Weitere Vorteile und Ausführungsformen ergeben sich aus den beigefügten Figuren:  
Darin zeigen:

Fig. 1A eine Darstellung einer Feuerstätte 10 mit einem in der Feuerstätte ablaufenden Verbrennungsprozess 20 in

einem ersten Zustand;

Fig. 1B Ergebnis einer Analytik des in Fig. 1A dargestellten Verbrennungsprozesses;

5 Fig. 2A eine Darstellung einer Feuerstätte 10 mit einem in der Feuerstätte ablaufenden Verbrennungsprozess 20 in einem zweiten Zustand;

Fig. 2B Ergebnis einer Analytik des in Fig. 2A dargestellten Verbrennungsprozesses;

10 Fig. 3A eine Darstellung einer Feuerstätte 10 mit einem in der Feuerstätte ablaufenden Verbrennungsprozess 20 in einem dritten Zustand;

Fig. 3B Ergebnis einer Analytik des in Fig. 3A dargestellten Verbrennungsprozesses;

15 Fig. 4A eine Darstellung einer Feuerstätte 10 mit einem in der Feuerstätte ablaufenden Verbrennungsprozess 20 in einem dritten Zustand;

Fig. 4B Ergebnis einer Analytik des in Fig. 4A dargestellten Verbrennungsprozesses;

20 Fig. 5A eine Darstellung einer Computertastatur 30 mit eingeschalteter Hintergrundbeleuchtung, aufgenommen unter analogen Bedingungen zu Fig. 1A, 2A und 3A;

Fig. 5B Ergebnis einer Analytik der in Fig. 5A dargestellten Abbildung der Computertastatur 30;

25 Fig. 6A ein Diagramm zur Darstellung der Änderungen der einer Flamme zugeordneten Daten bei einer ruhig ablaufenden Verbrennung;

Fig. 6B ein Diagramm zur Darstellung der Änderung der Beträge der einer Flamme zugeordneten Daten bei einer ruhig ablaufenden Verbrennung;

30 Fig. 7A eine Autokorrelationsfunktion der in Fig. 6A dargestellten Funktion;

Fig. 7B eine Autokorrelationsfunktion der in Fig. 6B dargestellten Funktion;

35 Fig. 8A ein Diagramm zur Darstellung der Änderung der Beträge der einer Flamme zugeordneten Daten bei einer unruhig ablaufenden Verbrennung mit schnellen Flammenbewegungen;

Fig. 8B ein Diagramm zur Darstellung der absoluten Änderung der einer Flamme zugeordneten Daten bei einer unruhig ablaufenden Verbrennung mit schnellen Flammenbewegungen;

40 Fig. 9A eine Autokorrelationsfunktion der in Fig. 8A dargestellten Funktion; und

Fig. 9B eine Autokorrelationsfunktion der in Fig. 8B dargestellten Funktion.

45 **[0105]** Figur 1A zeigt eine Darstellung einer Feuerstätte 10 mit einem in der Feuerstätte 10 ablaufenden Verbrennungsprozess 20 in einem ersten Zustand. Zur Aufnahme der in Figur 1A gezeigten Darstellung ist ein optischer Sensor verwendet worden. Zu erkennen ist die Feuerstätte 10 mit der darin befindlichen Brennkammer 30. In der Brennkammer liegt ein Brenngut 40, welches teilweise glüht.

50 **[0106]** Figur 1B zeigt ein Analyseergebnis, welches auf Basis der in Figur 1A dargestellten Sensordaten erhalten wurde. Die Analysedaten zeigen diejenigen Bereiche des vom Sensor erfassten Bereichs hell, die als für die Verbrennung relevant eingestuft worden sind.

**[0107]** Zur Erzeugung eines solchen Analyseergebnisses wird zunächst eine Position der Flamme bestimmt. Diese ermöglicht es, eine Region of Interest (ROI) zu bestimmen, welche in grober Näherung die Brennkammer darstellt. Dadurch kann die Datenmenge deutlich reduziert werden, da Daten außerhalb der ROI von der weiteren Betrachtung ausgeschlossen werden können.

55 **[0108]** Ist die ROI festgelegt, wird eine Farbfilterung durchgeführt. Dafür werden die zu verschiedenen Zeiten aufgenommenen Sensordaten, im gezeigten Beispiel Bilddaten und im Rahmen dieser Beschreibung auch als Frames bezeichnet, erstmal in den HSV (hue, saturation, value) Farbraum umgewandelt. Eine erste Parameteroptimierung

zeigte, dass besonders gute Ergebnisse für eine anschließende Feature Extraction erhalten werden, wenn der H-Wert zwischen 19% und 95% liegt, der S-Wert über 65% liegt und der V-Wert über 70% liegt.

**[0109]** Weiterhin werden die einzelnen Pixel nach der Helligkeit gefiltert. Dafür ist vorgesehen, dass jeder Pixel, der zuvor durch die Filterung ausgewählt wurde, eine festgelegte Graustufenbedingung erfüllt. So werden im gezeigten Beispiel die Pixel mit einem Graustufenwert von mindestens 230 von 255 durchgelassen. Diese Filterung ermöglicht es, eine Flamme auch in einer schlechteren Lichtumgebung, z.B. auf dunklen Aufnahmen oder bei starker Rauchbildung vergleichsweise sicher erkennen zu können.

**[0110]** Die weitere Auswertung dieser in Figur 1B hell dargestellten Bereiche ermöglicht es, auf die Qualität der in der Brennkammer 30 ablaufenden Verbrennung Rückschlüsse ziehen zu können. Insbesondere ist dabei hilfreich, derartige Analyseergebnisse zu verschiedenen Zeitpunkten miteinander zu vergleichen. Aus den Veränderungen der als zur Bewertung des Verbrennungsprozesses relevant eingestuft Sensordaten kann beispielsweise ermittelt werden, ob die hell dargestellten Bereiche für einen glühenden Brennstoff stehen oder eher einem flackernden Feuer zuzuordnen sind. Auf diesen Teil der Auswertung wird im Zusammenhang mit den Figuren 6A - 9B genauer eingegangen.

**[0111]** Figur 2A zeigt eine weitere Darstellung der Feuerstätte mit einem in der Feuerstätte 10 ablaufenden Verbrennungsprozess 20 in einem zweiten Zustand. In dieser Darstellung, die wie auch in Figur 1A in einem sichtbaren Wellenlängenbereich aufgenommen wurde, ist zu erkennen, dass die Feuerstätte 10 identisch mit derjenigen es, wie sie in Figur 1A gezeigt ist. Auch hier ist in der Brennkammer 30, dass Brenngut 40 angeordnet. Im Vergleich zu der Darstellung aus Figur 1A ist jedoch zu erkennen, dass einige der in Figur 1A sehr hell dargestellten Bereiche in Figur 2A weniger hell sind. Dies ist auf eine weniger starke Glut in diesen Bereichen zurückzuführen.

**[0112]** Dieser optische Eindruck wird auch durch das in Figur 2B gezeigte Ergebnis einer Analytik des in Figur 2A dargestellten Verbrennungsprozesses 20 unterstrichen. Die Anzahl und Fläche der in Figur 2B ebenfalls hell dargestellten Bereiche, die als relevant zur Bewertung des Verbrennungsprozesses in der Brennkammer 30 eingestuft wurden, sind wesentlich geringer als die entsprechenden Bereiche in Figur 1B.

**[0113]** Ein wie in Figur 2B dargestelltes Analyseergebnis könnte darauf hinweisen, dass ein Brennvorgang gerade erst begonnen hat und die Glut noch nicht das gesamte Brennmaterial 40 erfasst hat. Nicht glühendes Brennmaterial 40 könnte zwischen Sensor und glühenden Brennmaterial angeordnet sein und so verhindern, dass die verdeckte Glut als relevant zur Bewertung des Verbrennungsprozesses erkannt wird. Gegen eine solche Auslegung spricht jedoch die großflächige Verteilung der als für den Verbrennungsprozess relevant eingestuft Sensordaten. Zu Beginn eines Verbrennungsprozesses ist eine solche weiträumige Verteilung von Glut meist nicht zu erwarten. Wahrscheinlicher ist es, dass - insbesondere, wenn zuvor bereits ein Analyseergebnis wie beispielsweise in Figur 1B vorlag - dass die Verbrennung des Brennmaterials nicht (mehr) unter optimalen Bedingungen abläuft. Beispielsweise könnte das Brennmaterial zur Neige gehen oder die Sauerstoffzufuhr zu gering sein.

