



(19)  
Bundesrepublik Deutschland  
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 602 20 041 T2 2008.02.07**

(12) **Übersetzung der europäischen Patentschrift**

(97) **EP 1 382 905 B1**

(21) Deutsches Aktenzeichen: **602 20 041.5**

(96) Europäisches Aktenzeichen: **02 405 630.1**

(96) Europäischer Anmeldetag: **19.07.2002**

(97) Erstveröffentlichung durch das EPA: **21.01.2004**

(97) Veröffentlichungstag

der Patenterteilung beim EPA: **09.05.2007**

(47) Veröffentlichungstag im Patentblatt: **07.02.2008**

(51) Int Cl.<sup>8</sup>: **F23G 5/50 (2006.01)**

**F23G 5/46 (2006.01)**

**F23N 1/00 (2006.01)**

**C04B 7/36 (2006.01)**

**F27D 19/00 (2006.01)**

(73) Patentinhaber:

**ABB Research Ltd., Zürich, CH**

(74) Vertreter:

**Zimmermann & Partner, 80331 München**

(84) Benannte Vertragsstaaten:

**AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB,  
GR, IE, IT, LI, LU, MC, NL, PT, SE, SK, TR**

(72) Erfinder:

**Gallestey Alvarez, Eduardo, 5522 Tägerig, CH;  
Frei, Christian, 5442 Fislisbach, CH; Brooks, John,  
Sidcup, Kent DA14 4LD, GB; Clark, Douglas, S81  
0UW Worksop, GB**

(54) Bezeichnung: **Bestimmung der Zusammenstellung eines Stoffgemisches zur Zufuhr in einen Ofen**

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach der Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents kann jedermann beim Europäischen Patentamt gegen das erteilte europäische Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch ist schriftlich einzureichen und zu begründen. Er gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist (Art. 99 (1) Europäisches Patentübereinkommen).

Die Übersetzung ist gemäß Artikel II § 3 Abs. 1 IntPatÜG 1991 vom Patentinhaber eingereicht worden. Sie wurde vom Deutschen Patent- und Markenamt inhaltlich nicht geprüft.

**Beschreibung**

**[0001]** Die Erfindung betrifft das Gebiet der Prozessregelung, und insbesondere ein Verfahren, Computerprogrammprodukt und Vorrichtung zum Bestimmen eines Stoffgemisches zur Zufuhr in einen Ofen, wie jeweils im Oberbegriff von Anspruch 1, 10 und 11 beschrieben.

**ALLGEMEINER STAND DER TECHNIK**

**[0002]** Zementhersteller werden gedrängt, verschiedene Klassen von Zement zu den niedrigstmöglichen Kosten unter ständig wechselnden wirtschaftlichen, umweltbedingten und technologischen Randbedingungen herzustellen. Der Zementverarbeitungsprozess ist komplex und erfordert eine hochklassige Steuerung um Langzeitstabilität und ein gutes Ergebnis zu erreichen. Es gibt offensichtliche Vorteile, wenn der Prozess auf die wirtschaftlichste Weise erreicht wird. Ein Beispiel hierfür ist die Gesamtoptimierung des Brennofenprozesses, Optimierung des Herstellungsprozesses des Rohstoffgemisches und die Handhabung von alternativen Kraftstoffen:

Zementhersteller werden dafür bezahlt, alternative Kraftstoffe oder Müll zu verbrennen und es gibt ein starkes Interesse daran, dieses Vorgehen so weit wie möglich auszudehnen. Auf der anderen Seite können herkömmliche Kraftstoffe (Kohle, Öl und Erdgas) nicht gestrichen werden. Dafür gibt es verschiedene Gründe. Zum Beispiel geht die Asche von der Verbrennung direkt in den Zementklinker, und da die chemische Zusammensetzung der alternativen Kraftstoffe veränderbar ist, können die Randbedingungen der endgültigen Zementzusammensetzung nur erfüllt werden, wenn herkömmliche Kraftstoffe dienlich sind, diese Veränderungen auszugleichen. Außerdem machen Gesetzgebung für Schadstoffe, Preise und Kosten von Kraftstoffen und Müll, technologische Randbedingungen wie hohe Temperaturen, Hochlaufbedingungen usw. Entscheidungen bezüglich der Verhältnisse von „Rohmehl zu Kraftstoff zu Müll“ sehr schwierig. Heutzutage wird die Bestimmung der Verhältnisse von „Rohmehl zu Kraftstoff zu Müll“ meistens von Hand ausgeführt, basierend auf Bedienererfahrung und auf sehr konservative Weise. Dieselben Probleme treten in anderen Öfen auf, z.B. zur Kalk- oder Aluminiumherstellung, in welcher das Produkt Asche von der Verbrennung des Kraftstoffs und Mülls umfasst.

**[0003]** Die US-Patentschrift 5,888,256 beschreibt ein Verfahren zum Herstellen eines Kraftstoffs, der in einem Zementofen verbrannt wird: eine chemische Zusammensetzung von unterschiedlichen Müllstoffen wird bestimmt, und diese Müllstoffe werden gemischt, um einen Kraftstoff zu erhalten, der bestimmte Anforderungen erfüllt, die durch einen Kraftstoffverbraucher spezifiziert werden. Die Anforderungen umfassen z.B. einen spezifizierten Energiewert und einen Ascherückstand mit einer spezifizierten Zusammensetzung. Es wird allerdings nicht spezifiziert, wie diese Anforderungen bestimmt werden und wie sie zusammenhängen mit einem gesamtwirtschaftlichen Ergebnis des Prozesses, der das Verbrennen des Kraftstoffs in dem Ofen vorsieht.

