



(11) **EP 1 517 107 B1**

(12) **EUROPÄISCHE PATENTSCHRIFT**

(45) Veröffentlichungstag und Bekanntmachung des Hinweises auf die Patenterteilung:  
**30.12.2009 Patentblatt 2009/53**

(51) Int Cl.:  
**F27B 9/40 (2006.01) F27D 19/00 (2006.01)**

(21) Anmeldenummer: **04020371.3**

(22) Anmeldetag: **27.08.2004**

(54) **Verfahren zum optimalen Betrieb eines Erwärmungsofens**

Process for the optimized operation of a reheating furnace

Procédé pour un fonctionnement optimal d'un four de réchauffage

(84) Benannte Vertragsstaaten:  
**AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB GR HU IE IT LI LU MC NL PL PT RO SE SI SK TR**

(30) Priorität: **17.09.2003 AT 14572003**

(43) Veröffentlichungstag der Anmeldung:  
**23.03.2005 Patentblatt 2005/12**

(73) Patentinhaber: **Siemens VAI Metals Technologies GmbH & Co**  
**4031 Linz (AT)**

(72) Erfinder:

- **Rosenthaler, Maximilian**  
**4312 Katsdorf (AT)**
- **Schutti, Alfred Hans**  
**4650 Edt bei Lambach (AT)**
- **Lichtenwagner, Manfred**  
**4644 Scharnstein (AT)**

- **Auzinger, Dietmar**  
**4203 Altenberg (AT)**

(74) Vertreter: **Maier, Daniel Oliver et al**  
**Siemens AG**  
**CT IP Com E**  
**Postfach 22 16 34**  
**80506 München (DE)**

(56) Entgegenhaltungen:  
**FR-A- 2 155 397 US-A- 4 223 385**  
**US-A- 4 373 364 US-A- 4 657 507**  
**US-A- 5 930 136**

- **PATENT ABSTRACTS OF JAPAN Bd. 0110, Nr. 24 (C-399), 23. Januar 1987 (1987-01-23) & JP 61 199018 A (MITSUBISHI ELEC CORP), 3. September 1986 (1986-09-03)**

**EP 1 517 107 B1**

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

## Beschreibung

**[0001]** Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Optimierung eines ErwärmungsOfens, insbesondere eines StoßOfens oder eines HubbalkenOfens, zur Weiterbehandlung von Walzgut.

**[0002]** Bekannte Verfahren zur Steuerung von Erwärmungsöfen (S. zum Beispiel US 4223385 A) verwenden für jede Bramme einen Sollerwärmungsverlauf als Sollerwärmungskurve dargestellt, d.h. dass der Erwärmungsverlauf im Ofen schon beim Eintrag der Bramme vorbestimmt ist. Zu jeder Position der Ofenreise wird dann versucht die Brammentemperatur so weit als möglich an die aktuelle Solltemperatur anzugleichen. Dafür werden Temperatursollwerte für die verschiedenen Zonen des Ofens berechnet, in denen sich mehrere Brammen befinden können. Die Austragezeitpunkte sind durch ein übergeordnetes System meist schon vorbestimmt.

**[0003]** Nachteilig an diesen Verfahren ist vor allem, dass Sonderfälle, wie Ofenstörungen oder der gemischte Einsatz von warmen und kalten Brammen (Warm- bzw. Kalteinsatz) durch die Sollerwärmungskurven nicht oder nur sehr ungenügend unter großen Kompromissen abgebildet werden können.

**[0004]** Es ist eine Aufgabe der vorliegenden Erfindung ein Verfahren zur Steuerung von Erwärmungsöfen zu entwickeln, das einen, gegenüber dem Stand der Technik, verbesserten, optimalen Betrieb, unter Berücksichtigung von technologischen Bedingungen, ermöglicht.

**[0005]** Die Erfindung ist dadurch gekennzeichnet, dass eine Zielfunktion gebildet wird, die unter Einbeziehung zumindest eines mathematischen Modells als Nebenbedingung einer mathematischen Optimierung, wie z. B. einer Extremwertbildung, unterworfen wird, und die auf diese Art bestimmten Funktionswerte der Zielfunktion zur Steuerung der Ofenfahrweise verwendet werden und kritisches Walzgut, das sich noch vor dem Ofeneintrag befindet, ermittelt wird und die Optimierung auf Basis einer berechneten Zielfunktion, unter Ausscheidung des kritischen Walzguts erfolgt, wobei die Ausscheidung einer Bramme auf Basis bewerteter Kosten für den Ausfall dieser Bramme erfolgt. Dabei werden die Auswirkungen hinsichtlich der Produktionskosten z.B. zwischen der Beibehaltung einer Ziehreihenfolge und einer Umplanung dieser verglichen, wobei diese Veränderungen bei den Produktionskosten in die Entscheidung, umzuplanen oder nicht, mit einbezogen werden. Insbesondere wirtschaftliche und technologische Kriterien finden damit Berücksichtigung und ermöglichen für den Betreiber eine besonders wirtschaftliche Betriebsweise des ErwärmungsOfens.

**[0006]** Neu an dieser Erfindung ist, dass nicht nur gültige Sollwerte berechnet werden, sondern dass die Sollwerte, wie etwa für Ofentemperatur und/ oder Austragezeit, durch eine mathematische Optimierung gefunden werden, wobei die Optimierung nach verschiedenen Kriterien möglich ist.

**[0007]** Neu an dieser Erfindung ist ebenfalls, dass nicht nur das Walzgut, wie z.B. Brammen, das sich bereits im Ofen befindet, für das also der Erwärmvorgang bereits begonnen hat, sondern auch Walzgut, das sich noch vor dem Ofen befindet, berücksichtigt wird.

**[0008]** Eine mögliche Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Verfahrens wird dadurch erreicht, dass die Zielfunktion eine Funktion von Zustandsvariablen des Walzguts, wie die Walzgutoberflächentemperatur oder die Temperaturverteilung, und/ oder von Kontrollvariablen, wie die Stückfolgezeit oder die Ofentemperatur einzelner Ofenzonen, ist. Durch die Berücksichtigung der Zustandsvariablen wird einerseits der ist-Zustand des Ofens weitgehend erfasst und andererseits sichergestellt, dass über die ermittelte Zielfunktion eine optimale Steuerung erreicht wird.

