

(12) BELGISCHER PATENTANTRAG

(41) Veröffentlichungsdatum : 14/06/2024

(21) Antragsnummer : BE2023/5905

(22) Anmeldetag : 03/11/2023

(62) Teilantrag des früheren Antrags :

(62) Anmeldetag des früheren Antrags :

(51) Internationale Klassifikation : F23C 9/08

(30) Prioritätsangaben :

18/11/2022 NL 2033569

(71) Anmelder :

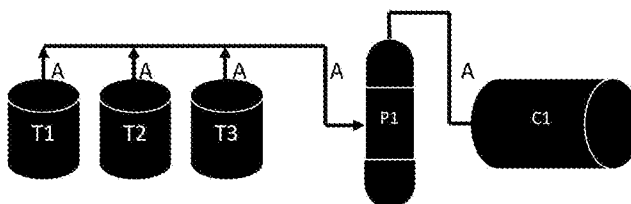
WTE-Tech B.V
GmbH
2271 EE, VOORBURG
Niederlande

(72) Erfinder :

VAN DEN BERG Johannus Petrus
2271 EE VOORBURG
Niederlande

(54) Flammenlose Verbrennung von Kohlenwasserstoffen

(57)Die vorliegende Offenbarung betrifft ein Verfahren zur flammenlosen Verbrennung, das Folgendes umfasst: Vorheizen einer Verbrennungszone auf über 800 °C; Halten der Temperatur der Verbrennungszone auf einer Temperatur zwischen 850 °C und 1400 °C; gleichzeitiges Einspritzen eines Oxidationsmittels und eines Kohlenwasserstoff-Brennstoffgemisches in die Verbrennungszone, wobei das Oxidationsmittel und das Kohlenwasserstoff-Brennstoffgemisch unabhängig voneinander von einer ersten bzw. zweiten Stelle aus eingespritzt werden; Verbrennung des Kohlenwasserstoff-Brennstoffgemisches ohne Flammen; und Ablassen von Abgasen, wobei das



Figur 1

Kohlenwasserstoff-Brennstoffgemisch ohne
Flammen verbrennt, indem eine
Ofensauerstoffkonzentration der Verbrennungszone
unter 12 Vol.-% und eine Abgasrückführungsrate von
0 bis 0 beibehalten wird.

Flammenlose Verbrennung von Kohlenwasserstoffen

Gebiet der Erfindung

Die vorliegende Erfindung bezieht sich auf Verfahren, Vorrichtungen und Systeme, die
5 für die flammenlose Verbrennung von Kohlenwasserstoffen geeignet sind.

Hintergrund der Erfindung

Kohlenwasserstoffe werden auf der ganzen Welt als Brennstoffquelle verwendet. Diese
Kohlenwasserstoffe werden in der Regel aus natürlichen Quellen wie Öl- und Gasfeldern
10 gewonnen. Ein erheblicher Teil der geförderten Kohlenwasserstoffe wird an der Förderquelle
verbrannt (abgefackelt). So wurden beispielsweise im Jahr 2020 in Saudi-Arabien 80 Milliarden
Kubikfuß Kohlenwasserstoffe entweder abgelassen oder abgefackelt, was etwa 2 % der saudi-
arabischen Erdgasförderung entspricht. Kohlenwasserstoffe werden in der Regel auch bei der
Erdölraffination abgefackelt, wo das Abfackeln als Sicherheitsmaßnahme für Abfall und/oder
15 überschüssiges Gas eingesetzt wird. Das Abfackeln von überschüssigem Gas erfolgt auch bei
der Lagerung von Kohlenwasserstoffen in Treibstofflagern (Lagerung von Chemikalien,
Erdölprodukten [wie Diesel, Benzin, Kerosin, schweres Schiffsöl usw.], Biokraftstoffen und
Pflanzenölen). Während der Lagerung werden zur Vermeidung eines Überdrucks flüchtiger
Kohlenwasserstoffe in den Lagertanks flüchtige Bestandteile abgesaugt und in eine Fackel
20 geleitet, wo sie verbrannt werden. Zum Abfackeln von Kohlenwasserstoffen kommt es auch,
wenn Lagertanks, z. B. in Öllagern oder LPG-Tankern, vor dem Befüllen mit neuen
Kohlenwasserstoffen gespült werden müssen.

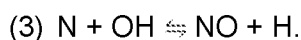
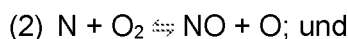
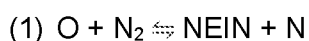
Das Abfackeln von Kohlenwasserstoffen auf herkömmliche Weise war in der Regel mit
einer erheblichen Bildung von Stickoxiden, wie Stickstoffoxid (NO) und Stickstoffdioxid (NO₂),
25 verbunden. Diese Stickstoffoxide werden häufig als NO_x abgekürzt. NO_x-Emissionen sind an
der Bildung von Smog beteiligt, der durch die Reaktion von NO_x-Verbindungen mit anderen
flüchtigen organischen Verbindungen (VOC) in der Atmosphäre entsteht. NO_x-Emissionen sind
auch eine wichtige Quelle des sauren Regens. Daher ist es sowohl aus gesundheitlicher als
auch aus ökologischer Sicht wünschenswert, die NO_x-Emissionen zu reduzieren.
30 Auch das Problem der Entgasung von Wasserstoffspeichern auf Schiffen (Seeschiffen) ähnelt
dem Problem des Abfackelns von Kohlenwasserstoffen. Bei beiden Verfahren werden
schädliche Gase in die Atmosphäre freigesetzt, die Umweltprobleme verursachen können.
Bei der Entgasung eines Kohlenwasserstofflagertanks werden unerwünschte Gase, Dämpfe
und flüchtige Stoffe wie VOC (flüchtige organische Verbindungen) aus dem Inneren eines
35 Kohlenwasserstofflagertanks entfernt. Dies wird in der Regel durch Erhitzen des
Kohlenwasserstoff-Lagertanks erreicht, um die restlichen flüssigen Kohlenwasserstoffe zu
verdampfen und die verdampften Kohlenwasserstoffe in die Atmosphäre abzulassen.

Anschließend wird der Kohlenwasserstoff-Lagertank mit Spülgasen gespült, um die unerwünschten Stoffe zu verdrängen und den Tank effektiv von gefährlichen oder unerwünschten Dämpfen zu befreien. Die unerwünschten Stoffe/Spülgase werden in der Regel durch geeignete Belüftungssysteme oder Entlüftungsmechanismen in die Atmosphäre abgegeben.

Die flammenlose Verbrennung ist eine wirksame Technologie, die zur Verringerung der Schadstoffemissionen aus dem Abfackeln und der Entgasung, insbesondere der NO_x-Emissionen, eingesetzt werden kann.

Es gibt drei Hauptquellen von NO_x Verbindungen, die bei der Verbrennung von Kohlenwasserstoffen entstehen und üblicherweise als (i) "Sofort-NO", (ii) "Brennstoff-NO" und (iii) "thermisches NO" bezeichnet werden. "Thermisches NO", das durch den "Zeldovich-Mechanismus" entsteht, ist die Hauptquelle der NO_x-Emissionen bei der Verbrennung sauberer Kohlenwasserstoffe, wie z. B. Erdgas.

Die drei Hauptreaktionen, die zur Bildung von NO_x durch thermisches NO führen, sind folgende (in vereinfachter Form):



Diese Reaktionen sind nur bei hohen Temperaturen von Bedeutung, in der Regel über 1400 °C. Daher bestand ein früherer Ansatz zur Verringerung der NO_x-Emissionen beim Abfackeln von Kohlenwasserstoffen darin, die Flammentemperatur zu senken, beispielsweise durch Flammenkühlung. Alternative Ansätze waren die "Flammenstaffelung", bei der die Reagenzien in eine primäre Verbrennungszone unter nicht-stöchiometrischen Bedingungen eingeführt werden, gefolgt von einer Abkühlung der entstehenden Verbrennungsprodukte und schließlich der Einführung in eine sekundäre Verbrennungszone. Seit 1989 wird die "flammenlose Verbrennung", oft auch als "flammenlose Oxidation" oder unter dem Markennamen "FLOX" bezeichnet, im Hinblick auf eine verringerte NO_x-Bildung untersucht. Diese flammenlose Verbrennung wurde mit einer Ofentemperatur von ca. 1000 °C und durch Vorheizen der Luft auf ca. 650 °C vor der Einleitung in die Verbrennungszone erreicht. Die flammenlose Verbrennung zeichnet sich dadurch aus, dass keine Flamme sichtbar ist und die UV-Emission minimal ist. Es wurde festgestellt, dass eine solche Flamme sauberen Brennstoff mit minimalen NO_x-Emissionen und einem Kohlenmonoxidgehalt von weniger als 1 ppm in den Abgasen verbrennen kann, was auf eine vollständige Verbrennung des Brennstoffs hinweist. EP 0463218 A1 beschreibt eine solche flammenlose Verbrennung. Die flammenlose Oxidation ermöglicht eine geringere NO_x-Erzeugung als die stufenweise Verbrennung.

Die kommerzielle Nutzung flammenloser Verbrennungssysteme hat seit Mitte der 1990er Jahre langsam zugenommen und wird mit sauberen Brennstoffen in Stahlwerken (als

Wärmequelle für Siliziumstahlbandanlagen, Glühanlagen und Beizanlagen), Stirlingmotoren und Gasturbinen genutzt.

Die Forschung hat ergeben, dass eine homogene Mischung von Brennstoff und Luft/Oxidationsmittel innerhalb der Verbrennungszone für die Bildung stabiler flammenloser Oxidationszonen von Bedeutung ist, da dadurch die Bildung von "Hot Spots" innerhalb der Verbrennungszone vermieden wird, in denen die Temperatur 1425 °C übersteigt, bei der sich schnell NO_x bildet. Eine Möglichkeit, dies zu erreichen, ist die Vorvermischung von Brennstoff/Luft- oder Brennstoff/Oxidationsmittel-Strömen vor der Einleitung in die Oxidationszone/den Ofen. Dies gewährleistet zwar eine gute Durchmischung und damit eine homogenere Verbrennung, bringt aber normalerweise Einschränkungen mit sich: (i) welche Brennstoffe verwendet werden können; (ii) welche Verunreinigungen der Brennstoff enthalten darf; und (iii) in welchen Konzentrationen solche Brennstoffe verwendet werden dürfen, um die Bildung von explosions- und/oder verpuffungsgefährdeten Gemischen zu vermeiden. Wenn beispielsweise (i) Methan als Brennstoff verwendet wird, (ii) darf der Methanbrennstoff nur bis zu 15 Volumenprozent Wasserstoff enthalten und (iii) muss das Methan unter die untere Entflammargrenze (LFL) von 4,4 Volumenprozent in Luft verdünnt werden.

Die flammenlose Verbrennung erfordert eine Mindesttemperatur von etwa 850 °C. Unterhalb dieser Temperatur findet eine unvollständige Oxidation statt. Temperaturen in der Verbrennungszone, die über der Schwellentemperatur liegen, sind relativ leicht aufrechtzuerhalten, wenn saubere Brennstoffe zuverlässig in ausreichender Menge bereitgestellt werden können. Wenn jedoch gelegentlich kurze Zeiträume auftreten, in denen der Verbrennungszone nicht genügend Brennstoff zugeführt wird, kommt es zu einer unvollständigen Verbrennung. Bei Brennstoffen, die nicht zuverlässig in ausreichender Menge zugeführt werden können, d. h. bei Brennstoffen, die im Allgemeinen in ausreichender Menge zugeführt werden können, aber in kurzen Zeiträumen von einigen Sekunden nicht, kann dieses Problem teilweise durch die Verwendung einer Verbrennungszone gelöst werden, die mit einer porösen Matrix aus Keramik mit hoher Wärmekapazität gefüllt ist. Die poröse Matrix speichert genügend Wärme, um die flammenlose Verbrennung nach den kurzen Zeiträumen ohne ausreichende Brennstoffzufuhr wieder in Gang zu setzen. Die Nachteile solch komplizierter Strukturen sind die schnelle Verschmutzung der Bahnen, die Unfähigkeit, längere Zeiträume ohne Brennstoffversorgung zu überstehen, hohe Druckunterschiede in der Matrix und Schwierigkeiten bei der Wartung. Ein weiterer Nachteil ist, dass die hohe Wärmekapazität der Matrix es erschwert, eine unzureichende Brennstoffversorgung durch einen Temperaturabfall in der Verbrennungszone zu erkennen. Bei solchen Systemen werden auch Brennstoff und Luft/Oxidationsmittel vorgemischt, so dass die Einschränkungen dieser Vormischung bestehen bleiben.

Zusammenfassung der Offenbarung

Ziel der vorliegenden Anmeldung ist es, ein Verfahren, eine Vorrichtung und ein System bereitzustellen, das die flammenlose Verbrennung von Kohlenwasserstoffbrennstoffen

- 5 ermöglicht, (i) deren Zusammensetzung sich im Laufe der Zeit ändern kann, (ii) die große Mengen an Verunreinigungen wie Wasserstoff enthalten können, (iii) mit einem hohen Volumenanteil in der Verbrennungszone und/oder (iv) mit einer Rate, die nicht ausreicht, um eine spontane flammenlose Verbrennung aufrecht zu erhalten.

- Ein weiteres Ziel der flammenlosen Verbrennungsmethode ist es, eine effiziente und gründliche
10 Verbrennung über einen weiten Bereich von Verbrennungsgaszusammensetzungen und Energiegehalten (unterer Heizwert) zu erreichen, während gleichzeitig die Bildung von NO_x minimiert wird.

- Ein weiteres Ziel der vorliegenden Erfindung ist die Bewältigung des Umweltproblems, das mit der Entgasung von Wasserstofftanks für Kohlenwasserstofftreibstoff auf Schiffen verbunden ist.
15 Die vorliegende Erfindung zielt darauf ab, einen nachhaltigeren und umweltfreundlicheren Ansatz für die Entgasung von Schiffen zu entwickeln, der sicherstellt, dass schädliche Emissionen wirksam eingedämmt und gemindert werden.

- Ein weiteres Ziel der Erfindung ist es, eine kompakte flammenlose Verbrennungsvorrichtung bereitzustellen, die beweglich ist, d.h. die Fähigkeit der flammenlosen Verbrennungsvorrichtung
20 oder des flammenlosen Verbrennungssystems, leicht transportiert und an verschiedenen Orten verwendet werden zu können.

In Anbetracht der obigen Ausführungen bezieht sich ein erster Aspekt der vorliegenden Offenbarung auf ein Verfahren zur flammenlosen Verbrennung, das Folgendes umfasst:

- (i) Vorheizen einer Verbrennungszone auf über 800 °C;
25 (ii) Aufrechterhaltung der Temperatur in der Verbrennungszone auf einer Temperatur zwischen 850 °C und 1400 °C;
(iii) gleichzeitiges Einspritzen eines Oxidationsmittels und eines Kohlenwasserstoff-Brennstoffgemisches in die Verbrennungszone, wobei das Oxidationsmittel und das Kohlenwasserstoff-Brennstoffgemisch unabhängig voneinander von einer ersten bzw. zweiten
30 Stelle eingespritzt werden
(iv) Verbrennung des Kohlenwasserstoff-Brennstoffgemischs ohne Flammen; und
(v) Entlüftung der Abgase,
wobei das Kohlenwasserstoff-Brennstoffgemisch ohne Flammen verbrennt, indem eine Ofensauerstoffkonzentration der Verbrennungszone unter 12 Volumenprozent gehalten wird
35 und eine Abgasrückführungsrate von 0 bis 0,5 beibehalten wird.