**[0114]** Figur 3A zeigt ebenfalls eine Darstellung einer Feuerstätte 10 mit einem in der Feuerstätte 10 ablaufenden Verbrennungsprozess 20 in einem dritten Zustand. Wie der in Figur 3A gezeigten Darstellung der von einem im sichtbaren Bereich arbeitenden Sensor erfassten Daten zu entnehmen ist, läuft der Verbrennungsprozess 20 mit hell lodender Flamme ab.

**[0115]** Dieser optische Eindruck wird auch durch das in Figur 3B dargestellte Analyseergebnis des in Figur 3A dargestellten Verbrennungsprozesses bestätigt. Wie auch in den Figuren 1B und 2B sind auch in Figur 3B, die als relevant zur Bewertung des Verbrennungsprozesses eingestuft Sensordaten hell hervorgehoben. Wie insbesondere im Vergleich mit der Darstellung in Figur 1B zu erkennen ist, verteilen sich die hell dargestellten Datenpunkte über einen sehr weiten Bereich. Wie den zugrundeliegenden Sensordaten aus Figur 3A zu entnehmen ist, liegt im vorliegenden Fall eine hell lodendernde Flamme als Ursache für die weiträumige Verteilung der als für den Verbrennungsprozess relevanten Datenpunkte vor.

**[0116]** Eine alternative Ursache für ein solches Muster könnte jedoch auch ein sehr hoher Füllstand des Brennguts 40 in der Brennkammer 30 sein. Auch in einem solchen Fall könnte bei glühendem Brennstoff ein vergleichbares Datenmuster erhalten werden. Zur Unterscheidung derartiger Analyseergebnisse bietet es sich wie oben jedoch bereits dargelegt an, die Analysedaten zu zwei verschiedenen Zeitpunkten, bevorzugt zwei zeitnah aufeinanderfolgenden Zeitpunkten, miteinander zu vergleichen. Während nämlich hell lodender Flammen zu einem rasch verändernden Analysedatenmuster führen, ist dies bei Glut ein deutlich langsamerer Prozess.

**[0117]** Insbesondere wird dementsprechend ein unterschiedliches Flammenbild bei der Analyse von Bildsequenzen, beispielsweise Videos deutlich. Flackernde Feuer mit sich schnell örtlich verändernden Zentren hoher Temperatur lassen sich in Bildsequenzen leicht von einem glühenden Brennstoff unterscheiden, bei welchem die Zentren besonders hoher Temperatur im Wesentlichen statisch verbleiben.

**[0118]** Figur 4A zeigt eine weitere Darstellung einer Feuerstätte 10 mit einem in der Feuerstätte 10 ablaufenden Verbrennungsprozess 20, jedoch in einem vierten Zustand. Erneut wird der im sichtbaren Bereich arbeitende Sensor wie auch zur Erfassung der in den Figuren 1A, 2A und 3A dargestellten Sensordaten genutzt. Der in Figur 4A dargestellte Verbrennungsprozess 20 läuft ebenfalls unter Flammenbildung ab, jedoch mit weniger hohen und lodenden Flammen als in Figur 3B gezeigt.

**[0119]** Dieser optische Eindruck wird auch durch das in Figur 4B dargestellte Analyseergebnis bestätigt. Die als relevant zur Bewertung des Verbrennungsprozesses eingestuft Sensordaten sind erneut hell hervorgehoben und überdecken im Vergleich mit der Darstellung aus Figur 3B einen weniger großen Bereich.

**[0120]** Es hat sich gezeigt, dass darauf trainierte Systeme künstlicher Intelligenz (KI) Unterschiede im Flammenbild nach einem Training erkennen können und aus dem Flammenbild Informationen zu dem Status des derzeit ablaufenden Verbrennungsprozesses 20 ableiten können. Es können aus diesen Informationen Rückschlüsse zu der Effizienz bzw. des Wirkungsgrades des Verbrennungsprozesses 20 gezogen werden. Ebenfalls ist daraus ableitbar, mit welcher Menge Feinstaub im Abgas bei dem derzeit ablaufenden Verbrennungsprozess 20 zu rechnen ist.

**[0121]** Nach einem wie oben beschriebenen Training eines Systems künstlicher Intelligenz war es diesem System möglich, jedes der vier in den Figuren 1B, 2B, 3B und 4B dargestellten Analyseergebnisse als zu einem Verbrennungsprozess gehörend zu identifizieren. Um das System künstlicher Intelligenz zu überprüfen, wurde ein Negativtest durchgeführt. Für den Negativtest wurde mit dem zur Erstellung der in den Figuren 4A genutzten Sensor eine Computertastatur 60 mit Hintergrundbeleuchtung aufgenommen. In Figur 5A ist ein Bild einer solchen Tastatur 60 mit eingeschalteter Hintergrundbeleuchtung im sichtbaren Bereich dargestellt.

**[0122]** Auch wenn die eingeschaltete Hintergrundbeleuchtung in der in Figur 5A dargestellten Computertastatur 60 in unter analogen Bedingungen zu den Figuren 1A, 2A, 3A und 4A nicht eindeutig zu erkennen ist, zeigt das darauf basierende und in Figur 5B dargestellte Ergebnis eine Analytik der in Figur 5A dargestellten Sensordaten helle Bereiche, die möglicherweise als relevant zur Erkennung eines Verbrennungsprozesses eingestuft werden könnten. Auch wenn die in Figur 5B dargestellte Anordnung der hellen Bereiche denjenigen ähnelt, wie sie beispielsweise in Figur 2B dargestellt sind, konnte das System künstlicher Intelligenz dennoch zuverlässig erkennen, dass es sich bei den in Figur 5B dargestellten Daten nicht um einen Verbrennungsprozess handelt. Das System kann also basierend auf der Analyse der Sensordaten, wie sie in den Figuren 4A und 4B bzw. 5A und 5B dargestellt sind erkennen, ob es sich bei dem detektierten Objekt tatsächlich um ein Feuer 20 handelt.

**[0123]** Die Figur 6A und 6B zeigt ein Diagramm zur Darstellung der Änderungen der einer Flamme zugeordneten Daten bei einer ruhig ablaufenden Verbrennung. Wie oben bereits beschrieben ist es in vielen Fällen vorteilhaft, nicht nur Daten zu einem einzigen Zeitpunkt während des Verbrennungsprozesses zu ermitteln, sondern Daten zu verschiedenen Zeitpunkten während des Verbrennungsprozesses aufzunehmen. Die Aufnahme dieser Daten erfolgt vorzugsweise in festen Abständen. In den in den Figuren 6A - 9B dargestellten Diagrammen sind jeweils Werte gegen eine Rahmennummer aufgetragen. Jeder Frame steht dabei für einen Datensatz, der zu einem bestimmten Zeitpunkt durch die Sensoreinrichtung während des Verbrennungsprozesses ermittelt wird. Auf der X-Achse ist die fortlaufende Nummer der zu unterschiedlichen Zeitpunkten aufgenommenen Frames dargestellt. Im vorliegenden Beispiel erfolgte die Aufnahme der einzelnen Frames jeweils in einem festen Zeitintervall, sodass die fortlaufende Nummer zu einer Zeit korreliert.

**[0124]** Auf der vertikalen Achse in dem in Figur 6A dargestellten Diagramm sind Werte aufgetragen, die das Verhältnis der Änderung der Position und/oder Fläche der als zur Bewertung der Verbrennung relevant eingestuften Datenpunkte darstellen. Die Ermittlung der als relevant eingestuften Datenpunkte erfolgt vorzugsweise wie im Zusammenhang mit den Fig. 1A und 1B beschrieben ist.

**[0125]** Zur Erzeugung des in Fig. 6A dargestellten Graphen werden die von der Feuerstätte zu einem ersten Zeitpunkt erhaltenen Daten aufbereitet und mit den analog aufbereiteten Daten verglichen, die zu einem zweiten Zeitpunkt erhalten wurden. Dazu werden Positionen der als zu einer Flamme gehörenden Pixel analog den Figuren 1B, 2B, 3B und 4B zu verschiedenen Zeitpunkten miteinander verglichen. Aus den Verschiebungen der der Flamme zugehörigen Pixel entlang der X und/oder Y Richtung wird eine wie in Figur 6A dargestellte Funktion erzeugt.

