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

(11) **EP 2 051 811 B1**

(12) **EUROPÄISCHE PATENTSCHRIFT**

(45) Veröffentlichungstag und Bekanntmachung des Hinweises auf die Patenterteilung:
30.05.2012 Patentblatt 2012/22

(21) Anmeldenummer: **07730248.7**

(22) Anmeldetag: **19.06.2007**

(51) Int Cl.:
B02C 17/18 *(2006.01)* ***B02C 25/00*** *(2006.01)*

(86) Internationale Anmeldenummer:
PCT/EP2007/056072

(87) Internationale Veröffentlichungsnummer:
WO 2008/019904 (21.02.2008 Gazette 2008/08)

(54) **VERFAHREN ZUR ERMITTLUNG EINES MÜHLENFÜLLSTANDS**

METHOD FOR DETERMINING A REFUSE FILLING LEVEL

PROCÉDÉ POUR DÉTERMINER UN NIVEAU DE REMPLISSAGE D'UN BROYEUR

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

(30) Priorität: **14.08.2006 DE 102006038014**

(43) Veröffentlichungstag der Anmeldung:
29.04.2009 Patentblatt 2009/18

(73) Patentinhaber: **SIEMENS AKTIENGESELLSCHAFT**
80333 München (DE)

(72) Erfinder:
- **BECKER, Norbert**
  91341 Röttenbach (DE)
- **LÖFFLER, Hans-Ulrich**
  91054 Erlangen (DE)
- **SMITS, Stefan**
  91334 Hemhofen (DE)
- **TISCHLER, Kurt**
  91052 Erlangen (DE)

(56) Entgegenhaltungen:
WO-A-2004/065014
DE-A1- 4 215 455
DE-A1- 19 747 628

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

EP 2 051 811 B1

Printed by Jouve, 75001 PARIS (FR)

Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Ermittlung eines Füllstands einer beladenen Trommel einer Mühle.

[0002] Bei einer derartigen Mühle kann es sich beispielsweise um eine Kugelmühle (ball mill) oder auch um eine SAG (semiautogenously grinding)-Mühle handeln, die zum Zermahlen von grob körnigen Materialien, wie z. B. Erzen oder Zement usw., bestimmt ist. Bei solchen Mühlen ist der aktuelle Füllstand in der Trommel, in der die Zerkleinerung stattfindet, normalerweise unbekannt. Der Füllstand hängt nämlich von vielen Größen ab. Beispiele hierfür sind der genaue Vermahlungsgrad, der Anteil an Kugeln, die zur Unterstützung des Mahlvorgangs in die Trommel eingebracht werden, der Abnutzungsgrad dieser Kugeln und der Feststoffanteil der Suspension, die sich aktuell in der Trommel befindet. Diese Größen ändern sich größtenteils während des Betriebs der Mühle. Ihre aktuellen Werte sind ebenso unbekannt wie der Wert des Füllstands selbst.

[0003] Eine einigermaßen genaue Kenntnis des aktuellen Füllstands wäre auch deshalb sehr günstig, da man daraus Rückschlüsse über die Effizienz des Mühlenbetriebs ziehen könnte. Bei überfüllten Mühlen ist die Zerkleinerung wegen der geringen Fallhöhe und der Energieabsorption des bereits zerkleinerten Mahlguts ineffizient. Bei unterfüllten Mühlen können die Trommelwände und die Mitnehmer beschädigt werden. Anhand des aktuellen Füllstands und gegebenenfalls weiterer Parameter, wie der Härte des zu mahlenden Guts oder des Feststoffanteils, kann die Drehzahl der Trommel besser eingestellt werden.

[0004] Derzeit wird der Füllstand vom Bedienpersonal nach dessen empirischen Erfahrenswerten abgeschätzt. Unterstützend kommen Gewichtssensoren zum Einsatz, die das Auflagegewicht der beladenen Trommel auf den Lagern ermitteln. Trotz dieser zusätzlich vorgesehenen Sensoren sind diese Schätzverfahren sehr ungenau. Jüngst sind auch akustische Messverfahren entwickelt worden, die aber ebenfalls zusätzliche Sensoren zur Schallaufnahme benötigen.

[0005] Die DE 4215 455 A1 offenbart ein Verfahren gemäß dem Oberbegriff des Anspruchs 1.

[0006] Konventionelle Verfahren zur Füllstandserfassung, wie beispielsweise die von dem Unternehmen Mollet Füllstandstechnik GmbH mittels des Internetauftritts http://www.mollet-gmbh.de/ angebotenen Drehflügel-, Pendel- und Vibrationsmessverfahren, sind eher für still stehende Vorratsbehälter, nicht jedoch für eine rotierende und beladene Trommel einer Mühle geeignet.

[0007] Die Aufgabe der Erfindung besteht deshalb darin, ein Verfahren und eine Einrichtung anzugeben, das auf einfache Weise während des Betriebs der Mühle eine aktuelle Füllstandsermittlung für die Trommel ermöglicht.

[0008] Diese Aufgabe wird gelöst durch die Merkmale des unabhängigen Patentanspruchs 1. Bei dem erfindungsgemäßen Verfahren zur Ermittlung eines Füllstands einer beladenen Trommel einer Mühle wird

a) die Trommel mittels eines Antriebs mit einem Antriebsmoment beaufschlagt und in eine Drehbewegung versetzt,
b) das Antriebsmoment am Antrieb gemäß einer vorgebbaren Antriebstestsequenz eingestellt,
c) ein zeitlicher Drehzahlverlauf einer aufgrund der Antriebstestsequenz hervorgerufenen Drehzahl der Trommel erfasst,
d) der erfasste Drehzahlverlauf einer Analyse unterzogen, wobei bei der Analyse des Drehzahlverlaufs (15) ein Trägheitsmoment (J) der beladenen und angetriebenen Trommel (2) ermittelt wird, und
e) anhand von Ergebnissen der Analyse der Füllstand bestimmt.

[0009] Das erfindungsgemäße Verfahren zeichnet sich gegenüber der bislang üblichen sehr ungenauen Schätzmethode zum einen durch eine höhere Genauigkeit und zum anderen dadurch aus, dass es auch automatisiert und vor allem während des laufenden Betriebs der Mühle durchgeführt werden kann. Es kann also insbesondere auch ein aktueller Messwert für den Füllstand ermittelt werden. Vorteilhafterweise beruht das erfindungsgemäße Verfahren in erster Linie auf der ohnehin für die Regelung des normalen Mühlenbetriebs vorgesehenen Erfassung der Drehzahl. Diese Messgröße steht also bereits in geeigneter, beispielsweise elektronischer Form in einer Auswerteeinheit zur Verfügung. Es sind also insbesondere keine zusätzlichen Sensoren, wie beim Stand der Technik beispielsweise die Gewichtssensoren für das Auflagegewicht der Trommel, notwendig. Auch die Antriebstestsequenz lässt sich in einfacher Weise am Antrieb einstellen, sodass insgesamt nur ein vergleichsweise niedriger Realisierungsaufwand für das erfindungsgemäße Verfahren anfällt.

[0010] Vorteilhafte Ausgestaltungen des erfindungsgemäßen Verfahrens ergeben sich aus den Merkmalen der von Anspruch 1 abhängigen Ansprüche.

[0011] Günstig ist es, wenn bei der Analyse des Drehzahlverlaufs aus dem erfassten zeitlichen Drehzahlverlauf, und insbesondere nach einer Digitalisierung, mittels einer Fourier-Transformation ein Drehzahlfrequenzsignal erzeugt wird, das insbesondere hinsichtlich der umfassten Frequenzanteile untersucht wird. Aufgrund des Auftreffens des Mahlguts auf die Mitnehmer ergeben sich periodische Einbrüche in der Drehzahl, die mittels einer Fourier-Analyse effektiv erfasst und ausgewertet werden können. Vorzugsweise wird aus dem Vorhandensein, aus der Amplitude oder aus der Phase bestimmter Frequenzanteile auf den Füllstand rückgeschlossen. So kann das erfasste Drehzahlsignal besonders gut und umfassend untersucht werden. Der Aufwand hierfür ist überschaubar. Eine Fourier-Transformation lässt sich ohne

weiteres elektronisch und automatisiert durchführen.

[0012] Gemäß einer anderen bevorzugten Variante wird als Antriebstestsequenz ein konstantes Antriebsmoment vorgegeben oder das Antriebsmoment verwendet, das zum normalen Betrieb der Mühle insbesondere durch einen Antriebsregler vorgegeben wird. Der Antriebsregler ist also insbesondere ohnehin vorhanden. Er kann üblicherweise sowohl ein Antriebsmoment als auch eine Drehzahl vorgeben. Bei Verwendung der genannten Antriebstestsequenz wird das Füllstandsermittlungsverfahren besonders einfach. So kommt es praktisch ohne Eingriff in die Vorgabe oder Einstellung des Antriebsmoments aus. Der normale Mühlenbetrieb wird dann nicht einmal geringfügig durch eine Änderung des Antriebsmoments beeinträchtigt, die durch die Füllstandserfassung bedingt ist. Dennoch kann anhand der Analyse der Fourier-Transformierten des Drehzahlverlaufs die interessierende Information bezüglich des Füllstands ermittelt werden.

[0013] Vorzugsweise wird bei der Analyse des Drehzahlverlaufs weiterhin der erfasste Drehzahlverlauf einer Filterung, insbesondere einer Tiefpass-Filterung, und/oder einer Mittelwertbildung (Median) unterzogen. So können Schwankungen beseitigt werden, und es lässt sich einfacher ein bereits sehr guter erster Näherungswert für den gesuchten Füllstand bestimmen.

[0014] Erfindungsgemäß wird bei der Analyse des Drehzahlverlaufs ein Trägheitsmoment der beladenen und angetriebenen Trommel ermittelt. Das Trägheitsmoment ist eine besonders gut geeignete Zwischengröße, anhand der sich der aktuelle Füllstand einfach und doch mit hoher Genauigkeit bestimmen lässt.

[0015] Günstig ist weiterhin eine Variante, bei der als Antriebstestsequenz ein Antriebsmoment mit mindestens einer sprungartigen Änderung, insbesondere mit einer Änderung in Form eines Rechteckpulses, vorgegeben wird. Insbesondere weist die Antriebstestsequenz zwei aufeinander folgende rechteckpulsförmige Änderungen mit entgegengesetzter Änderungsrichtung auf. Eine solche Sprungfunktion im Antriebsmoment führt zu einer leicht erfass- und auswertbaren Reaktion im Drehzahlverlauf. Ausgewertet werden dann also insbesondere die zugehörigen Sprungantworten.