**[0009]** Nach einer weiteren Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Verfahrens wird durch die Optimierung eine Maximierung des Ofendurchsatzes erzielt. Damit lassen sich Ofenaggregate sehr effizient und wirtschaftlich betreiben.

**[0010]** Eine alternative Ausgestaltung dazu sieht eine Optimierung hinsichtlich einer Minimierung des Energiebedarfs des Ofens vor. Durch diese Vorgehensweise können Öfen entsprechend der anlagentechnischen Gegebenheiten bzw. der Produktionserfordernisse hinsichtlich ihrer Fahrweise, also z.B. der Ofenbetriebsparameter, angepasst werden. Es wird dadurch ein besonders wirtschaftlicher Betrieb und damit einhergehend eine Reduktion von Prozesskosten, bezogen auf das Walzgut, erreicht. Da die Energiekosten für die Erwärmung einen hohen Anteil an den Produktionskosten je Gewichtseinheit erzeugtes Walzgut haben, können so sehr hohe Einsparungen erzielt werden.

**[0011]** Nach einer bevorzugten Ausführung der Erfindung werden mit dem erfindungsgemäßen Verfahren die Ofentemperatursollwerte und die Austragezeiten berechnet. Durch diese Berechnung gelingt es, unmittelbar für die Steuerung des Ofens verwertbare Größen zu ermitteln.

**[0012]** Nach einer weiteren Ausführung der Erfindung werden mit dem erfindungsgemäßen Verfahren Sollwerte für Brenngasmengen und Luftmengen berechnet. Mit Hilfe physikalischer Modelle zu den Erwärmungsöfen, Modelle der Strömungsverhältnisse und der Kenntnis der Energie der Gase kann die Ofentemperatur berechnet werden, die dann wieder Grundlage für den Erwärmungsprozess ist.

**[0013]** Eine besondere Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Verfahrens sieht vor, dass zumindest eine an die Sollwerte in Form eines Grenzwerts gestellte Bedingung bei der Optimierung als Nebenbedingung berücksichtigt wird. Durch dieses Merkmal, werden auf einfache Weise anlagentechnische oder technologische Grenzwerte in die Optimierung einbezogen. Die Nebenbedingung wird mathematisch als Ungleichung dargestellt.

**[0014]** Eine weitere Ausführung der Erfindung sieht vor, dass zumindest eine Bedingung, die einen fixierten Wert für eine Kontroll- oder Zustandsvariable angibt, bei der Optimierung als Nebenbedingung berücksichtigt wird, wodurch in

einfacher Art und Weise Fixgrößen Berücksichtigung finden.

**[0015]** Eine mögliche Ausführung der Erfindung verwendet als Optimierungsalgorithmus ein Verfahren zur sequentiellen quadratischen Optimierung, wie z.B. das Verfahren nach Schittkowski. Dieses Optimierungsverfahren, siehe z.B.:

- 5
- Schittkowski Klaus: "On the Convergence of a Sequential Quadratic Programming Method with Augmented Lagrangian Line Search Funktion", Math. Operationsforschung und Statistik, Ser. Optimization, Vol. 14(1983) No.2, Seiten 197-216)

10 hat den Vorteil, dass es gute Konvergenzeigenschaften besitzt. Außerdem findet es sehr rasch eine zulässige Lösung, sodass auch bei vorzeitigem Abbruch des Optimierungsverfahrens bereits eine gute Näherung zur Verfügung steht.

**[0016]** Für die Lösung, der aus dem Verfahren nach Schittkowski bestimmten quadratischen Hilfsprobleme, kann die Methode von Gill und Murray verwendet werden:

- 15
- Gill P., Murray: "Numerically Stable Methods for Quadratic Programming", Mathematical Programming 14 (1978), Seiten 349-372).

20 **[0017]** Eine besondere Ausführung des erfindungsgemäßen Verfahrens sieht vor, dass im Falle der Unlösbarkeit der mathematischen Optimierung unter vorgegebenen Nebenbedingungen, die Lösung mit der kleinsten Verletzung der Nebenbedingungen, insbesondere der Grenzwert-bezogenen Nebenbedingungen, berechnet wird. Dadurch wird erreicht, dass optimierte Sollwerte ermittelt werden, die nur sehr wenig von den vorgegebenen Bedingungen abweichen.

**[0018]** Nach einer weiteren Ausführung des erfindungsgemäßen Verfahrens wird eine Prioritätenreihenfolge der aufzugebenden Nebenbedingungen und/ oder alternativen Nebenbedingungen vorgegeben. Damit ist es möglich, das Verfahren sehr individuell an die Gegebenheiten anzupassen und Optima sicher zu finden.

25 **[0019]** Entsprechend einer speziellen Ausführung der Erfindung wird die Optimierung offline zur Berechnung von Durchsatzzeiten für zeitlich nachfolgende Ofenbelegungen durchgeführt. Diese berechneten Durchsatzzeiten können beispielsweise zur Auslegung von Anlagen oder zur Walzprogrammerstellung herangezogen werden.

30 **[0020]** Nach einer weiteren, speziellen Ausführung der Erfindung wird die Optimierung online und zwar unmittelbar vor und/ oder während des Erwärmungsvorganges durchgeführt und die Ergebnisse der Optimierung zur Steuerung des Erwärmungsvorganges verwendet. Dabei kann während des Erwärmungsvorganges, unter Verwendung aktueller Messwerte des Ofens, die Optimierung zur Berechnung von Sollwerten für die Steuerung des Erwärmungsvorganges verwendet werden.

35 **[0021]** Nach einer anderen Ausführung der Erfindung wird die Optimierung online durchgeführt und die Ergebnisse für die Optimierung der Ziehreihenfolge und/ oder der Einstoßreihenfolge eingesetzt. Damit kann eine weitere Verbesserung des Ofenbetriebes bzw. des Erwärmungsvorganges erreicht werden. Nach einer vereinfachten Variante dazu kann die Ermittlung der Ziehreihenfolge bzw. der Einstoßreihenfolge auch in einer Offline-Version durchgeführt werden.