**[0126]** In Fig. 6A ist ein solcher Graph dargestellt, wie er bei der Analytik eines Feuers erhalten wird, dessen Flammen sich vergleichsweise wenig bewegen. Es handelt sich demnach um eine vergleichsweise ruhige Verbrennung, was auch als "ruhiges Feuer" bezeichnet wird. Wie man in Fig. 6A erkennen kann, schwanken die aufgetragenen Werte um einen Mittelwert. Ein solches Verhalten ist zu erwarten, da eine Flamme, auch wenn sie sich bewegt, im Wesentlichen dort lodert, wo das Brennmaterial vorhanden ist. selbst wenn die Flamme beispielsweise durch einen Gasstrom bewegt wird, wird zu einem späteren Zeitpunkt wieder in der Nähe des (durch den Gasstrom nicht bewegten) Brennmaterials eine Flamme detektierbar sein. Ein solches Zurückkehren ist durch negative Werte gekennzeichnet.

**[0127]** Insgesamt sind - insbesondere im Vergleich zu der im Folgenden beschriebenen Figur 8A - in Fig. 6A betragsmäßig geringe Änderungen der Flammen-Position. Dies ist typisch für eine ruhig brennende Flamme. Die Varianz zwischen den Werten zu verschiedenen Zeitpunkten (bzw. Frames) ist bei dem in Figur 6A dargestellten Graphen vergleichsweise gering.

**[0128]** In Figur 6B ist ein weiteres Diagramm zur Darstellung der Änderung der einer Flamme zugeordneten Daten bei einer ruhig ablaufenden Verbrennung gezeigt. Im Gegensatz zu der in Figur 6A gezeigten Darstellung sind in Figur 6B jedoch die Beträge der Änderungen (auch als absolute Änderungen bezeichnet) dargestellt. Die entlang der vertikalen Achse aufgetragenen Werte sind daher alle positiv. Die Beträge der Änderungen liegen meist unterhalb von 0,008 Einheiten, was für eine ruhig verlaufende Verbrennung charakteristisch ist.

**[0129]** Die Figuren 7A und 7B zeigen Graphen von Autokorrelationsfunktionen der in den Figuren 6A und 6B darge-

stellten Graphen. Dabei wird die Abweichung zwischen einem Durchschnittswert aller Veränderungen bis zu einem Frame und dem Durchschnittswert aller Veränderungen über alle Frames dargestellt. Erwartungsgemäß nähert sich daher dieser Graph jeweils dem Wert 0 an.

**[0130]** Da es sich bei der durch diese Graphen charakterisierten Verbrennung jedoch um eine ruhig verlaufende Verbrennung handelt sind die Änderungen jedoch über den gesamten Graphen gering und liegen betragsmäßig deutlich unterhalb von 0,001.

**[0131]** Wie oben bereits im Zusammenhang mit den Figuren 6A - 7B angedeutet wurde, zeigen die Figuren 8A - 9B analoge Darstellungen, jedoch für einen Verbrennungsprozess, bei dem starke Veränderungen der Position der Flamme und der von Flammen bedeckten Sensorfläche auftreten. Ein Verbrennungsprozess, bei dem lodernde Flammen sich stark und/oder schnell bewegen wird auch als "schnelles Feuer" bezeichnet.

**[0132]** In den in den Figuren 8A - 9B dargestellten Diagrammen ist entlang der horizontalen Achse analog zu den Figuren 6A - 7B die Nummer der Frames aufgetragen. Diese Achse bildet somit eine Zeitachse.

**[0133]** Im Wesentlichen korreliert die Darstellung der Figur 8A zu derjenigen in Figur 6A, die Darstellung der Figur 8B zu derjenigen in Figur 6B, die Darstellung der Figur 9A zu derjenigen in Figur 7A und die Darstellung der Figur 9B zu derjenigen in Figur 7B.

**[0134]** Während jedoch in den Figuren 8A und 8B die Veränderungen gegenüber den Figuren 6A und 6B im Verlauf des Graphen nicht deutlich ersichtlich sind, werden die Änderungen bei der Betrachtung der Beträge der Änderungen deutlich: Im Gegensatz zu den in den Figuren 6A und 6B dargestellten Graphen sind die maximalen Änderungen betragsmäßig mit  $< -0,01$  und  $+ \text{nahezu } 0,02$  etwa doppelt so stark wie in den Figuren 6A und 6B dargestellt. Bereits aus diesen Werten lässt sich ein unruhiger Verlauf der durch einen solchen Graphen dargestellten Verbrennungsprozesse erkennen.

**[0135]** Noch deutlicher ist dieser Unterschied jedoch bei einem Vergleich der in den Figuren 9A und 9B dargestellten Graphen mit denjenigen, wie sie in den Figuren 7A und 7B dargestellt sind. Die dargestellten Autokorrelationsfunktionen zeigen zumindest bei geringen Framenummern Änderungen, die etwa dem 4-fachen der in den Figuren 7A und 7B dargestellten Änderungen entsprechen.

**[0136]** Mit den oben dargestellten Signaldaten wurde ein Algorithmus entwickelt, mit dem das Flammenbild 20 und die Temperatur bestimmt und bewertet werden kann. Anhand des Flammenbilds 20 und der Temperatur lässt sich bereits eine Bewertung durchführen. Ist beispielsweise das Flammenbild unstetig und die Bereiche hoher Temperatur sehr großflächig verteilt, deutet das auf ein schlechtes Flammenbild und eine zu hohe Temperatur hin. In diesem Fall kann davon ausgegangen werden, dass der Feuerstätte zu viel Luft zugeführt wird und die Verbrennung aufgrund des im Übermaß zu Verfügung stehenden Sauerstoffs ineffizient abläuft.

**[0137]** Für das Training des Systems wurden Trainingsvideos aufgezeichnet, welche jeweils Zustände abbilden, die von Fachexperten klassifiziert, also verschiedenen Verbrennungsarten zugeordnet wurden. Basierend auf diesen Trainingsvideos und der von den Fachexperten zugeordneten Klasse wurde der Algorithmus trainiert. Zur Klassifizierung wurde eXtreme Gradient Boosting (XGBoost) eingesetzt.

**[0138]** In einem beispielhaften Training wurden die vier Parameter Flammenbild (Flackern: viel, okay, wenig), Temperatur (gut, hoch, niedrig), Brennstoffmenge (Brennraum überfüllt, in Ordnung, wenig) und Brennstoffzustand (fest, ascheförmig etc.) für die Klassifizierung ausgewählt. Für die Temperatur und Flammenbild wurden mittels eines XGBoost Algorithmus von Fachexperten erstellte Bezeichnungen und/oder Klassifizierungen mit den extrahierten Features in Verbindung gebracht. Vorzugsweise werden die Bezeichnungen einzeln analysiert. Als Ergebnis werden zwei Entscheidungsbäume erhalten, die anhand der definierten Features eine Abschätzung über die Temperatur- und Flammenbildbezeichnung ermöglichen.

**[0139]** Auch andere Algorithmen sind denkbar. XGBoost hat sich jedoch als besonders geeignet erwiesen, da dieser insbesondere bei der zugrundeliegenden Datenmenge aus den betrachteten Algorithmen die besten Ergebnisse liefert. Insbesondere bei größerer Datenmenge könnten weitere Algorithmen vorteilhaft sein, wie beispielsweise k-nearest neighbor, Support Vector Machine und ander.

**[0140]** Nach einem anfänglichen Training mit den händisch klassifizierten Trainingsvideos wurde die Trainingsmethode gewechselt und der Algorithmus mit neuen, nicht zuvor klassifizierten Trainingsvideos weiter trainiert. Das System künstlicher Intelligenz konnte mit diesen zusätzlichen Trainingsdaten weiter verbessert werden. So wurden Zusammenhänge zwischen verschiedenen Parametern erkannt und die Zustände von neuen/unbekannten Sensordaten korrekt bestimmt.

**[0141]** Die Anmelderin behält sich vor, sämtliche in den Anmeldungsunterlagen offenbarten Merkmale als erfindungswesentlich zu beanspruchen, sofern sie einzeln oder in Kombination gegenüber dem Stand der Technik neu sind.