**[0004]** „Linkman in cement production: optimization beyond traditional control“, Krings et al. in ABB Review Nr. 6/7 1995, Seiten 32 bis 38, ABB Asea Brown Boveri, Schweiz-Zürich, offenbart ein System zum Automatisieren des Kernprozesses in der Zementproduktion – das Brennen von Klinker in einem Drehofen. Das System ahmt die Regelungstätigkeiten eines erfahrenen Ofenbedienungsexperten nach, geht aber noch weiter, indem beständige Leistung und hohe Verfügbarkeit sichergestellt werden.

**[0005]** WO-A-02/22246 offenbart ein System und Verfahren zum Optimieren von Mischgut von Rohstoffen von unterschiedlichen Bezugsquellen mit unterschiedlichen bekannten oder unbekanntem elementaren Zusammensetzungen.

**BESCHREIBUNG DER ERFINDUNG**

**[0006]** Es ist deshalb eine Aufgabe der Erfindung, ein Verfahren, Computerprogramm und eine Vorrichtung zum Bestimmen eines Stoffgemisches zur Zufuhr in einen Ofen der anfangs erwähnten Art zu erzeugen, welche den wirtschaftlichen Aspekten eines Ofenbetriebs Rechnung tragen.

**[0007]** Diese Aufgaben werden durch ein Verfahren, Computerprogrammprodukt und eine Vorrichtung zum Bestimmen eines Stoffgemisches zur Zufuhr in einen Ofen gemäß der Ansprüche 1, 10 und 11 erreicht.

**[0008]** Das erfinderische Verfahren zum Bestimmen eines Stoffgemisches zur Zufuhr in einen Ofen, wobei der Ofen mit Zuführstoffen versorgt wird und diese Zuführstoffe als Rohmaterial, Kraftstoff und Müll klassifizierbar sind und wobei ein Produkt, das durch Betreiben des Ofens hergestellt wird, Asche vom Verbrennen des Kraftstoffs und Mülls umfasst, umfasst die folgenden Schritte:

Bestimmen der Randbedingungen des Betriebs des Ofens und Ausdrücken der Randbedingungen als Funktionen der Zuführraten für Rohstoff, Kraftstoffe und Müll;  
 Bestimmen einer Kostenfunktion, die die Gesamtbetriebskosten des Ofens über eine bestimmte Zeitdauer und als Funktion der Zuführraten von Rohstoff, Kraftstoff und Müll darstellt, wobei die Kostenfunktion die Rohstoffkosten, Kraftstoffkosten, Müllkosten (oft negativ) und Einkünfte durch das Produkt umfasst; und  
 Bestimmen von Zeitkurven der Zuführraten für Rohstoff, Kraftstoff und Müll, die die Kostenfunktion minimieren und die Randbedingungen erfüllen.

**[0009]** Die Erfindung erlaubt deshalb das Bestimmen von einem Gemisch von Zufuhrstoffen, das die Gesamtkosten eines Ofenbetriebs minimiert, d.h. einen Gewinn maximiert, über eine bestimmte Zeitdauer.

**[0010]** In einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung umfasst die Kostenfunktion ferner die Kosten von Emissionen. Dies erlaubt die Verrechnung von durch die Erzeugung von unerwünschten Gasen oder Staub auftretenden Steuern oder Strafen.

**[0011]** In einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung umfasst ein Computerprogrammprodukt ein computerlesbares Medium, das Mittel der Computerprogrammkodierung auf sich aufgezeichnet hat, um den Computer, wenn das Mittel der Computerprogrammkodierung in einen inneren Speicher eines digitalen Computer geladen wird, das Verfahren gemäß der Erfindung ausführen zu lassen.

**[0012]** Die Vorrichtung zum Bestimmen eines Stoffgemisches zur Zufuhr in einen Ofen gemäß der Erfindung umfasst einen Datenprozessor, einen an den Prozessor gekoppelten Speicher und in dem Speicher gespeicherte Mittel der Computerprogrammkodierung, wobei das Mittel der Computerprogrammkodierung, wenn es durch den Prozessor durchgeführt wird, verursacht, dass das Verfahren gemäß der Erfindung ausgeführt wird.

**[0013]** Das erfinderische Verfahren, Computerprogrammprodukt und die Vorrichtung werden vorzugsweise für einen Zementofen angewandt, wobei der Rohstoff Rohmehl ist, welches ein Gemisch aus Kalkstein und anderen Bestandteilen ist, und wobei das Produkt Klinker ist. In einer anderen Ausführungsform wird die Erfindung für einen Kalkofen angewandt, wobei der Rohstoff Kalkstein ist und wobei das Produkt Kalk ist, oder für einen Aluminiumofen, wobei der Rohstoff Bauxit umfasst und wobei das Produkt Aluminium ist.