**[0022]** Nach einer weiteren, speziellen Ausführung der Erfindung werden als Startlösung für die Optimierung Werte, also Ofenparameter, mit ähnlicher Charakteristik verwendet. Beispielsweise können im kontinuierlichen Betrieb des Ofens die Ergebnisse der letzten Optimierung als Startwerte verwendet werden.

40 **[0023]** Nach einer weiteren, speziellen Ausführung der Erfindung wird das erfindungsgemäße Verfahren zur Steuerung mehrerer Erwärmungsöfen, insbesondere mit unterschiedlichen Ofentypen, eingesetzt. Damit können z.B. zwei Stoßöfen und ein Hubbalkenofen im gemeinsamen Betrieb optimiert werden. Dies ist ein wesentlicher Vorteil der Erfindung, da derartige Anlagenkonfigurationen häufig vorkommen und daher technisch beherrscht werden müssen.

45 **[0024]** Bei der gemeinsamen Optimierung mehrerer Öfen wird von einer bekannten Ziehreihenfolge ausgegangen. Jede Bramme besitzt ihren eigenen Parametersatz (z.B. Ofentemperatur, bzw. weiteren Parametern), der vom jeweiligen Ofen bestimmt ist. Ein Zusammenhang zwischen mehreren Erwärmungsöfen ergibt sich durch die Ziehreihenfolge, da alle nachfolgenden Brammen über die Austragezeitpunkte einer vorhergehenden Bramme beeinflusst werden. Für das nachfolgende Prozessaggregat, wie z.B. einem Warmwalzwerk, ist es nötig eine bestimmte Brammenfolge, die einem Walzprogramm genügen muss, sicherzustellen.

50 **[0025]** Für die Optimierungsaufgabe ändert sich durch die Optimierung mehrerer Erwärmungsöfen nur die Dimension, die Zielfunktion bleibt im Sinne unverändert.

55 **[0026]** Nach einer weiteren möglichen Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Verfahrens wird die Optimierung, im Falle geplanter oder auch ungeplanter Störungen, zur Maximierung des Ofendurchsatzes oder zur Minimierung des Energiebedarfs durchgeführt, wobei die Optimierung unter Verwendung wenigstens einer Störgröße erneut erfolgt. Entsprechend der zu lösenden Aufgabe kann das erfindungsgemäße Verfahren angewendet werden, wobei diese Flexibilität in der betrieblichen Praxis große Vorteile bietet. Geplante Störungen sind z.B. Walzenwechsel in einem nachfolgenden Walzwerk. Diese können zumindest großteils vorab geplant und auch in der Ofenfahrweise berücksichtigt werden. Durch die Optimierung können z.B. mittels Vorausberechnung die Stückfolgezeiten für das Ziehen des Walzguts ermittelt und optimiert werden.

[0027] Ungeplante Störungen können z.B. sein:

- ein Ausfall in einem nach geschalteten Prozessaggregat, wie z.B. dem Warmwalzwerk, sodass ein Austrag des Walzguts erst nach der Behebung des Ausfalls möglich ist.
- eine Ofensteuerung, die dazu führt, dass einer der Öfen einer Produktionsanlage ausfällt
- eine Störung im Ofen, die dazu führt, dass die Solltemperatur nicht eingehalten werden kann.

[0028] Derartige Störungen können in der Optimierung berücksichtigt werden, wobei über die Störung charakterisierende Störgrößen eine neue Optimierung für die geänderte Situation durchgeführt wird. Im Falle einer Störung im nachfolgenden Warmwalzwerk wird z.B. die zu erwartenden Dauer der Störung bei der Optimierung berücksichtigt. Bei längeren Störungen kann dies zu einer Absenkung der Ofentemperatur und damit zu einer Energieeinsparung führen.

[0029] Bei Ausfall eines Ofens, etwa durch einen technischen Defekt, wird z.B. auf Basis dieser Situation die Ziehr-eihenfolge für das Walzgut neu berechnet, sodass eine Synchronisation mit dem Walzprogramm erreicht wird. Liegt nur ein eingeschränkter Ofenbetrieb vor, wird unter Berücksichtigung von Art und Dauer der Störung, also unter Berücksichtigung einer geringeren max. Ofentemperatur eine Optimierung und Vorausberechnung durchgeführt.

[0030] Nach einer anderen möglichen Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Verfahrens werden bei der Optimierung, unter Verwendung eines Modells zur Ermittlung diverser Emissionen, diese Emissionen in der Zielfunktion und/ oder als Nebenbedingung berücksichtigt. Emissionen sind hinsichtlich der geltenden Umweltauflagen, die Grenzwerte definieren, einzuhalten. Derartige Emissionen sind z. B. Anteile und/ oder absolute Mengen von Schwefeloxiden, Stickoxiden, Kohlendioxid und Kohlenmonoxid usw. im Abgas.

[0031] Die Emissionen können aus der Kenntnis der chemischen Zusammensetzung und der Betriebsparameter berechnet werden. Eine weitere Möglichkeit der Ermittlung der Emissionen basiert auf den Emissionswerten der Vergangenheit und den aktuellen Ofenparametern. Mit Hilfe dieser Werte kann eine Prognose berechnet werden.

[0032] Eine mögliche Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Verfahrens sieht vor, dass die Optimierung kritisches Walzgut ermittelt, sodass Steuerungsvorgaben für die Ziehtemperatur oder weiteren Nebenbedingungen für das kritische Walzgut angepasst werden können. Diese Vorgaben können z.B. für die Steuerung oder als Information für das Bedienpersonal des Erwärmungsofens herangezogen werden. Als kritisches Walzgut, wie z.B. kritische Brammen, sind solche zu verstehen, für die die Nebenbedingungen am schwierigsten einzuhalten sind. Anders ausgedrückt bedeutet das, dass die Einhaltung der Grenzwerte für kritisches Walzgut einen starken Einfluss auf die Zielfunktion hat, diese also stark verändert. Ein kritische Bramme wäre z.B. eine kalt eingesetzte Bramme zwischen warm eingesetzten Brammen.