## Bezugszeichenliste

**[0142]**

10 Feuerstätte, Ofen

- 20 Verbrennungsprozess, Flamme, Glut
- 30 Brennkammer, Brennraum
- 40 Brenngut, Brennmaterial
- 50 Bereich
- 5 60 (Computer-) Tastatur

**Patentansprüche**

- 10 **1.** Vorrichtung (1) zur Analyse einer Verbrennung eines brennbaren Materials in einer Feuerstätte, **gekennzeichnet durch**

eine einen Sensor umfassende Sensoreinrichtung, welche zur Aufnahme von Daten aus dem Verbrennungsprozess und/oder eines Bildes und/oder einer Bildsequenz der Verbrennung vorgesehen und eingerichtet ist, und eine Rechneinrichtung, welche mit der Sensoreinrichtung in Datenverbindung steht oder zu welcher eine Datenverbindung ausbildbar ist, und

15 mit einer Ausgabeeinrichtung in Datenverbindung steht oder zu welcher eine Datenverbindung ausbildbar ist, wobei die Ausgabeeinrichtung zur Ausgabe eines Signals vorgesehen und/oder eingerichtet ist, welches zu einem Wert korreliert, der für einen Wirkungsgrad der Verbrennung und/oder für eine bei der Verbrennung entstehende Feinstaubmenge charakteristisch ist.
- 20 **2.** Vorrichtung (1) nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass**

der Sensor, und vorzugsweise die Sensoreinrichtung kein integraler Teil der Feuerstätte ist, sondern vorzugsweise in einem Gehäuse angeordnet ist, welches relativ zu der Feuerstätte, insbesondere relativ zu einer Brennkammer der Feuerstätte, in der die Verbrennung des brennbaren Materials stattfindet, bewegbar ist.
- 25 **3.** Vorrichtung (1) nach einem der vorangegangenen Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass**

der Sensor, und vorzugsweise die Sensoreinrichtung in einem gemeinsamen Gehäuse mit einer Datenübertragungseinrichtung angeordnet ist, welche dazu vorgesehen und eingerichtet ist, eine bevorzugt zumindest abschnittsweise drahtlose Datenverbindung zu der Rechneinrichtung bereitzustellen, wobei die Rechneinrichtung vorzugsweise Teil eines Computernetzwerks ist.
- 30 **4.** Vorrichtung (1) nach einem der vorangegangenen Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass**

die Sensoreinrichtung mehrere Sensoren umfasst, wobei durch mindestens zwei Sensoren voneinander verschiedene physikalischer Parameter der Verbrennung detektierbar sind, wobei vorzugsweise mindestens zwei Sensoren optische Sensoren sind, wobei jeder dieser mindestens zwei optischen Sensoren jeweils zur Aufnahme eines Bildes und/oder einer Bildsequenz der Verbrennung in einem von dem anderen dieser mindestens zwei optischen Sensor verschiedenen Wellenlängenbereich vorgesehen und eingerichtet ist.
- 35 **5.** Vorrichtung (1) nach einem der vorangegangenen Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass**

die Ausgabeeinrichtung

45 - eine Anzeigeeinrichtung ist, welche vorzugsweise in einem gemeinsamen Gehäuse mit dem Sensor und/oder der Sensoreinrichtung angeordnet ist und/oder zur Anzeige einer Handlungsempfehlung zur Erhöhung des Wirkungsgrads der Verbrennung und/oder der Verminderung der bei der Verbrennung entstehenden Feinstaubmenge vorgesehen und eingerichtet ist, oder

50 - eine Steuereinrichtung ist, durch welche ein Steuerbefehl an die Feuerstätte gebbar ist, welcher zu einer Erhöhung des Wirkungsgrads der Verbrennung und/oder der Verminderung der bei der Verbrennung entstehenden Feinstaubmenge korreliert.
- 55 **6.** Verfahren zur Analyse einer Verbrennung eines brennbaren Materials in einer Feuerstätte, **gekennzeichnet durch** die Schritte:

- Aufnehmen eines Datums aus dem Verbrennungsprozess und/oder eines Bildes und/oder einer Bildsequenz der Verbrennung durch eine einen Sensor umfassende Sensoreinrichtung,

## EP 4 571 188 A1

- Übermitteln der Sensordaten an eine Rechneinrichtung,
- Klassifizieren der Sensordaten oder darauf basierender Daten durch die Rechneinrichtung,
- Ausgeben eines Signals, welches zu einem Wert korreliert, der für einen Wirkungsgrad der Verbrennung charakteristisch ist.

- 5
7. Verfahren zur Regelung einer Verbrennung eines brennbaren Materials in einer Feuerstätte, **dadurch gekennzeichnet, dass** basierend auf einem Ergebnis der Analyse einer Verbrennung nach Anspruch 8 eine Information bereitgestellt wird, die zu einem Regelbefehl korreliert, welcher zu einem höheren Wirkungsgrad der Verbrennung und/oder einer verringerten Feinstaubbildung während Verbrennung korreliert.
- 10
8. Verfahren nach Anspruch 7, **dadurch gekennzeichnet, dass** einem Nutzer auf einem Bildschirm eine Regelungsempfehlung der Feuerstätte und/oder eine Empfehlung für eine Zuführung eines Additivs und/oder eines Brennstoffs in eine Brennkammer angezeigt wird.
- 15
9. Maschinenlesbarer Programmcode, welcher ein Verfahren nach einem der Ansprüche 6 - 8 oder Teilen davon codiert oder eine Anweisung zur Durchführung eines Verfahren nach einem der Ansprüche 6 - 8 oder Teilen davon codiert.
- 20
10. Maschinenlesbares Speichermedium (100) auf welchem ein maschinenlesbarer Programmcode nach Anspruch 9 gespeichert ist.
- 25
- 30
- 35
- 40
- 45
- 50
- 55