**[0014]** Weitere bevorzugte Ausführungsformen werden offensichtlich aus den abhängigen Ansprüchen.

#### KURZE BESCHREIBUNG DER ZEICHNUNGEN

**[0015]** Der Erfindungsgegenstand wird ausführlicher im nachfolgenden Text mit Bezug auf bevorzugte, beispielhafte Ausführungsformen erklärt, welche in den beigefügten Zeichnungen dargestellt werden, wobei

**[0016]** [Fig. 1](#) schematisch Eingabe- und Ausgabekennwerte eines Zementofenprozesses zeigt; und

**[0017]** [Fig. 2](#) ein Flussdiagramm eines Computerprogramms gemäß der Erfindung zeigt.

**[0018]** Die in den Zeichnungen verwendeten Bezugszeichen und deren Bedeutung sind in Form einer Zusammenfassung in der Bezugszeichenliste aufgelistet.

#### AUSFÜHRLICHE BESCHREIBUNG DER BEVORZUGTEN AUSFÜHRUNGSFORMEN

**[0019]** Das erfinderische Verfahren wird im Hinblick auf einen Zementofen erklärt, es ist für einen Fachmann jedoch naheliegend, die Erfindung auf jeden Brennofenprozess anzuwenden, in welchem ein durch das Betreiben des Ofens hergestelltes Produkt Asche von der Verbrennung von Kraftstoff und Müll umfasst.

**[0020]** [Fig. 1](#) zeigt schematisch Eingabe- und Ausgabekennwerte eines Zementofenprozesses. R kennzeichnet eine Zufuhr von Rohstoff, welcher für einen Zementofen Rohmehl genannt wird, W eine Zufuhr von Müllstoff, und F eine Zufuhr von herkömmlichem Kraftstoff wie etwa Gas oder Öl. C ist eine Abfuhr eines Produkts, welches für den Zementofen Klinker ist.  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_2$  und D (Staub) kennzeichnen Abfuhr von unerwünschten Stoffen.

**[0021]** Um den Betriebsablauf des Zementofens gemäß der Erfindung zu optimieren, sind etliche Parameter, die den Prozess und seinen Zusammenhang kennzeichnen, erforderlich:  
 Der Ofen wird von einem mit Rohmehl gefüllten Silo versorgt, d.h. im Wesentlichen gemahlenem oder pulver-

förmigem Kalkstein. Das Rohmehl ist durch eine Funktion

$$hc_{\text{Roh\_Mehl}} = hc_{\text{Roh\_Mehl}}(l, t)$$

gekennzeichnet, welche die thermische Energie ergibt, welche notwendig ist, um ein Kilogramm einer Schicht von Rohmehl, das sich in dem Silo in der Höhe  $l$  zur Zeit  $t$  befindet, in Klinker einer gewünschten Qualität umzuwandeln. In der Regel ist die vorhergesagte  $hc_{\text{Roh\_Mehl}}$  konstant, kann aber unter bestimmten Umständen schwanken, wenn eine neue Klinkersorte hergestellt werden soll.

**[0022]** Aufgrund von umweltbedingten Betrachtungen und Regelungen, werden mehrere Emissionsarten berücksichtigt. In einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung sind dies „NOx“, „SO2“, und „Staub“, und die Gesetzgebung bezüglich dieser Emissionen wird dargestellt durch:

1. tägliche Emissionsgrenze  $dr_{\text{NOx}}$ ,  $dr_{\text{SO2}}$ ,  $dr_{\text{Staub}}$
2. wahre Emissionsgrenze  $hr_{\text{NOx}}$ ,  $hr_{\text{SO2}}$ ,  $hr_{\text{Staub}}$
3. zu bezahlende Steuern oder Strafen pro Emissionseinheit  $p_{\text{NOx}}$ ,  $p_{\text{SO2}}$ ,  $P_{\text{Staub}}$ .

**[0023]** In dem Ofen wird herkömmlicher Kraftstoff verbrannt, normalerweise Kohle oder Öl. Zum Zwecke dieser Erklärung werden auf herkömmlichen Kraftstoff bezogene Parameter als „Kraftstoff“ oder „Kohle“ gekennzeichnet. Außerdem wird eine alternative Art von Kraftstoff verbrannt, welche „Müll“ genannt werden soll. Kraftstoff und Müll werden durch die folgenden Größen gekennzeichnet.

1.  $p_{\text{Kohle}}$ ,  $p_{\text{Muell}}$ : Kraftstoffkosten (\$/Tonne). Im Falle von „Müll“ sind die Kosten negativ, d.h. der Werksbediener wird für das Verbrennen des Mülls bezahlt.
2.  $hc_{\text{Kohle}}$ ,  $hc_{\text{Muell}}$ : Wärmewert, d.h. nutzbare thermische Energie pro Masseneinheit (MJ/Tonne). Er wird entweder geschätzt von vorangegangenen Daten oder Ofenbetriebsdaten, oder wird ständig pro Charge gemessen, abhängig von der Art von Kraftstoff und Müll.
3.  $e_{\text{NOx\_Kohle}}$ ,  $e_{\text{SO2\_Kohle}}$ ,  $e_{\text{NOx\_Muell}}$ ,  $e_{\text{SO2\_Muell}}$ : Emissionsraten (in angemessenen Einheiten) pro Tonne verbrannten Kraftstoffs.