Ein zweiter Aspekt der vorliegenden Offenbarung bezieht sich auf eine flammenlose Verbrennungsvorrichtung, die für das Verfahren der flammenlosen Verbrennung des vorhergehenden Aspekts geeignet ist und Folgendes umfasst:

- einen Ofen mit einer Verbrennungszone;
- 5 - mindestens einen FLOX-Brenner, wobei der FLOX-Brenner eine erste Einspritzöffnung umfasst, wobei die erste Einspritzöffnung eine erste Düse umfasst, die so konfiguriert ist, dass sie das Einspritzen eines ersten Kohlenwasserstoff-Brennstoffgemisches ermöglicht, und eine zweite Düse, die so konfiguriert ist, dass sie das Einspritzen eines Oxidationsmittels ermöglicht;
- 10 - mindestens einen Anfahrbrenner, der unter FLOX- und Flammenverbrennungsbedingungen betrieben werden kann und eine zweite Einspritzöffnung umfasst, wobei die zweite Einspritzöffnung eine dritte Düse, die so konfiguriert ist, dass sie die Einspritzung eines ersten Hilfsbrennstoffs ermöglicht, und eine vierte Düse umfasst, die so konfiguriert ist, dass sie die Einspritzung eines Oxidationsmittels ermöglicht;
- 15 - ein Mittel zur Messung der Verbrennungstemperatur;
 - eine Abluftöffnung (Schornstein);
 wobei die erste und die zweite Einspritzöffnung parallel angeordnet sind, um die Bereitstellung des ersten Kohlenwasserstoff-Brennstoffgemisches und des Oxidationsmittels für den FLOX-Brenner zu ermöglichen; und
- 20 - wobei die dritte und die vierte Einspritzöffnung parallel angeordnet sind, um dem Startbrenner das erste Hilfsbrennstoffgemisch und das Oxidationsmittel zuführen zu können.

Ein dritter Aspekt der vorliegenden Offenbarung bezieht sich auf ein Verfahren zur Verbrennung von Boil-Off-Gas (BOG), das Kohlenwasserstoffe enthält, wobei das Verfahren umfasst:

- Sammeln von BOG mit mindestens einem Kohlenwasserstoff aus mindestens einem Kohlenwasserstoff-Lagertank;
- Zuführung des gesammelten BOG zu einer Verbrennungsvorrichtung, die zur Durchführung des Verfahrens des ersten Aspekts geeignet ist; und
- 30 - Verbrennung des BOG unter flammenlosen Bedingungen nach einem Verfahren gemäß einer beliebigen Ausführungsform des ersten Aspekts.

Ein vierter Aspekt der vorliegenden Offenbarung betrifft ein Verfahren zur Verbrennung von Restgas und/oder Flüssigkeit (RGL), das Kohlenwasserstoffe umfasst, wobei das Verfahren Folgendes umfasst:

-Verbindung eines Kohlenwasserstoff-Lagertanks mit einer Verbrennungsvorrichtung, die zur Durchführung des Verfahrens einer beliebigen Ausführungsform gemäß dem ersten Aspekt geeignet ist;

-Zuführung eines Gases, das Restgas und/oder Flüssigkeit enthält, aus dem

5 Kohlenwasserstoffspeicher zum Verbrennungsgerät;

-wenn die Temperatur der Verbrennungszone der Verbrennungsvorrichtung 850 °C übersteigt, Verbrennung des Restgases und/oder der Flüssigkeit unter flammenlosen Bedingungen gemäß einem Verfahren nach einer beliebigen Ausführungsform gemäß dem ersten Aspekt;

10 - Regelung der Zufuhr von Restgas und/oder Flüssigkeit in die Verbrennungszone, um eine Temperatur von über 850 °C aufrechtzuerhalten, damit eine flammenlose Verbrennung in der Verbrennungszone gewährleistet ist

- wenn die maximale Zufuhr von Restgas und/oder Flüssigkeit zur Verbrennungszone der Verbrennungsvorrichtung nicht mehr ausreicht, um eine Temperatur von über 850 °C

15 aufrechtzuerhalten, Zuführen von Hilfsbrennstoff zur Verbrennungszone der Verbrennungsvorrichtung und Verbrennen sowohl (i) des Hilfsbrennstoffs als auch (ii) des Restgases und/oder der Flüssigkeit unter flammenlosen Bedingungen gemäß einem Verfahren nach einer beliebigen Ausführungsform des ersten Aspekts.

20 Ein fünfter Aspekt der vorliegenden Offenbarung bezieht sich auf ein System, das zur Verbrennung von Restgas und/oder Flüssigkeit (RGL) geeignet ist und Folgendes umfasst:

-mindestens einen Lagertank für Kohlenwasserstoff; und

-eine Verbrennungsvorrichtung, die zur Durchführung des Verfahrens einer beliebigen Ausführungsform des ersten Aspekts geeignet ist,

25 wobei der/die Kohlenwasserstoffspeicher mit der Verbrennungsvorrichtung durch Mittel verbunden sind, die es ermöglichen, die Kohlenwasserstoffspeicher in Fluidverbindung mit der Verbrennungsvorrichtung zu bringen.

Ein sechster Aspekt der vorliegenden Offenbarung bezieht sich auf ein Verfahren zur
30 Entgasung eines Kohlenwasserstoff-Lagertanks, wobei das Verfahren die folgenden Schritte umfasst:

- Abpumpen von Flüssigkeit aus dem Kohlenwasserstoff-Lagertank, bis weniger als 5% des Volumens des Kohlenwasserstoff-Lagertanks mit flüssigem Kohlenwasserstoff gefüllt sind;

35 - das in Flüssigkeitsverbindung bringen des Kohlenwasserstoff-Lagertanks mit einem Zwischenlagertank;

-Verdampfung der restlichen Kohlenwasserstoff-Flüssigkeit im Kohlenwasserstoff-Lagertank;

- das Fließen verdampfenden Kohlenwasserstoffs vom Kohlenwasserstoff-Lagertank zum Zwischenlagertank;
- optionales Kondensieren und/oder Komprimieren des verdampften Kohlenwasserstoffs im Zwischenlagertank;
- 5 - Spülen des Kohlenwasserstoff-Lagertanks mit einem Inertgas;
- Zuführung des Spülgases aus dem Kohlenwasserstoff-Lagertank zu: (i) dem Lagertank und/oder (ii) einer Verbrennungsvorrichtung, die zur Durchführung des Verfahrens einer beliebigen Ausführungsform gemäß dem ersten Aspekt geeignet ist;
- Zuführung zumindest eines Teils des den Kohlenwasserstoff enthaltenden Spülgases
- 10 zum Verbrennungsgerät;
- wenn die Temperatur des Apparates 850 °C übersteigt, Verbrennung des dem Apparat zugeführten Gases unter flammenlosen Bedingungen gemäß einem Verfahren nach einer beliebigen Ausführungsform gemäß dem ersten Aspekt;
- wenn die Temperatur der Vorrichtung unter 850 °C liegt, Bereitstellung von
- 15 Hilfsbrennstoff als Beistoff zu dem den Kohlenwasserstoff enthaltenden Spülgas und Verbrennung des Hilfsbrennstoffs und des der Vorrichtung zugeführten Gases unter flammenlosen Bedingungen gemäß einem Verfahren nach einer beliebigen Ausführungsform gemäß dem ersten Aspekt.

- 20 Ein siebter Aspekt der vorliegenden Offenbarung bezieht sich auf ein System, das zur Entgasung eines Kohlenwasserstoff-Lagertanks eines Schiffes geeignet ist und Folgendes umfasst:
- einen Zwischenlagertank;
- eine Verbrennungsvorrichtung, die zur Durchführung des Verfahrens eines beliebigen
- 25 Aspekts gemäß dem ersten Aspekt geeignet ist;
- ein Mittel, um den Kohlenwasserstoff-Lagertank eines Schiffes in Flüssigkeitsverbindung mit dem Zwischenlagertank zu bringen; und
- ein Mittel, um den Kohlenwasserstoff-Lagertank eines Schiffes mit der Verbrennungsvorrichtung in Fluidverbindung zu bringen und/oder Mittel, um den
- 30 Zwischenlagertank eines Schiffes mit der Verbrennungsvorrichtung in Fluidverbindung zu bringen.

Kurze Beschreibung der Figuren

Abbildung 1 zeigt den schematischen Aufbau eines Verfahrens zur Verbrennung von Boil-Off-Gas (BOG), das aus Kohlenwasserstoffen besteht, für drei verbundene Lagertanks.

Abbildung 2 zeigt eine repräsentative Abgasrate für eine Reihe angeschlossener Speichertanks über ein Jahr.

In Abbildung 3 ist eine Vorrichtung gemäß dem zweiten Aspekt der Erfindung dargestellt.

Abbildung 4 zeigt die Veränderung der Temperatur in der Verbrennungszone und der O₂ Konzentration in Abhängigkeit vom Durchfluss des Kohlenwasserstoffgemischs im Abgas von 50 bis 910 kg/h.

Abbildung 5 zeigt die simulierte Veränderung der Temperatur in der Verbrennungszone und der O₂ Konzentration nach Volumen bei simuliertem Ausfall des Kohlenwasserstoff-Brennstoffgemischs aus dem Gasstrom und dem einströmenden LPG-Hilfsbrennstoffgas.

Abbildung 6: zeigt die simulierte Veränderung der Temperatur in der Verbrennungszone und der O₂-Konzentration in Abhängigkeit vom Volumen des Kohlenwasserstoff-Brennstoffgemischs aus dem Abgasstrom und dem einströmenden LPG-Hilfsbrennstoffgas.

Definitionen und Abkürzungen

Rezirkulationsrate, K_v . Die Rezirkulationsrate, K_v , ist wie folgt definiert:

$$K_v = M_E / (M_F + M_A),$$

wobei: (i) M_E die Masse des rückgeführten Abgases ist; (ii) M_F die Masse des Kohlenwasserstoffkraftstoffs (Kohlenwasserstoffkraftstoffgemischs) ist; und (iii) M_A die Masse der Verbrennungsluft ist. Die Rezirkulationsrate wird zur Berechnung der Rezirkulationsrate des rezirkulierten Abgases im Verhältnis zu den Massen des Kohlenwasserstoff-Kraftstoffs (Kohlenwasserstoff-Kraftstoffgemischs) und der Verbrennungsluft verwendet. Die Rückführung der Abgase kann dazu beitragen, die Verbrennungstemperatur zu kontrollieren und die Kohlenwasserstoffkonzentrationen zu verdünnen.

Detaillierte Beschreibung der Erfindung

Das System, Verfahren und Gerät der vorliegenden Erfindung ist

Ein erster Aspekt der vorliegenden Offenbarung bezieht sich auf ein Verfahren zur flammenlosen Verbrennung, das Folgendes umfasst:

(i) Vorheizen einer Verbrennungszone auf über 800 °C;

(ii) Aufrechterhaltung der Temperatur in der Verbrennungszone auf einer

Temperatur zwischen 850 °C und 1400 °C;

(iii) gleichzeitiges Einspritzen eines Oxidationsmittels und eines Kohlenwasserstoff-Brennstoffgemisches in die Verbrennungszone, wobei das Oxidationsmittel und das

Kohlenwasserstoff-Brennstoffgemisch unabhängig voneinander von einer ersten bzw. zweiten Stelle aus eingespritzt werden;

- (iv) Verbrennung des Kohlenwasserstoff-Brennstoffgemischs ohne Flammen; und
- (v) Entlüftung der Abgase,

wobei das Kohlenwasserstoff-Brennstoffgemisch ohne Flammen verbrennt, indem eine Ofensauerstoffkonzentration der Verbrennungszone unter 12 Vol.-% und eine Abgasrückführungsrate von 0 bis 0,5 beibehalten wird.

Die oben beschriebene Methode trägt dazu bei, die Verbrennungstemperaturen zu senken und die Bildung von NO_x auf Werte zu reduzieren, die weit unter den gesetzlichen Grenzwerten liegen.

Das Oxidationsmittel und das Kohlenwasserstoff-Brennstoff-Gemisch (Kohlenwasserstoff-Brennstoff) werden getrennt in die Verbrennungszone der Brennkammer im Ofen eingespeist. Es findet keine Vermischung statt, bevor das Kohlenwasserstoff-Brennstoff-Gemisch und das Oxidationsmittel in der Brennkammer vollständig vermischt sind, einschließlich des rückgeführten Abgases. Die Begriffe "Kohlenwasserstoff-Brennstoff" und "Kohlenwasserstoff-Brennstoff-Gemisch" werden austauschbar verwendet.

In einer bevorzugten Ausführungsform kann das Verfahren des ersten Aspekts einen ersten Schritt des Vorheizens der Verbrennungszone auf über 800 °C unter Verwendung eines Hilfsbrennstoffs (z. B. Erdgas) umfassen, um optimale Verbrennungsbedingungen zu gewährleisten und ein Temperaturniveau zu erreichen, bei dem die Autooxidation des Kohlenwasserstoffbrennstoffs beginnt und flammenlose Verbrennungsbedingungen hergestellt werden

Die Methode der flammenlosen Verbrennung wird im Dauerbetrieb betrieben, wobei die Oxidation der Kohlenwasserstoffe unter flammenlosen Bedingungen erfolgt.

Das Verfahren des ersten Aspekts kann einen zusätzlichen Schritt der Bereitstellung eines Hilfsbrennstoffs in den Fällen umfassen, in denen die Menge des Kohlenwasserstoff-Brennstoffgemischs schnell abnimmt (Verringerung der Konzentration des Kohlenwasserstoffs im vorhandenen Brennstoffgemisch oder Verringerung des Gesamtdurchflusses des Spülgases mit Kohlenwasserstoffen) oder der Durchfluss des Kohlenwasserstoff-Brennstoffgemischs vollständig unterbrochen wird, um Temperaturschwankungen wirksam zu dämpfen und stabile thermische Bedingungen zu gewährleisten. Die rasche Aktivierung der Hilfsbrennstoffzufuhr soll verhindern, dass der Verbrennungsprozess aufgrund des plötzlichen Rückgangs der Zufuhr des Kohlenwasserstoffgemischs vollständig erlischt. Durch eine kurze Einspritzung von Hilfskraftstoff kann die Verbrennungstemperatur schnell wieder auf das Betriebsniveau angehoben werden, wodurch ein stabiler und kontinuierlicher Verbrennungsprozess gewährleistet wird.

Darüber hinaus dient die präzise Steuerung der Abgasrückführungsrate (zwischen 0 und 0,5) der wirksamen Verdünnung der Kohlenwasserstoffkonzentration im Brennraum. Wenn die Abgasrückführungsrate 0,5 übersteigt, führt dies zu einem erhöhten Gesamtgasvolumen im System. Dies wiederum erhöht die Turbulenzen, was den Einsatz eines größeren und schwerfälligeren flammenlosen Verbrennungsapparats erforderlich macht, was nicht wünschenswert ist, da eines der Ziele der vorliegenden Erfindung darin besteht, eine kompakte Bauweise beizubehalten, die für mobile (transportable) Anwendungen geeignet ist.

Ein Vorteil dieser Methode besteht darin, dass sie die flammenlose Verbrennung von Kohlenwasserstoffgemischen mit sehr hohen Betriebskoeffizienten ermöglicht. Daher kann das Verfahren für die flammenlose Verbrennung von Kohlenwasserstoffgemischen verwendet werden, die: (i) sich im Laufe der Zeit in Bezug auf die Kohlenwasserstoffzusammensetzung ändern; (ii) sich die Durchflussmenge/Massenübertragung ändert; und/oder (iii) sich im Laufe der Zeit in Bezug auf die Konzentration der einzelnen Kohlenwasserstoffe ändert.

Unterschiedliche Kohlenwasserstoffzusammensetzungen, Strömungsgeschwindigkeiten und/oder Kohlenwasserstoffkonzentrationen führen typischerweise zu unterschiedlichen Verbrennungsenthalpien und/oder Verbrennungsentropien. Dies hat den Vorteil, dass eine flammenlose Verbrennung von Kohlenwasserstoff-Brennstoffgemischen ohne Analyse der genauen Kohlenwasserstoff-Zusammensetzung und -Konzentration, wie z. B. Boil-off-Gas, möglich ist.

Ein weiterer Vorteil des Verfahrens ist, dass es weniger Lärm erzeugt als herkömmliche Abfackelmethoden.

Ein weiterer Vorteil des vorliegenden Verfahrens ist, dass es bei niedrigeren Sauerstoffkonzentrationen (unter 12 %) in der Brennkammer arbeitet als bekannte flammenlose Oxidationssysteme. Dies hat den Vorteil, dass wesentlich höhere Konzentrationen von Kohlenwasserstoffen im Kohlenwasserstoff-Brennstoffgemisch sicher verbrannt werden können, im Bereich von 1,5 bis 15 Volumenprozent des Brennstoffgemischs, ohne die unteren Explosionsgrenzen zu überschreiten.