[0016] Vorteilhaft ist es weiterhin, wenn sich die absolute Änderung des Antriebsmoments bezogen auf einen Ausgangswert des Antriebsmoments in einem Bereich von bis zu 30%, insbesondere von bis zu 10%, und insbesondere bis zu 2% bewegt. Dann ist die Änderung des Antriebsmoments einerseits groß genug, um eine auswertbare Reaktion hervorzurufen, und andererseits noch nicht zu groß, um den normalen Mühlenbetrieb nennenswert zu beeinträchtigen. Bei der Variante mit zwei aufeinander folgenden rechteckpulsförmigen Änderungen mit entgegengesetzter Änderungsrichtung können die beiden Rechteckpulse abgesehen vom Vorzeichen gleich, also symmetrisch ausgebildet sein. Ebenso sind aber ungleiche oder asymmetrische aufeinander folgende Rechteckpulse möglich. Beispielsweise können die beiden Rechteckpulse unterschiedliche Pulsdauern und -höhen, jedoch gleiche Zeitintegrale haben. Dadurch kann beispielsweise eine Überschreitung einer vorgegebenen maximalen Mühlendrehzahl vermieden werden. Daher wird der erste Puls vorzugsweise mit negativer Änderungsrichtung und der zweite Puls mit positiver Änderungsrichtung sowie mit gleicher absoluter Pulshöhe wie der erste Puls gewählt. Der erste negative Antriebsmoment-Puls verlangsamt dann die Drehzahl, während der zweite positive Antriebsmoment-Puls die Mühle wieder auf die ursprüngliche Drehzahl beschleunigt. Vorteilhafterweise wird nur ein negativer Antriebsmoment-Puls ausgewertet, da bei negativen Antriebsmoment-Pulsen der Einfluss des Mühlenmomentes geringer ist.

[0017] Günstig ist eine weitere Variante, bei der der Rechteckpuls eine insbesondere vorgebbare und damit bekannte Pulszeitdauer und eine insbesondere ebenfalls vorgebbare und bekannte die Änderung des Antriebsmoments bestimmende Pulshöhe aufweist, und anhand der Pulszeitdauer, der Pulshöhe und einer aufgrund der Antriebstestsequenz hervorgerufenen und erfassten Drehzahländerung ein erster Messwert für das Trägheitsmoment ermittelt wird. Insbesondere wird eine mittlere Drehzahländerung und daraus abgeleitet ein Mittelwert des Trägheitsmoments bestimmt, wobei vorzugsweise von einem statischen, also zeitlich unveränderlichen Trägheitsmoment ausgegangen wird. Dann ist das Trägheitsmoment in sehr guter Näherung insbesondere zu dem Quotienten des Produkts aus der Pulszeitdauer und der Pulshöhe (= Zähler) zu der erfassten (mittleren) Drehzahländerung (= Nenner) proportional. Es resultiert also ein sehr einfacher und auch numerisch leicht auswertbarer Zusammenhang zwischen den genannten Größen.

[0018] Gemäß einer anderen bevorzugten Variante wird zur Bestimmung des Füllstands der für das Trägheitsmoment der beladenen und angetriebenen Trommel ermittelte erste Messwert mit dem Trägheitsmoment eines Kreisbogensegments verglichen, um daraus insbesondere einen Befüllungswinkel oder eine Befüllungshöhe zu bestimmen. Es wurde erkannt, dass sich die Beladung bei den während des Betriebs üblicherweise verwendeten Drehzahlen innerhalb der Trommel so verteilt, dass das Füllgut stets in guter Näherung innerhalb eines Kreisbogensegments angeordnet ist. Demnach lässt sich anhand des bekannten Trägheitsmoments eines Kreisbogensegments und anhand des ermittelten Trägheitsmoment-Messwerts der Füllstand in der Trommel bestimmen.

[0019] Günstig ist es weiterhin wenn eine Zeit- oder Drehzahlabhängigkeit des Trägheitsmoments durch zumindest einen zusätzlich vorgesehenen Korrekturfaktor berücksichtigt wird. Dadurch lässt sich die Messgenauigkeit weiter steigern.

[0020] Darüber hinaus gibt es eine günstige Ausgestaltung des Verfahrens, bei dem ein zum normalen Betrieb der Mühle vorgesehener Drehzahlregler zumindest während einer Dauer der Antriebstestsequenz abgeschaltet wird. Dadurch wird verhindert, dass der Drehzahlregler eingreift und die durch die Antriebstestsequenz gezielt und zu Auswer-

tezwecken herbeigeführte Drehzahländerung ausregelt. Auch ein nur teilweises Nachregeln kann zu ungenaueren Messergebnissen führen. Wenn der Drehzahlregler allerdings eine sehr lange Zeitkonstante hat, die insbesondere in der Größenordnung der Dauer der Antriebstestsequenz liegt oder sogar größer ist, ist ein Abschalten des Drehzahlreglers nicht unbedingt erforderlich.

[0021] Mit Vorteil ist vorgesehen, dass aus dem Drehzahlverlauf und der Antriebstestsequenz ein Trägheitsmoment der beladenen und angetriebenen Trommel und ein statischer Reibungsfaktor eines drehzahlabhängigen Reibungsmomentes ermittelt wird. Durch ein derartiges Verfahren kann die Drehzahlabhängigkeit des Reibmomentes berücksichtigt werden.

[0022] Günstig ist es weiterhin, wenn die Ermittlung des Trägheitsmoments und des statischen Reibungsfaktors auf Basis eines linearen Modells erfolgt, wobei das lineare Modell die Abhängigkeit der Drehzahl von dem Antriebsmoment beschreibt. Ein lineares Modell gibt die Abhängigkeit zwischen der Drehzahl und dem Antriebsmoment der Mühle ausreichend genau wieder, wobei die Parameter des linearen Modells einfach zu bestimmen sind.

[0023] Weiterhin ist mit Vorteil vorgesehen, dass das lineare Modell ein PT1-Glied ist, und zur Ermittlung des Trägheitsmoments und des statischen Reibungsfaktors das PT1-Glied zu zwei Zeitpunkten mit Messwerten der Drehzahl und des Antriebsmoments abgeglichen wird. Ein PT1-Glied hat lediglich zwei unbekannte Parameter, die durch Auswertung des PT1-Gliedes zu zwei unterschiedlichen Zeitpunkten einfach zu bestimmen sind. Der dadurch erforderliche Rechenaufwand ist sehr gering, so dass die Ermittlung der Parameter auch bei begrenzter Speicherkapazität und Rechenleistung durchführbar ist.

[0024] Die Aufgabe wird ebenfalls gelöst durch eine Steuereinrichtung, mit welcher der Füllstand einer beladenen Trommel einer Mühle gemäß einem Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 14 ermittelbar ist. Dazu ist die Steuereinrichtung mit einem Programmcode versehen, welcher Steuerbefehle enthält, die die Steuereinrichtung zur Durchführung des Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 14 veranlassen.

[0025] Die Erfindung erstreckt sich ferner auf einen maschinenlesbaren Programmcode für eine Steuereinrichtung für eine Mühle, welcher Steuerbefehle aufweist, die die Steuereinrichtung zur Durchführung des oben beschriebenen Verfahrens. Der maschinenlesbare Programmcode kann auch auf eine bereits für die Mühle vorhandene, nicht mit dem erfindungsgemäßen Programmcode versehene Steuereinrichtung hinterlegt werden und somit die Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens an einer bisher herkömmlich betriebenen Mühle ermöglichen.

[0026] Ferner erstreckt sich die Erfindung auf ein Speichermedium bzw. Computerprogrammprodukt mit einem darauf gespeicherten maschinenlesbaren Programmcode, wie er oben beschrieben wurde.

[0027] Weitere Merkmale, Vorteile und Einzelheiten der Erfindung ergeben sich aus der nachfolgenden Beschreibung von Ausführungsbeispielen anhand der Zeichnung. Es zeigt:

FIG 1 ein Ausführungsbeispiel einer Mühle mit einer beladenen und um eine Drehachse drehantreibbaren Trommel und mit einer Steuer- und Regeleinheit,

FIG 2 und 3 einen Querschnitt II - II bzw. III - III senkrecht zur Drehachse durch die Trommel der Mühle gemäß FIG 1 bei verschiedener Verteilung des Trommelinhalts,

FIG 4 Zeitdiagramme einer durch die Steuer- und Regeleinheit eingestellten Antriebstestsequenz für ein auf die Trommel wirkendes Antriebsmoment und eines erfassten sowie eines erwarteten Verlaufs einer durch die Antriebstestsequenz hervorgerufenen Drehzahl,

FIG 5 ein Kreisbogensegment entsprechend einem mittleren Verteilungszustand des Trommelinhalts,

FIG 6 Zeitdiagramme einer negativen Sprunganregung eines auf die Trommel wirkenden Antriebsmoments und einer näherungsweise erwarteten Sprungantwort der Drehzahl, und

FIG 7 ein Zeitdiagramm einer Differenz des erfassten Verlaufs und des erwarteten ungestörten Verlaufs gemäß FIG 4.

[0028] Einander entsprechende Teile sind in FIG 1 bis 7 mit denselben Bezugszeichen versehen.

[0029] In FIG 1 ist ein Ausführungsbeispiel einer Mühle 1 mit einer Trommel 2 und einer Steuer- und Regeleinheit 3 in schematischer Darstellung gezeigt. Bei der Mühle 1 handelt es sich um eine Erzmühle, die als Kugelmühle oder als SAG-Mühle ausgebildet ist. Die Trommel 2 steht mit einem Zufuhrschacht 4 in Verbindung, mittels dessen zu mahlendes Erzmaterial 5 in das Innere der Trommel 2 gelangt. Zur Zerkleinerung des Erzmaterials 5 ist die beladene Trommel 2 mittels eines im Ausführungsbeispiel als getriebeloser Elektromotor ausgeführten Antriebs 6 um eine Drehachse 7 drehantreibbar.