**[0024]** Schließlich gibt es ebenfalls auf den Ofen, das Werk und das Produkt bezogene Parameter.

1.  $R_{\text{Kohle}}$ ,  $R_{\text{Muell}}$ : maximale Rate, bei der ein bestimmter Kraftstoff verbrannt werden kann (Tonne/Std.).
2. MaxZufuhrtrate: maximale Ofendurchsatzrate bei stabilen Bedingungen (Tonne/Std.).
3. MinZufuhrtrate: minimale Ofendurchsatzrate bei stabilen Bedingungen (Tonne/Std.).
4. MaxZufuhrtratenänderung: maximale Änderung der Durchsatzrate pro Bemusterungszeit (Tonne/Std.). Wichtig für Stabilität.
5.  $e_{\text{Staub}}$ : Staubemissionsrate pro Tonne Rohmehl.

**[0025]**  $M_{\text{Kohle}}(t)$ ,  $M_{\text{Muell}}(t)$ ,  $M_{\text{Roh\_Mehl}}(t)$ , sollen jeweils die Mengen von „Kohle“, „Müll“ und „Rohmehl“ kennzeichnen, welche dem Ofen zu den Zeiten  $t = 0, dt, 2dt, \dots, tf$  zugeführt werden. Dies ist eine Vereinfachung, die durch Gestalten des Ofenbetriebs als zeitdiskreter Prozess erreicht wird. Tatsächlich werden diese Mengen natürlich ständig dem Ofen über ein Bemusterungsintervall oder Diskretisierungsintervall  $dt$  zugeführt. Jede der Mengen, z.B.  $M_{\text{Kohle}}$ , ist proportional zu einer entsprechenden Zufuhrtrate, z.B.  $M_{\text{Kohle}}/dt$ . Das Bemusterungsintervall  $dt$  kann einen Wert zwischen z.B. 5 Minuten und einer Stunde aufweisen. In einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung bleibt das Bemusterungsintervall  $dt$  konstant. In einer anderen Ausführungsform wird das Bemusterungsintervall  $dt$  während des Betriebs des Ofens geändert.

**[0026]** Gemäß der Erfindung werden für jede Bemusterungszeit  $t = 0, dt, 2dt, \dots, tf$ , die Größen  $M_{\text{Kohle}}(\tau), M_{\text{Muell}}(\tau), M_{\text{roh\_mehl}}(\tau)$ ,  $\tau = t: t + dt, \dots, tf$ , welche eine Funktion von Kosten minus Einkommen minimieren, während Problemrandbedingungen erfüllt werden, berechnet. In einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung lautet die Kostenfunktion:

$$J[M_{\text{Kohle}}, M_{\text{Muell}}, M_{\text{Roh\_Mehl}}] = \sum_{\tau=0}^{tf} \left( \begin{matrix} \text{Kosten}_{\text{NOx}}(\tau) + \text{Kosten}_{\text{SO2}}(\tau) + \text{Kosten}_{\text{Staub}}(\tau) + \\ \text{Kosten}_{\text{Kohle}}(\tau) + \text{Kosten}_{\text{Muell}}(\tau) + \text{Kosten}_{\text{Roh\_Mehl}}(\tau) - \text{rev}(\tau) \end{matrix} \right) dt$$

wobei

$$\text{Kosten}_{\text{NOx}}(\tau) = p_{\text{NOx}}(e_{\text{NOx\_Roh\_Mehl}} M_{\text{Roh\_Mehl}}(\tau) + e_{\text{NOx\_Kohle}} M_{\text{Kohle}}(\tau) + e_{\text{NOx\_Muell}} M_{\text{Muell}}(\tau))$$

$$\text{Kosten}_{\text{SO2}}(\tau) = p_{\text{SO2}}(e_{\text{SO2\_Roh\_Mehl}} M_{\text{Roh\_Mehl}}(\tau) + e_{\text{SO2\_Kohle}} M_{\text{Kohle}}(\tau) + e_{\text{SO2\_Muell}} M_{\text{Muell}}(\tau))$$

$$\text{Kosten}_{\text{NOx}}(\tau) = p_{\text{Staub}}(e_{\text{Staub}} M_{\text{Roh\_Mehl}}(\tau) + e_{\text{Staub\_Kohle}} M_{\text{Kohle}}(\tau) + e_{\text{Staub\_Muell}} M_{\text{Muell}}(\tau))$$

$$\text{Kosten}_{\text{Kohle}}(\tau) = p_{\text{Kohle}} M_{\text{Kohle}}(\tau)$$

$$\text{Kosten}_{\text{Muell}}(\tau) = p_{\text{Muell}} M_{\text{Muell}}(\tau)$$

$$\text{Kosten}_{\text{Roh\_Mehl}}(\tau) = p_{\text{Roh\_Mehl}} M_{\text{Roh\_Mehl}}(\tau)$$

$$\text{rev}(\tau) = \alpha p_{\text{Klinker}} M_{\text{Roh\_Mehl}}(\tau)$$

wobei  $0 < \alpha < 1$  ein von vornherein bekannter oder gemessener Koeffizient ist, der eine Umwandlungsrate von Rohstoff in Klinker beschreibt. Normalerweise ist „Müllkosten“  $p_{\text{Muell}}$  eine negative Zahl. Es ist ebenso zu bemerken, dass in einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung die Kostenfunktion keine affine Funktion von  $M_{\text{Kohle}}(\cdot)$ ,  $M_{\text{Muell}}(\cdot)$ ,  $M_{\text{Roh\_Mehl}}(\cdot)$  ist, sondern eine allgemeine nichtlineare Funktion. Die Kostenfunktion kann und muss an jede Situation angepasst werden, z.B. wenn Kosten sich in einer nichtlinearen Weise gemäß von Verträgen in Bezug auf Preise für Energie, Müllstoff, Klinker usw. ändern.