Ein Vorteil des gleichzeitigen separaten Einspritzens eines Oxidationsmittels und eines Kohlenwasserstoff-Brennstoffgemischs in die Verbrennungszone, wobei das Oxidationsmittel und das Kohlenwasserstoff-Brennstoffgemisch unabhängig voneinander von einer ersten bzw. zweiten Stelle aus eingespritzt werden, besteht darin, dass eine Vorvermischung des Kohlenwasserstoff-Brennstoffgemischs und des Oxidationsmittels vor dem Einführen in die Verbrennungskammer innerhalb des Ofens der flammenlosen Verbrennungsvorrichtung vermieden werden kann. Dies hat den Vorteil, dass wesentlich höhere Konzentrationen von Kohlenwasserstoffen in dem Kohlenwasserstoff-Brennstoffgemisch sicher verbrannt werden

können, im Bereich von 1,5 bis 15 Volumenprozent des Brennstoffgemisches, ohne die unteren Explosionsgrenzen zu überschreiten.

Vorzugsweise handelt es sich um ein Verfahren, bei dem das Oxidationsmittel vor der Einspritzung in die Verbrennungszone vorgewärmt wird. Diese Vorwärmung des

- 5 Oxidationsmittels hat den Vorteil, dass ein noch höheres Betriebsdrehzahlverhältnis erzielt werden kann.

Vorzugsweise handelt es sich um ein Verfahren, bei dem das Kohlenwasserstoff-Brennstoffgemisch vor der Einspritzung in die Verbrennungszone vorgewärmt wird. Diese Vorwärmung des Kohlenwasserstoffgemischs hat den Vorteil, dass noch höhere

- 10 Betriebsdrehzahlen erreicht werden können.

Vorzugsweise handelt es sich um ein Verfahren, bei dem das Kohlenwasserstoff-Brennstoffgemisch aus einem Boil-off-Gas, einem Restgas oder einer Restflüssigkeit, einem Kohlenwasserstoff-Lagerspülgas oder einer beliebigen Kombination davon ausgewählt wird.

- 15 Vorzugsweise handelt es sich um ein Verfahren, bei dem die Temperatur des Ofens auf einer Temperatur von 850 bis 1200 °C gehalten wird, indem entweder:

- Kühlluft mit einer Temperatur von unter 40°C in den Ofen eingeleitet wird;
und/oder

- Einführung eines zusätzlichen Brennstoffs in den Ofen.

- 20 Ein Vorteil dieser bevorzugten Ausführungsform besteht darin, dass die Temperatur in der Verbrennungszone besser gesteuert werden kann, indem dem Ofen kühle (<40 °C) Luft und/oder zusätzlicher Brennstoff zugeführt wird.

Vorzugsweise ist der Hilfskraftstoff ausgewählt aus Propan, Flüssiggas (LPG), Erdgas (NG), Raffineriebrenngas oder einer Kombination davon.

- 25 Vorzugsweise handelt es sich um ein Verfahren, bei dem die Sauerstoffkonzentration im Ofen zwischen 3 und 12 Volumenprozent, vorzugsweise zwischen 3 und 10 Volumenprozent, gehalten wird. Das Kohlenwasserstoff-Brennstoffgemisch (oder der Kohlenwasserstoff-Brennstoff) kann mit dem Oxidationsmittel und dem Abgas so gemischt werden, dass die Sauerstoffkonzentration im Ofen zwischen 3 und 10 Volumenprozent aufrechterhalten wird.

- 30 Die Aufrechterhaltung einer Sauerstoffkonzentration von über 3 Volumenprozent hat den Vorteil, dass die CO-Bildung minimiert wird.

Vorzugsweise handelt es sich um ein Verfahren, bei dem die Ofentemperatur auf einer Temperatur von 800 bis 1400 °C, vorzugsweise von 850 bis 1200 °C, noch bevorzugter von 900 bis 1100 °C gehalten wird.

- 35 Vorzugsweise handelt es sich um ein Verfahren, bei dem in einem ersten Schritt die Verbrennungszone unter Verwendung eines Hilfsbrennstoffs auf über 800 °C vorgeheizt wird.

Vorzugsweise handelt es sich um ein Verfahren, bei dem der Hilfstreibstoff ausgewählt ist aus Methan, Ethan, Propan, Butan, Erdgas, irgendeinem entzündbaren anderen

Kohlenwasserstoff oder entflammbaren gasförmigen Einsatzstoff (z. B. H₂) oder irgendeiner Kombination davon, besonders bevorzugt ausgewählt aus Methan, Ethan, Propan, Butan, Erdgas, irgendeinem anderen Kohlenwasserstoff, Wasserstoff oder irgendeiner Kombination davon, besonders bevorzugt ausgewählt aus Methan, Ethan, Propan, Butan.

- 5 Vorzugsweise handelt es sich um ein Verfahren, bei dem das (vorgewärmte) Oxidationsmittel mit einer Geschwindigkeit von mindestens 40 m/s, vorzugsweise mit einer Geschwindigkeit von mindestens 50 m/s, in die Oxidationszone eingeführt wird.

- Vorzugsweise handelt es sich um ein Verfahren, bei dem das erste Kohlenwasserstoff-Brennstoffgemisch mit einer Geschwindigkeit von mindestens 40 m/s, vorzugsweise
10 mindestens 50 m/s, noch bevorzugter mindestens 80 m/s, in die Oxidationszone eingeführt wird,

- Hochgeschwindigkeitsdüsen für das Kohlenwasserstoff-Brennstoffgemisch und das Oxidationsmittel sorgen für eine sofortige Vermischung der beiden Verbrennungskomponenten und des rezirkulierenden Abgases beim Einspritzen in die Brennkammer (hohe Turbulenz), was
15 zu einer vollständigen Verbrennung des Kohlenwasserstoff-Brennstoffgemisches führt.

- Vorzugsweise handelt es sich um ein Verfahren, bei dem das erste Kohlenwasserstoff-Brennstoffgemisch der Verbrennungszone mit 0,8 bis 50 Megajoule pro Normalkubikmeter (MJ/Nm³), vorzugsweise 1,0 bis 30 MJ/Nm³, besonders bevorzugt 1,5 bis 20 MJ/Nm³ zugeführt wird,

- 20 Vorzugsweise handelt es sich bei dem Verfahren um ein Verfahren, bei dem das erste Kohlenwasserstoff-Brennstoffgemisch ein Kohlenwasserstoff-Abgas ist.

- Vorzugsweise handelt es sich um ein Verfahren, bei dem, wenn das erste Kohlenwasserstoff-Brennstoffgemisch Wasserstoff enthält, das Verfahren so ausgelegt ist, dass es ein Wasserstoff enthaltendes Kohlenwasserstoff-Brennstoffgemisch wirksam handhaben
25 kann, ohne die Sicherheit aufgrund der Entflammbarkeitsmerkmale von Wasserstoff zu beeinträchtigen.

- Vorzugsweise wird das Kohlenwasserstoff-Kraftstoffgemisch mit einer Strömungsgeschwindigkeit von mindestens 50 m/s eingeleitet. Dies kann mit einer dP-Messung über dem Injektor gemessen werden. Dies hat den Vorteil, dass das Risiko von Rückfackeln
30 minimiert werden kann.

Ein zweiter Aspekt der vorliegenden Offenbarung bezieht sich auf eine flammenlose Verbrennung Vorrichtung, die für das Verfahren der flammenlosen Verbrennung des vorhergehenden Aspekts geeignet ist, umfassend:

- 35 - einen Ofen mit einer Verbrennungszone;
 - mindestens einen FLOX-Brenner, wobei der FLOX-Brenner eine erste Einspritzöffnung mit einer ersten Düse, die so konfiguriert ist, dass sie das Einspritzen eines

ersten Kohlenwasserstoff-Brennstoffgemisches ermöglicht, und eine zweite Düse, die so konfiguriert ist, dass sie das Einspritzen eines Oxidationsmittels ermöglicht, umfasst;

- mindestens einen Anfahrbrenner, der unter FLOX- und

Flammenverbrennungsbedingungen betrieben werden kann und eine zweite Einspritzöffnung

umfasst, wobei die zweite Einspritzöffnung eine dritte Düse, die so konfiguriert ist, dass sie die Einspritzung eines ersten Hilfsbrennstoffs ermöglicht, und eine vierte Düse umfasst, die so konfiguriert ist, dass sie die Einspritzung eines Oxidationsmittels ermöglicht;

- ein Mittel zur Messung der Verbrennungstemperatur; und

- eine Abluftöffnung (Schornstein);

- wobei die erste und die zweite Einspritzöffnung parallel angeordnet sind, um die Zufuhr des ersten Kohlenwasserstoff-Brennstoffgemisches und des Oxidationsmittels zum FLOX-Brenner zu ermöglichen; und

- wobei die dritte und vierte Einspritzöffnung parallel angeordnet sind, um die Zufuhr des ersten Hilfsbrennstoffgemisches und des Oxidationsmittels zum Startbrenner zu ermöglichen.

Vorzugsweise umfasst der Ofen des flammenlosen Verbrennungsgeräts eine Brennkammer mit einer Verbrennungszone. Die Verbrennungszone bezieht sich auf den spezifischen Bereich innerhalb der Brennkammer des Ofens, in dem die flammenlosen Verbrennungsreaktionen stattfinden.

Die Begriffe "Hilfsmittel" oder "Hilfsgerät" werden hier synonym verwendet.

Die Vorrichtung gemäß dem zweiten Aspekt kann vorteilhafterweise die Durchführung des Verfahrens des ersten Aspekts ermöglichen, mit allen damit verbundenen Vorteilen.

Durch die Anordnung der Einspritzöffnungen können das erste Kohlenwasserstoffgemisch und der erste Zusatzbrennstoff getrennten Brennern (FLOX-Brenner und Startbrenner) zugeführt werden, die zur FLOX-Verbrennung fähig sind. Diese Konfiguration hat den Vorteil, dass das Gerät trotz niedriger Kohlenwasserstoffkonzentrationen im ersten Kohlenwasserstoff-Brennstoffgemisch eine Betriebstemperatur aufrechterhalten kann, die die NO_x -Emissionen minimiert. Daher ermöglicht die Konfiguration dem Gerät ein hohes *Turndown*-Verhältnis. Diese Konfiguration ermöglicht es dem Gerät außerdem, eine Betriebstemperatur aufrechtzuerhalten, die die NO_x -Emissionen im Falle einer vorübergehenden Unterbrechung der Versorgung mit dem ersten Kohlenwasserstoffgemisch minimiert. Diese Konfiguration ermöglicht vorteilhafterweise den Verzicht auf eine thermische Pufferung.

Die unabhängige Einspritzung der Beschickungskomponenten (bestehend aus dem Oxidationsmittel und dem Kohlenwasserstoff-Brennstoff-Gemisch) bei minimaler

Gasgeschwindigkeit führt zu einer intensiven Vermischung am Ofeneintritt in die Brennkammer, und diese intensive Vermischung gewährleistet eine effektive und homogene Oxidation aller verfügbaren Kohlenwasserstoffe. Die Mindestgasgeschwindigkeiten am Ofeneintritt sind wichtig, um die Mischungsanforderungen zu erfüllen, da sie die Geschwindigkeit beeinflussen, mit der sich Brennstoff und Luft vermischen. Die Mindestgasgeschwindigkeiten sollten hoch genug sein, um turbulente Bedingungen an der Einspritzstelle zu gewährleisten, so dass sich Brennstoff und Luft in der Brennkammer vollständig vermischen. Sind die Gasraten zu niedrig, vermischen sich Brennstoff und Luft nicht richtig und die Verbrennung ist nicht effizient. Der Begriff Ofeneinlass bezieht sich auf den genauen Punkt innerhalb des flammenlosen Verbrennungsgeräts, an dem das Oxidationsmittel und das Kohlenwasserstoff-Brennstoff-Gemisch zusammenkommen, bevor sie in die Brennkammer gelangen. Bei der ersten Einspritzöffnung handelt es sich um eine Düse, die für die Einspritzung eines ersten Kohlenwasserstoff-Brennstoffgemischs ausgelegt ist, und um eine zweite Düse, die für die Einspritzung eines Oxidationsmittels ausgelegt ist. Die beiden Düsen sind so angeordnet, dass sich das Kohlenwasserstoff-Brennstoffgemisch und das Oxidationsmittel innig vermischen können. In der Brennkammer findet eine homogene Oxidationsreaktion in der Gasphase statt, wobei das gesamte Volumen der Brennkammer genutzt wird. Nicht-Kohlenwasserstoffe werden vollständig oxidiert (S, N, etc.). Eine breite Palette von Kohlenwasserstoffen kann verwendet werden;

Die Verbrennungskammer des Ofens hat eine kompakte Bauweise und funktioniert mit reduzierten Sauerstoffkonzentrationen (zwischen 3 und 12 Volumenprozent, vorzugsweise 3-10 Volumenprozent). Darüber hinaus stärkt der reduzierte Gehalt an Oxidationsmitteln auch die Fähigkeit der flammenlosen Verbrennungsvorrichtung, Sicherheit zu gewährleisten, vor Risiken zu schützen und einen optimalen Betrieb aufrechtzuerhalten. Somit gewährleisten das Verfahren und die Vorrichtung der vorliegenden Erfindung eine vollständige Verbrennung von Kohlenwasserstoffen, eine vollständige Oxidation von Schadstoffkomponenten (S, N und andere) und gleichzeitig eine geringe NO_x-Bildung (Stickoxide).

Die Anordnung der ersten und zweiten Einspritzöffnungen, die parallel angeordnet sind, hat den Vorteil, dass das Gerät ohne Vormischung des ersten Kohlenwasserstoff-Kraftstoffgemischs vor der Einführung in das Gerät betrieben werden kann.

Vorzugsweise kann das Flammenverbrennungsgerät beweglich gestaltet werden, so dass es von einem Ort zum anderen transportiert werden kann.

Vorzugsweise ist der flammenlose Verbrennungsapparat kompakt, da er mit Blick auf die Transportierbarkeit konstruiert wurde, um sicherzustellen, dass er überall dort, wo er benötigt wird, effizient eingesetzt werden kann, und auch der Apparat ist so konstruiert, dass er auf spezielle Transportgeräte passt, wobei beispielsweise die Brennkammer des Ofens Abmessungen von 5 Metern Länge, 2 Metern Höhe und 2 Metern Breite haben kann.

Vorzugsweise verfügt der flammenlose Verbrennungsapparat über mehrere FLOX-Brennereinheiten. Dies hat den Vorteil, dass der flammenlose Verbrennungsapparat ein noch höheres Turndown-Verhältnis aufweisen kann.

5 Vorzugsweise verfügt die flammenlose Verbrennungsvorrichtung über eine Einrichtung zur Messung des Drucks in der Verbrennungszone.

Vorzugsweise umfasst die flammenlose Verbrennungsvorrichtung ein Mittel zur Messung der O₂ Konzentration innerhalb der Verbrennungszone. Solche Mittel ermöglichen es vorteilhafterweise, die flammenlose Verbrennungsvorrichtung mit einer besseren Verbrennungskontrolle zu betreiben.

10 Vorzugsweise umfasst die flammenlose Verbrennungsvorrichtung einen Wärmetauscher. Vorzugsweise ist der Wärmetauscher so konfiguriert, dass Wärme aus dem Abgas übertragen werden kann auf: (i) das Kohlenwasserstoff-Brennstoffgemisch; (ii) das Oxidationsmittel; (iii) den Hilfsbrennstoff; (iv) die Erzeugung von Dampf zur Energieverbrennung; und/oder (v) eine beliebige Kombination davon. Dies ermöglicht
15 vorteilhafterweise eine höhere Brennstoffeffizienz, wenn die Vorrichtung mit einer niedrigen Kohlenwasserstoffkonzentration im Kohlenwasserstoffbrennstoffgemisch betrieben wird. Dies ermöglicht auch eine niedrigere Abgastemperatur, die für einen sicheren Betrieb in Bereichen mit der Gefahr von Kohlenwasserstofflecks, wie z. B. LPG-Tanks oder LPG-Tankschiffen, erforderlich sein kann.