[0030] An der Trommel 2 ist ein Drehzahlsensor 8 zur Erfassung einer Drehzahl n der Trommel 2 vorgesehen. Der

Drehzahlsensor 8 ist an die Steuer- und Regeleinheit 3 angeschlossen. Letztere umfasst insbesondere mindestens eine zentrale Recheneinheit 9, beispielsweise in Gestalt einer Mikrocomputer-, Mikroprozessor- oder Mikrocontroller-Baugruppe, einen mit dem Drehzahlsensor 8 verbundenen Drehzahlregler 10 und einen an den Antrieb 6 angeschlossenen Antriebsregler 11. Der Drehzahlregler 10 und der Antriebsregler 11 stehen mittels eines Schalters 12 miteinander in Verbindung. Der Drehzahlregler 10, der Antriebsregler 11 und der Schalter 12 sind an die zentrale Recheneinheit 9 angeschlossen.

[0031] Bei dem Drehzahlregler 10, dem Antriebsregler 11 und auch dem Schalter 12 kann es sich um physikalisch existierende, beispielsweise elektronische Baugruppen oder aber um in einem nicht näher gezeigten Speicher hinterlegte Software-Module handeln, die nach ihrem Aufruf in der zentralen Recheneinheit 9 ablaufen. Die genannten einzelnen Komponenten 9 bis 11 stehen mit in FIG 1 aus Übersichtlichkeitsgründen nicht gezeigten weiteren Komponenten und/oder Einheiten in Wechselwirkung. Außerdem kann die Steuer- und Regeleinheit 3 als eine einzige Einheit oder als Kombination mehrerer gesonderter Teileinheiten ausgeführt sein.

[0032] Im Folgenden werden auch unter Bezugnahme auf FIG 2 bis 7 die Wirkungsweise sowie besondere Verfahrensabläufe und Vorteile der Mühle 1 beschrieben.

[0033] Aufgrund der durch den Antrieb 6 bewirkten Drehbewegung der Trommel 2 wird das eingebrachte Erzmaterial 5 gemahlen. Zur Unterstützung des Mahlvorgangs können in die Trommel 2 zusätzlich Stahlkugeln eingebracht werden. Außerdem wird bei der im Ausführungsbeispiel als Erzmühle ausgebildeten Mühle 1 Wasser zugeführt, sodass sich im Inneren der Trommel 2 ein Füllgut 13 befindet, das im Wesentlichen eine Suspension mit einem durch das mehr oder weniger stark zerkleinerte Erzmaterial 5 und die Stahlkugeln gebildeten Feststoffanteil ist.

[0034] Das Füllgut 13 sowie zwei seiner möglichen Verteilungen innerhalb der rotierenden Trommel 2 sind aus den Querschnittsdarstellungen gemäß FIG 2 und 3 ersichtlich. Gezeigt sind Querschnitte durch die Trommel 2 senkrecht zur Drehachse 7. Die Darstellungen sind stark schematisiert. Es fehlen insbesondere Details der Trommelwand, wie z.B. die an der Innenseite der Trommelwand in Umfangsrichtung verteilt angeordneten Mitnahmestege oder Mitnehmer (engl. Fachbegriff = Liner).

[0035] Die Verteilung des Füllguts 13 in der Trommel 2 kann während des Betriebs variieren. Sie hängt von verschiedenen Parametern, wie der Füllhöhe und in gewissem Grad auch der Drehzahl n, ab. Typischerweise ist die Trommel 2 zu 45-50% gefüllt, woraus sich ein Winkel α von 45˚-55˚ und ein Winkel β von ungefähr 140˚ ergibt. Außerdem ist sie stochastischen Schwankungen unterworfen. Bei dem Verteilungszustand gemäß FIG 2 befindet sich ein Teil des Füllguts 13 aufgrund des Mitnahmeeffekts der Trommel 2 relativ weit oben an der Trommelinnenwand. Nach einem Abrutschen dieses Teils in Richtung der tiefsten Stelle des Trommelinnenraums weist das Füllgut den in FIG 3 gezeigten Verteilungszustand auf. Derartige Veränderungen können sich zyklisch und/oder azyklisch wiederholen.

[0036] Während des Betriebs ändert sich der Befüllungsgrad der Mühle 1 in Abhängigkeit verschiedener Einflussparameter. Eine genaue Kenntnis des aktuellen Befüllungszustands ist wünschenswert, um die Mühlenbetriebsparameter möglichst gut einzustellen und damit den Betrieb der Mühle 1 möglichst effizient zu gestalten.

[0037] Die Mühle 1 ermöglicht aufgrund speziell implementierter Verfahren, den Füllstand des Füllguts 13 in der Trommel 2 insbesondere auch während des laufenden Betriebs zu bestimmen. Diese Füllstandsermittlung beruht auf der Erfassung und Auswertung der Drehzahl n der Trommel 2.

[0038] Bei einer ersten Ausgestaltung dieses Verfahrens werden Sprungantworten der Drehzahl n als Reaktion auf eine sprungartige Veränderung eines Antriebsmoments M des Antriebs 6 analysiert. Als Eingangsgröße wird eine besondere Antriebstestsequenz 14 für das Antriebsmoment M eingestellt. Dies erfolgt mittels entsprechender Vorgaben am Antriebsregler 11, der dann den Antrieb 6 so ansteuert, dass er ein Antriebsmoment M entsprechend der gewünschten Antriebstestsequenz 14 liefert.

[0039] Ein Beispiel einer solchen Antriebstestsequenz 14 ist in dem oberen Diagramm von FIG 4 gezeigt. Der über der Zeit t aufgetragene Verlauf des Antriebsmoments M weist kurzzeitige und geringfügige Abweichungen von einem Grundwert M_0 auf, den das Antriebsmoment M zu diesem Zeitpunkt aufgrund der durch die normalen Betriebserfordernisse bedingten Vorgaben des Antriebsreglers 11 annimmt. Diese Abweichungen sind sprungartig. Insbesondere umfasst die Antriebstestsequenz 14 zwei dem Grundwert M_0 überlagerte Rechteckpulse mit einer Pulshöhe ΔM_1 bzw. ΔM_2 und einer Pulszeitdauer Δt_1 bzw. Δt_2.

[0040] Die beiden Rechteckpulse haben entgegengesetztes Vorzeichen. Der erste Rechteckpuls führt zu einer sprunghaften Absenkung, der zweite der Rechteckpuls zu einer sprunghaften Anhebung des Antriebsmoments M. Diese Reihenfolge ist günstig, da die Mühle 1 üblicherweise bei etwa 80% ihrer kritischen Drehzahl n_{krit} betrieben wird. Um ein Überschreiten dieser kritischen Drehzahl n_{krit} auch während der Phase der Antriebstestsequenz 14 sicher zu vermeiden, empfiehlt es sich zunächst zwischen den Zeitpunkten t_0 und t_1 den negativen Rechteckpuls mit der Absenkung des Antriebsmoments M und erst danach zwischen den Zeitpunkten t_2 und t_3 den positiven Rechteckpuls mit der Anhebung des Antriebsmoments M vorzusehen.

[0041] Dementsprechend ist die Auswirkung auf die Drehzahl n. Der erste negative Rechteckpuls der Antriebstestsequenz 14 lässt die Drehzahl n sinken, während der zweite positive Rechteckpuls zu einem Anstieg zurück zum Drehzahlausgangswert n_0 führt. Im unteren Diagramm von FIG 4 sind schematisch ein anhand des Drehzahlsensors 8

gemessener sowie ein bei konstantem Trägheitsmoment erwarteter Zeitverlauf 15 bzw. 16 der Drehzahl n dargestellt. Anhand einer Mittelung des gemessenen Zeitverlaufs 15 und anhand eines "Root Mean Square"-Fits an eine Kurve mit den bekannten Parametern Δt_1 und Δt_2 und mit einer durch die Antriebstestsequenz 14 bewirkten Drehzahländerung Δn als unbekanntem Parameter kann die Drehzahländerung Δn bestimmt werden. Im einfachsten Fall kann dies anhand einer Subtraktion des im Bereich zwischen den Zeitpunkten t_1 und t_2 gemittelten gemessenen Zeitverlaufs 15 vom Drehzahlausgangswert n_0 erfolgen. Die Mittelung erfolgt in der Steuer- und Regeleinheit 3, wobei beispielsweise eine Tiefpass-Filterung verwendet wird. Insgesamt kann die durch die Antriebstestsequenz 14 bewirkte Drehzahländerung Δn so ermittelt werden.

[0042] Um sicherzustellen, dass die als maßgebliche Messgröße zu erfassende Drehzahländerung Δn nicht durch einen raschen Eingriff des Drehzahlreglers 10 ausgeglichen wird, wird der Drehzahlregler 10 für eine Dauer T_A der Antriebssequenz 14 mittels des Schalters 12 abgeschaltet. Diese Maßnahme ist allerdings nicht zwingend erforderlich. Sie kann entfallen, wenn die Verzögerungszeit des Drehzahlreglers 10 größer als die Dauer T_A der Antriebssequenz 14 ist.

[0043] Aus der erfassten Drehzahländerung Δn sowie aus den vorgegebenen Parametern der Antriebssequenz 14 kann ein sehr guter Schätzwert für ein - zunächst als zeitlich konstant, also statisch angenommenes - Trägheitsmoment J der beladenen Trommel 2 errechnet werden.

[0044] Der Ausgangspunkt dieser Analysemethode sind die folgenden Zusammenhänge. Für eine Beschleunigung einer rotierenden Masse m mit konstantem Trägheitsmoment J ist ein Beschleunigungsmoment M_a gemäß

$$M_a = J \cdot \frac{d\omega}{dt} \qquad (1)$$

erforderlich, wobei mit ω die Winkelgeschwindigkeit der rotierenden Masse m bezeichnet ist. Zwischen einem Drehwinkel α und der Winkelgeschwindigkeit ω gilt die Beziehung:

$$\omega = \frac{d\alpha}{dt} \qquad (2)$$

[0045] In den Querschnittsdarstellungen gemäß FIG 2 und 3 ist der Drehwinkel α mit eingetragen, um den der Masseschwerpunkt des Füllguts 13 jeweils gegenüber der Ruhelage bei stillstehender Trommel 2 ausgelenkt ist.