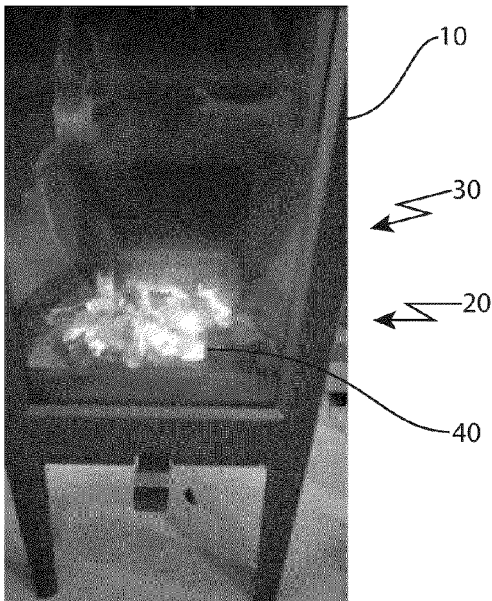


Fig. 1A

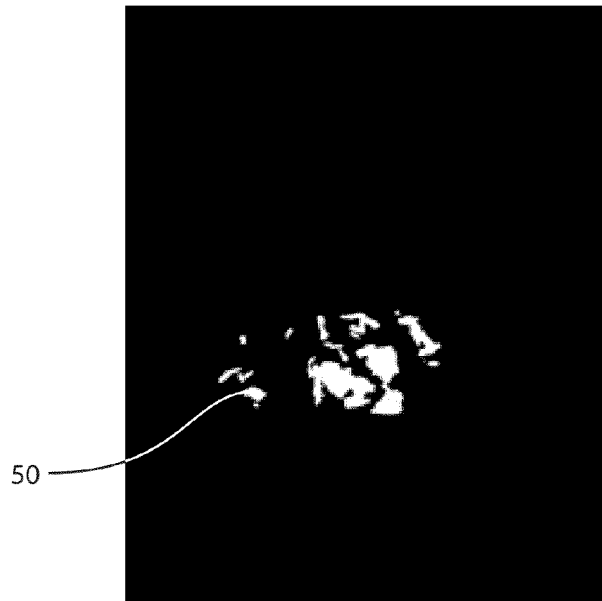


Fig. 1B

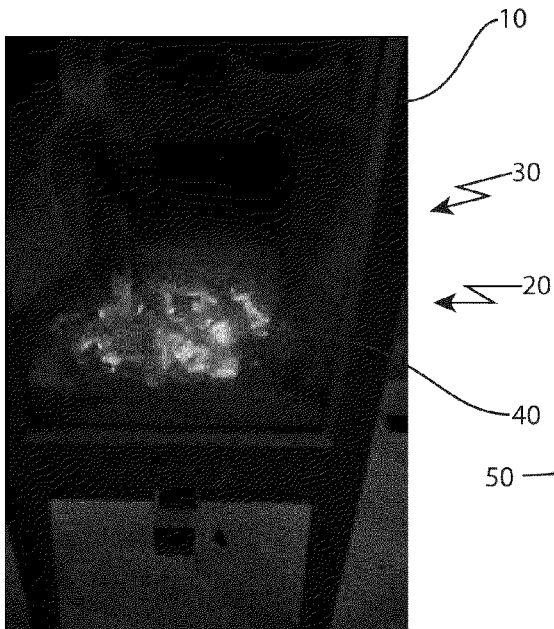


Fig. 2A



Fig. 2B

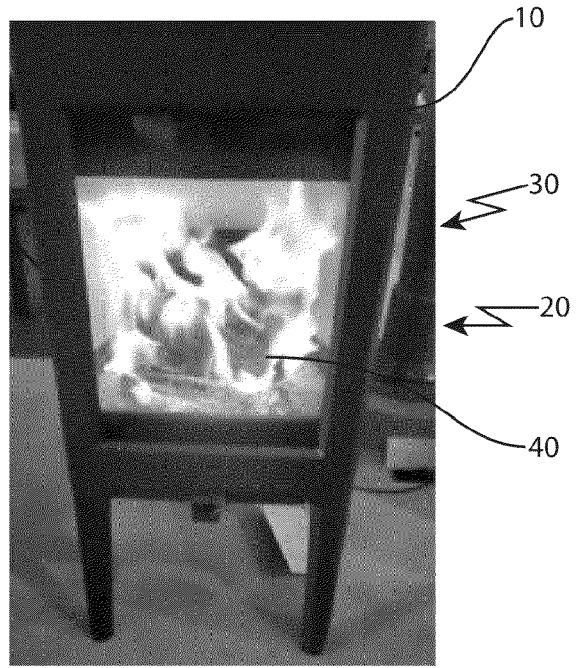


Fig. 3A

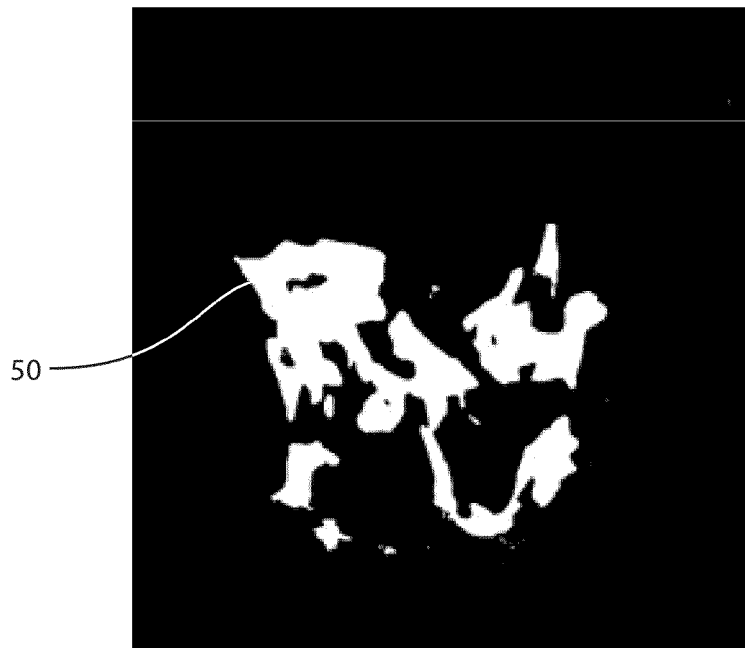


Fig. 3B

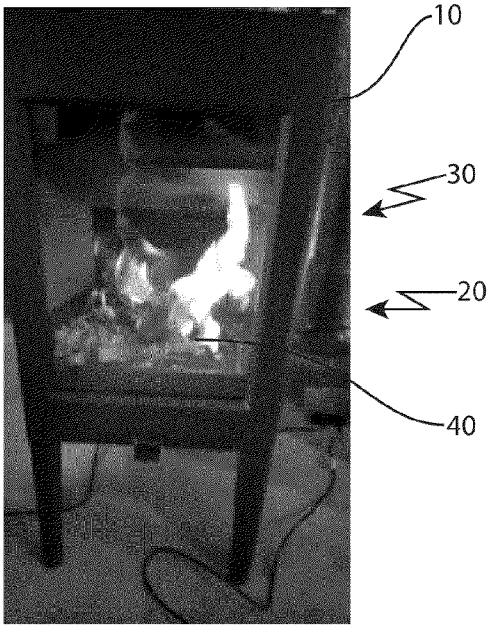


Fig. 4A

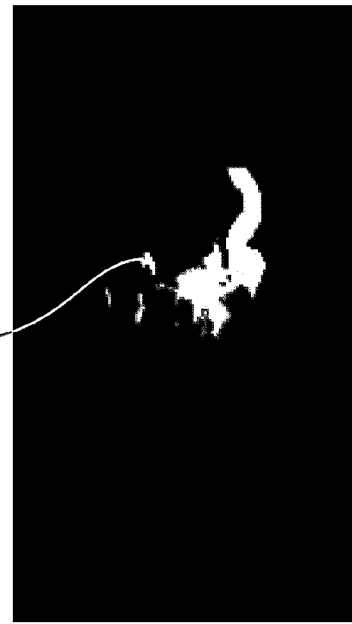


Fig. 4B

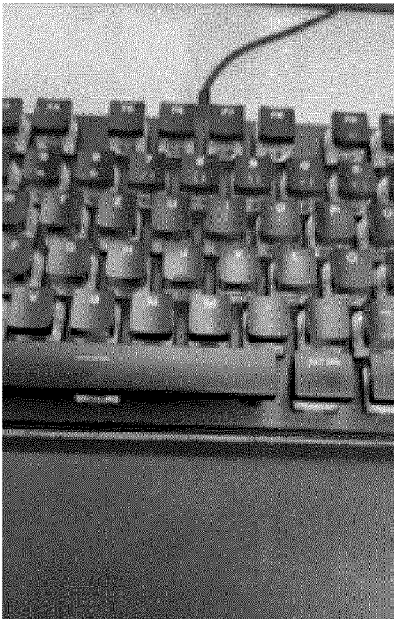


Fig. 5A

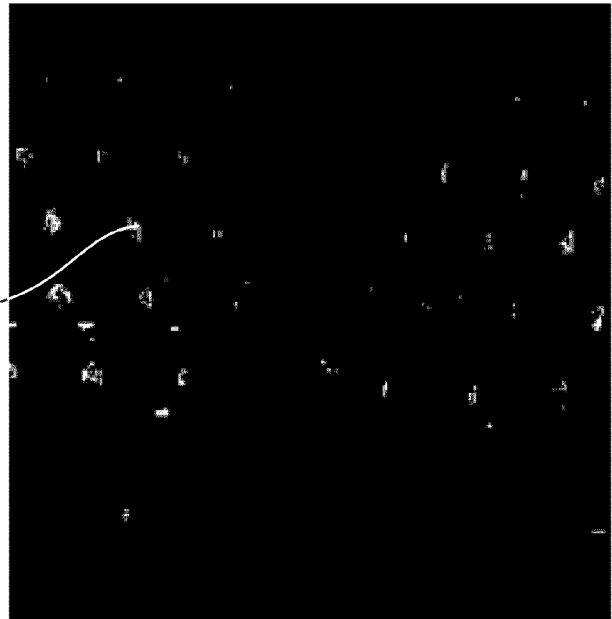


Fig. 5B

Ruhiges Feuer

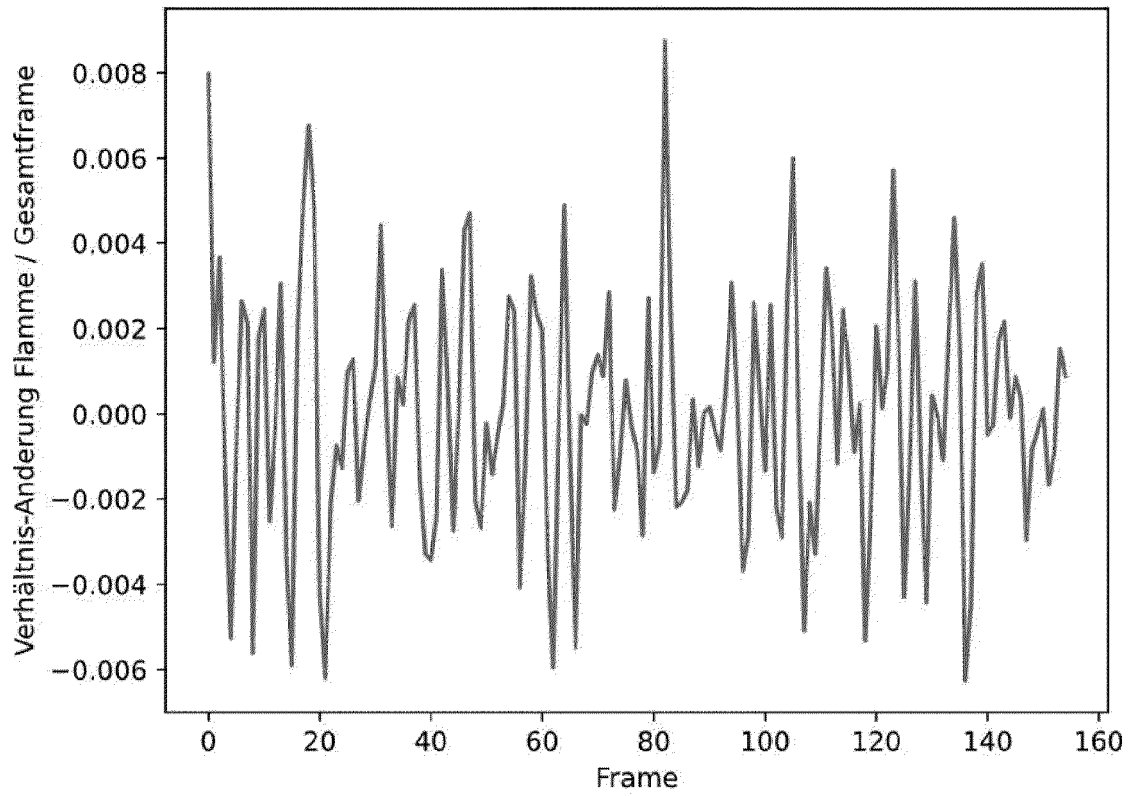


Fig. 6A

Ruhiges Feuer

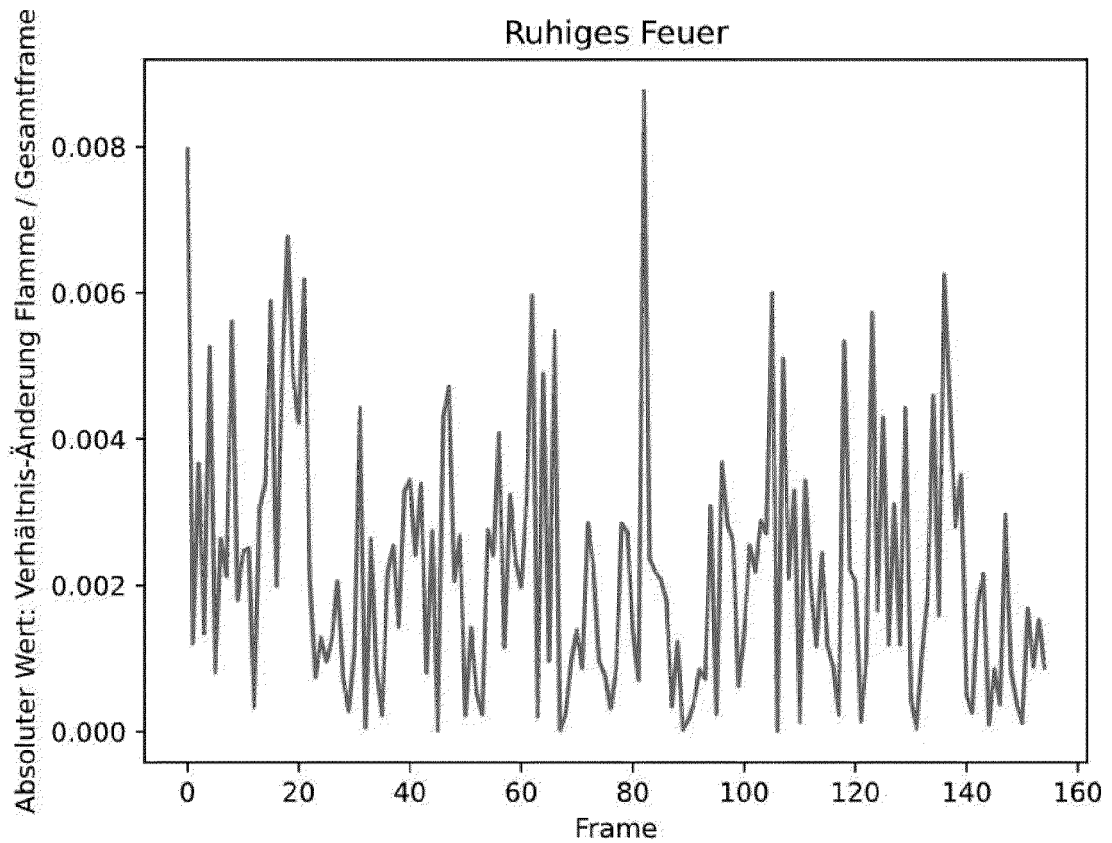


Fig. 6B

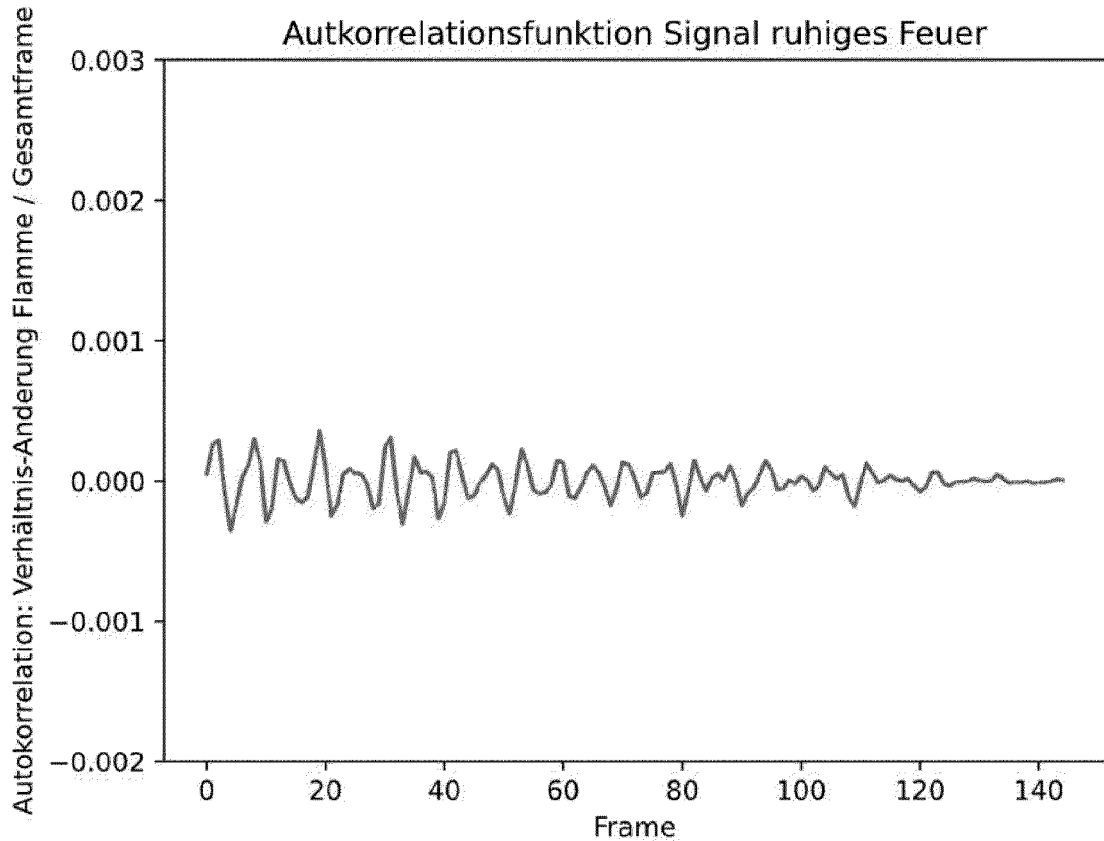


Fig. 7A

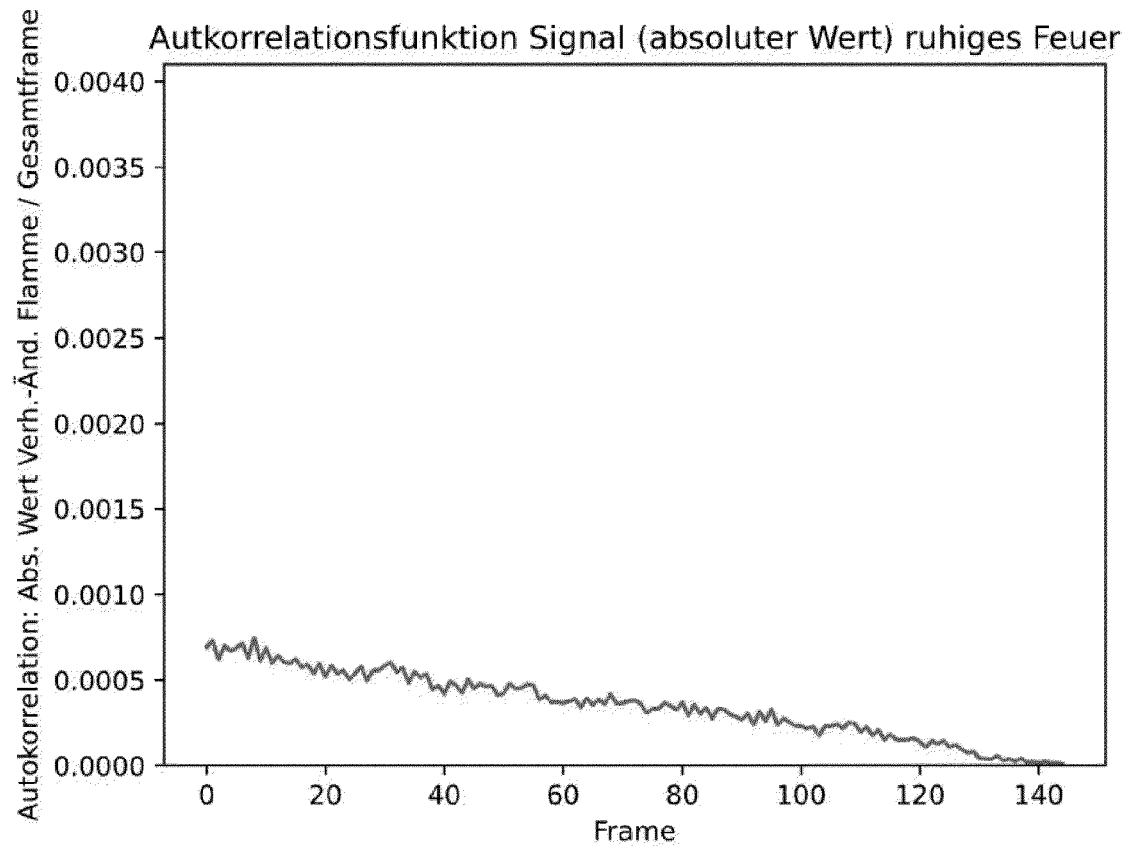


Fig. 7B

Schnelles Feuer

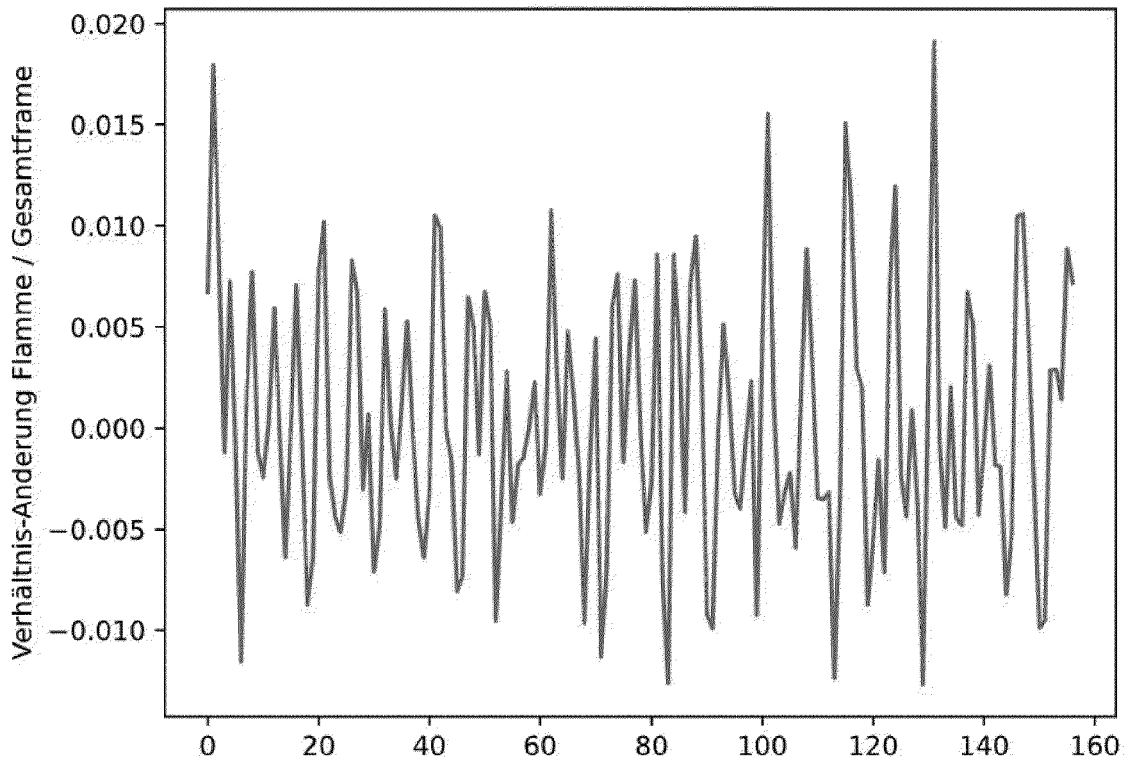


Fig. 8A

Schnelles Feuer

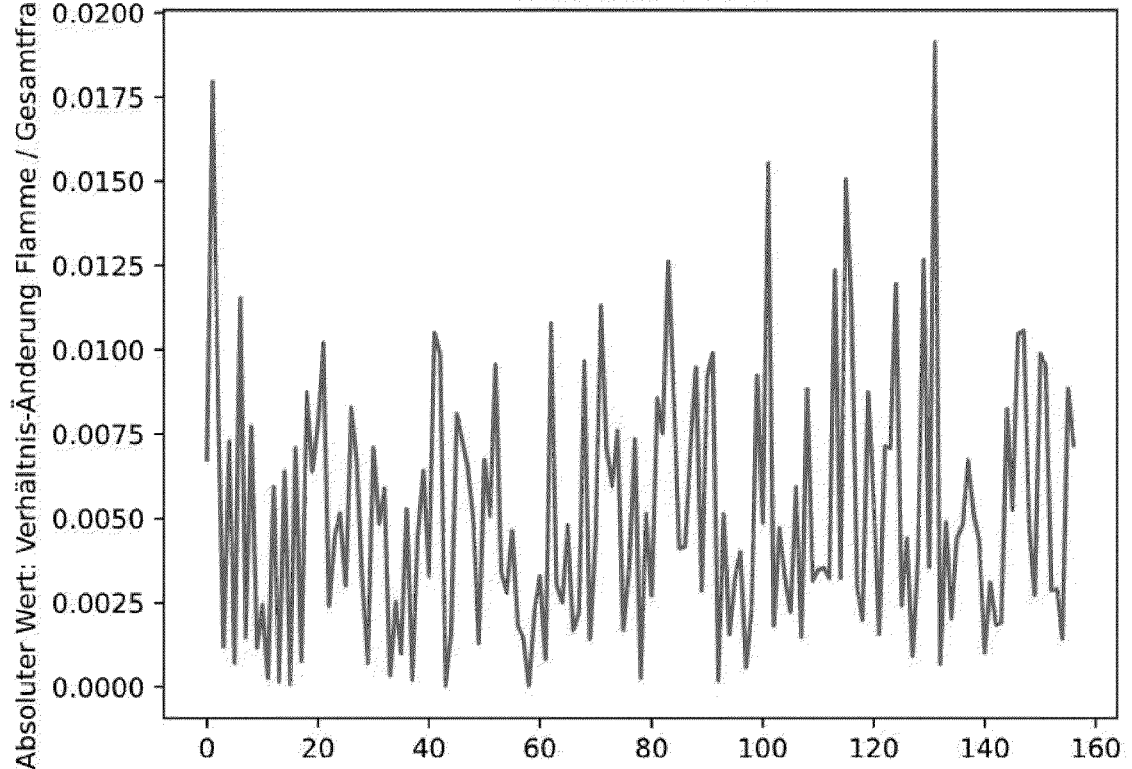