**[0027]** Die zu erfüllenden Randbedingungen sind von vielfältiger Art. Die wichtigsten sind Wärme Gleichgewicht, Emissionsgrenzen, Ausgabegrenzen und Eingabegrenzen:

Wärme Gleichgewicht: Zu jedem Zeitpunkt  $\tau = t, t + dt, \dots, t_f$  muss die erzeugte Wärmemenge mindestens der Wärme entsprechen, die notwendig ist, um das Rohmehl in Klinker umzuwandeln.

$$hc_{\text{Roh\_Mehl}}(\text{Aktueller\_Silo\_Pegel}, \tau) M_{\text{Roh\_Mehl}}(\tau) \leq hc_{\text{Kohle}} M_{\text{Kohle}}(\tau) + hc_{\text{Muell}} M_{\text{Muell}}(\tau)$$

$$\text{Aktueller\_Silo\_Pegel} = \text{konst} \sum_{\tau=t}^{t_f} M_{\text{Roh\_Mehl}}(\tau) dt$$

**[0028]** Wahre Emissionsgrenze: Zu jedem Zeitpunkt  $\tau = t, t + dt, \dots, t_f$  sollte die Emission per Zeiteinheit, oder Emissionsrate, nicht vorgegebene Schwellwerte überschreiten.

$$e_{\text{NOx\_Roh\_Mehl}} M_{\text{Roh\_Mehl}}(\tau) + e_{\text{NOx\_Kohle}} M_{\text{Kohle}}(\tau) + e_{\text{NOx\_Muell}} M_{\text{Muell}}(\tau) \leq dr_{\text{NOx}}$$

$$e_{\text{SO2\_Roh\_Mehl}} M_{\text{Roh\_Mehl}}(\tau) + e_{\text{SO2\_Kohle}} M_{\text{Kohle}}(\tau) + e_{\text{SO2\_Muell}} M_{\text{Muell}}(\tau) \leq dr_{\text{SO2}}$$

$$e_{\text{Staub}} M_{\text{Roh\_Mehl}}(\tau) + e_{\text{Staub\_Kohle}} M_{\text{Kohle}}(\tau) + e_{\text{Staub\_Muell}} M_{\text{Muell}}(\tau) \leq dr_{\text{Staub}}$$

Kumulative Emissionsgrenze: Für jeden Schadstoff von Bedeutung sollte die Emission über einen bestimmten Zeitraum, z.B. über einen Tag, nicht einen vorgegebenen Schwellwert überschreiten.

$$\sum_{\tau=t}^{24} e_{\text{NOx\_Roh\_Mehl}} M_{\text{Roh\_Mehl}}(\tau) + e_{\text{NOx\_Kohle}} M_{\text{Kohle}}(\tau) + e_{\text{NOx\_Muell}} M_{\text{Muell}}(\tau) + \text{NOx}_{\text{SchonAbgegeben}}(t) \leq dr_{\text{NOx}}$$

$$\sum_{\tau=t}^{24} e_{\text{SO2\_Roh\_Mehl}} M_{\text{Roh\_Mehl}}(\tau) + e_{\text{SO2\_Kohle}} M_{\text{Kohle}}(\tau) + e_{\text{SO2\_Muell}} M_{\text{Muell}}(\tau) + \text{SO2}_{\text{SchonAbgegeben}}(t) \leq hr_{\text{SO2}}$$

$$\sum_{\tau=t}^{24} e_{\text{Staub}} M_{\text{Roh\_Mehl}}(\tau) + e_{\text{Staub\_Kohle}} M_{\text{Kohle}}(\tau) + e_{\text{Staub\_Muell}} M_{\text{Muell}}(\tau) + \text{Staub}_{\text{SchonAbgegeben}}(t) \leq hr_{\text{Staub}}$$

wobei, wenn das erfinderische Verfahren in Echtzeit während des Ofenbetriebs angewandt wird, die oben vorgestellten aktuellen Werte der Größen  $\text{NOx}_{\text{SchonAbgegeben}}$ ,  $\text{SO2}_{\text{SchonAbgegeben}}$  und  $\text{Staub}_{\text{SchonAbgegeben}}$ , von echten Messungen oder typenabhängigen Sensoren übernommen werden. Wenn das erfinderische Verfahren nicht in Echtzeit angewandt wird, dann werden die „schon abgegebenen“ Größen über mathematische Modelle berechnet, indem vorangegangene Werte der Ofenparameter, Umgebungsbedingungen, usw. verwendet werden.