[0046] Um die Trommel 2 in eine Drehbewegung zu versetzen, wirkt das vom Antrieb 6 aufgebrachte Antriebsmoment M einem beispielsweise durch die Reibungsverluste in der Lagerung der Trommel 2 verursachten Reibmoment M_r sowie einem durch die Auslenkung des Füllguts 13 hervorgerufenen rückstellenden Mühlenmoment M_m entgegen und liefert zugleich das für die Rotation benötigte Beschleunigungsmoment M_a. Es gilt also:

$$M = M_r + M_m + M_a \qquad (3)$$

[0047] Bei Annahme eines statischen Trägheitsmoments J und bei Vorgabe einer Antriebstestsequenz 14 mit zwei Rechteckpulsen gleicher Pulshöhe $\Delta M_1 = \Delta M_2 = \Delta M$ und gleicher Pulszeitdauern $\Delta t_1 = \Delta t_2 = \Delta t$ ergibt sich der gesuchte erste Schätzwert für das Trägheitsmoment J aus Gleichung (1) zu:

$$J = \frac{60 \cdot \Delta M \cdot \Delta t}{2 \cdot \pi \cdot \Delta n} = C \cdot \frac{\Delta M \cdot \Delta t}{\Delta n} \qquad (4)$$

wobei die Drehzahländerung Δn aus dem gemessenen oder erwarteten Drehzahlverlauf 15 bzw. 16 entnommen wird und eine Umrechnung zwischen der in Bogenmaß pro Sekunde angegebenen Winkelgeschwindigkeit ω und der in Umdrehungen pro Minute angegebenen Drehzahl n vorgenommen wird. C steht für eine Proportionalitätskonstante.

[0048] Die Parameter ΔM und Δt der Antriebstestsequenz 14 werden so bemessen, dass zum einen ein erfassbarer Messeffekt im Drehzahlverlauf 15 bzw. 16 resultiert, aber zum anderen die Drehzahländerung Δn klein genug bleibt,

um den während der Messphase insbesondere weiter gehenden Mühlenbetrieb und vor allem den Durchsatz der Mühle 1 nicht maßgeblich zu beeinträchtigen. Eine kleine resultierende Drehzahländerung Δn gewährleistet außerdem, dass die Drehzahlabhängigkeiten beispielsweise des Trägheitsmoments J und des Mühlenmoments M_m nicht zum Tragen kommen, und die hier zunächst vorausgesetzten statischen Verhältnisse auch tatsächlich in guter Näherung gegeben sind. Im Ausführungsbeispiel liegen die Pulshöhen $\Delta M_1 = \Delta M_2 = \Delta M$ deshalb bei etwa 5% des Grundwerts M_0. Die Pulszeitdauern $\Delta t_1 = \Delta t_2 = \Delta t$ liegen bei jeweils etwa 5 s.

[0049] Anhand des gemäß Gleichung (4) bestimmten Schätzwerts für das Trägheitsmoment J kann auf den eigentlich interessierenden Füllstand zurück geschlossen werden.

[0050] Allgemein gilt für das Trägheitsmoment J die Beziehung:

$$J = \int r^2 \cdot dm \tag{5}$$

wobei mit r ein Abstand einer differentiellen Masse dm von der Drehachse 7 bezeichnet ist.

[0051] Wie aus den Darstellungen gemäß FIG 2 und 3 ersichtlich ist, befindet sich das Füllgut 13 zumindest im Mittel innerhalb eines Kreisbogensegments. Für die in FIG 2 und 3 gezeigten beiden Verteilungszustände sind die jeweiligen Bogensehnen 17 bzw. 18 der angenommenen Kreisbogensegmente mit eingetragen. Deren gedachte Schnittpunkte mit der Trommelwand bilden in FIG 2 und 3 ebenfalls mit eingetragenen Befüllungswinkel β, die vom jeweiligen Verteilungszustand des Füllguts 13 innerhalb der Trommel 2 abhängen.

[0052] Es hat sich gezeigt, dass die Annahme einer Füllgutverteilung in Form eines Kreisbogensegments in der Praxis sehr gut erfüllt ist - zumindest, solange die Drehzahl n in dem üblichen Bereich unterhalb der kritischen Drehzahl n_{krit} liegt.

[0053] Deshalb liefert ein Vergleich des gemäß Gleichung (4) bestimmten Schätzwerts für das Trägheitsmoment J mit dem analytisch oder numerisch zu berechnendem Trägheitsmoment einer um eine Drehachse rotierenden kreisbogensegmentförmigen Masse eine Information über die aktuelle Befüllung.

[0054] Unter Bezugnahme auf die Darstellung gemäß FIG 5 kann für das Trägheitsmoment einer um eine Drehachse rotierenden kreisbogensegmentförmigen Masse folgende Berechnungsvorschrift aus Gleichung (5) abgeleitet werden:

$$J = \rho \cdot l \cdot R^4 \cdot \left[\frac{\beta}{4} - \frac{\cos(\beta/2) \cdot \sin^3(\beta/2)}{6} - \frac{\cos^3(\beta/2) \cdot \sin(\beta/2)}{2} \right] \tag{6}$$

wobei mit ρ eine konstant angenommene und in etwa bekannte Füllgutdichte, mit R ein Trommelradius und mit 1 eine axiale Trommellänge in Richtung der Drehachse 7 bezeichnet ist.

[0055] Der gemäß Gleichung (4) bestimmte Schätzwert für das Trägheitsmoment J wird in die Gleichung (6) eingesetzt. Die resultierende Beziehung wird entweder analytisch oder numerisch nach dem Befüllungswinkel β aufgelöst.

[0056] Der so ermittelte Befüllungswinkel β ist bereits ein Maß für die Befüllung der Trommel 2. Bei Bedarf lässt er sich gemäß:

$$h_f = R \cdot \left[1 - \cos(\beta/2) \right] \tag{7}$$

in eine Befüllungshöhe h_f umrechnen.

[0057] Die Messergebnisse lassen sich weiter verfeinern, wenn die Zeitabhängigkeiten der verschiedenen Einflussgrößen, insbesondere die des Trägheitsmoments J, mit berücksichtigt werden. Hierzu wird die Momentengleichung (3) voll dynamisiert, d.h. es werden Abhängigkeiten der Einzelmomente von der Zeit t eingeführt:

$$\mathrm{M} = \mathrm{M_r}(\mathrm{t}) + \mathrm{M_m}(\mathrm{t}) + \mathrm{M_a}(\mathrm{t}) \tag{8}$$

[0058] Es wird ein drehzahlabhängiges Reibmoment $M_r(t)$ gemäß:

$$M_r(t) = M_r^* \cdot \omega = M_r^* \cdot \dot{\alpha} \qquad (9)$$

angenommen, wobei mit M_r^* ein zeitkonstanter Reibungsfaktor bezeichnet ist. Die Zeitabhängigkeit des Produktausdrucks gemäß Gleichung (9) wird also ausschließlich durch die Drehzahl n bzw. die Winkelgeschwindigkeit ω hervorgerufen.

[0059] Weiterhin wird die drehwinkelabhängige und damit ebenfalls zeitabhängige Mühlenkennlinie berücksichtigt. Sie geht in das rückstellende Mühlenmoment $M_m(t)$ ein:

$$M_m(t) = M_m^* \cdot \sin(\alpha) \qquad (10)$$

wobei mit M_m^* ein zeitkonstanter Rückstellungsfaktor bezeichnet ist. Die Zeitabhängigkeit ist somit wieder nur durch den Produktfaktor $\sin(\alpha)$, also durch den zeitabhängigen Drehwinkel α, bestimmt.

[0060] Bei dem Beschleunigungsmoment $M_a(t)$ wird neben der Zeitabhängigkeit der Winkelgeschwindigkeit ω nun auch die des Trägheitsmoments J berücksichtigt. Es ergibt sich also zu:

$$M_a(t) = \frac{d(J \cdot \omega)}{dt} = \frac{d(J \cdot \dot{\alpha})}{dt} = J \cdot \ddot{\alpha} + \dot{J} \cdot \dot{\alpha} \qquad (11)$$

[0061] Unter Berücksichtigung der Gleichungen (9) - (11) lässt sich Gleichung (8) umformen in:

$$M = J \cdot \ddot{\alpha} + (\dot{J} + M_r^*) \cdot \dot{\alpha} + M_m^* \cdot \sin(\alpha) \qquad (12)$$

[0062] Unter der Annahme kleiner Drehwinkel α, für die $\sin(\alpha) \approx \alpha$ gilt, ist die Gleichung (12) die Differentialgleichung eines gedämpften Pendels.

[0063] Um die Gegebenheiten im Innern der Trommel 2 möglichst realistisch abzubilden, wird außerdem eine Nebenbedingung eingeführt, die die Durchrutschbedingung beschreibt. Wie anhand von FIG 2 und 3 bereits erläutert, fällt oder rutscht das Füllgut 13 wieder nach unten, wenn es eine bestimmte obere Position an der Trommelinnenwand erreicht hat. Dieser oberen Position kann ein Grenzdrehwinkel α_0 zugeordnet werden. Er hängt ebenfalls von der Winkelgeschwindigkeit ω ab. In Gleichung (12) kann als Nebenbedingung also eine durch den drehzahlabhängigen Grenzdrehwinkel α_0 bestimmte Begrenzung des Drehwinkels α ergänzt werden:

$$M = J \cdot \ddot{\alpha} + (\dot{J} + M_r^*) \cdot \dot{\alpha} + M_m^* \cdot \sin\left(\min\left(\alpha, \alpha_0(\dot{\alpha})\right)\right) \qquad (13)$$

[0064] Die Gleichung (13) lässt sich numerisch lösen, beispielsweise mittels einer Entwicklung um den Arbeitspunkt α_0.

[0065] Dabei können zusätzliche Informationen über das Verhalten der Mühle 1, die z.B. während der Inbetriebsetzungsphase oder während eines Stillstands gewonnen worden sind, mit einfließen. Insbesondere das Trägheitsmoment J der leeren Trommel 2 kann während der Inbetriebsetzung problemlos ermitteln. Daneben kann auch das Trägheitsmoment J der mit einer Testbefüllung beladenen Trommel 2 durch einen während der Inbetriebsetzungsphase vorgenommenen Auslaufversuch, bei dem der Antrieb 6 sprunghaft abgeschaltet wird, ermittelt werden. Die Periodendauer der resultierenden Schwingung ergibt sich nach den bekannten Gleichungen für das gedämpfte physikalische Pendel.

[0066] Die so gewonnenen Zusatzinformationen können insbesondere zur Kalibrierung des Füllstandserfassungsverfahrens verwendet werden.