[0033] Nach einer weiteren Ausgestaltung des erfindungsgemäßen Verfahrens wird zur Adaption des mathematischen Modells, um eine höhere Modellgenauigkeit zu erreichen, zumindest eine Temperaturmessung herangezogen, wobei die Temperatur beim Ofenaustrag und/oder in der Vorstrasse, verbunden mit einer Rückrechnung auf die Austragetemperatur, verwendet wird. Durch die erhöhte Modellgenauigkeit ist ein noch höheres Optimierungspotential erreichbar.

[0034] Zur beispielhaften Beschreibung der Erfindung sind folgende Darstellungen vorgesehen:

Fig. 1: Schematische Darstellung der Brammenbewegung und des zeitlichen Ablaufs

Fig. 2: Schematische Darstellung eines Ofens

[0035] Die Erfindung soll anhand eines Stoßofens 1 zur Erwärmung von Brammen 2 (siehe Fig. 2) erläutert werden: Der Stoßofen 1 besitzt eine Anzahl von z beheizten Zonen, Im konkreten Fall sind es fünf:

- Vorheizzone 3 (oben/ unten),
- Heizzone 4 (oben/ unten) und Ausgleichszone 5 (nur oben).

[0036] In der Konvektivzone 6 werden die eintretenden Brammen vom ausströmenden Gas der Vorheizzone 3 und der Heizzone 4 vorgewärmt, bevor sie in die beheizten Zonen eintreten. Die in den Ofen 1 eintretenden Brammen 2 weisen eine Temperatur  $T_E$  auf. Die Brammen 2 sollen nach dem Erwärmvorgang eine Temperatur  $T_A$  aufweisen. Die Austragereihenfolge der Brammen 2 ist z.B. durch die Einstoßreihenfolge festgelegt. Jede Bramme kann zu jedem Zeitpunkt durch die Zustandsvariable

T: Temperaturverteilung (z.B. 2-dimensional, über Dicke und Breite od. Länge)

beschrieben werden.

**[0037]** Die Ofenlängsrichtung wird mit  $x$  bezeichnet, wobei  $x = 0$  bei der Einstoßofenkante angesetzt wird. Das bedeutet, dass Brammen im Ofen positive  $x$ -Werte und Brammen vor dem Ofen, also im Vorlauf, negative  $x$ -Werte besitzen.

**[0038]** Die Prozesszeit wird mit dem Symbol  $t$  bezeichnet, wobei  $t=0$  jenen Zeitpunkt kennzeichnet, der der letzten Temperaturberechnung der Brammen entspricht. Die Temperatur der Brammen wird zyklisch und/ oder bei jeder Bewegung der Brammensäule, also der Gesamtzahl der Brammen vor dem bzw. im Ofen, mit Hilfe von Messwerten, wie z.B. der Umgebungstemperatur, der Ofentemperatur oder auch Brenngasmengen berechnet. Zum Zeitpunkt  $t=0$  hat jede Bramme eine definierte Temperaturverteilung und eine eindeutige Temperatur, die einem gewichteten Mittelwert aus der Temperaturverteilung entspricht. Aufgrund der Bewegung der Bramme  $i$  ergibt sich der in Fig. 1 näher dargestellte Zusammenhang zwischen der Position  $x$ , und dem Zeitpunkt  $t$ , wobei:

$\tau_i$ : Zeitpunkt, zu dem die Bramme  $i$  an die Austrageposition geschoben wird,

$\xi_k^i$ : Position der Bramme  $i$  zur Zeit  $[\tau_{k-1}, \tau_k]$ ,

$s_k^i$ : Vorschubzeitintervall

z.B. Bramme  $i$ : Temperatur  $T_i$  und Position  $\xi_1^i$ .

**[0039]** Die verbleibende Verweilzeit im Ofen ist durch die Austragezeiten, wie  $A_i, A_{i+1}$ , der vorhergehenden Brammen bestimmt, da bei jedem Austrag einer Bramme, die Bramme  $i$  nach vorne rückt (siehe Fig. 1 und 2)

**[0040]** Es werden  $n$  Brammen betrachtet, wobei nicht alle notwendigerweise im Ofen sind. Jede Bramme  $i \leq n$  hat noch  $i-1$  Stufen bis zum Austrag  $7$ , die mit der Laufvariablen  $k_i$  bezeichnet werden. In jeder Stufe  $k$  wird der Zustand der Bramme unter dem Einfluss von Kontrollvariablen, wie etwa der Ofentemperatur, vom Zustand  $k$  auf den Zustand  $k+1$ , geändert.

**[0041]** Die Zustandsvariablen, die durch die Laufvariable  $k$  gekennzeichnet sind, beschreiben die Eintrittsparameter bei Eintritt in die Stufe  $k$ . Die Zustandsvariablen, die durch die Laufvariable  $k+1$  gekennzeichnet sind, beschreiben die Austrittsparameter bei Austritt aus der Stufe  $k$  und gleichzeitig die Eintrittsparameter bei Eintritt in die Stufe  $(k+1)$ .

**[0042]** Die Zustandsvariablen, die durch die Laufvariable  $k = n$  gekennzeichnet sind, stellen die Austrittsparameter bei Austritt aus der letzten Stufe dar, wenn der Austrag der Bramme als letzte Stufe betrachtet wird. Der Übergang vom Zustand  $k_i$  auf den Zustand  $k_i+1$  wird durch ein Modell in Form von Gleichungen beschrieben.

**[0043]** Die Änderung der Zustandsvariablen durch die Einwirkung der Ofentemperatur kann in allen Stufen von einem Erwärmungsmodell, wie z.B. nach:

Dr. Ing. J. Henri Brunklaus: "Industrieöfen, Bau und Betrieb", Vulkan Verlag, 1979, 4. Auflage, Seiten 72-96,

beschrieben werden, wobei zu allen Stufen ein eigener Satz von Parametern  $p^k$  gehört, der die Eigenschaften des Ofens, wie Strahlung und Konvektion, enthält.