20 Vorzugsweise umfasst die flammenlose Verbrennungsvorrichtung einen Startbrenner. Der Anfahrerbrenner ist so ausgelegt, dass die Brennkammer auf eine Temperatur von mindestens 850 °C gebracht werden kann. Vorzugsweise umfasst die flammenlose Verbrennungsvorrichtung einen Anfahrerbrenner, der mit einem Anfahrgas betrieben wird, das aus Propan, Flüssiggas (LPG), Erdgas (NG), einem Raffineriebrenngas oder einer Kombination
25 dieser Brennstoffe ausgewählt wird.

In einer bevorzugten Ausführungsform kann die flammenlose Verbrennungsvorrichtung so konfiguriert sein, dass sie das Verfahren der flammenlosen Verbrennung gemäß dem ersten Aspekt durchführt.

30 Ein dritter Aspekt der vorliegenden Offenbarung bezieht sich auf ein Verfahren zur Verbrennung von Boil-Off-Gas (BOG), das Kohlenwasserstoffe enthält, wobei das Verfahren umfasst:

- Sammeln von BOG mit mindestens einem Kohlenwasserstoff aus mindestens einem Kohlenwasserstoff-Lagertank;

35 - Zuführung des gesammelten BOG zu einer Verbrennungsvorrichtung, vorzugsweise einer flammenlosen Verbrennungsvorrichtung, die zur Durchführung des Verfahrens des ersten Aspekts geeignet ist; und

- Verbrennung des BOG unter flammenlosen Bedingungen nach einem Verfahren gemäß einer beliebigen Ausführungsform des ersten Aspekts.

In einer bevorzugten Ausführungsform kann die Verbrennungsvorrichtung zum Sammeln von Boil-off-Gas (BOG) gemäß dem dritten Aspekt eine flammenlose Verbrennungsvorrichtung sein, die so konfiguriert ist, dass sie die flammenlose Verbrennung gemäß dem Verfahren der flammenlosen Verbrennung des ersten Aspekts erleichtert und ermöglicht.

Ein vierter Aspekt der vorliegenden Offenbarung betrifft ein Verfahren zur Verbrennung von Restgas und/oder Flüssigkeit (RGL), das Kohlenwasserstoffe umfasst, wobei das Verfahren Folgendes umfasst:

- Verbindung eines Kohlenwasserstoff-Lagertanks mit einer Verbrennungsvorrichtung, vorzugsweise einer flammenlosen Verbrennungsvorrichtung, die zur Durchführung des Verfahrens einer beliebigen Ausführungsform gemäß dem ersten Aspekt geeignet ist;

- Zuführung eines Gases, das Restgas und/oder Flüssigkeit enthält, aus dem Kohlenwasserstoffspeicher zum Verbrennungsgerät;

- wenn die Temperatur der Verbrennungszone der Verbrennungsvorrichtung 850 °C übersteigt, Verbrennung des Restgases und/oder der Restflüssigkeit unter flammenlosen Bedingungen gemäß einem Verfahren nach einer beliebigen Ausführungsform gemäß dem ersten Aspekt;

- Regelung der Zufuhr von Restgas und/oder Flüssigkeit in die Verbrennungszone, um eine Temperatur von über 850 °C aufrechtzuerhalten, damit eine flammenlose Verbrennung in der Verbrennungszone gewährleistet ist

- wenn die maximale Zufuhr von Restgas und/oder Flüssigkeit zur Verbrennungszone der Verbrennungsvorrichtung nicht mehr ausreicht, um eine Temperatur von über 850 °C aufrechtzuerhalten, Zuführen von Hilfsbrennstoff zur Verbrennungszone der Verbrennungsvorrichtung und Verbrennen sowohl (i) des Hilfsbrennstoffs als auch (ii) des Restgases und/oder der Flüssigkeit unter flammenlosen Bedingungen gemäß einem Verfahren nach einer beliebigen Ausführungsform des ersten Aspekts.

Vorzugsweise umfasst das Verfahren den zusätzlichen Schritt:

- Spülen des Vorratsbehälters mit einem Inertgas und Zuführen des kohlenwasserstoffhaltigen Spülgases zum Verbrennungsgerät;

- wenn die Temperatur der Verbrennungszone der Verbrennungsvorrichtung 850 °C übersteigt, das kohlenwasserstoffhaltige Spülgas in die Verbrennungszone eingeführt wird, um die Kohlenwasserstoffe innerhalb des Spülgases unter flammenlosen Bedingungen gemäß einem Verfahren nach einer beliebigen Ausführungsform des ersten Aspekts zu verbrennen;

- Regelung der Zufuhr von Kohlenwasserstoff mit Spülgas zur Verbrennungszone, um eine Temperatur über 850 °C aufrechtzuerhalten, damit die flammenlose Verbrennung in der Verbrennungszone aufrechterhalten wird; und

- wenn die maximale Zufuhr von Spülgas zur Verbrennungszone der Verbrennungsvorrichtung nicht mehr ausreicht, um eine Temperatur von über 850 °C aufrechtzuerhalten, Zuführen von Hilfsbrennstoff zur Verbrennungszone der Verbrennungsvorrichtung und Verbrennen sowohl (i) des Hilfsbrennstoffs als auch (ii) der Kohlenwasserstoffe des Spülgases unter flammenlosen Bedingungen gemäß dem Verfahren nach dem ersten Aspekt.

Der Begriff RGL (Restgas und/oder -flüssigkeit) bezieht sich auf ein Gemisch, das sowohl Gase als auch Flüssigkeiten enthält, die nach der Primärextraktion oder -trennung in einem System, Behälter, Kohlenwasserstofflagertank oder Prozess verbleiben. Im Zusammenhang mit Kohlenwasserstoffen bezeichnet RGL insbesondere eine Kombination von Gasen und/oder Flüssigkeiten, die aus Kohlenwasserstoffverbindungen bestehen.

In einer bevorzugten Ausführungsform kann die Verbrennungsvorrichtung gemäß dem vierten Aspekt der Erfindung eine flammenlose Verbrennungsvorrichtung sein, wie sie gemäß dem zweiten Aspekt der Erfindung beschrieben ist, wobei die flammenlose Verbrennungsvorrichtung so konfiguriert ist, dass sie die flammenlose Verbrennung gemäß dem Verfahren des ersten Aspekts erleichtert und ermöglicht.

Vorzugsweise wird das Verfahren mit der Maßgabe durchgeführt, dass, wenn eine flammenlose Verbrennung nicht möglich ist, das Spülgas durch eine Fackel geleitet wird.

Vorzugsweise ist das Spülgas ausgewählt aus Stickstoff, Argon oder einer Mischung davon.

Ein fünfter Aspekt der vorliegenden Offenbarung bezieht sich auf ein System, das zur Verbrennung von Restgas und/oder Flüssigkeit (RGL) geeignet ist und Folgendes umfasst:

- mindestens einen Lagertank für Kohlenwasserstoff; und
- eine Verbrennungsvorrichtung, vorzugsweise eine flammenlose Verbrennungsvorrichtung, die zur Durchführung des Verfahrens einer beliebigen Ausführungsform des ersten Aspekts geeignet ist, wobei der/die Kohlenwasserstoffspeicher mit dem Verbrennungsgerät durch Mittel verbunden sind, die es ermöglichen, die Kohlenwasserstoffspeicher in Fluidverbindung mit dem Verbrennungsgerät zu bringen.

Ein sechster Aspekt der vorliegenden Offenbarung bezieht sich auf ein Verfahren zur Entgasung eines Kohlenwasserstoff-Lagertanks innerhalb des Systems zur flammenlosen Verbrennung gemäß dem achten Aspekt der vorliegenden Erfindung, wobei das Verfahren die folgenden Schritte umfasst:

- Abpumpen von Flüssigkeit aus dem Kohlenwasserstoff-Lagertank, bis weniger als 5 % des Volumens des Kohlenwasserstoff-Lagertanks mit flüssigem Kohlenwasserstoff gefüllt sind;

- Verbindung des Kohlenwasserstoff-Lagertanks des Behälters mit dem Zwischenlagertank;

- Verdampfung der restlichen Kohlenwasserstoff-Flüssigkeit im Kohlenwasserstoff-Lagertank;

5 - das Ermöglichen des Fließens von verdampftem Kohlenwasserstoff vom Kohlenwasserstoff-Lagertank zum Zwischenlagertank;

- optionales Kondensieren und/oder Komprimieren des verdampften Kohlenwasserstoffs im Zwischenlagertank;

10 - Zuführen mindestens eines primären Anteils des verdampften, kondensierten und/oder komprimierten Kohlenwasserstoffs aus dem Zwischenspeichertank zu einer flammenlosen Verbrennungsvorrichtung, die so konfiguriert ist, dass sie das Verfahren der flammenlosen Verbrennung gemäß dem ersten Aspekt der Erfindung durchführt, und/oder Erleichtern eines Exports eines sekundären Anteils des kondensierten Kohlenwasserstoffs,

15 - Spülen des Kohlenwasserstoff-Lagertanks im Anschluss an die Entfernung der restlichen Kohlenwasserstoff-Flüssigkeit in den vorangegangenen Schritten mit einem Inertgas, wie Stickstoff, Argon oder einem Gemisch davon;

20 - Lieferung des Kohlenwasserstoffs, die das Spülen von Gas aus dem Kohlenwasserstoff-Lagertank umfasst, an: (i) dem Zwischenspeichertank und/oder (ii) einer flammenlosen Verbrennungsvorrichtung, die zur Durchführung des Verfahrens gemäß dem ersten Aspekt geeignet ist;

- Zuführung zumindest eines Teils des den Kohlenwasserstoff enthaltenden Spülgases zu der flammenlosen Verbrennungsvorrichtung;

25 - wenn die Temperatur der Verbrennungszone der flammenlosen Verbrennungsvorrichtung 850 °C übersteigt, Verbrennung des der Vorrichtung zugeführten Gases unter flammenlosen Bedingungen gemäß einem Verfahren nach einer beliebigen Ausführungsform gemäß dem ersten Aspekt;

- Regelung der Zufuhr von Kohlenwasserstoff mit Spülgas zur Verbrennungszone, um eine Temperatur über 850 °C aufrechtzuerhalten, damit die flammenlose Verbrennung in der Verbrennungszone aufrechterhalten wird; und

30 - wenn die maximale Zufuhr von Spülgas zur Verbrennungszone der flammenlosen Verbrennungsvorrichtung nicht mehr ausreicht, um eine Temperatur von über 850 °C aufrechtzuerhalten, Zuführen von Hilfsbrennstoff zur Verbrennungszone der Verbrennungsvorrichtung und Verbrennen sowohl (i) des Hilfsbrennstoffs als auch (ii) der Kohlenwasserstoffe des Spülgases unter flammenlosen Bedingungen gemäß dem Verfahren nach dem ersten Aspekt.
35

Die oben beschriebene Methode zur Entgasung kann für das Be-/Entladen oder die Reinigung des Kohlenwasserstoff-Lagertanks eines Schiffes verwendet werden.

Der Begriff "kohlenwasserstoffhaltiges Spülgas" bezieht sich auf ein kohlenwasserstoffreiches Spülgas oder genauer gesagt auf das Gasgemisch, das während des Entgasungsvorgangs aus dem Kohlenwasserstoff-Lagertank entfernt wird, einschließlich des zum Spülen verwendeten Inertgases.

In einer bevorzugten Ausführungsform kann die Verbrennungsvorrichtung gemäß dem sechsten Aspekt der Erfindung eine flammenlose Verbrennungsvorrichtung sein, wie sie gemäß dem zweiten Aspekt der Erfindung beschrieben ist, wobei die flammenlose Verbrennungsvorrichtung so konfiguriert ist, dass sie die flammenlose Verbrennung gemäß dem Verfahren des ersten Aspekts erleichtert und ermöglicht.

Im sechsten Aspekt der vorliegenden Erfindung wird der Kohlenwasserstoff-Lagertank entleert und die restliche Kohlenwasserstoffflüssigkeit, die nicht extrahiert werden konnte, verdampft, beispielsweise durch Erhitzen. Die verdampfte Kohlenwasserstoffflüssigkeit wird in einen Zwischenspeichertank verbracht, gegebenenfalls kondensiert oder verdichtet und anschließend im Zwischenspeichertank gespeichert. Der kondensierte Kohlenwasserstoff kann dem flammenlosen Verbrennungsgerät zugeführt oder für andere Zwecke verwendet werden. In einem zusätzlichen Spülschritt wird der Kohlenwasserstoff-Lagertank mit einem Inertgas, dem Spülgas, gespült. Anschließend wird das kohlenwasserstoffreiche Spülgas nicht einfach in die Atmosphäre entlassen. Stattdessen wird es in den Zwischenspeichertank und/oder in die flammenlose Verbrennungsvorrichtung geleitet. Somit entfällt bei der vorliegenden Erfindung die Notwendigkeit der Entlüftung, durch die traditionell potenziell schädliche Emissionen in die Umwelt abgegeben werden.

In einer bevorzugten Ausführungsform kann der Kohlenwasserstoff-Lagertank ein Volumen zwischen 4000-30000 m³, vorzugsweise zwischen 4000-10000 m³ haben.

Der vorliegende Aspekt der Erfindung ist besonders vorteilhaft für die Entfernung von Restkohlenwasserstoffen aus dem Spülgas, da er mit den extremen Änderungen des Kohlenwasserstoffgehalts des Spülgases umgehen kann. Bei der Spülung von Kohlenwasserstoff-Lagertanks mit Inertgasen entsteht typischerweise ein Spülgas, das anfangs einen hohen Kohlenwasserstoffgehalt aufweist, der von leicht flüchtigen Kohlenwasserstoffen dominiert wird. Im weiteren Verlauf des Spülvorgangs nimmt der Gesamtkohlenwasserstoffgehalt mit der Zeit ab und die Zusammensetzung wird zunehmend von weniger flüchtigen Kohlenwasserstoffen dominiert. Der vorliegende Aspekt hat den Vorteil, dass Stickstoff als Spülgas verwendet werden kann, ohne dass übermäßige NO_x Emissionen entstehen. Der vorliegende Aspekt hat auch den Vorteil, dass eine Echtzeitanalyse der Gesamtkohlenwasserstoffkonzentration und/oder der Kohlenwasserstoffzusammensetzung im

Spülgas nicht erforderlich ist. Vorzugsweise wird das Spülgas aus Stickstoff, Argon oder einer Mischung davon ausgewählt, noch bevorzugter ist das Spülgas Stickstoff.

Außerdem beinhaltet die Entgasungsmethode das Auffangen und die kontrollierte Verbrennung von Kohlenwasserstoffen. Dadurch kann die Freisetzung von flüchtigen organischen

- 5 Verbindungen (VOC) und anderen schädlichen Schadstoffen in die Atmosphäre erheblich reduziert werden.

Ein siebter Aspekt der vorliegenden Offenbarung bezieht sich auf ein System, das zur Entgasung eines Kohlenwasserstoff-Lagertanks geeignet ist und Folgendes umfasst:

- 10 - Zwischenlagertank;
- eine Verbrennungsvorrichtung, vorzugsweise eine flammenlose Verbrennungsvorrichtung, die geeignet ist, das Verfahren eines beliebigen Aspekts gemäß dem ersten Aspekt durchzuführen;
- Mittel, um den Kohlenwasserstoff-Lagertank mit dem Zwischenlagertank in
15 Fluidverbindung zu bringen; und
- Mittel, um den Kohlenwasserstoffspeicher mit dem Verbrennungsgerät in Fluidverbindung zu bringen und/oder Mittel, um den Zwischenspeicher mit dem Verbrennungsgerät in Fluidverbindung zu bringen.