[0067] Bei einer Variante werden so und unter Berücksichtigung des erfassten und noch ungefilterten Verlaufs 15 der Drehzahl n zeit- oder/und drehzahlabhängige Korrekturfaktoren ermittelt, die bei der Auswertung der Gleichungen (4) und (6) berücksichtigt werden. Diese Korrekturfaktoren können beispielsweise eine zeitabhängige Abweichung von der

exakt kreisbogensegmentförmigen Verteilung des Füllguts 13 innerhalb der Trommel 2 beschreiben. Dabei werden also auch die im erfassten Verlauf 15 enthaltenen Schwankungen ausgewertet, um zu einem sehr genauen und zeitaktuellen Ergebnis für den Füllstand zu gelangen.

[0068] Bei einer weiteren bevorzugten Variante wird die voll dynamische Simulation lediglich offline verwendet, um den Einfluss der in Gleichung (13) durch $M^*_r \cdot \dot{\alpha}$ beschriebenen Reibung und des in Gleichung (13) durch $M^*_m \cdot \sin(\min(\alpha, \alpha_0(\dot{\alpha})))$ beschriebenen rückstellenden Mühlenmoments besser analysieren und quantifizieren zu können. So lässt sich aus der Struktur von Gleichung (13) beispielsweise die Form der Sprungantwort abschätzen.

[0069] Wenn im laufenden Betrieb der Drehwinkel α bereits die Durchrutschbedingung α_0 erreicht hat, lässt sich die Drehzahlabhängigkeit näherungsweise linearisieren. Es gilt in etwa:

$$\sin(\min(\alpha, \alpha_0(\dot{\alpha}))) \approx \sin(\alpha_0 + \varepsilon\dot{\alpha}) \approx \sin(\alpha_0) + \varepsilon\dot{\alpha} \cdot \cos(\alpha_0) \qquad (14)$$

wobei mit ε eine kleine Störung bezeichnet ist. Mit dieser Näherung vereinfacht sich die Gleichung (13), so dass sie die bekannte Struktur eines PT1-Glieds aufweist.

[0070] Die Lösung der Differentialgleichung eines PT1-Glieds bei einer Sprunganregung ist bekannt. Sie hat die allgemeine Form:

$$K\left(1 - \exp\left(-\frac{t}{T_{PT1}}\right)\right) \qquad (15)$$

wobei mit K eine Amplitudenkonstante und mit T_{PT1} eine Zeitkonstante des PT1-Glieds bezeichnet ist. Übertragen auf eine im oberen Diagramm von FIG 6 gezeigte Sprunganregung 19 mit einem negativen Sprung des Antriebsmoments M zum Zeitpunkt t_0 ergibt sich auf Basis des PT1-Modells folgende Grundstruktur der im unteren Diagramm von FIG 6 gezeigten Sprungantwort 20 für die Drehzahl n(t):

$$n(t) = n_0 - \Delta n\left(1 - \exp\left(-\frac{(t - t_0)}{T_{PT1}}\right)\right) \quad \text{für} \quad t \geq t_0 \qquad (16a)$$

$$n(t) = n_0 \quad \text{für} \quad t < t_0 \qquad (16b)$$

[0071] Die näherungsweise erwarteten Funktionen gemäß Gleichung (15) oder (16) werden an die Messdaten gefittet. Dieser Fit liefert die in Gleichung (15) oder (16) zunächst noch unbekannten Parameter K bzw. Δn und T_{PT1}. Abgesehen vom Offset n_0 ist die Antwort auf den Sprung von M_0 auf M_0-ΔM zumindest anfangs durch die Steigung

$$\frac{K}{T_{PT1}} = \frac{\Delta M}{J} = \frac{\Delta\dot{\alpha}}{\Delta t} \qquad (17)$$

bestimmt. Es ergibt sich also wieder der statische Fall (vgl. Gleichung (4)). Insgesamt kann man also durch Fitten eines PT1-Glieds mit den freien Parametern T und K bzw. Δn an den gemessenen Zeitverlauf 15 auch im dynamischen Fall das Trägheitsmoment J aus der Anfangssteigung K/T ermitteln.

[0072] Bei der Näherung gemäß Gleichung (14) wurde der nicht lineare (sinusförmige) Anteil linearisiert und als kleine Störung ε betrachtet. Durch die Auswertung der Anfangssteigung des PT1-Gliedes vereinfachen sich die analytischen Zusammenhänge, da einige komplexe unbekannte Terme gekürzt werden können. Berücksichtigt man aber beispielsweise auch noch höhere Ordnungen in ε, ergeben sich quadratische Terme in $\dot{\alpha}$, so dass die Differentialgleichung (13) analytisch nicht mehr lösbar ist.

[0073] Eine Lösung kann dann jedoch beispielsweise störungstheoretisch mit dem Störungsansatz:

$$\alpha(t) = \alpha_0(t) + \lambda\alpha_1(t) + \lambda^2\alpha_2(t) + \ldots \qquad (18)$$

entwickelt werden, wobei $\alpha_0(t)$ die Lösung des ungestörten - Systems ist. So wird aus den Messdaten zunächst die Drehzahl n oder das Trägheitsmoment J näherungsweise durch Rückrechnung aus der ungestörten Lösung bestimmt. Die resultierende ungestörte Lösung der Drehzahl n, die im Wesentlichen dem erwarteten Zeitverlauf 16 gemäß FIG 4 entspricht, wird von dem gemessenen Zeitverlauf 15 gemäß FIG 4 subtrahiert wird. Nur das im Diagramm gemäß FIG 7 gezeigte resultierende Störungsdifferenzsignal 21 wird auf seine Frequenzanteile hin weiter untersucht. Ein solches Vorgehen ist numerisch vorteilhaft, weil bekannte Absolutanteile (=erwarteter Zeitverlauf 16) bereits eliminiert werden.

[0074] Weiterhin kann aus dem erfassten Drehzahlverlauf 15, der eine Sprungantwort darstellt, mittels einer Modellinversion und unter Berücksichtigung der maßgeblichen Gleichung (13) auf den aktuellen Füllstand geschlossen werden. Hierzu kann auf Basis von Gleichung (13) folgendes Gleichungssystem:

$$\dot{J} = \frac{\left[M - M_m^* \cdot \sin\left(\min\left(\alpha, \alpha_0(\dot{\alpha})\right)\right) - J \cdot \ddot{\alpha}\right]}{\dot{\alpha}} - M_r^* \qquad (19a)$$

$$J = \int \dot{J} dt \qquad (19b)$$

aufgestellt werden, das zwei Einzelgleichungen umfasst. Das Trägheitsmoment J und seine erste zeitliche Ableitung $\dot{J}$ sind die zu bestimmenden unbekannten Größen. Bekannt sind dagegen das vorgegebene und ggf. auch nochmals gemessene Antriebsmoment M sowie die gemessene Winkelgeschwindigkeit $\dot{\alpha}$, die im Wesentlichen der Drehzahl n entspricht. Weiterhin lassen sich der zeitkonstante Rückstellungsfaktor M_m^* und der zeitkonstante Reibungsfaktor M_r^* zumindest näherungsweise anhand einer statischen Berechnung ermitteln.

[0075] Die (numerische) Lösung der Differentialgleichung (13) ist der von verschiedenen Parametern abhängige Drehwinkel $\alpha(J(t),M(t),\alpha_0(t))$ bzw. die daraus leicht zu bestimmende Drehzahl n(t) der Trommel 2 bei gegebenem J(t) und M(t). Zumindest als Zwischengröße gilt das Interesse zunächst jedoch dem Trägheitsmoment J(t). Unter Modellinversion versteht man die analytische Auflösung der Gleichung (13) nach J(t). Für die allgemeine, dynamische Differentialgleichung wird das nicht gelingen. Zur numerischen Lösung kann man beispielsweise folgende Ansatzfunktionen in J verwenden:

$$J(t) = p_0 J_0 + p_1 J_1(t) + p_2 J_2(t) + \ldots \qquad (20)$$

[0076] Damit wird die Differentialgleichung vorwärts gelöst und das Ergebnis mit den gemessenen Werten verglichen. In Gleichung (20) bezeichnet J_0 die Lösung des statischen Problems und $J_1(t)$ eine beispielsweise sinusförmige Störungsfunktion, also z.B. $J_1(t) = \sin(t/T_{St})$. Die Störungsperiodizität T_{st} kann insbesondere aus der Drehzahl n und aus dem Umfangsabstand der Mitnehmer in der Trommel 2 berechnet werden. Das Optimierungsproblem in den Parametern p_n wird beispielsweise durch einen "Least Square"-Fit mit den Messdaten gelöst. Dies kann insbesondere automatisiert und auch online, also während des Mühlenbetriebs, erfolgen.

[0077] Bei einer weiteren bevorzugten Variante wird die Momentengleichung (3) teilweise dynamisiert. Das Trägheitsmoment J und das Mühlenmoment M_m werden als statisch angenommen, wohingegen das Reibmoment M_r gemäß Gleichung (9) als drehzahlabhängig angenommen wird. Somit ergibt sich als Momentengleichung:

$$\mathrm{M} = \mathrm{M}_r(t) + \mathrm{M}_m + \mathrm{M}_a(t) = \mathrm{M}_r^* \cdot \omega + \mathrm{M}_m + J \cdot \frac{d\omega}{dt} \qquad (21)$$

[0078] Wird Gleichung (21) für einen Sprung des Antriebsmoments ΔM betrachtet, so vereinfacht sich diese zu:

$$\frac{d\omega}{dt} = -\frac{M_r^*}{J} \cdot \omega + \frac{1}{J} \cdot \Delta M \qquad (22)$$

[0079] Gleichung (22) hat die Struktur eines PT1-Glieds, mit der Differenzialgleichung

$$\frac{dy}{dt} = -\frac{y}{T_{PT1}} + \frac{K}{T_{PT1}} \cdot u \qquad (23)$$

[0080] Ein Vergleich der Gleichungen (22) und (23) liefert folgende Zusammenhänge:

$$\Delta M = u \qquad (24a)$$

$$n = y \qquad (24b)$$

$$M_r^* = \frac{60}{2\pi} \cdot \frac{1}{K} \qquad (24c)$$

$$J = \frac{60}{2\pi} \cdot \frac{T_{PT1}}{K} \qquad (24d)$$

[0081] Die Gleichungen (24c) und (24d) stellen einen Zusammenhang zwischen dem Reibungsfaktor M_r^* und dem Trägheitsmoment J, die in Gleichung (21) unbekannt und zu bestimmen sind, und dem Verstärkungsfaktor K und der Zeitkonstante T_{PT1} eines PT1-Glieds her. Der Verstärkungsfaktor K und die Zeitkonstante T_{PT1} können mittels einer Parameteridentifikation aus Messwerten des Antriebsmoments M und der Drehzahl n ermittelt werden. Vorliegend sind zwei Parameter K und T_{PT1} zu identifizieren, wobei das Modell des Mühlenverhaltens, also das PT1-Glied, linear ist.