**[0044]** Das Erwärmungsmodell hängt neben den Zustandsvariablen  $T$  auch von den Kontrollvariablen

- Ofentemperatur  $T_{\text{ofen}}(z)$  für jede aktiv beheizte Zone
- Stückfolgezeit  $[\tau_{k-1}, \tau_k] \rightarrow s_k^i$

der jeweiligen Stufe ab. Das Erwärmungsmodell enthält folgende Teilmodelle:

- Strahlungsmodell
- Konvektionsmodell
- Wärmeleitungsmodell

und lässt sich beschreiben als

$$T' = f(x_i(t), T, Z(x_i(t), t)) \quad (1)$$

mit  $x_i(t)$  Position der Bramme  $i$  zum Zeitpunkt  $t$   
 $Z(x_i(t), t)$  Ofenparameter an der Stelle  $x$  zum Zeitpunkt  $t$

## EP 1 517 107 B1

**[0045]** Das Erwärmungsmodell enthält die zugehörigen Materialgesetze der Brammen.

**[0046]** Das Modell kann nur für sinnvolle Kombinationen von Zustands- und Kontrollvariablen ausgewertet werden:

5

- $$0 \leq \tau_{k-1} \leq \tau_k \quad (2)$$

10

- $$T_{\text{ofen}}(z) \geq 0 \quad (3)$$

**[0047]** Ziel des Verfahrens ist es, Sollwerte für die Ofentemperatur  $T_{\text{ofen}}$  und die Austragezeiten  $A_i$  zu finden, die die Bedingungen

15

- $$T_A \geq T_{A \text{ min}} \quad \text{Austragetemperatur} \geq \text{Grenzwert} \quad (4)$$

- $$dT_{\text{ok}} \leq dT_{\text{ok min}} \quad \text{Temperatur: Oberfläche oben - Kern} \leq \text{Grenzwert} \quad (5)$$

20

- $$dT_{\text{ou}} \leq dT_{\text{ou min}}$$
  

$$\text{Temperatur Oberfläche oben - Oberfläche unten} \leq \text{Grenzwert} \quad (6)$$

25

- $$T_{\text{o}} \leq T_{\text{omax}} \quad \text{Oberflächentemperatur} \leq \text{Grenzwert} \quad (7)$$

30

- $$\text{Grenzwert} \leq \sum s_k^i \leq \text{Grenzwert} \quad (8)$$

erfüllen, also aus der vorgegebenen Anfangstemperatur das Erreichen der vorgegebenen Endtemperatur gewährleistet, wobei Grenzwerte für die Temperaturgradienten (Oberfläche oben - Kern, Oberfläche oben - Oberfläche unten) und maximale Oberflächentemperaturen nicht überschritten werden und Grenzwerte für die Summe einzelner Stückfolgezeiten eingehalten werden.

**[0048]** Dazu wird eine nach den Variablen stetig differenzierbare Zielfunktion ermittelt, mit der allgemeinen Form

40

$$\alpha \sum_k f^k(x_k, y_k) + \beta \sum_k g^k(t_k)$$

$x$  bezeichnet die Zustandsvariablen, wie  $T$ , und  $y$  die Kontrollvariablen, wie  $T_{\text{ofen}}$ , und  $t$  die Austragezeiten. Jede Bramme liefert einen Beitrag, wobei alle Beiträge zur Zielfunktion addiert werden.

**[0049]** Die Optimierungsaufgabe besteht darin, die Zielfunktion zu minimieren unter den Nebenbedingungen

- $c^k(x^k, y^k) = 0$ , siehe Gleichung (1)

- $d^k(x^k, y^k) \geq 0$ , siehe Gleichungen (2) - (8)

50

- $x^k = v^k$  wobei  $v^k$  für die Werte der fixierten Zustandsvariablen  $T$  steht, so kann z.B. die Oberflächentemperatur für bestimmte Stufen  $k$  festgelegt werden.

55

- $x^k = w^k$ , wobei  $w^k$  für die Werte der fixierten Kontrollvariable  $y$  steht, so kann z.B. die Ofentemperatur für bestimmte Stufen  $k$  festgelegt werden.

**[0050]** Je nach Definition der Zielfunktion können die Sollwerte für einen Erwärmungsvorgang mit maximalem Durchsatz oder mit minimaler Energie berechnet werden. Mit den Gewichtungsfaktoren  $\alpha$  und  $\beta$  sind auch Kombinationen

daraus zu berechnen.

**[0051]** Die durch die Optimierung bestimmten Sollwerte für die Temperatur, in den verschiedenen Zonen des Ofens und die Sollwerte für die Austragezeiten, stellen optimale Werte dar.

**[0052]** Kann aufgrund der vorgegebenen Nebenbedingungen des Optimierungsproblems bei einmaliger Durchführung des Optimierungsverfahrens keine Lösung gefunden werden, wird als nächster Schritt zumindest eine Nebenbedingung geändert, etwa ein Grenzwert oder ein fix vorgegebener Wert für eine Kontrollvariable, und mit dieser veränderten Nebenbedingung erneut eine Optimierung durchgeführt. Dabei kann vorgegeben werden, welche Nebenbedingung zuerst und in welchem Ausmaß diese verändert werden soll. Wenn erneut keine gültige Lösung gefunden werden kann, wird das Optimierungsverfahren unter Veränderung zumindest einer Nebenbedingung wiederholt.

**[0053]** Das Verfahren kann in allen Erwärmungsöfen unabhängig vom Ofentyp, so beispielsweise in Stoßöfen und Hubbalkenöfen, für die Optimierung der Erwärmung von Brammen, Knüppeln und dergleichen eingesetzt werden.