In einer bevorzugten Ausführungsform kann die Verbrennungsvorrichtung gemäß dem siebten

- 20 Aspekt der Erfindung eine flammenlose Verbrennungsvorrichtung sein, wie sie gemäß dem zweiten Aspekt der Erfindung beschrieben ist, wobei die flammenlose Verbrennungsvorrichtung so konfiguriert ist, dass sie die flammenlose Verbrennung gemäß dem Verfahren des ersten Aspekts erleichtert und ermöglicht.

- 25 Ein achter Aspekt der vorliegenden Offenbarung bezieht sich auf ein System zur flammenlosen Verbrennung, das mindestens einen Kohlenwasserstoffspeicher und eine flammenlose Verbrennungsvorrichtung gemäß dem zweiten Aspekt der Erfindung umfasst, wobei die flammenlose Verbrennungsvorrichtung Folgendes umfasst:

- einen Ofen mit einer Brennkammer und einer Verbrennungszone;
30 - mindestens einen FLOX-Brenner, wobei der FLOX-Brenner eine erste Einspritzöffnung umfasst, wobei die erste Einspritzöffnung eine erste Düse umfasst, die so konfiguriert ist, dass sie das Einspritzen eines ersten Kohlenwasserstoff-Brennstoffgemisches ermöglicht, und eine zweite Düse, die so konfiguriert ist, dass sie das Einspritzen eines Oxidationsmittels ermöglicht;
- mindestens einen Anfahrbrönnner, der unter FLOX- und Flammverbrennungs-
35 bedingungen betrieben werden kann und eine zweite Einspritzöffnung umfasst, wobei die zweite Einspritzöffnung eine dritte Düse, die so konfiguriert ist, dass sie die Einspritzung eines

ersten Hilfsbrennstoffs ermöglicht, und eine vierte Düse umfasst, die so konfiguriert ist, dass sie die Einspritzung eines Oxidationsmittels ermöglicht;

- ein Mittel zur Messung der Verbrennungstemperatur; und
- eine Auslassöffnung;

5 wobei die erste und die zweite Einspritzöffnung parallel angeordnet sind, um die Bereitstellung des ersten Kohlenwasserstoff-Brennstoffgemisches und des Oxidationsmittels für den FLOX-Brenner zu ermöglichen; und wobei die dritte und die vierte Einspritzöffnung parallel angeordnet sind, um die Zufuhr des ersten Zusatzbrennstoffs und gegebenenfalls des Oxidationsmittels zu einem Startbrenner zu ermöglichen, wobei der mindestens eine Kohlenwasserstoffvorratstank
10 mit der flammenlosen Verbrennungsvorrichtung verbunden ist.

In einer Ausführungsform sind die zweite Einspritzöffnung und der Ofen des Systems für flammenlose Verbrennung so konfiguriert, dass eine flammenlose Verbrennung des ersten Zusatzbrennstoffs mit einer Abgasrückführungsrate von 0 bis 0,5 möglich ist.

15 Ferner ist die Vorrichtung zur flammenlosen Verbrennung des Systems zur flammenlosen Verbrennung so konfiguriert, dass sie das Verfahren zur flammenlosen Verbrennung gemäß dem Verfahren zur flammenlosen Verbrennung des ersten Aspekts der Erfindung durchführt.

20 Ferner kann das System zur flammenlosen Verbrennung einen Zwischenspeichertank und Mittel umfassen, um den Kohlenwasserstoffspeichertank in eine Fluidverbindung mit dem Zwischenspeichertank zu bringen. Außerdem kann das System für die flammenlose Verbrennung Mittel umfassen, um den Kohlenwasserstoff-Lagertank in Fluidverbindung mit der
25 flammenlosen Verbrennungsvorrichtung zu bringen und/oder Mittel, um den Zwischenspeichertank in Fluidverbindung mit der flammenlosen Verbrennungsvorrichtung zu bringen.

Das System zur flammenlosen Verbrennung kann zur Schiffsentgasung eingesetzt werden, d. h. zur Entfernung von Kohlenwasserstoffrestgasen aus den Ladetanks
30 (Kohlenwasserstofflagertanks). In einer bevorzugten Ausführungsform kann sich der Kohlenwasserstoff-Lagertank daher innerhalb eines Schiffes befinden.

Außerdem kann die flammenlose Verbrennungsvorrichtung und/oder das System für flammenlose Verbrennung beweglich gestaltet werden und von einem Ort zum anderen transportiert werden. Das System zur flammenlosen Verbrennung kann auf verschiedenen
35 Schiffen eingesetzt werden, so dass es an unterschiedliche Schiffe und Orte, an denen eine Schiffsentgasung erforderlich ist, angepasst werden kann. Es ist so konzipiert, dass es überall dort, wo es benötigt wird, effizient eingesetzt werden kann.

Darüber hinaus kann das System zur flammenlosen Verbrennung für die flammenlose Verbrennung von Restgas und/oder Flüssigkeit (RGL) verwendet werden.

Detaillierte Beschreibung der Figuren

5 Die Offenbarung wird nun unter Bezugnahme auf die Figuren erörtert, die bevorzugte beispielhafte Ausführungsformen des Gegenstands der Offenbarung zeigen.

Abbildung 1 zeigt ein schematisches Schema für ein Verfahren zur Verbrennung von Boil-Off-Gas (BOG), das Kohlenwasserstoffe enthält. Der Begriff Boil-Off-Gas (BOG) bezieht sich auf die Verdampfung von verflüssigten Gasen wie verflüssigtem Erdgas (LNG) oder
10 Flüssiggas (LPG) oder verflüssigtem Ethan (LEG) aufgrund von Temperatur- und Druckänderungen. In diesem Beispiel gibt es drei Kohlenwasserstoff-Lagertanks [T1, T2 und T3]. Bei dem dargestellten Verfahren wird BOG, das mindestens einen Kohlenwasserstoff enthält, aus mindestens einem der Kohlenwasserstoff-Lagertanks [T1, T2 und/oder T3] gesammelt. Dies ist durch Pfeile [A1, A2 und/oder A3] dargestellt. Das mindestens einen
15 Kohlenwasserstoff enthaltende BOG kann aus einem, zwei oder allen Tanks gleichzeitig oder nacheinander entnommen werden. Das mindestens einen Kohlenwasserstoff enthaltende BOG wird wahlweise [A4] durch eine Vorbehandlungsanlage [P1], wie z. B. einen AC-Filter, geleitet, die Folgendes ermöglicht: (i) Rest-H₂S und/oder (ii) kondensierte Kohlenwasserstoffe vollständig oder teilweise aus dem BOG entfernt werden. Das gesammelte BOG, das
20 mindestens einen Kohlenwasserstoff enthält, wird einer Verbrennungsvorrichtung, vorzugsweise einer flammenlosen Verbrennungsvorrichtung, zugeführt, die zur Durchführung des Verfahrens des ersten Aspekts [C1] geeignet ist. Dies wird durch den Pfeil [A5] veranschaulicht. Das BOG wird unter flammenlosen Bedingungen gemäß einem Verfahren zur flammenlosen Verbrennung nach einer beliebigen Ausführungsform des ersten Aspekts
25 verbrannt.

Abbildung 2 zeigt eine repräsentative Abgasrate für eine Reihe von angeschlossenen Lagertanks über ein Jahr. Der Begriff "Abgas" bezieht sich auf Gase, die als Abfall- oder Nebenprodukte bei verschiedenen Vorgängen freigesetzt werden. Das typische Durchflussmuster ist für 8800 Stunden dargestellt (Durchflussrate auf der y-Achse, mit
30 Abstufungen in 100 m³/Stunde, Zeit auf der x-Achse, mit Abstufungen in 1000 Stunden), wobei alle 4 Stunden einem Datenpunkt entsprechen. Der durchschnittliche Durchfluss wird auf 145,2 m³/Stunde und der maximale Durchfluss auf 839 m³/Stunde geschätzt.

Abbildung 3 zeigt ein nicht begrenztes Beispiel für die Anordnung (PFD) einer Vorrichtung gemäß dem zweiten Aspekt der Erfindung. In diesem nicht einschränkenden
35 Beispiel umfasst der Ofen (2) der flammenlosen Verbrennungsvorrichtung eine Brennkammer mit einer Länge von 5 m, einer Höhe von 2 m und einer Breite von 2 m. Die Brennkammer ist mit einem Startbrenner, acht Hochgeschwindigkeits-Abgasinjektoren und vier Sonden für die

(Kühl-)Luftzufuhr ausgestattet. Die Sonden sind Vorrichtungen, mit denen (kühlere) Luft in die Brennkammer eingeleitet wird. Zwei LPG- oder Propan-Sonden werden für die Einspritzung von Zusatzbrennstoff installiert.

Abbildung 4 zeigt die simulierte Veränderung der Temperatur in der Verbrennungszone und der O₂ Volumenkonzentration in Abhängigkeit von der Veränderung des Durchflusses des Kohlenwasserstoffgemischs im Abgas von 50 bis 910 kg/Std. für die Startbedingungen der Anlage.

Die x-Achse ist die Zeit in Minuten, von 2 bis 29 Minuten in 4-Minuten-Schritten. Es gibt vier y-Achsen, die von links nach rechts gelesen, sind wie folgt:

1. Massenstrom von Kohlenwasserstoff-Kraftstoff (Kohlenwasserstoff-Kraftstoffgemisch) ("LCV4" in kg/h), 0 bis 1250 kg/h in Abstufungen von 250 kg/h;
2. Temperatur der Verbrennungszone (°C), 0 bis 1500 °C, in Abstufungen von 300 °C;
3. Berechneter Molenbruch O₂ (in %) von 0,0250 bis 0,160, in Abstufungen von 0,0250; und
4. Massenstrom des Hilfskraftstoffs (Propan, bezeichnet als "Fuel206", in kg/h), von 0 bis 20 kg/h, in Abstufungen von 4 kg/h.

Die Linien, beginnend von oben nach unten, da sie die y-Achse kreuzen, sind wie folgt:

- a. Temperatur, mit einem Ausgangswert von 900 °C;
- b. Durchflussmenge des Hilfskraftstoffs, mit einem Anfangswert von 2,7 kg/h;
- c. Berechneter Molenbruch O₂ , mit einem Anfangswert von 3,5 %; und
- d. Massenstrom von Kohlenwasserstoff-Kraftstoff (Kohlenwasserstoff-Kraftstoff-Gemisch), mit einem Anfangswert von 0.

In der ersten schraffierten Zone (von links nach rechts gelesen) beginnt der Kohlenwasserstoff-Brennstoff (Kohlenwasserstoff-Brennstoff-Gemisch) der Verbrennungszone im Ofen zugeführt zu werden, und die Menge des zum Vorheizen bereitgestellten Hilfsbrennstoffs beginnt sich zu verringern (und geht nach etwa 7 Minuten auf Null). Bei der Verbrennung des Kohlenwasserstoff-Brennstoffs (Kohlenwasserstoff-Brennstoff-Gemischs) wird der Verbrennungszone genügend Energie zugeführt, um die für die flammenlose Oxidation (FLOX) erforderliche Temperatur von 850 °C zu halten.

In der zweiten schattierten Zone (von links nach rechts gelesen) wurde ein Abfall der Kohlenwasserstoff-Brennstoffzufuhr (Kohlenwasserstoff-Brennstoffgemisch) simuliert. Dies führte zu einem raschen Temperaturabfall auf ca. 900 °C und einem sprunghaften Anstieg der Sauerstoffkonzentration auf ca. 12 %. Um die Temperatur über 850 °C und die Sauerstoffkonzentration im sicheren Bereich von unter 12 % zu halten, wurde rasch zusätzlicher Brennstoff zugeführt. Der Zusatzbrennstoff verbrannte unter FLOX-Bedingungen und lieferte der Verbrennungszone genügend Energie, um die Temperatur über 850 °C zu

halten, und verbrauchte genügend Sauerstoff, um die Sauerstoffkonzentration unter 12 % zu halten.

Im dritten schattierten Bereich (von links nach rechts gelesen) wurde die Zufuhr von Kohlenwasserstoff-Kraftstoff (Kohlenwasserstoff-Kraftstoff-Gemisch) aufgrund des geringen Massenstroms der Kohlenwasserstoff-Kraftstoffzufuhr gestoppt. Dementsprechend wurde die Zufuhr an Hilfskraftstoff erhöht.

Sobald die Mindesttemperatur von 800 °C erreicht ist, wird der Anfahrbrönnner vom Flammenmodus (Anfahrmodus) auf den Flox-Modus (flammenlose Oxidation) umgeschaltet, und es wird eine flammenlose Verbrennung erreicht. Bei der flammenlosen Verbrennung wird der Hilfsbrönnnstoff verwendet, um die Ofentemperatur über 800 °C zu halten, während die Menge des Kohlenwasserstoffgemischs verringert oder auf Null gesetzt wird, um die Ofentemperatur konstant zu halten,

Abbildung 5 zeigt die simulierte Veränderung der Temperatur in der Verbrennungszone und der volumenbezogenen O₂ Konzentration bei simuliertem Beginn der Abgaszufuhr in die Brennkammer des Ofens.

Die x-Achse ist die Zeit in Minuten, von 3575 bis 3640 Minuten in 5-Minuten-Schritten. Es gibt vier y-Achsen, die von links nach rechts gelesen, sind wie folgt:

1. Massenstrom von Kohlenwasserstoff-Kraftstoff ("LCV4" in kg/h), 0 bis 1260 kg/h in Abstufungen von 252 kg/h;
 2. Berechneter Molenbruch O₂ von 0,0250 bis 0,160, in Abstufungen von 0,0250;
 3. Massenstrom des Hilfskraftstoffs (Propan, bezeichnet als "Fuel206", in kg/h), von 0 bis 20 kg/h, in Abstufungen von 4 kg/h; und
 4. Temperatur der Verbrennungszone (°C), 0 bis 1500 °C, in Abstufungen von 300 °C.
- Die Linien, beginnend von oben nach unten, da sie die y-Achse kreuzen, sind wie folgt:
- a. Temperatur, mit einem Ausgangswert von 900 °C;
 - b. Durchflussmenge des Hilfskraftstoffs, mit einem Anfangswert von 3,1 kg/h;
 - c. Berechneter Molenbruch O₂, mit einem Anfangswert von 5%; und
 - d. Massenstrom von Kohlenwasserstoff-Kraftstoff, mit einem Anfangswert von 0.

Es wurde ein rascher Anstieg der Zufuhr von Kohlenwasserstoff-Kraftstoff simuliert (bei etwa 3568 Minuten), von 0 auf 950 kg/h. Dies ist repräsentativ für das Öffnen eines teilweise gefüllten Kohlenwasserstoff-Lagertanks bei Umgebungstemperatur. Die rasche Zufuhr von Kohlenwasserstoff-Kraftstoff (Kohlenwasserstoff-Kraftstoff-Gemisch) führt zu einem raschen Anstieg der Temperatur in der Verbrennungszone auf 1030 °C, zu einem raschen Abschalten der Hilfsbrönnnstoffzufuhr und zu einem raschen Anstieg der Sauerstoffkonzentration von etwa 5 % auf etwa 12 %. Es wurde eine rasche Einstellung der Zufuhr von Kohlenwasserstoff-Kraftstoff

(Kohlenwasserstoff-Kraftstoffgemisch) simuliert (bei etwa 3595 Minuten, Zone A), und zwar von 950 kg/h auf 0. Dies ist repräsentativ für das Schließen eines Wertes für einen teilweise gefüllten Kohlenwasserstoff-Lagertank bei Umgebungstemperatur. Die rasche Einstellung der Zufuhr von Kohlenwasserstoff-Brennstoff (Kohlenwasserstoff-Brennstoff-Gemisch) führt zu einem raschen Absinken der Temperatur der Verbrennungszone von etwa 1000 °C auf unter 850 °C und zu einem raschen Anstieg der Sauerstoffkonzentration von etwa 12 % auf etwa 14 %. Dies führte zu einem fast sofortigen Einschalten der Zusatzbrennstoffzufuhr bei ca. 3595 Minuten, was zu einer sehr kurzen Zeitspanne von ca. 120 s führte, in der die Temperatur unter 850 °C sank. Dies ist viel kürzer als bei vergleichbaren Methoden, und diese Methode führt dementsprechend zu einer viel geringeren NO_x-Erzeugung. Durch eine kurze Zufuhr von Zusatzbrennstoff kann die Verbrennungstemperatur also schnell wieder auf das Betriebsniveau angehoben werden, so dass ein stabiler und kontinuierlicher Verbrennungsprozess gewährleistet ist.