[0082] Die Parameteridentifikation erfolgt durch einen Minimierungsalgorithmus, der beispielsweise den quadratischen Fehler minimiert. Die Parameteridentifikation kann zeitkontinuierlich oder zeitdiskret durchgeführt werden. Da moderne Recheneinheiten zeitdiskret arbeiten, wird nachfolgend die zeitdiskrete Parameteridentifikation erläutert.

[0083] Wird Gleichung (23) diskretisiert, so ergibt sich:

$$y_{i+1} = \frac{K \cdot \Delta t}{T_{PT1}} \cdot u_i + \left(1 - \frac{\Delta t}{T_{PT1}}\right) \cdot y_i = p_i \cdot u_i + p_2 \cdot y_i \qquad (25)$$

wobei Δt die Abtastzeit und

$$p_1 = \frac{K \cdot \Delta t}{T_{PT1}} \qquad (26a)$$

und

$$p_2 = 1 - \frac{\Delta t}{T_{PT1}} \tag{26b}$$

[0084] ist. Die Berechnung der unbekannten Parameter erfolgt durch die Minimierung der Summe der quadrierten Fehler zwischen dem Modellausgang y_i und den entsprechenden Messwerten y_i^{Mess} über N Zeitschritte. Es ist somit das Gütefunktional

$$\sum_{i=1}^{N} \left(y_i - y_i^{Mess} \right)^2 \tag{27}$$

zu minimieren. Als Lösung für das überbestimmte Gleichungssystem ergibt sich in Matrixschreibweise:

$$\mathbf{p} = \left(\mathbf{M}^T \cdot \mathbf{M} \right)^{-1} \cdot \mathbf{M}^T \cdot \mathbf{y}^{Mess} \tag{28}$$

wobei **p** ein Vektor aus p_1 und p_2 und $\mathbf{y}^{Mess}$ ein Vektor aus y_2^{Mess} bis y_{N+1}^{Mess} ist. **M** ist eine Matrix aus einem Vektor **u** und **y**, wobei **u** die gemessenen Eingangswerte u_1 bis u_N und der Vektor **y** die Messwerte y_1^{Mess} bis y_N^{Mess} enthält.
[0085] Besonders einfach wird Gleichung (28), wenn lediglich N = 2 Zeitschritte betrachtet werden. Da nur zwei Parameter zu bestimmen sind, ist die Betrachtung von zwei Zeitschritten ausreichend. Aus Gleichung (28) ergibt sich:

$$\mathbf{M}^T \cdot \mathbf{M} \cdot \mathbf{p} = \mathbf{M}^T \cdot \mathbf{y}^{Mess} \tag{29}$$

[0086] Durch Einführen von Abkürzungen ergibt sich aus Gleichung (29):

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{p} = \mathbf{b} \tag{30}$$

[0087] Gleichung (30) kann nach **p** aufgelöst werden, so dass sich folgende Gleichung ergibt:

$$\mathbf{p} = \mathbf{A}^{-1} \cdot \mathbf{b} \tag{31}$$

[0088] Für die Unbekannten Parameter p_1 und p_2 ergibt sich somit:

$$p_1 = \frac{b_1 \cdot a_{22} - b_2 \cdot a_{12}}{a_{11} \cdot a_{22} - a_{12} \cdot a_{21}} \tag{32}$$

$$p_2 = \frac{b_2 \cdot a_{11} - b_1 \cdot a_{21}}{a_{11} \cdot a_{22} - a_{12} \cdot a_{21}} \tag{33}.$$

[0089] b_1 und b_2 sind die Elemente des Vektors **b** und a_{ij} die Elemente der Matrix **A** in der i-ten Zeile und j-ten Spalte.
[0090] Da a_{12} immer gleich a_{21} ist, können die unbekannten Parameter p_1 und p_2 durch Auswertung von zwei aufeinanderfolgenden Zeitschritten bestimmt werden, wobei nur fünf Werte, nämlich a_{11}, a_{12}, a_{22}, b_1 und b_2 auszuwerten sind. Somit können die unbekannten Parameter p_1 und p_2 auch in Recheneinheiten mit begrenzter Rechenleistung und

Speicherkapazität bestimmt werden. Mit Hilfe der Parameter p_1 und p_2 und der bekannten Abtastzeit Δt kann auf den Verstärkungsfaktor K und die Zeitkonstante T_{PT1} des PT1-Gliedes zurückgerechnet werden. Aus dem Verstärkungsfaktor K und der Zeitkonstante T_{PT1} kann ferner auf den unbekannten Reibungsfaktor M_r* und das unbekannte Trägheitsmoment J zurückgerechnet werden. Mit diesen berechneten Größen kann in bekannter Weise auf den Füllstand der Trommel 2 geschlossen werden.

[0091] Sollte das Gleichungssystem schlecht konditioniert sein, schafft eine Singulärwertzerlegung Abhilfe. Alternativ kann auch eine Householdertransformation oder eine QR-Zerlegung nach Gram-Schmidt durchgeführt werden.

[0092] Mit dem vorgestellten Verfahren können auch komplexere lineare Modelle mit drei oder mehr freien Parametern bestimmt werden.

[0093] Sämtliche vorstehend beschriebenen Verfahrensschritte werden in der Steuer- und Regeleinheit 3, insbesondere in der zentralen Recheneinheit 9 durchgeführt. Dies erfolgt vorzugsweise automatisiert und zyklisch während des laufenden Mühlenbetriebs, sodass in der Steuer- und Regeleinheit 3 sehr genau ermittelte Informationen über die jeweils aktuelle Befüllung der Trommel 2 vorliegen. Diese können zu einer verbesserten Steuerung und/oder Regelung des Mühlenbetriebs verwendet werden.

[0094] Bei einer anderen Ausgestaltung des Verfahrens zur Füllstandserfassung kann auch ohne speziell vorgegebene Antriebstestsequenz 14 und stattdessen mit dem Antriebsmoment M gearbeitet werden, das sich aufgrund der vom Antriebsregler 11 für den normalen Mühlenbetrieb getroffenen Vorgaben am Antrieb 6 einstellt. Der auch in diesem Fall erfasste Verlauf 15 der Drehzahl n wird dann in der Regel- und Steuereinheit 3 zunächst einer Fourier-Transformation unterzogen.

[0095] Das anschließend als Fourier-Transformierte vorliegende Frequenzsignal des Drehzahlverlaufs n wird insbesondere hinsichtlich der vorhandenen Frequenzanteile sowie deren Amplitude und Phasenlagen untersucht. Daraus lassen sich Informationen über den aktuellen Füllstand der Trommel 2 sowie ggf. über weitere Betriebsparameter, wie die Massenverteilung in der Trommel 2, die Korngrößenverteilung im Erzmaterial 5 und den Stahlkugelanteil, ableiten.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Ermittlung eines Füllstands (β, h_f) einer beladenen Trommel (2) einer Mühle (1), wobei

   a) die Trommel (2) mittels eines Antriebs (6) mit einem Antriebsmoment (M) beaufschlagt und in eine Drehbewegung (ω) versetzt wird,
   b) das Antriebsmoment (M) am Antrieb (6) gemäß einer vorgebbaren Antriebstestsequenz (14; 19) eingestellt wird,
   dadurch gekennzeichnet, dass
   c) ein zeitlicher Drehzahlverlauf (15) einer aufgrund der Antriebstestsequenz (14; 19) hervorgerufenen Drehzahl (n) der Trommel (2) erfasst wird,
   d) der erfasste Drehzahlverlauf (15) einer Analyse unterzogen wird, wobei bei der Analyse des Drehzahlverlaufs (15) ein Trägheitsmoment (J) der beladenen und angetriebenen Trommel (2) ermittelt wird, und
   e) anhand von Ergebnissen der Analyse der Füllstand (β, h_f) bestimmt wird.

2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** bei der Analyse des Drehzahlverlaufs (15) aus dem erfassten zeitlichen Drehzahlverlauf (15) mittels einer Fourier-Transformation ein Drehzahlfrequenzsignal erzeugt wird, das insbesondere hinsichtlich der umfassten Frequenzanteile untersucht wird.

3. Verfahren nach Anspruch 2, **dadurch gekennzeichnet, dass** aus dem Vorhandensein, aus der Amplitude oder aus der Phase bestimmter Frequenzanteile auf den Füllstand rückgeschlossen wird.

4. Verfahren nach Anspruch 2 oder 3, **dadurch gekennzeichnet, dass** als Antriebstestsequenz ein konstantes Antriebsmoment vorgegeben wird oder ein Antriebsmoment (M_0) verwendet wird, das zum normalen Betrieb der Mühle (1) insbesondere durch einen Antriebsregler (11) vorgegeben wird.

5. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichn e t, dass bei der Analyse des Drehzählverlaufs (15) der erfasste Drehzahlverlauf (15) einer Filterung oder einer Mittelwertbildung unterzogen wird.

6. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** als Antriebstestsequenz (14; 19) ein Antriebsmoment (M) mit mindestens einer sprungartigen Änderung, insbesondere mit einer Änderung in Form eines Rechteckpulses, vorgegeben wird.

7. Verfahren nach Anspruch 6, **dadurch gekennzeichnet, dass** sich die Änderung (ΔM; ΔM_1, ΔM_2) des Antriebsmoments (M) bezogen auf einen Ausgangswert (M_0) des Antriebsmoments (M) in einem Bereich von bis zu 30%, insbesondere von bis zu 10%, und insbesondere bis zu 2% bewegt.