## Patentansprüche

1. Verfahren zur Optimierung eines ErwärmungsOfens, insbesondere eines StoßOfens oder eines HubbalkenOfens, zur Weiterbehandlung von Walzgut, **dadurch gekennzeichnet, dass** eine Zielfunktion gebildet wird, die unter Einbeziehung zumindest eines mathematischen Modells als Nebenbedingung einer mathematischen Optimierung, wie z. B. einer Extremwertbildung, unterworfen wird, und die auf diese Art bestimmten Funktionswerte der Zielfunktion zur Steuerung der Ofenfahrweise verwendet werden, und kritisches Walzgut, das sich noch vor dem Ofeneintrag befindet, ermittelt wird und die Optimierung auf Basis einer berechneten Zielfunktion, unter Ausscheidung des kritischen Walzguts erfolgt, wobei die Ausscheidung einer Bramme auf der Basis bewerteter Kosten für den Ausfall des Walzguts erfolgt.
2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Zielfunktion eine Funktion von Zustandsvariablen des Walzguts, wie die Walzgutoberflächentemperatur oder die Temperaturverteilung, und/ oder von Kontrollvariablen, wie die Stückfolgezeit oder die Ofentemperatur einzelner Ofenzonen, ist.
3. Verfahren einem der Ansprüche 1 bis 2, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Optimierung eine Maximierung des Ofendurchsatzes bewirkt.
4. Verfahren einem der Ansprüche 1 bis 2, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Optimierung eine Minimierung des Energiebedarfs des Ofens bewirkt.
5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, **dadurch gekennzeichnet, dass** mit dem Verfahren Ofentemperatursollwerte und Austragezeiten berechnet werden.
6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, **dadurch gekennzeichnet, dass** mit dem Verfahren Sollwerte für Brenngasmengen und Luftmengen berechnet werden.
7. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 6, **dadurch gekennzeichnet, dass** zumindest eine an die Sollwerte in Form eines Grenzwerts gestellte Bedingung bei der Optimierung als Nebenbedingung berücksichtigt wird.
8. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 7, **dadurch gekennzeichnet, dass** zumindest eine Bedingung, die einen fixierten Wert für eine Kontroll- oder Zustandsvariable angibt, bei der Optimierung als Nebenbedingung berücksichtigt wird.
9. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 8, **dadurch gekennzeichnet, dass** als Optimierungsalgorithmus ein Verfahren zur sequentiellen quadratischen Optimierung, wie z.B. das Verfahren nach Schittkowski, verwendet wird.
10. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 9, **dadurch gekennzeichnet, dass** im Falle der Unlösbarkeit der mathematischen Optimierung unter vorgegebenen Nebenbedingungen die Lösung mit der kleinsten Verletzung der Nebenbedingungen, insbesondere der Grenzwert-bezogenen Nebenbedingungen, berechnet wird.
11. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 10, **dadurch gekennzeichnet, dass** eine Prioritätenreihenfolge der aufzugebenden Nebenbedingungen und/ oder alternativen Nebenbedingungen vorgegeben wird.
12. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 11, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Optimierung offline zur Be-

## EP 1 517 107 B1

rechnung von Durchsatzzeiten für zeitlich nachfolgende Ofenbelegungen durchgeführt wird.

- 5
13. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 12, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Optimierung online unmittelbar vor und/ oder während des Erwärmungsvorganges durchgeführt und die Ergebnisse der Optimierung zur Steuerung des Erwärmungsvorganges verwendet werden.
14. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 13, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Optimierung online durchgeführt und die Ergebnisse für die Optimierung der Ziehreihenfolge und/ oder der Einstoßreihenfolge eingesetzt werden.
- 10
15. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 14, **dadurch gekennzeichnet, dass** als Startlösung für die Optimierung Ofenparameter mit ähnlicher Charakteristik verwendet werden.
16. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 15, **dadurch gekennzeichnet, dass** das Verfahren zur Steuerung mehrerer Erwärmungsöfen, insbesondere mit unterschiedlichen Ofentypen, eingesetzt wird.
- 15
17. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 16, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Optimierung bei geplanten und/ oder bei ungeplanten Störungen unter Verwendung zumindest einer Störgröße erneut durchgeführt wird, zur Maximierung des Ofendurchsatzes und/ oder zur Minimierung des Energiebedarfs.
- 20
18. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 17, **dadurch gekennzeichnet, dass** bei der Optimierung, unter Verwendung eines Modells zur Ermittlung diverser Emissionen, diese Emissionen in der Zielfunktion und/ oder als Nebenbedingung berücksichtigt werden.
- 25
19. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 18, **dadurch gekennzeichnet, dass** zur Adaption des mathematischen Modells, zum Zwecke einer Erhöhung der Modellgenauigkeit, zumindest eine Temperaturmessung herangezogen wird, wobei die Temperatur beim Ofenaustrag und/ oder in der Vorstrasse, verbunden mit einer Rückrechnung auf die Austragetemperatur, verwendet wird.

### 30 Claims

- 35
1. Method for optimizing a heating furnace, in particular a pressure furnace or a walking-beam furnace, for the further treatment of rolling stock, **characterized in that** a target function is formed, which, with the inclusion of at least one mathematical model as a secondary condition, is subjected to mathematical optimization, such as, for example, extreme-value formation, and the thus determined functional values of the target function are used for controlling the furnace operating characteristics, and critical rolling stock not yet introduced into the furnace is determined, and optimization takes place on the basis of a calculated target function, with the critical rolling stock being rejected, the rejection of a slab taking place on the basis of evaluated costs for the failure of the rolling stock.
- 40
2. Method according to Claim 1, **characterized in that** the target function is a function of state variables of the rolling stock, such as the rolling-stock surface temperature or the temperature distribution, and/or of control variables, such as the piece follow-up time or the furnace temperature of individual furnace zones.
- 45
3. Method according to either one of Claims 1 and 2, **characterized in that** optimization brings about a maximization of the furnace throughput.
- 50
4. Method according to either one of Claims 1 and 2, **characterized in that** optimization brings about a minimization of the energy requirement of the furnace.
- 55
5. Method according to one of Claims 1 to 4, **characterized in that** the furnace-temperature desired values and output times are calculated by means of the method.
6. Method according to one of Claims 1 to 5, **characterized in that** desired values for fuel-gas quantities and air quantities are calculated by means of the method.
7. Method according to one of Claims 1 to 6, **characterized in that** at least one condition placed in the form of a limit value upon the desired values is taken into account as a secondary condition in the optimization.