Fig. 8B

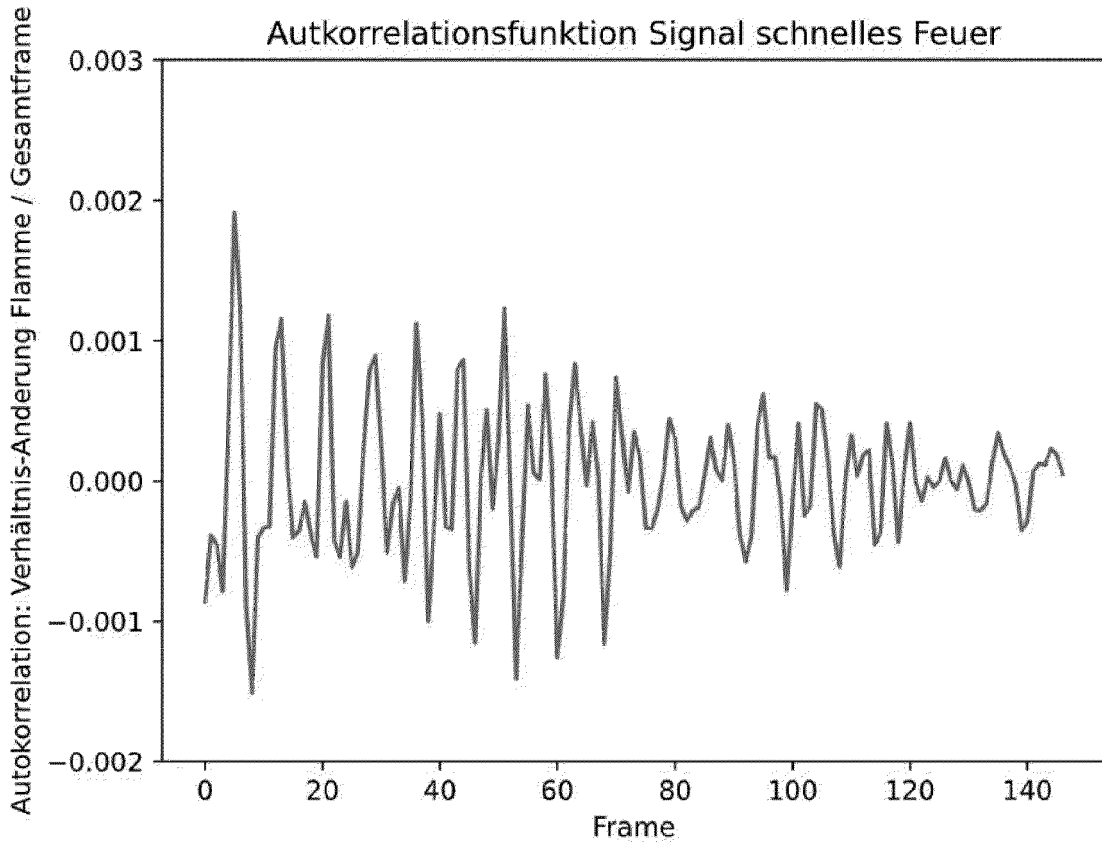


Fig. 9A

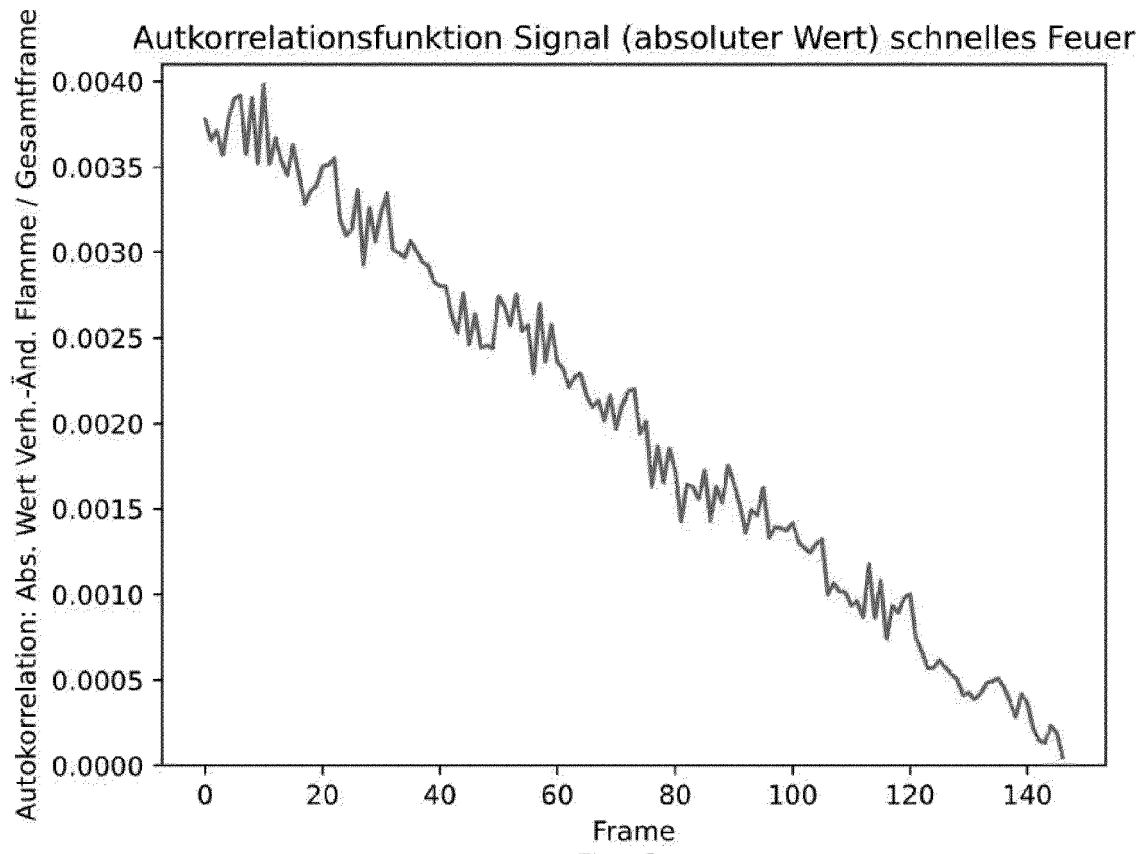


Fig. 9B



EUROPÄISCHER RECHERCHENBERICHT

Nummer der Anmeldung

EP 24 21 6916

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	EP 2 682 674 B1 (MATTHIESSEN HANS [DE]) 27. Juli 2022 (2022-07-27) * Seite 5, Absatz 32 - Seite 8, Absatz 67 * * Tabelle 1 * * Abbildungen 1-5 *	1-3,5-10	INV. F23N5/00 F23N5/08 F23B30/00 F23G7/10
X	US 6 551 094 B2 (SIEMENS AG [DE]) 22. April 2003 (2003-04-22) * Spalte 5, Zeile 23 - Spalte 6, Zeile 23 * * Anspruch 19 * * Abbildungen 1-3 *	1,4-7,9,10	
X	EP 2 979 032 B1 (REIME GERD [DE]) 4. Januar 2017 (2017-01-04) * Spalte 4, Absatz 17 - Spalte 7, Absatz 26 * * Abbildungen 1-5 *	1-3,5-7,9,10	
X	EP 2 064 490 B1 (KARLSRUHER INST FÜR TECHNOLOGIE [DE]) 17. August 2016 (2016-08-17) * Spalte 6, Absatz 25 - Spalte 9, Absatz 38 * * Abbildungen 1-5 *	1,6,7,9,10	RECHERCHIERTE SACHGEBIETE (IPC) F23N F23B F23G