**[0029]** Maximale und minimale Randbedingungen: Aus technischen Gründen müssen  $M_{\text{Kohle}}(\tau)$ ,  $M_{\text{Muell}}(\tau)$ ,  $M_{\text{Roh\_Mehl}}(\tau)$  immer zwischen bestimmten Grenzen liegen.

**[0030]** Hochlauf-Randbedingungen: Über eine bestimmte Zeit kann sich die Zufuhr rate  $M_{\text{Kohle}}(\tau)$ ,  $M_{\text{Muell}}(\tau)$ ,

$M_{\text{Roh\_Mehl}}(\tau)$  nicht um mehr als einen vorgegebenen Betrag ändern.

**[0031]** Randbedingungen der chemischen Zusammensetzung: Das Produkt „Klinker“ ist nach dem Gesetz hinsichtlich mehrerer Beziehungen definiert, die die Konzentrationen seiner chemischen Bestandteile erfüllen müssen. Zum Beispiel,

$$92 \leq \frac{\text{SiO}_2}{\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3} \leq 97$$

muss eingehalten werden. Wenn die chemische Zusammensetzung der Kraftstoffe und deren Asche bekannt sind, ist es einfach, die obenstehende Beziehung als eine Funktion von

$M_{\text{Kohle}}(\tau)$ ,  $M_{\text{Muehl}}(\tau)$ ,  $M_{\text{Roh\_Mehl}}(\tau)$

auszudrücken.

**[0032]** In anderen bevorzugten Ausführungsformen der Erfindung werden eine oder mehrere Randbedingungen ebenfalls berücksichtigt:

1. Minimale Werte von Aschekonzentration, wichtig für die Zementqualität.
2. Andere Schadstoffe wie Schwermetalle, Kohlenwasserstoffe, usw...
3. Anforderungen an die chemische Zusammensetzung des Endprodukts: die gesamte Asche geht ebenfalls in den Zementklinker, während sich die chemische Zusammensetzung des Mülls, d.h. des alternativen Kraftstoffs mit der Zeit ändert.
4. Betriebsbedingte Randbedingungen des Kraftstoff- und Müllverbrauchs.
5. Getrennte Betrachtung des Verbrennungsprozesses im Vorkalziniierer und in dem Ofen.
6. Verträge müssen um jeden Preis oder mit vorgegebenen Strafen erfüllt werden.
7. Kosten des Elektrizitätsverbrauchs.

**[0033]** Gemäß der Erfindung wird die Kostenfunktion minimiert gemäß einer oder mehrerer Randbedingungen, einschließlich der oben beschriebenen, sie ist jedoch nicht darauf beschränkt. Wenn die Kostenfunktion und Randbedingungen linear sind, können wohlbekanntes, lineare Programmierverfahren angewandt werden.

**[0034]** Das Ergebnis dieser Berechnungen ist eine Kurve über der Zeit der drei Zufuhrraten, d.h. der Größen  $M_{\text{Kohle}}(\tau)$ ,  $M_{\text{Muehl}}(\tau)$ ,  $M_{\text{Roh\_Mehl}}(\tau)$ ,  $\tau = t, t + dt, \dots, t_f$  von jeweils Kraftstoff, Müll und Rohmehl. Von diesen Werten muss nur der entsprechende zu  $\tau = t$  Eingabe für den Ofen während des Intervalls von  $t$  bis  $\tau = t_d$  sein. Zur Zeit  $t + t_d$  werden neue Werte durch die Größen  $\text{NOx}_{\text{SchonAbgegeben}}$ ,  $\text{SO}_2_{\text{SchonAbgegeben}}$  und  $\text{Staub}_{\text{SchonAbgegeben}}$  gemessen oder erzeugt, wie auch für die Vorhersage für Wärmekapazität des Rohmehls und vorzugsweise auch für die Koeffizienten und Konstanten, die in die obigen Gleichungen eingehen. Der Optimierungsablauf wird dann für den nächsten Zeitschritt wiederholt. In einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung werden die in den Randbedingungen und der Optimierungsfunktion benutzten Koeffizienten geschätzt und angepasst, indem erweiterte Kalmanfilter, neuronale Netze, Systemidentifikationsabläufe oder Ähnliches benutzt wird. Zum Beispiel können sich die Wärmekapazität des Mülls und die Rohmehleigenschaften ändern, Regen kann das Verbrennen schwieriger machen, aktuelle, gemessene Emissionen können von den erwarteten abweichen. Insbesondere Änderungen in den Umgebungsbedingungen können eine Neueinstellung der Koeffizienten notwendig machen.

**[0035]** Die Gültigkeit des Verfahrens wurde durch eine Matlab<sup>TM</sup>-Anwendung dieses Problems demonstriert, indem ein Standardalgorithmus der linearen Programmierung benutzt wurde.

**[0036]** In einer weiteren bevorzugten Ausführungsform der Erfindung werden die linearen Beziehungen in der Kostenfunktion und/oder einer oder mehrerer Randbedingungsgleichungen ersetzt durch allgemeine, nichtlineare Beziehungen, die durch mathematische Modelle definiert werden, welche auf physikalischen Grundbegriffen oder identifizierten „Black-Box“-Modellen, wie neuronale Netze usw. basieren. Dementsprechend werden entsprechende Algorithmen für nichtlineare Optimierung benutzt. Solche Algorithmen sind von z.B. der nichtlinearen, modellprädiktiven Regelungstheorie wohlbekannt.