## EP 1 517 107 B1

8. Method according to one of Claims 1 to 7, **characterized in that** at least one condition which specifies a fixed value for a control variable or state variable is taken into account as a secondary condition in the optimization.
- 5 9. Method according to one of Claims 1 to 8, **characterized in that** a method for sequential quadratic optimization, such as, for example, Schittkowski's method, is used as an optimization algorithm.
- 10 10. Method according to one of Claims 1 to 9, **characterized in that**, in the event of the unsolvability of the mathematical optimization under stipulated secondary conditions, the solution with the lowest infringement of the secondary conditions, in particular of the limit-value-related secondary conditions, is calculated.
11. Method according to one of Claims 1 to 10, **characterized in that** a priority sequence of the secondary conditions and/or alternative secondary conditions to be introduced is stipulated.
- 15 12. Method according to one of Claims 1 to 11, **characterized in that** optimization is carried out off-line for the calculation of throughput times for furnace occupancies successive in time.
- 20 13. Method according to one of Claims 1 to 12, **characterized in that** optimization is carried out on-line immediately before and/or during the heating process, and the results of the optimization are used for controlling the heating process.
- 25 14. Method according to one of Claims 1 to 13, **characterized in that** optimization is carried out on-line, and the results are used for optimizing the pull-out sequence and/or the push-in sequence.
- 30 15. Method according to one of Claims 1 to 14, **characterized in that** furnace parameters with a similar characteristic are used as a starting solution for optimization.
- 35 16. Method according to one of Claims 1 to 15, **characterized in that** the method is used for the control of a plurality of heating furnaces, in particular with different furnace types.
- 40 17. Method according to one of Claims 1 to 16, **characterized in that** optimization is carried out anew in the event of planned and/or unplanned malfunctions, using at least one disturbance variable, in order to maximize the furnace throughput and/or to minimize the energy requirement.
18. Method according to one of Claims 1 to 17, **characterized in that**, in optimization, using a model for determining various emissions, these emissions are taken into account in the target function and/or as a secondary condition.
19. Method according to one of Claims 1 to 18, **characterized in that**, to adapt the mathematical model for the purpose of increasing the model accuracy, at least one temperature measurement is adopted, the temperature at the furnace output and/or in the blooming train, together with a back calculation to the output temperature, being used.

### Revendications

- 45 1. Procédé d'optimisation d'un four de chauffage, en particulier d'un four à pousoir ou d'un four à longerons mobiles, destiné au traitement de produits laminés,  
**caractérisé en ce que**  
une fonction cible qui subit une optimisation mathématique, par exemple la formation d'une valeur extrême est formée en tenant compte d'au moins un module mathématique comme condition secondaire, les valeurs ainsi déterminées de la fonction cible étant utilisées pour commander le mode de conduite du four et  
50 **en ce que** des produits laminés critiques sont déterminés pendant qu'ils sont encore situés en amont de l'entrée du four et l'optimisation est effectuée sur base d'une fonction cible calculée en rejetant le produit laminé critique, une brame étant rejetée sur base de l'évaluation du coût de la mise au rebut du produit laminé.
- 55 2. Procédé selon la revendication 1, **caractérisé en ce que** la fonction cible est une fonction de variables d'état du produit laminé, par exemple la température de surface du produit laminé ou la répartition de la température, et/ou de variables de contrôle, par exemple la cadence de succession des pièces ou la température de certaines zones du four.

## EP 1 517 107 B1

3. Procédé selon l'une des revendications 1 et 2, **caractérisé en ce que** l'optimisation a pour effet une maximisation du débit du four.
- 5 4. Procédé selon l'une des revendications 1 et 2, **caractérisé en ce que** l'optimisation a pour effet une minimisation des besoins en énergie du four.
- 10 5. Procédé selon l'une des revendications 1 à 4, **caractérisé en ce que** le procédé permet de calculer les valeurs de consigne de température et les instants d'extraction hors du four.
- 15 6. Procédé selon l'une des revendications 1 à 5, **caractérisé en ce que** le procédé permet de calculer les valeurs de consigne du débit de gaz combustible et du débit d'air.
7. Procédé selon l'une des revendications 1 à 6, **caractérisé en ce qu'**au moins une condition imposée aux valeurs de consigne sous la forme d'une valeur limite est prise en compte comme condition secondaire lors de l'optimisation.
- 20 8. Procédé selon l'une des revendications 1 à 7, **caractérisé en ce qu'**au moins une condition qui donne une valeur fixe d'une variable de contrôle ou d'état est prise en compte comme condition secondaire dans l'optimisation.
- 25 9. Procédé selon l'une des revendications 1 à 8, **caractérisé en ce que** comme algorithme d'optimisation, il utilise un procédé d'optimisation quadratique séquentiel, par exemple le procédé de Schittkowski.
- 30 10. Procédé selon l'une des revendications 1 à 9, **caractérisé en ce qu'**au cas où l'optimisation mathématique ne peut être résolue dans des conditions secondaires prédéterminées, la solution calculée est celle qui contrevient le moins aux conditions secondaires et en particulier aux conditions secondaires qui concernent les valeurs limites.
- 35 11. Procédé selon l'une des revendications 1 à 10, **caractérisé en ce qu'**un ordre de priorité des conditions secondaires à prévoir et/ou des conditions secondaires alternatives sont prédéterminés.
- 40 12. Procédé selon l'une des revendications 1 à 11, **caractérisé en ce que** l'optimisation est réalisée hors ligne pour le calcul de la durée du passage pour des occupations successives du four.
- 45 13. Procédé selon l'une des revendications 1 à 12, **caractérisé en ce que** l'optimisation est réalisée en ligne directement avant et/ou pendant l'opération de chauffage et **en ce que** les résultats de l'optimisation sont utilisés pour commander l'opération de chauffage.
- 50 14. Procédé selon l'une des revendications 1 à 13, **caractérisé en ce que** l'optimisation est réalisée en ligne et **en ce que** les résultats sont utilisés pour l'optimisation de la succession d'extractions et/ou la succession de poussées.
- 55 15. Procédé selon l'une des revendications 1 à 14, **caractérisé en ce que** comme solution initiale de l'optimisation, il utilise des paramètres de four qui présentent une caractéristique similaire.
16. Procédé selon l'une des revendications 1 à 15, **caractérisé en ce qu'**il est utilisé pour commander plusieurs fours de chauffage qui comptent en particulier différents types de fours.
17. Procédé selon l'une des revendications 1 à 16, **caractérisé en ce qu'**en cas de perturbations planifiées et/ou non planifiées, l'optimisation est de nouveau réalisée en recourant à au moins une grandeur perturbatrice pour maximiser le débit du four et/ou minimiser ses besoins en énergie.
18. Procédé selon l'une des revendications 1 à 17, **caractérisé en ce qu'**en utilisant un modèle de détermination de diverses émissions, l'optimisation tient compte de ces émissions dans la fonction cible et/ou comme condition secondaire.
19. Procédé selon l'une des revendications 1 à 18, **caractérisé en ce que** pour adapter le modèle mathématique en vue d'augmenter la précision du modèle, il utilise au moins une mesure de température, la température utilisée étant celle qui règne à l'extraction du four et/ou dans le parcours amont, avec un recalcul de la température d'extraction.