Der vorliegende Recherchenbericht wurde für alle Patentansprüche erstellt			
Recherchenort <b>München</b>		Abschlußdatum der Recherche <b>3. April 2025</b>	Prüfer <b>Gavriliu, Costin</b>
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 : nichtschriftliche Offenbarung P : Zwischenliteratur		T : der Erfindung zugrunde liegende Theorien oder Grundsätze E : älteres Patentdokument, 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 (F04C03)

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

EP 24 21 6916

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.

03-04-2025

10

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
EP 2682674 B1	27-07-2022	DE 102012105932 A1	09-01-2014
		EP 2682674 A2	08-01-2014
-----			
US 6551094 B2	22-04-2003	AT E256843 T1	15-01-2004
		DE 19841877 A1	20-04-2000
		DK 1114280 T3	13-04-2004
		EP 1114280 A1	11-07-2001
		ES 2213396 T3	16-08-2004
		JP 4365036 B2	18-11-2009
		JP 2002525544 A	13-08-2002
		US 2001019814 A1	06-09-2001
		WO 0016010 A1	23-03-2000
-----			
EP 2979032 B1	04-01-2017	DE 102013005151 A1	02-10-2014
		EP 2979032 A1	03-02-2016
		WO 2014154571 A1	02-10-2014
-----			
EP 2064490 B1	17-08-2016	DE 102006044114 A1	27-03-2008
		EP 2064490 A1	03-06-2009
		ES 2593103 T3	05-12-2016
		JP 4976496 B2	18-07-2012
		JP 2010504494 A	12-02-2010
		KR 20090057173 A	04-06-2009
		US 2009190799 A1	30-07-2009
		WO 2008034508 A1	27-03-2008
-----			

15

20

25

30

35

40

45

50

55

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 Patentdokumente**

- DE 102020128231 A1 **[0003]**
- DE 102014210614 B4 **[0004]**
- EP 4056898 A1 **[0005]**