Abbildung 6: zeigt die simulierte Veränderung der Temperatur in der Verbrennungszone und der O₂-Konzentration in Abhängigkeit vom Volumen des Kohlenwasserstoffgemischs im Abgasstrom, wenn der Durchfluss des Kohlenwasserstoffgemischs im Abgasstrom abfällt und ein Zusatzbrennstoff wie LPG-Gas zugeführt wird.

Die x-Achse ist die Zeit in Minuten, von 3575 bis 3640 Minuten in 5-Minuten-Schritten.

Es gibt vier y-Achsen, die von links nach rechts gelesen, sind wie folgt:

1. Temperatur: i) der Verbrennungszone (°C) im Ofen und ii) des Schornsteins (°C), von 0 bis 1455 °C, in Abstufungen von 291 °C;
2. Berechneter Molenbruch O₂ von 0,090 bis 0,160, in Abstufungen von 0,016; und
3. Massenstrom von Kohlenwasserstoff-Kraftstoff ("LCV4" in kg/h), 0 bis 1260 kg/h in Abstufungen von 252 kg/h.

Die Linien, beginnend von oben nach unten, da sie die y-Achse kreuzen, sind wie folgt:

- a. Temperatur der Verbrennungszone ("Ofen T");
- b. Berechneter Molenbruch O₂, mit einem Anfangswert von etwa 0,128;
- c. Temperatur des Stapels ("Stack T"); und
- d. Massenstrom von Kohlenwasserstoff-Kraftstoff, mit einem Anfangswert von 0.

Liste der Referenznummern

- 1 Flammenloses Verbrennungsgerät
- 2 Ofen
- 3 Verbrennungszone
- 4 Erste Einspritzöffnung
- 5 Erste Düse für die Einspritzung eines ersten Kohlenwasserstoffgemisches

- 6 Zweite Einspritzöffnung
- 7 Mittel zur Messung der Verbrennungstemperatur, wie z.B. ein Thermoelement
- 8 Auspufföffnung
- 9 Fan
- 5 10 Ventil
- 11 Magnetventil
- 12 Lufteinlassfilter
- 13 Klappe für Kühlluft
- 14 Stellmotor
- 10 15 Druckschalter
- 16 Filter
- 17 Kugelhahn
- 18 Magnetspule mit Druckminderer
- 19 Ventil
- 15 20 Erster FLOX-Brenner
- 21 Zweiter FLOX-Brenner
- 22 Anfahrbrenner für den Betrieb unter FLOX- und Flammenverbrennungsbedingungen
- 23 Sauerstoffsensor
- 24 Klappe
- 20 25 Lineare Durchflusskontrolle
- 26 Luft
- 27 Kohlenwasserstoff-Kraftstoff (Kohlenwasserstoff-Kraftstoff-Gemisch)
- 28 Auspuffgas
- 29 Hilfskraftstoff
- 25

Beispiele

Die folgenden, nicht einschränkenden Beispiele veranschaulichen die Produkte und
 30 Verfahren gemäß der Offenbarung.

Beispiel 1 - Prozesssimulation eines Verfahrens gemäß der vorliegenden Offenbarung

Für die Simulation wurde ein Gerät gemäß Abbildung 3 verwendet. Die Simulation
 basierte auf dem schematischen Aufbau von Abbildung 1. Gemische aus Abgas und Luft unter
 35 minimalen, niedrigen, durchschnittlichen und maximalen Bedingungen, wie in Tabelle 1
 angegeben, wurden verwendet, um die Leistung des Verfahrens gemäß dem ersten Aspekt der

Erfindung zu modellieren, wobei eine Vorrichtung gemäß dem zweiten Aspekt der Erfindung verwendet wurde.

Die unteren Heizwerte für die minimalen und die niedrigen Mischungen werden mit 5,5 bzw. 7,7 MJ/Nm³ berechnet. Die Wärme- und Massenbilanz (W&M-Bilanz) wurde für den Durchschnittsfall aus Tabelle 1 berechnet. Es wurde festgestellt, dass ausgehend von 6,6 kmol/h LCV-Gas (= Luft-Kohlenwasserstoff-Abgasgemisch aus dem Tank, siehe Tabelle 1) 12,9 kmol/h Kaltluft für die Temperaturregelung und Sauerstoffzufuhr erforderlich sind. Der gesamte Ofen wird mit 10 %v O₂ betrieben, was einen sicheren Sauerstoffgehalt für plötzliche Schwankungen im Kohlenwasserstoffgehalt darstellt. Die Verbrennungstemperatur wird auf 1000 °C geschätzt.

Es wurde der Maximalfall simuliert, was zu einer berechneten W&M-Bilanz führte. Es wurde festgestellt, dass bei 26,4 kmol/h Tankabgasgemisch 110,6 kmol/h Kaltluft zur Temperaturregelung und Sauerstoffzufuhr benötigt werden. Auch für diesen Fall schätzen wir die effektive Verbrennungstemperatur auf 1000 °C.

Es wird geschätzt, dass das Verfahren gemäß dem ersten Aspekt zu NO_x Emissionen von weniger als 25 mg/Nm³ und weniger als 12 Teilen pro Million Volumen (ppmv) führt. Es wird geschätzt, dass, wenn das Verfahren durchgeführt wird, bei dem die Sauerstoffkonzentration des Ofens bei 3 bis 12 Vol.-% gehalten wird, dies zu: (i) NO_x - Emissionen von weniger als 25 mg/Nm³ und weniger als 12 ppmv; (ii) CO -Emissionen von weniger als 20 mg/Nm³ und weniger als 16 ppmv; und (iii) Gesamtemissionen organischer Verbindungen von weniger als 2 mgC/Nm³ und weniger als 4 ppmv führt.

Komponente	Minimum	Niedrig	Durchschnitt	Maximum	Einheiten
C1-C2	0.0	0.4	4.7	12.5	kg/Stunde
C3-C5	0.0	1.0	12.6	86.5	kg/Stunde
Insgesamt	0.0	1.4	17.3	99	kg/Stunde
Luft	0.0	14	176	700	kg/Stunde
Gesamtfluss	0.0	15.4	193.3	799	kg/Stunde

Tabelle 1. Tankabgas - Gasfluss und Zusammensetzung.

Beispiel 2 - Dynamische Prozesssimulation eines Verfahrens gemäß der vorliegenden Offenbarung

In Anbetracht der starken Durchflussschwankungen, die für die Abgasströmungsmuster in Tanks charakteristisch sind [Abbildung 2], wurde eine Reihe dynamischer Simulationen

durchgeführt, um die Reaktion des Systems auf rasche Änderungen des Abgasdurchflusses zu quantifizieren.

Die Schlüsselemente der jeweiligen Teile des erweiterten Prozessflussdiagramms (PFD) sind wie folgt:

- 5 1. Das Gaszufuhrsystem ohne Tank umfasst einen Gasdruckerhöher und eine Durchflussregelung. In unseren Simulationen sind wir von einem Ausgangsdruck (ab Tank) von 103 kPa ausgegangen, der an das tatsächliche Niveau angepasst werden muss.
- 10 2. Der Hilfsbrennstoff, d. h. ein Gas, bei dem es sich um Propan oder LPG handeln kann (optional kann auch Erdgas, NG, verwendet werden), gewährleistet die Brennstoffsteuerung für den Schritt des Vorheizens einer Verbrennungszone auf über 800 °C und die zusätzliche Brennstoffzugabe im Falle einer sehr mageren Abgaszusammensetzung sowie für die Aufrechterhaltung der Ofentemperatur über 800 °C während des Nullstroms.
- 15 3. Das Oxidationsmittel wurde aus der Verbrennungsluft ausgewählt. Die Frischluftzufuhr wurde geregelt für: (i) die Verbrennung, (ii) die O₂ Konzentration und (iii) die Temperaturregelung.
- 20 4. Der Brennerbereich und die Verbrennungskammer des Ofens umfassten einen Satz von 8 Gasbrennern mit Kohlenwasserstoffgemisch (Abbildung 3). Jeder Brenner wurde mit einer Mindestkapazität von 45 kg/Std. und einer Höchstkapazität von 140 kg/Std. modelliert. Zusätzlich wurde ein Anfahrbrenner modelliert, um die Brennkammer beim Kaltstart auf über 800 °C vorzuheizen oder zusätzliche Wärme zu liefern, um die Temperatur während der flammenlosen Verbrennung über 850 °C zu halten. Für die Fälle ohne Durchfluss wurden zwei zusätzliche Propan- oder LPG-Sonden modelliert. Für die dynamische Simulation sind nur die 8 LCV-Gasbrenner relevant.
- 25 5. Die Betriebsdynamik der Anlage wurde mit einer kontinuierlichen Änderung des Eingangsgasstroms von 50 auf 910 kg/h, einem Anstieg von 50 auf 910 kg/h innerhalb von 5 Minuten, gefolgt von einem plötzlichen Rückgang des Eingangsstroms auf 50 kg/h und einem Abfall auf 50 kg/h innerhalb von 1 Minute simuliert.
- 30 6. In Abbildung 5 ist die Systemreaktion über einen Zeitraum von 10 Minuten aufgezeichnet. Für Schlüsselparameter wie die Ofentemperatur und die O₂ Konzentration im Rauchgas sind folgende Änderungen zu erkennen:
 - mit dem raschen Anstieg des Durchflusses schwankt die Konzentration von O₂ zwischen 12,9 %v (Ausgangswert) und 11,7 %v (Tiefstwert), während die Temperatur in der Verbrennungszone zwischen 977 und 1044 °C schwankt, beides gut unter Kontrolle; und
 - 35 - Mit dem plötzlichen Abfall des Einlassgasstroms des Kohlenwasserstoffgemischs haben wir berechnet, dass die Temperatur in der Verbrennungszone kurzzeitig auf 902 °C sinkt, während die Sauerstoffkonzentration auf 13 Volumenprozent

ansteigt, gefolgt von einem Absinken auf 12 Volumenprozent in der anschließenden Stabilisierung. Die gesamte Dynamik zeigt eine wirksame Kontrolle der Schlüsselparameter für die Verbrennungskammer, die eine vollständige und stabile Verbrennung über die gesamte Bandbreite des Gaszuflusses des Kohlenwasserstoffgemischs von niedrig bis hoch und zurück bis niedrig gewährleistet.

In einer analogen Simulation über einen längeren Zeitraum (65 Minuten) wurde die Auswirkung eines Null-Gasflusses in Kombination mit einströmendem Hilfsbrennngas (in unserem Beispiel LPG) analysiert. Wie aus Abbildung 6 hervorgeht, wird die Temperatur der Verbrennungszone mit dem einströmenden LPG-Gas innerhalb der Anforderungen der Methode gut geregelt. Als Reaktion auf die Verringerung der Luftzufuhr zur Steuerung der Temperatur der Verbrennungszone (Verringerung des Durchflusses aufgrund der niedrigeren Ofentemperatur) kann der O₂ -Gehalt in der Brennkammer auf 5 Volumenprozent sinken, was immer noch im richtigen Fenster für eine vollständige Verbrennung unter flammenlosen Verbrennungsbedingungen liegt. Daher wird das vorliegende Verfahren, wenn es optional den Schritt umfasst, bei dem die Temperatur des Ofens auf einer Temperatur von 850 bis 1200 °C gehalten wird, indem ein Hilfsbrennstoff in den Ofen eingeführt wird, so simuliert, dass es vorteilhaft eine flammenlose Verbrennung ermöglicht, die zeitweilige Zufuhrschocks des Kohlenwasserstoff-Brennstoffgemischs ertragen kann, ohne unerwünschte Mengen an NO_x oder CO zu emittieren.

Ansprüche

1. Eine flammenlose Verbrennungsvorrichtung (1) für flammenlose Verbrennung, die Folgendes umfasst:
- 5 - einen Ofen (2) mit einer Verbrennungszone (3);
 - mindestens einen FLOX-Brenner (20), wobei der FLOX-Brenner eine erste Einspritzöffnung (4) umfasst, wobei die erste Einspritzöffnung (4) eine erste Düse (5) umfasst, die so konfiguriert ist, dass sie das Einspritzen eines ersten Kohlenwasserstoff-Brennstoffgemisches ermöglicht, und eine zweite Düse, die so konfiguriert ist, dass sie das
- 10 Einspritzen eines Oxidationsmittels ermöglicht;
 - mindestens einen Anfahrbrenner (22), der in der Lage ist, unter FLOX- und Flammenverbrennungsbedingungen zu arbeiten, mit einer zweiten Einspritzöffnung (6), wobei die zweite Einspritzöffnung (6) eine dritte Düse umfasst, die so konfiguriert ist, dass sie die Einspritzung eines ersten Hilfsbrennstoffs ermöglicht, und eine vierte Düse, die so konfiguriert ist, dass sie
- 15 die Einspritzung eines Oxidationsmittels ermöglicht;
 - ein Mittel zur Messung der Verbrennungstemperatur (7); und
 - eine Auslassöffnung (8);
 - wobei die erste und die zweite Einspritzöffnung parallel angeordnet sind, um die Bereitstellung des ersten Kohlenwasserstoff-Brennstoffgemisches und des Oxidationsmittels für
- 20 den FLOX-Brenner zu ermöglichen; und
 - wobei der dritte und der vierte Einspritzanschluss parallel angeordnet sind, um die Zufuhr des ersten Hilfskraftstoffs und gegebenenfalls des Oxidationsmittels zu einem Startbrenner zu ermöglichen.
- 25 2. Flammenlose Verbrennungsvorrichtung nach Anspruch 1, wobei die zweite Einspritzöffnung und der Ofen so konfiguriert sind, dass sie eine flammenlose Verbrennung des ersten Hilfsbrennstoffs mit einer Abgasrückführungsrate von 0 bis 0,5 ermöglichen.
3. Verfahren zur flammenlosen Verbrennung in einer flammenlosen Verbrennungsvorrichtung
- 30 nach einem der Ansprüche 1 bis 3, umfassend:
- (i) Vorheizen einer Verbrennungszone auf über 800 °C;
- (ii) Aufrechterhaltung der Temperatur in der Verbrennungszone auf einer Temperatur zwischen 850 °C und 1400 °C;
- (iii) gleichzeitiges Einspritzen eines Oxidationsmittels und eines Kohlenwasserstoff-
- 35 Brennstoffgemischs in die Verbrennungszone, wobei das Oxidationsmittel und das Kohlenwasserstoff-Brennstoffgemisch unabhängig voneinander von entsprechenden ersten und zweiten Stellen eingespritzt werden,

(iv) Verbrennung des Kohlenwasserstoff-Brennstoffgemischs ohne Flammen; und

(v) Entlüftung der Abgase,

wobei das Kohlenwasserstoff-Brennstoffgemisch ohne Flammen verbrennt, indem eine
Ofensauerstoffkonzentration der Verbrennungszone unter 12 Volumenprozent gehalten wird

5 und eine Abgasrückführungsrate von 0 bis 0,5 beibehalten wird.

4. Verfahren nach Anspruch 3, bei dem das Oxidationsmittel vor der Einspritzung in die
Verbrennungszone vorgewärmt wird.

10 5. Verfahren nach einem der Ansprüche 3 bis 4, bei dem das Kohlenwasserstoff-
Brennstoffgemisch vor dem Einspritzen in die Verbrennungszone vorgewärmt wird.

6. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei das Kohlenwasserstoff-
Brennstoffgemisch aus einem Boil-off-Gas, einem Restgas oder einer Restflüssigkeit, einem
15 Kohlenwasserstoff-Lagerspülgas oder einer Kombination davon ausgewählt wird.

7. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem die Temperatur des Ofens
auf einer Temperatur von 850 bis 1200 °C gehalten wird, indem entweder:

- 20 - Luft mit einer Temperatur von unter 40°C in den Ofen eingeleitet wird; und/oder
- ein zusätzlicher Brennstoff in den Ofen eingeführt wird.

8. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem die Sauerstoff-konzentration
im Ofen auf 3 bis 12 Vol.-%, vorzugsweise 3 bis 10 Vol.-%, gehalten wird.

25 9. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die Ofentemperatur auf einer
Temperatur von 800 bis 1400 °C, vorzugsweise von 850 bis 1200 °C, noch bevorzugter von 900
bis 1100 °C gehalten wird.

10. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei das Verfahren einen ersten
30 Schritt des Vorheizens der Verbrennungszone auf über 800 °C unter Verwendung eines
Hilfsbrennstoffs umfasst.

11. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei der Hilfstreibstoff ausgewählt
ist aus Methan, Ethan, Propan, Butan, Erdgas, einem anderen Kohlenwasserstoff oder
35 entflammaren gasförmigen Einsatzstoff oder einer Kombination davon, besonders bevorzugt
ausgewählt aus Methan, Ethan, Propan, Butan, Erdgas, einem anderen Kohlenwasserstoff,

Wasserstoff oder einer Kombination davon, besonders bevorzugt ausgewählt aus Methan, Ethan, Propan, Butan.

12. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei das (vorgewärmte)
5 Oxidationsmittel mit einer Geschwindigkeit von mindestens 40 m/s, vorzugsweise mit einer Geschwindigkeit von mindestens 50 m/s, in die Oxidationszone eingeleitet wird.
13. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei das erste Kohlenwasserstoff-Brennstoffgemisch mit einer Geschwindigkeit von mindestens 40 m/s, vorzugsweise von
10 mindestens 50 m/s, in die Oxidationszone eingeführt wird.
14. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei das erste Kohlenwasserstoff-Brennstoffgemisch der Verbrennungszone mit 0,8 bis 50 Megajoule pro Normalkubikmeter (MJ/Nm³), vorzugsweise 1,0 bis 30 MJ/Nm³, besonders bevorzugt 1,5 bis 20 MJ/Nm³,
15 zugeführt wird.
15. Verfahren nach Anspruch 11, wobei das Verfahren einen Schritt der Bereitstellung des Hilfskraftstoffs während eines raschen Rückgangs des Niveaus des Kohlenwasserstoff-Kraftstoffgemischs oder des vollständigen Wegfalls des Kohlenwasserstoff-Kraftstoffgemischs
20 umfasst.
16. Verfahren zur Verbrennung von Boil-Off-Gas (BOG), das Kohlenwasserstoffe enthält, wobei das Verfahren umfasst:
- Sammeln von BOG mit mindestens einem Kohlenwasserstoff aus mindestens einem
25 Kohlenwasserstoff-Lagertank;
 - Zuführen des gesammelten BOG zu einer Verbrennungsvorrichtung, vorzugsweise einer flammenlosen Verbrennungsvorrichtung nach Anspruch 1, die zur Durchführung des Verfahrens nach einem der Ansprüche 3-15 geeignet ist; und
 - Verbrennung des BOG unter flammenlosen Bedingungen gemäß einem Verfahren
30 nach einem der Ansprüche 3-15.
17. Verfahren zur Verbrennung von Restgas und/oder Flüssigkeit (RGL), die Kohlenwasserstoffe enthalten, wobei das Verfahren umfasst:
- Verbinden eines Kohlenwasserstoff-Lagertanks mit einer Verbrennungsvorrichtung,
35 vorzugsweise einer flammenlosen Verbrennungsvorrichtung nach Anspruch 1, die zur Durchführung des Verfahrens nach einem der Ansprüche 3 bis 15 geeignet ist, in Fluidverbindung bringt;

- Zuführung eines Gases, das Restgas und/oder Flüssigkeit enthält, aus dem Kohlenwasserstoffspeicher zu der Verbrennungsvorrichtung, vorzugsweise der flammenlosen Verbrennungsvorrichtung;

- Regelung der Zufuhr von Restgas und/oder Flüssigkeit in die Verbrennungszone, um eine Temperatur von über 850 °C aufrechtzuerhalten, damit eine flammenlose Verbrennung in der Verbrennungszone gewährleistet ist,

- wenn die maximale Zufuhr von Restgas und/oder Flüssigkeit zur Verbrennungszone der Verbrennungsvorrichtung nicht mehr ausreicht, um eine Temperatur von über 850 °C aufrechtzuerhalten, Zuführen von Hilfsbrennstoff zur Verbrennungszone der Verbrennungsvorrichtung und Verbrennen sowohl (i) des Hilfsbrennstoffs als auch (ii) des Restgases und/oder der Flüssigkeit unter flammenlosen Bedingungen gemäß einem der Ansprüche 3 bis 15.

18. Verfahren nach Anspruch 17, wobei das Verfahren den folgenden zusätzlichen Schritt umfasst:

- Spülen des Kohlenwasserstoff-Lagertanks mit einem Inertgas, wobei das Spülgas vorzugsweise aus Stickstoff, Argon oder einer Mischung davon ausgewählt wird, und Zuführen des Kohlenwasserstoffs, der das Spülgas enthält, zu der Verbrennungsvorrichtung, vorzugsweise einer flammenlosen Verbrennungsvorrichtung;

- wenn die Temperatur der Verbrennungszone der Verbrennungsvorrichtung 850 °C übersteigt, das kohlenwasserstoffhaltige Spülgas in die Verbrennungszone eingeführt wird, um die Kohlenwasserstoffe innerhalb des Spülgases unter flammenlosen Bedingungen gemäß einem Verfahren nach den Ansprüchen 3-15 zu verbrennen;

- Regelung der Zufuhr von Kohlenwasserstoff mit Spülgas zur Verbrennungszone, um eine Temperatur über 850 °C aufrechtzuerhalten, damit die flammenlose Verbrennung in der Verbrennungszone aufrechterhalten wird; und

- wenn die maximale Zufuhr von Spülgas zur Verbrennungszone der Verbrennungsvorrichtung nicht mehr ausreicht, um eine Temperatur von über 850 °C aufrechtzuerhalten, Zuführen von Hilfsbrennstoff zur Verbrennungszone der Verbrennungsvorrichtung und Verbrennen sowohl (i) des Hilfsbrennstoffs als auch (ii) der Kohlenwasserstoffe des Spülgases unter flammenlosen Bedingungen gemäß dem Verfahren nach den Ansprüchen 3-15.

19. Ein System für flammenlose Verbrennung, das Folgendes umfasst:

- mindestens einen Kohlenwasserstoff-Lagertank und eine flammenlose Verbrennungsvorrichtung nach Anspruch 1, wobei die flammenlose Verbrennungsvorrichtung einen Ofen mit einer Brennkammer und einer Verbrennungszone umfasst;

- mindestens einen FLOX-Brenner, wobei der FLOX-Brenner eine erste Einspritzöffnung umfasst, wobei die erste Einspritzöffnung eine erste Düse umfasst, die so konfiguriert ist, dass sie das Einspritzen eines ersten Kohlenwasserstoff-Brennstoffgemisches ermöglicht, und eine zweite Düse, die so konfiguriert ist, dass sie das Einspritzen eines Oxidationsmittels ermöglicht;
- 5 mindestens einen Anfahrbrenner, der unter FLOX- und Flammverbrennungsbedingungen betrieben werden kann und eine zweite Einspritzöffnung umfasst, wobei die zweite Einspritzöffnung eine dritte Düse, die so konfiguriert ist, dass sie die Einspritzung eines ersten Hilfsbrennstoffs ermöglicht, und eine vierte Düse umfasst, die so konfiguriert ist, dass sie die Einspritzung eines Oxidationsmittels ermöglicht;
- 10 - ein Mittel zur Messung der Verbrennungstemperatur; und
- eine Auslassöffnung;
- wobei die erste und die zweite Einspritzöffnung parallel angeordnet sind, um die Bereitstellung des ersten Kohlenwasserstoff-Brennstoffgemisches und des Oxidationsmittels für den FLOX-Brenner zu ermöglichen; und
- 15 wobei die dritte und die vierte Einspritzöffnung parallel angeordnet sind, um die Zufuhr des ersten Zusatzbrennstoffs und gegebenenfalls des Oxidationsmittels zu einem Startbrenner zu ermöglichen,
- wobei der mindestens eine Kohlenwasserstoffspeicher mit der flammenlosen Verbrennungsvorrichtung durch Mittel verbunden ist, die es ermöglichen, den mindestens einen Kohlenwasserstoffspeicher in Fluidverbindung mit der flammenlosen Verbrennungsvorrichtung zu bringen.
- 20

20. System zur flammenlosen Verbrennung nach Anspruch 19, wobei die zweite Einspritzöffnung und der Ofen so konfiguriert sind, dass sie eine flammenlose Verbrennung des ersten Hilfsbrennstoffs mit einer Abgasrückführungsrate von 0 bis 0,5 ermöglichen.

25

21. System zur flammenlosen Verbrennung nach Anspruch 20, ferner umfassend einen Zwischenspeichertank, Mittel, um den Kohlenwasserstoffspeichertank in Fluidverbindung mit dem Zwischenspeichertank zu bringen, und Mittel, um den Kohlenwasserstoffspeichertank in Fluidverbindung mit der flammenlosen Verbrennungsvorrichtung zu bringen, und/oder Mittel, um den Zwischenspeichertank in Fluidverbindung mit der flammenlosen Verbrennungsvorrichtung zu bringen.

30

22. Verwendung des Systems zur flammenlosen Verbrennung nach Anspruch 21 oder der flammenlosen Verbrennungsvorrichtung nach Anspruch 1 zur Entgasung eines Kohlenwasserstoff-Lagertanks, wobei der Kohlenwasserstoff-Lagertank Teil des Systems zur flammenlosen Verbrennung ist.

35

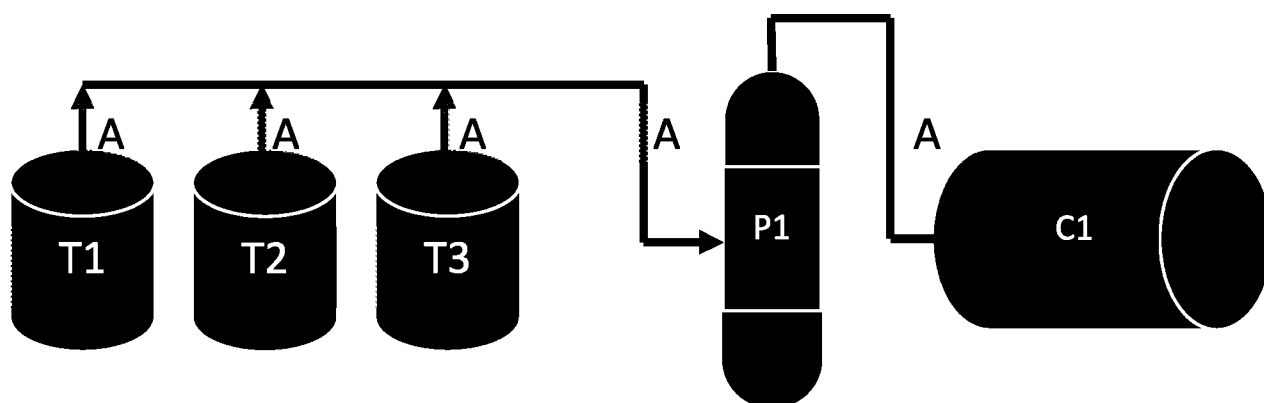
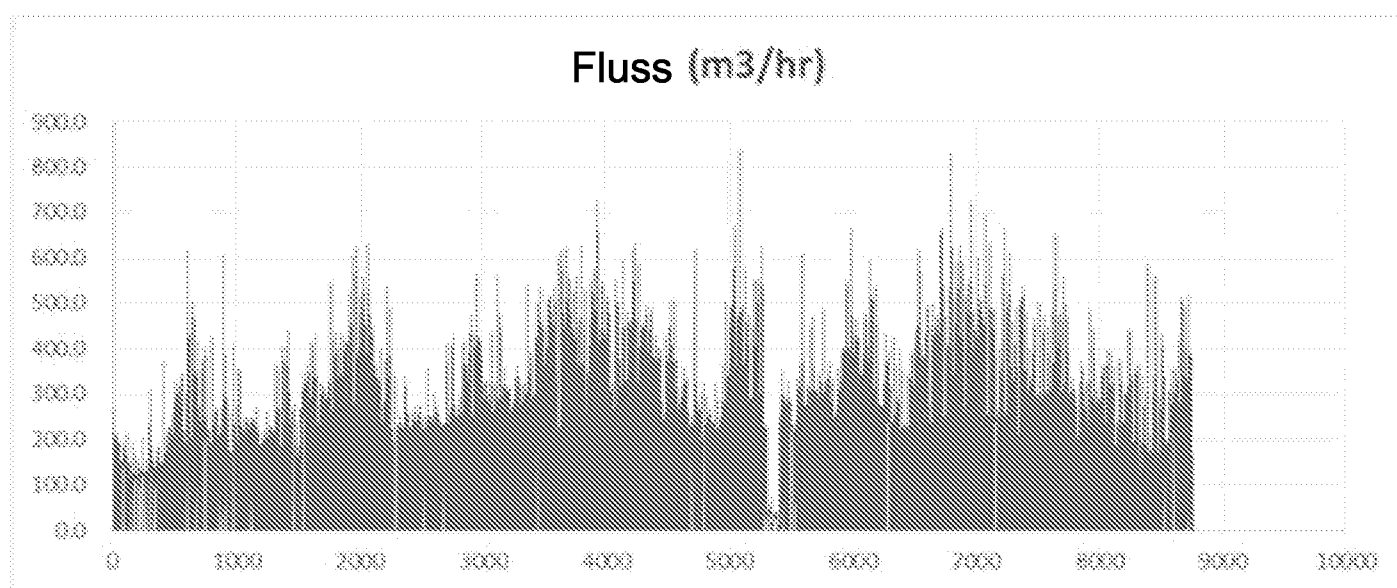
23. Verwendung des Systems zur flammenlosen Verbrennung nach einem der Ansprüche 21 bis 22 zur Entgasung eines Kohlenwasserstoff-Lagertanks eines Schiffes.