Fig. 1

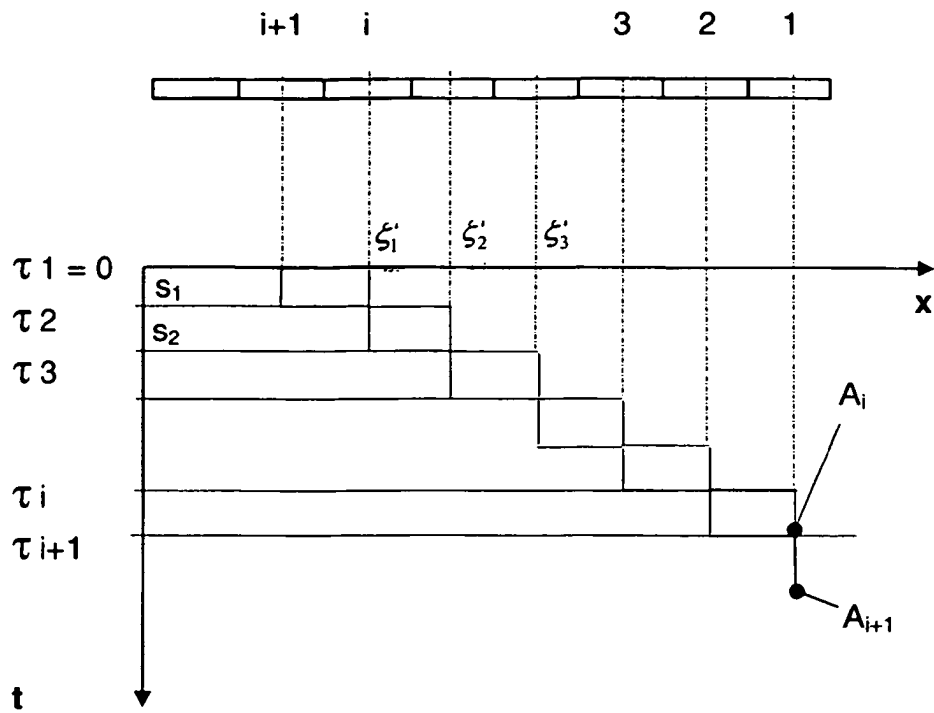
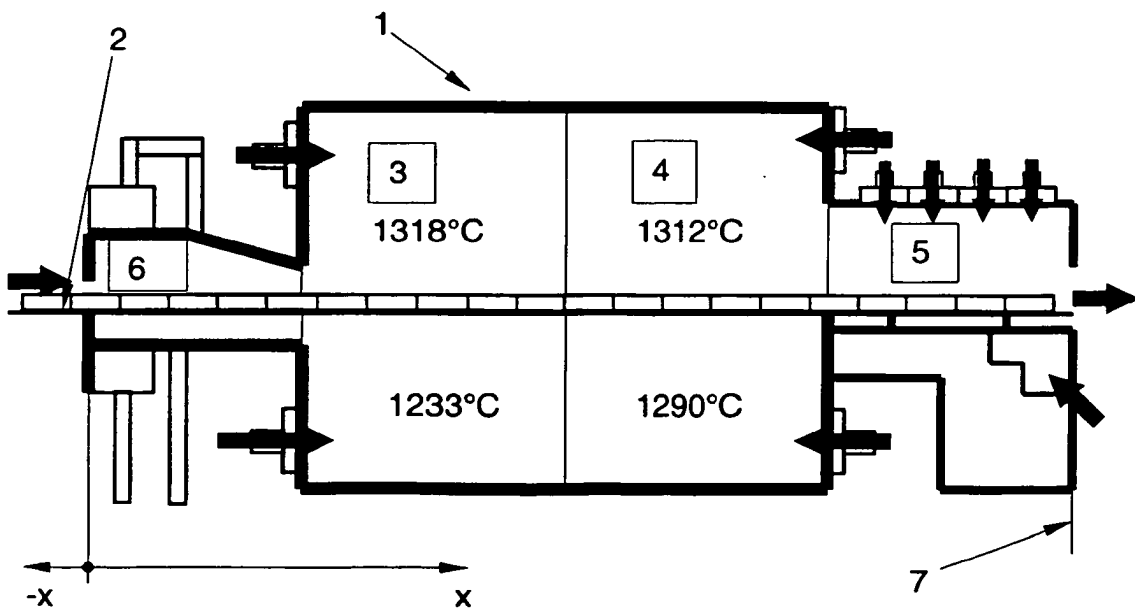


Fig.2



**IN DER BESCHREIBUNG AUFGEFÜHRTE DOKUMENTE**

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

**In der Beschreibung aufgeführte Patentdokumente**

- US 4223385 A [0002]

**In der Beschreibung aufgeführte Nicht-Patentliteratur**

- **Schittkowski Klaus.** On the Convergence of a Sequential Quadratic Programming Method with Augmented Lagrangian Line Search Funktion. *Math. Operationsforschung und Statistik, Ser. Optimization*, 1983, vol. 14 (2), 197-216 [0015]
- **Gill P., Murray.** Numerically Stable Methods for Quadratic Programming. *Mathematical Programming*, 1978, vol. 14, 349-372 [0016]
- **Dr. Ing. J. Henri Brunklaus.** *Industrieöfen, Bau und Betrieb*, 1979, vol. 4, 72-96 [0044]