**[0037]** Ein Computerprogrammprodukt gemäß der Erfindung setzt die Schritte des erfinderischen Verfahrens gemäß des Flussdiagramms von [Fig. 2](#) ein: In Schritt 1 wird die Programmausführung gestartet. In Schritt 2 werden Randbedingungen definiert, z.B. von der Bedieneingabe oder durch Laden von gespeicherten Daten oder einer Programmkodierung, die eine oder mehrere Randbedingungsgleichungen und/oder Parameter, die das zu regelnde aktuelle Werk betreffen, spezifizieren. In Schritt 3 wird die Kostenfunktion definiert, z.B. von

der Bedieneingabe oder durch Laden von Daten oder einer Programmkodierung, die die Kostenfunktion und/oder ihre Parameter spezifizieren. In Schritt 4 werden die optimalen Zufuhrraten oder Mengen von Zufuhrstoffen bestimmt. In einer ersten Variante des erfinderischen Verfahrens werden die optimale Zufuhr rate oder die Mengenkurven zur späteren Verwendung beim Regeln des Ofens gespeichert, und die Programmausführung zweigt in 5 zum Ende der Programmausführung 7 ab. In einer zweiten bevorzugten Variante zweigt die Programmausführung in 5 zu Schritt 6 ab, wo der Ofen in Echtzeit gemäß dem erfinderischen Verfahren geregelt wird: ein erster Satz von Werten  $M_{\text{Kohle}}(t)$ ,  $M_{\text{Müll}}(t)$ ,  $M_{\text{Roh\_Mehl}}(t)$  der optimalen Kurven wird benutzt, um den Zufluss von Kraftstoff, Müll und Rohmehl zu dem Ofen zu regeln, z.B. durch Ändern von Sollwerten der Niederpegelregler. Falls notwendig werden die in der Funktion und/oder den Randbedingungen benutzten Parameter, die den Ofenbetrieb und Kraftstoff- oder Mülleigenschaften betreffen, durch Messungen und/oder Schätzergebnisse aktualisiert. Die Programmausführung fährt fort mit dem Optimierungsschritt 4, basierend auf den aktualisierten Parametern. Die aus den Schritten 4 und 6 bestehende Schleife wird wiederholt, bis der Ofen abgestellt wird oder bis das Programm durch Abzweigung 5 oder aus anderen Gründen beendet wird.

**[0038]** Diese Strategie verstärkt optimale Reaktionen auf Änderungen in Kraftstoff-, Müll- und Rohmehlqualität, und nicht weniger bedeutend, Erfüllung von sowohl umweltbedingten als auch technisch bedingten Randbedingungen. Die Strategie kann ebenfalls benutzt werden, um optimale Rohmehlstoffe in den Silos herzustellen, um den ausgedehnten Gebrauch von alternativen Kraftstoffen zu erleichtern.

**[0039]** Die Erfindung wurde mit Bezug auf spezifische Kraftstoff- und Emissionsarten, wie auch Optimierungsalgorithmen erklärt. Es ist allerdings für den Fachmann naheliegend, die Erfindung zu verallgemeinern, um sie für andere Stoffe und Optimierungsabläufe anzuwenden.

**[0040]** Zum Beispiel können andere Emissionssubstanzen und entsprechende Strafen und/oder betreffende Grenzbedingungen eingearbeitet werden. Emissionsgrenzen können sich mit der Zeit auf einer täglichen oder jährlichen Basis ändern, um unterschiedlichen klimatischen Bedingungen Rechnung zu tragen. Verfahren der modellprädiktiven Regelung und Optimierung können benutzt werden, um Zufuhrstoffkurven zu bestimmen und den Ofen basierend auf der Funktion gemäß der Erfindung zu regeln.

#### Bezugszeichenliste

<b>R</b>	Rohmehl
<b>W</b>	Müll
<b>F</b>	Kraftstoff
<b>C</b>	Klinker
<b>SO<sub>2</sub></b>	SO <sub>2</sub>
<b>NO<sub>x</sub></b>	NO <sub>x</sub>
<b>D</b>	Staub
<b>1</b>	START, Start des Programms
<b>2</b>	def_rand, Definiere Randbedingungen
<b>3</b>	def_funk, Definiere Funktion
<b>4</b>	optim, Optimierung
<b>5</b>	Beenden?, Überprüfe das Beenden des Programms
<b>6</b>	Gehe weiter zum nächsten Zeitschritt
<b>7</b>	STOP, Programmende

#### Patentansprüche

1. Verfahren zum Bestimmen eines Stoffgemisches zur Zufuhr in einen Ofen, wobei dem Ofen Zufuhrstoffe (R, W, F) zugeführt werden, wobei die Zufuhrstoffe als Rohstoff (R), Kraftstoff (F) und Müll (W) klassifiziert sind, und wobei ein Produkt (C), das durch das Betreiben des Ofens erzeugt wird, Asche vom Verbrennen des Kraftstoffs und des Mülls umfasst, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Verfahren die folgenden Schritte umfasst:

- Bestimmen der Randbedingungen des Betriebs des Ofens und Ausdrücken der Randbedingungen als Funktionen der jeweiligen Zufuhr rate für den Rohstoff (R), Kraftstoff (F) und Müll (W);
- Bestimmen einer Kostenfunktion, die die Gesamtbetriebskosten des Ofens über eine bestimmte Zeitdauer und als Funktion der Zufuhrraten von Rohstoff (R), Kraftstoff (F) und Müll (W) darstellt, wobei die Kostenfunktion die Rohstoffkosten, Kraftstoffkosten, Müllkosten und die Einkünfte durch das Produkt umfasst; und
- Bestimmen von Kurven der Zufuhrraten für Rohstoff (R), Kraftstoff (F) und Müll (W), die die Kostenfunktion minimiert und die Randbedingungen erfüllt.

2. Verfahren nach Anspruch 1, wobei die Kostenfunktion ferner die Emissionskosten umfasst.
3. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei die Randbedingungen eine Anforderung umfasst, dass eine Wärmemenge, die durch Verbrennung erzeugt wird, die Wärmemenge übertrifft oder gleich der Wärmemenge ist, die beim Umwandeln des Rohstoffs in das Produkt aufgenommen wird.
4. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, wobei die Randbedingungen wahre Emissionsgrenzwerte umfassen, die nicht überschritten werden dürfen.
5. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, wobei die Randbedingungen kumulative Emissionsgrenzwerte umfassen, die nicht überschritten werden dürfen über eine bestimmte Zeitdauer.
6. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, wobei die Randbedingungen obere und untere Grenzen von mindestens einer der Zuführraten von Rohstoff (R), Kraftstoff (F) und Müll (W) umfassen.
7. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, wobei die Randbedingungen obere und untere Grenzen für Änderungen von mindestens einer der Zuführraten von Rohstoff (R), Kraftstoff (F) und Müll (W) umfassen.
8. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, wobei die Randbedingungen für den Betrieb und die Kostenfunktion lineare Ausdrücke der Zuführraten von Rohstoff (R), Kraftstoff (F) und Müll (W) sind und wobei die Kurven der Zuführraten durch lineares Programmieren bestimmt werden.
9. Verfahren nach einem der vorangehenden Ansprüche, den Schritt des Steuerns umfassend für den Betrieb des Ofens gemäß mindestens eines Teils der bestimmten Kurven von Zuführraten für Rohstoff (R), Kraftstoff (F) und Müll (W).
10. Computerprogrammprodukt zum Bestimmen eines Stoffgemisches zur Zufuhr in einen Ofen, ein computerlesbares Medium umfassend, das Mittel der Computerprogrammkodierung auf sich aufgezeichnet hat, wobei die Mittel der Computerprogrammkodierung ladbar und ausführbar auf einer Datenverarbeitungseinheit sind und wenn sie durchgeführt werden, die Schritte gemäß einem der Ansprüche 1 bis 8 ausführen.
11. Vorrichtung zum Bestimmen eines Stoffgemisches zur Zufuhr in einen Ofen, umfassend einen Datenprozessor, einen Speicher, der an den Prozessor gekoppelt ist und Mittel der Computerprogrammkodierung, die in dem Speicher gespeichert sind, wobei die Mittel der Computerprogrammkodierung, wenn sie durch den Prozessor durchgeführt werden, die Schritte gemäß einem der Ansprüche 1 bis 8 ausführen.

Es folgt ein Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

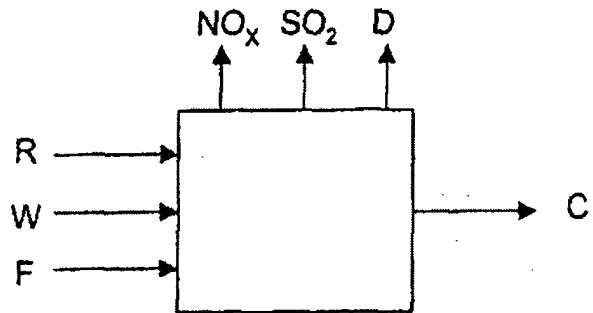


Fig. 1

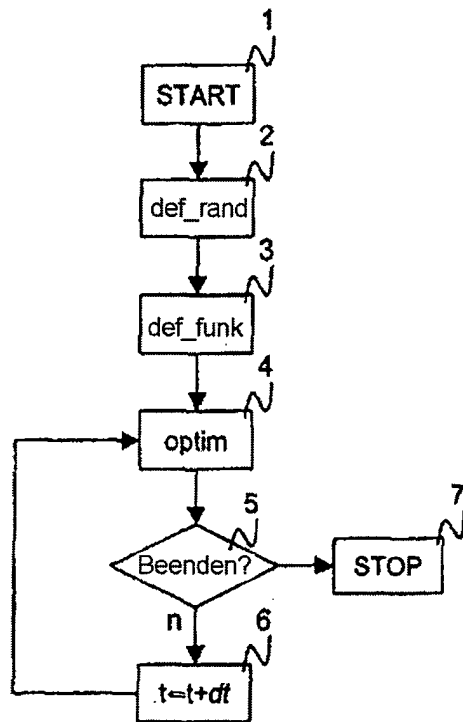


Fig. 2