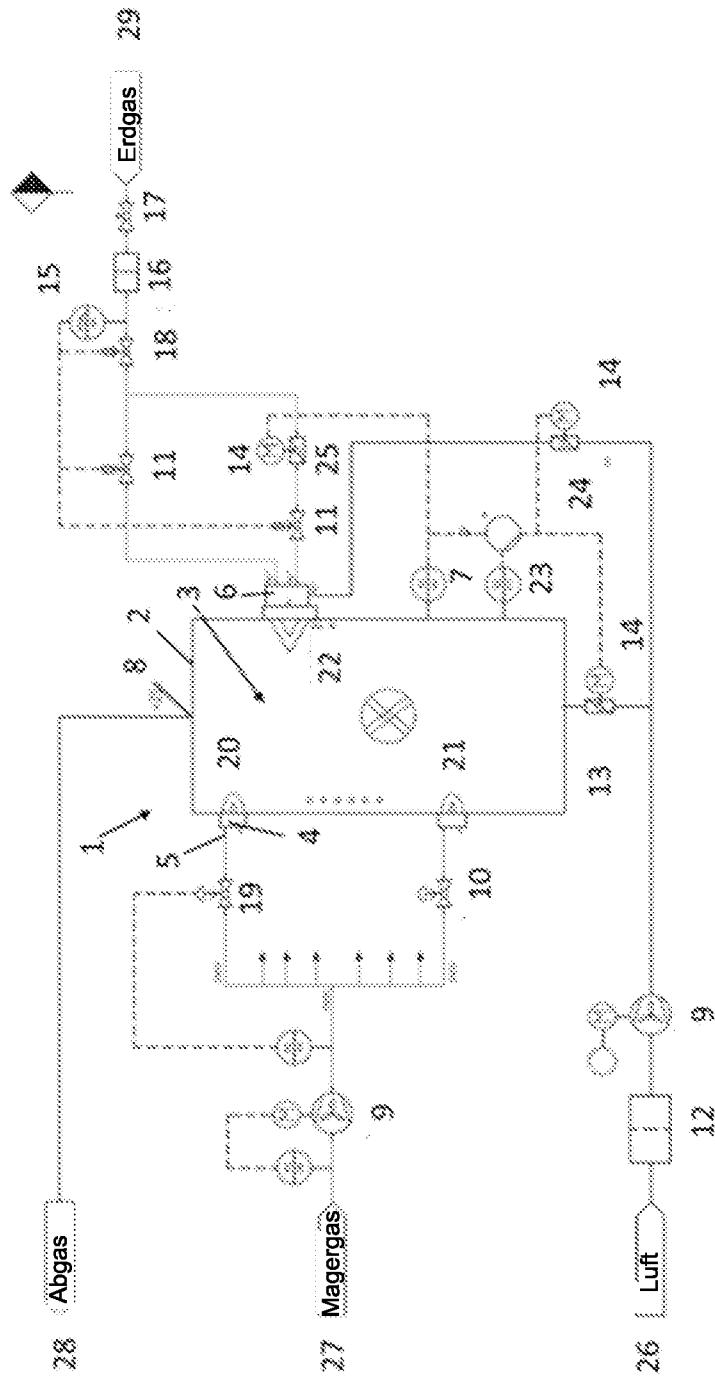
- 5 24. Verfahren zur Entgasung eines Kohlenwasserstoff-Lagertanks innerhalb des Systems zur flammenlosen Verbrennung nach den Ansprüchen 21-23, wobei das Verfahren die folgenden Schritte umfasst:
- Abpumpen von Flüssigkeit aus dem Kohlenwasserstoff-Lagertank, bis weniger als 5 % des Volumens des Kohlenwasserstoff-Lagertanks mit flüssigem Kohlenwasserstoff gefüllt sind;
 - 10 - Verbindung des Kohlenwasserstoff-Lagertanks des Behälters mit dem Zwischenlagertank;
 - Verdampfung der restlichen Kohlenwasserstoff-Flüssigkeit im Kohlenwasserstoff-Lagertank;
 - das Ermöglichen des Fließens verdampfender Kohlenwasserstoff vom
 - 15 Kohlenwasserstoff-Lagertank zum Zwischenlagertank;
 - optionales Kondensieren und/oder Komprimieren des verdampften Kohlenwasserstoffs im Zwischenlagertank;
 - Zuführen mindestens eines primären Anteils des verdampften, kondensierten und/oder komprimierten Kohlenwasserstoffs aus dem Zwischenspeichertank zu einer flammenlosen
 - 20 Verbrennungsvorrichtung, die so konfiguriert ist, dass sie das Verfahren der flammenlosen Verbrennung nach einem der Ansprüche 3 bis 15 durchführt, und/oder Erleichtern eines Exports eines sekundären Anteils des kondensierten Kohlenwasserstoffs,
 - Spülen des Kohlenwasserstoff-Lagertanks im Anschluss an die Entfernung der restlichen Kohlenwasserstoff-Flüssigkeit in den vorangegangenen Schritten mit einem Inertgas,
 - 25 wie Stickstoff, Argon oder einem Gemisch davon;
 - Lieferung des Kohlenwasserstoffs, die das Spülen von Gas aus dem Kohlenwasserstoff-Lagertank umfasst, zu: (i) dem Zwischenspeichertank und/oder (ii) einer flammenlosen Verbrennungsvorrichtung, die geeignet ist, das Verfahren nach einem der Ansprüche 3-15 durchzuführen;
 - 30 -Zuführung zumindest eines Teils des den Kohlenwasserstoff enthaltenden Spülgases zu der flammenlosen Verbrennungsvorrichtung;
 - wenn die Temperatur der Verbrennungszone der flammenlosen Verbrennungsvorrichtung 850 °C übersteigt, Verbrennung des der Vorrichtung zugeführten Gases unter flammenlosen Bedingungen gemäß einem Verfahren nach einem der Ansprüche
 - 35 3-15;

- Regelung der Zufuhr von Kohlenwasserstoff mit Spülgas zur Verbrennungszone, um eine Temperatur über 850 °C aufrechtzuerhalten, damit die flammenlose Verbrennung in der Verbrennungszone aufrechterhalten wird; und

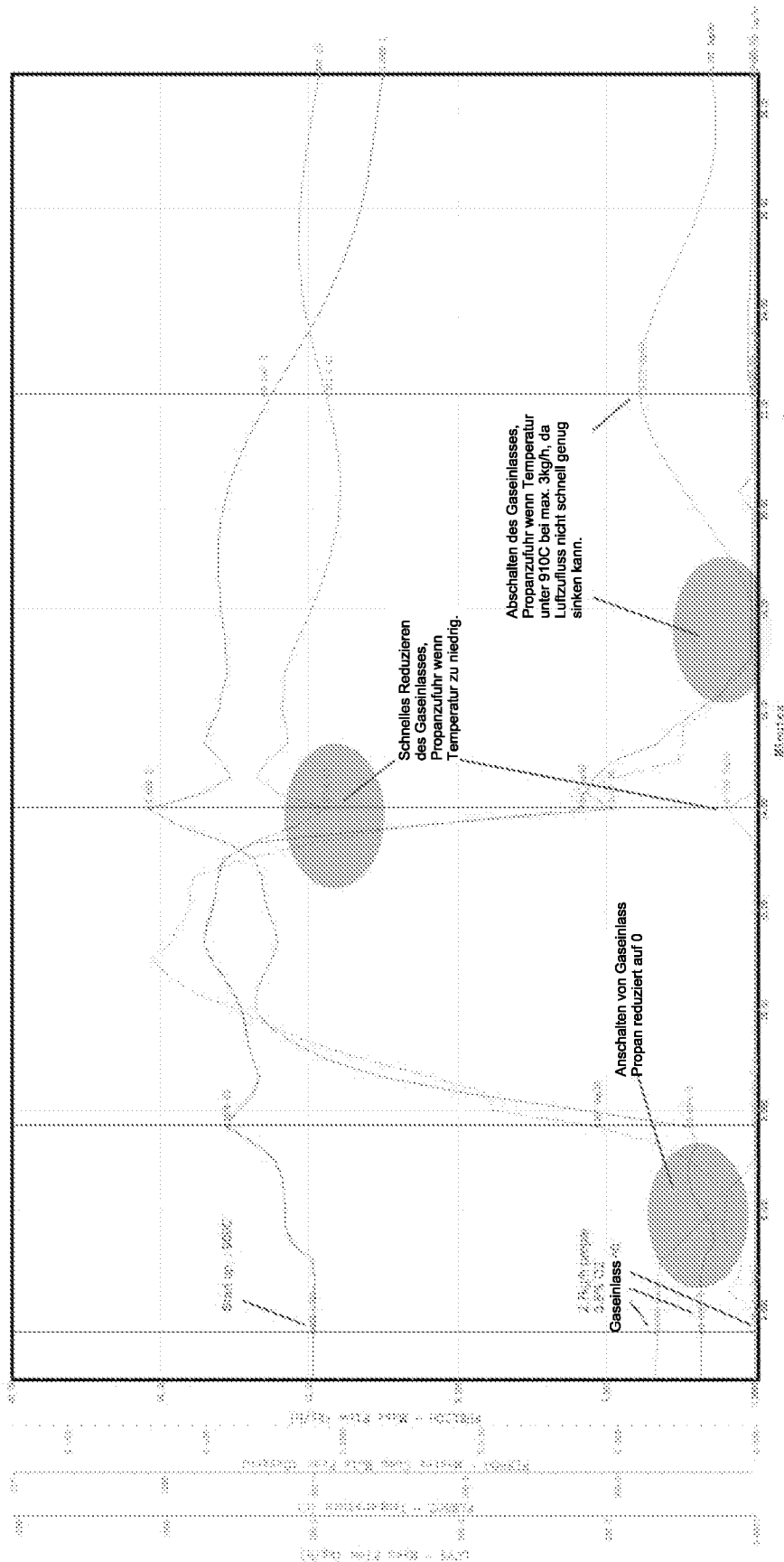
- wenn die maximale Zufuhr von Spülgas zur Verbrennungszone der flammenlosen

- 5 Verbrennungsvorrichtung nicht mehr ausreicht, um eine Temperatur von über 850 °C aufrechtzuerhalten, Zuführen von Hilfsbrennstoff zur Verbrennungszone der Verbrennungsvorrichtung und Verbrennen sowohl (i) des Hilfsbrennstoffs als auch (ii) der Kohlenwasserstoffe des Spülgases unter flammenlosen Bedingungen gemäß dem Verfahren nach einem der Ansprüche 3-15.

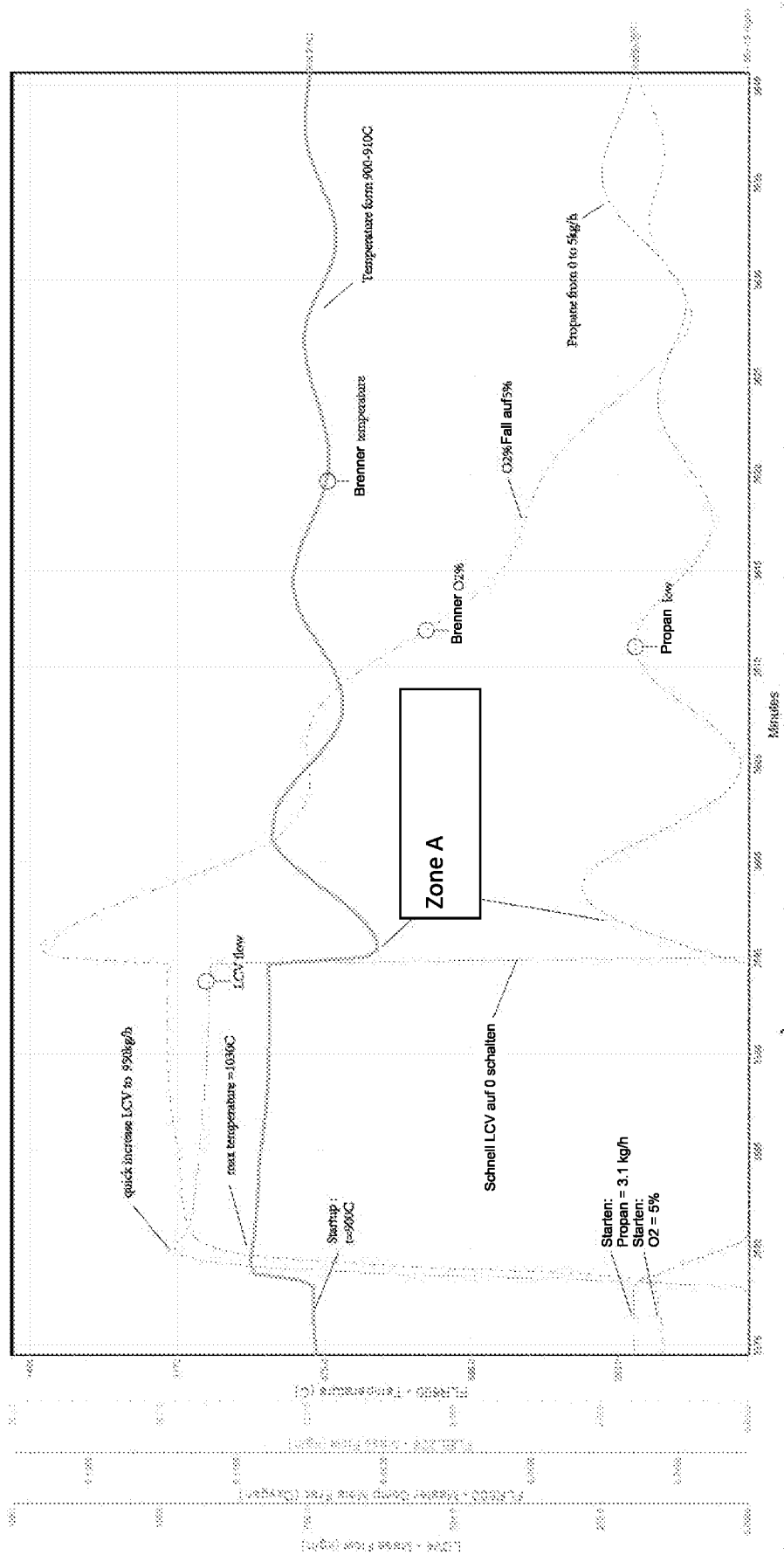
**Figur 1****Figur 2**



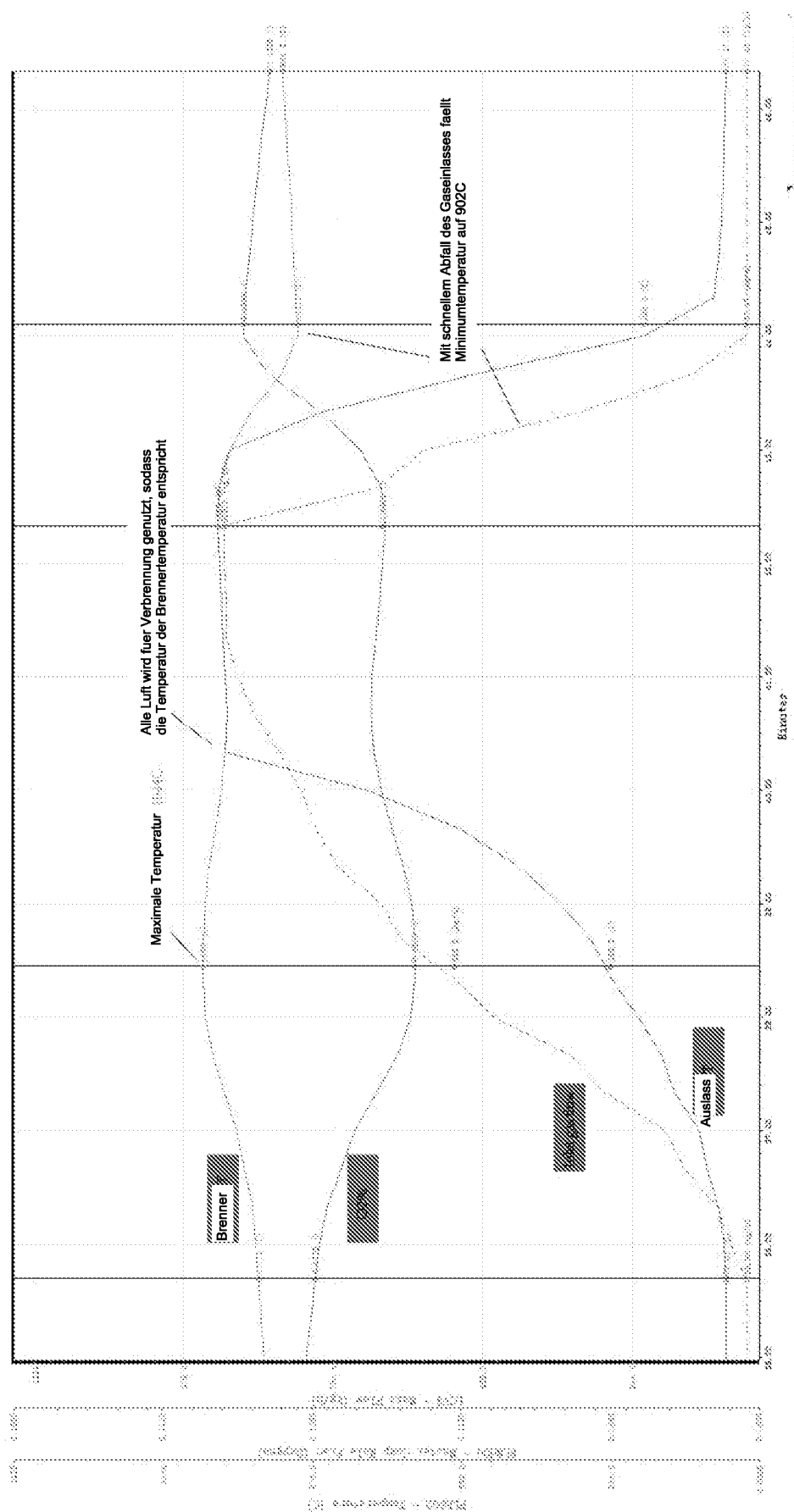
Figur 3



Figur 4



Figur 5



Figur 6