8. Verfahren nach Anspruch 6, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Rechteckpuls eine Pulszeitdauer (Δt; Δt_1, Δt_2) und eine die Änderung des Antriebsmoments (M) bestimmende Pulshöhe (ΔM; ΔM_1, ΔM_2) aufweist, und anhand der Pulszeitdauer (Δt; Δt_1, Δt_2), der Pulshöhe (ΔM; ΔM_1, ΔM_2) und einer aufgrund der Antriebstestsequenz (14) hervorgerufenen und erfassten Drehzahländerung (Δn) ein erster Messwert für das Trägheitsmoment (J) ermittelt wird.

9. Verfahren nach Anspruch 8, **dadurch gekennzeichnet, dass** zur Bestimmung des Füllstands (β, h_f) der für das Trägheitsmoment (J) der beladenen und angetriebenen Trommel (2) ermittelte erste Messwert mit dem Trägheitsmoment (J) eines Kreisbogensegments verglichen wird, um daraus insbesondere einen Befüllungswinkel (β) oder eine Befüllungshöhe (h_f) zu bestimmen.

10. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** eine Zeit- oder Drehzahlabhängigkeit des Trägheitsmoments (J) durch zumindest einen zusätzlich vorgesehenen Korrekturfaktor berücksichtigt wird.

11. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** ein zum normalen Betrieb der Mühle (1) vorgesehener Drehzahlregler (10) zumindest während einer Dauer (T_A) der Antriebstestsequenz (14) abgeschaltet wird.

12. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 11, **dadurch gekennzeichnet, dass** aus dem Drehzahlverlauf (15) und der Antriebstestsequenz (14; 19) ein Trägheitsmoment (J) der beladenen und angetriebenen Trommel (2) und ein statischer Reibungsfaktor (M_r*) eines drehzahlabhängigen Reibungsmomentes ermittelt wird.

13. Verfahren nach Anspruch 12, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Ermittlung des Trägheitsmoments (J) und des statischen Reibungsfaktors (M_r*) auf Basis eines linearen Modells erfolgt, wobei das lineare Modell die Abhängigkeit der Drehzahl (n) von dem Antriebsmoment (M) beschreibt.

14. Verfahren nach Anspruch 13, **dadurch gekennzeichnet, dass** das lineare Modell ein PT1-Glied ist, und zur Ermittlung des Trägheitsmoments (J) und des statischen Reibungsfaktors (M_r*) das PT1-Glied zu zwei Zeitpunkten mit Messwerten der Drehzahl (n) und des Antriebsmoments (M) abgeglichen wird.

15. Steuereinrichtung für eine Mühle (1), mit einem Programmcode, welcher Steuerbefehle aufweist, die die Steuereinrichtung zur Durchführung eines Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 14 veranlasst.

16. Maschinenlesbarer Programmcode für eine Steuereinrichtung für eine Mühle (1), welcher Steuerbefehle aufweist, die die Steuereinrichtung zur Durchführung des Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 14 veranlassen.

17. Speichermedium mit einem darauf gespeicherten maschinenlesbaren Programmcode gemäß Anspruch 16.

Claims

1. Method for determining a filling level (β, h_f) of a loaded drum (2) of a mill (1), in which

   a) a drive (6) applies to the drum (2) a drive torque (M) that sets it into a rotational movement (ω),
   b) the drive torque (M) is set at the drive (6) in accordance with a prescribable drive test sequence (14; 19),
   characterized in that
   c) a temporal speed characteristic (15) of a speed (n) of the drum (2) caused by the drive test sequence (14; 19) is acquired,
   d) the acquired speed characteristic (15) is analyzed, wherein an inertia torque (J) of the loaded and driven drum (2) is determined during analysis of the speed characteristic (15), and
   e) the filling level (β, h_f) is determined with the aid of results of the analysis.

2. Method according to Claim 1, **characterized in that** a speed frequency signal that is tested in particular with regard to the frequency components involved is generated from the acquired temporal speed characteristic (15) by means of a Fourier transformation during the analysis of the speed characteristic (15).

3. Method according to Claim 2, **characterized in that** the filling level is inferred from the presence, from the amplitude or from the phase of specific frequency components.

4. Method according to Claim 2 or 3, **characterized in that** as drive test sequence a constant drive torque is prescribed, or use is made of a drive torque (M_0) that is prescribed for the normal operation of the mill (1), in particular by a drive controller (11).

5. Method according to Claim 1, **characterized in that** the acquired speed characteristic (15) is subjected to a filtering or an averaging during the analysis of the speed characteristic (15).

6. Method according to Claim 1, **characterized in that** a drive torque (M) having at least one step change, in particular with a change in the form of a square-wave pulse, is prescribed as drive test sequence (14; 19).

7. Method according to Claim 6, **characterized in that** the change (ΔM; ΔM_1, ΔM_2) in the drive torque (M) referred to an initial value (M_0) of the drive torque (M) moves in a range of up to 30%, in particular of up to 10%, and in particular of up to 2%.

8. Method according to Claim 6, **characterized in that** the square-wave pulse has a pulse duration (Δt; Δt_1, Δt_2) and a pulse height (ΔM; ΔM_1, ΔM_2) determining the change in the drive torque (M), and a first measured value is determined for the inertia torque (J) with the aid of the pulse duration (Δt; Δt_1, Δt_2), the pulse height (ΔM; ΔM_1, ΔM_2) and a speed change (Δn) caused by the drive test sequence (14) and acquired.

9. Method according to Claim 8, **characterized in that**, to determine the filling level (β, h_f), the first measured value determined for the inertia torque (J) of the loaded and driven drum (2) is compared with the inertia torque (J) of a circular arc segment in order to determine therefrom, in particular, a filling angle (β) or a filling height (h_f).

10. Method according to Claim 1, **characterized in that** a time dependence or speed dependence of the inertia torque (J) is taken into account by at least one additionally provided correction factor.

11. Method according to Claim 1, **characterized in that** a speed regulator (10) provided for the normal operation of the mill (1) is switched off at least during one period (T_A) of the drive test sequence (14).

12. Method according to one of Claims 1 to 11, **characterized in that** an inertia torque (J) of the loaded and driven drum (2) and a static friction factor (M_r*) of a speed-dependent friction torque are determined from the speed characteristic (15) and the drive test sequence (14; 19).

13. Method according to Claim 12, **characterized in that** the inertia torque (J) and the static friction factor (M_r*) are determined on the basis of a linear model, the linear model describing the dependence of the speed (n) on the drive torque (M).

14. Method according to Claim 13, **characterized in that** the linear model is a PT1 element and, in order to determine the inertia torque (J) and the static friction factor (M_r*), the PT1 element is tuned at two instants with measured values of the speed (n) and of the drive torque (M).

15. Control device for a mill (1), comprising a program code that has control commands that prompt the control device to carry out a method according to one of Claims 1 to 14.

16. Machine-legible program code for a control device for a mill (1), which has control commands that prompt the control device to carry out the method according to one of Claims 1 to 14.

17. Storage medium comprising a machine-legible program code in accordance with Claim 16 that is stored thereon.

Revendications

1. Procédé de détermination d'un niveau (β, h_f) de remplissage d'un tambour (2) chargé d'un broyeur (1), dans lequel

   a) on soumet le tambour (2) à un couple (M) d'entraînement au moyen d'un entraînement (6) et on l'entraîne

en un mouvement (ω) de rotation,
b) on règle le couple (M) d'entraînement à l'entraînement (6) suivant une séquence (14 ; 19) de test d'entraînement pouvant être prescrite,
caractérisé en ce que
c) on relève une courbe (15), en fonction du temps, d'une vitesse (n) de rotation du tambour (2) provoquée par la séquence (14 ; 19) de test d'entraînement,
d) on soumet la courbe (15) relevée de vitesse de rotation à une analyse en déterminant, lors de l'analyse de la courbe (15) de vitesse de rotation, un moment (J) d'inertie du tambour (2) chargé et entraîné, et
e) on détermine le niveau (β, h_f) de remplissage au moyen des résultats de l'analyse.

2. Procédé suivant la revendication 1, **caractérisé en ce que**, lors de l'analyse de la courbe (15) de vitesse de rotation à partir de la courbe (15) de vitesse de rotation en fonction du temps qui a été relevée, on produit au moyen d'une transformation de Fourier un signal de fréquence de vitesse de rotation, dont on étudie notamment les composantes de fréquence.

3. Procédé suivant la revendication 2, **caractérisé en ce qu'**à partir de la présence, de l'amplitude ou de la phase de certaines composantes de fréquence, on tire une déduction sur le niveau de remplissage.

4. Procédé suivant la revendication 2 ou 3, **caractérisé en ce que** l'on prescrit comme séquence de test d'entraînement un couple d'entraînement constant ou on utilise un couple (M_0) d'entraînement qui est prescrit pour le fonctionnement normal du broyeur (1), notamment par un régleur (11) d'entraînement.

5. Procédé suivant la revendication 1, **caractérisé en ce que**, lors de l'analyse de la courbe (15) de vitesse de rotation, on soumet la courbe (15) de vitesse de rotation qui a été relevée à un filtrage ou à une formation d'une moyenne.

6. Procédé suivant la revendication 1, **caractérisé en ce que** l'on prescrit comme séquence (14 ; 19) de test d'entraînement un couple (M) d'entraînement ayant au moins une variation brusque, ayant notamment une variation sous la forme d'une impulsion rectangulaire.

7. Procédé suivant la revendication 6, **caractérisé en ce que** la variation (ΔM ; ΔM_1 ; ΔM_2) du couple (M) d'entraînement rapportée à une valeur (M_0) initiale du couple (M) d'entraînement se déplace dans une plage allant jusqu'à 30%, notamment allant jusqu'à 10% et notamment allant jusqu'à 2%.

8. Procédé suivant la revendication 6, **caractérisé en ce que** l'impulsion rectangulaire a une durée (Δt ; Δt_1 ; Δt_2) d'impulsion et une hauteur (ΔM ; ΔM_1 ; ΔM_2) d'impulsion déterminant la variation du couple (M) d'entraînement et on détermine, au moyen de la durée (Δt ; Δt_1 ; Δt_2) d'impulsion, de la hauteur (ΔM ; ΔM_1 ; ΔM_2) d'impulsion et d'une variation (Δn) de vitesse de rotation détectée et provoquée par la séquence (14) de test d'entraînement, une première valeur de mesure du moment (J) d'inertie.

9. Procédé suivant la revendication 8, **caractérisé en ce que**, pour la détermination du niveau (β, h_f) de remplissage, on compare la première valeur de mesure déterminée pour le moment (J) d'inertie du tambour (2) chargé et entraîné au moment (J) d'inertie d'un segment de cercle et on en détermine notamment un angle (β) de remplissage ou un niveau (h_f) de remplissage.

10. Procédé suivant la revendication 1, **caractérisé en ce qu'**on tient compte d'une variation, en fonction du temps ou de la vitesse de rotation, du moment (J) d'inertie par au moins un facteur de correction prévu supplémentairement.

11. Procédé suivant la revendication 1, **caractérisé en ce qu'**au moins pendant une durée (TA) de la séquence (14) de test d'entraînement, on déconnecte un régleur (10) de vitesse de rotation prévu pour le fonctionnement normale du broyeur (1).

12. Procédé suivant l'une des revendications 1 à 11, **caractérisé en ce qu'**à partir de la courbe (15) de vitesse de rotation et de la séquence (14 ; 19) de test d'entraînement, on détermine un moment (J) d'inertie du tambour (2) chargé et entraîné et un facteur (M_r*) de frottement statique d'un couple de frottement, qui dépend de la vitesse de rotation.

13. Procédé suivant la revendication 12, **caractérisé en ce que** l'on effectue la détermination du moment (J) d'inertie

et du facteur (M_r*) de frottement statique sur la base d'un modèle linéaire décrivant la dépendance de la vitesse (n) de rotation en fonction du couple (M) d'entraînement.

14. Procédé suivant la revendication 13, **caractérisé en ce que** le modèle linéaire est un élément PT1 et, pour la détermination du moment (J) d'inertie et du facteur (M_r*) de frottement statique, l'élément PT1 est égalisé en deux instants à des valeurs de mesure de la vitesse (n) de rotation et du couple (M) d'entraînement.

15. Dispositif de commande d'un broyeur (1) comprenant un code de programme qui comporte des instructions de commande, lesquelles font que le dispositif de commande effectue un procédé suivant l'une des revendications 1 à 14.

16. Côte de programme pouvant être lu par une machine pour un dispositif de commande d'un broyeur (1) qui a des instructions de commande, lesquelles font que le dispositif de commande effectue le procédé suivant l'une des revendications 1 à 14.

17. Support de mémoire ayant un code de programme suivant la revendication 16, qui y est mémorisé et qui peut être exploité par une machine.

FIG 1

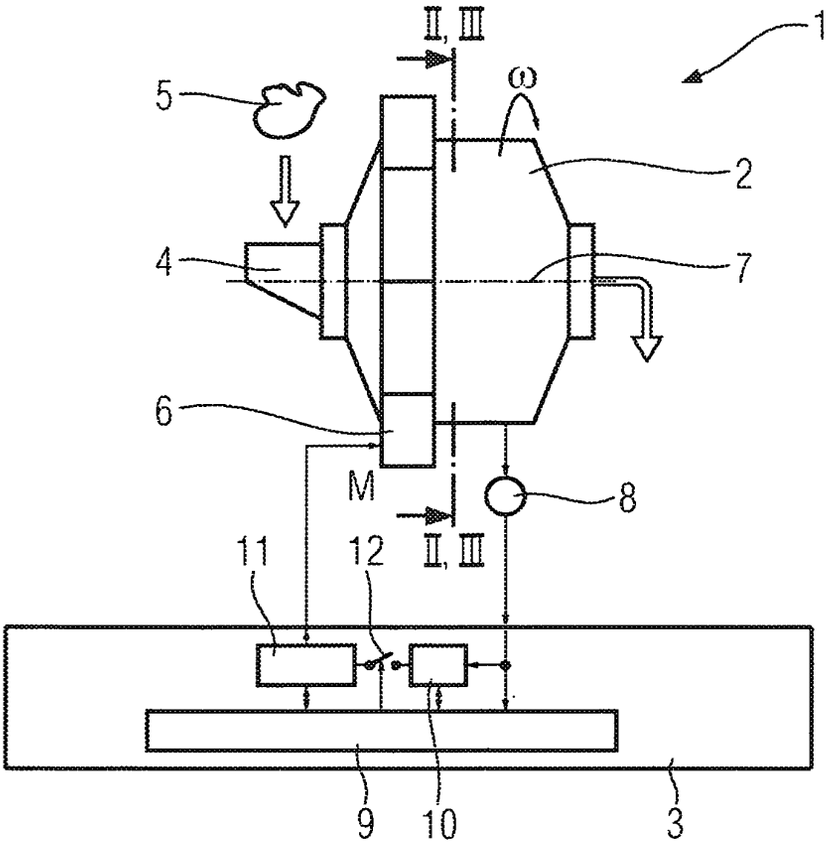


FIG 2

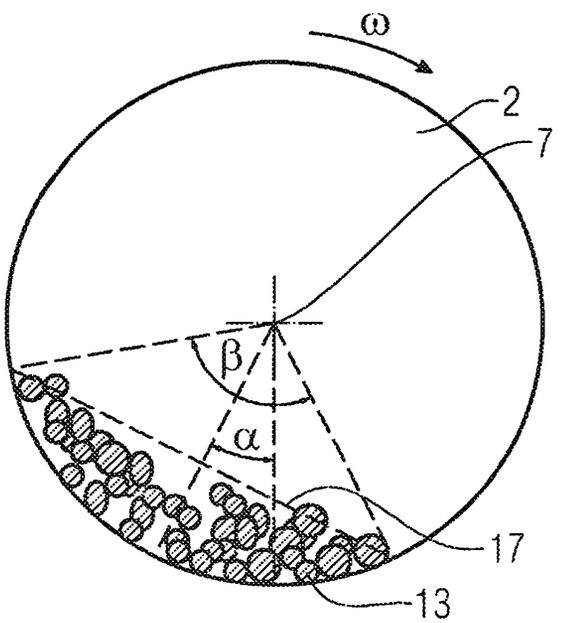


FIG 3

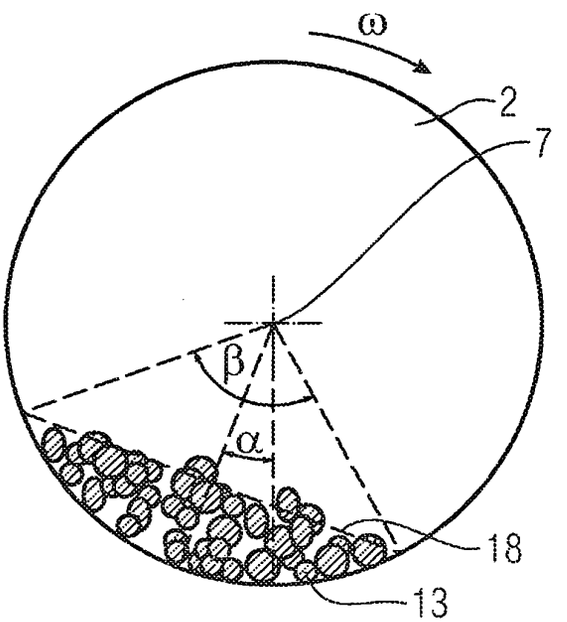


FIG 4

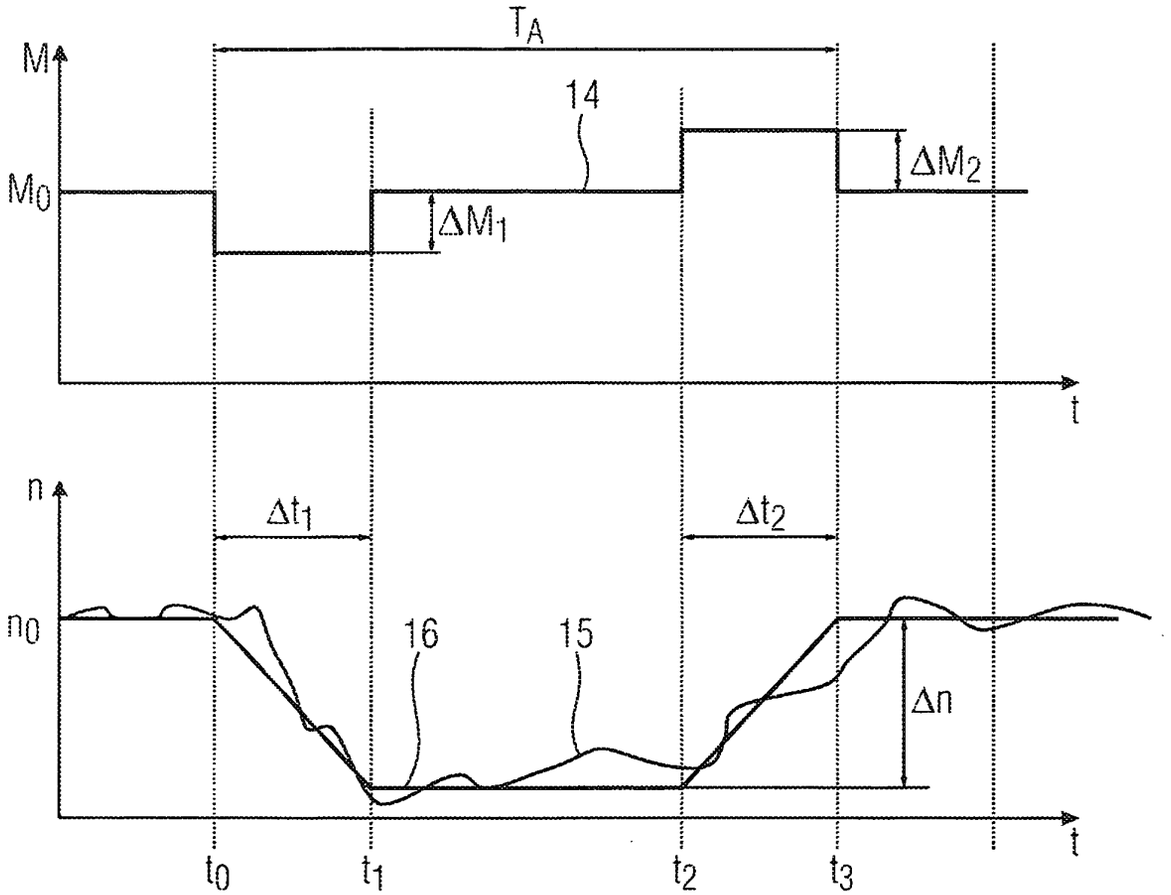

T_A
M
14
M_0
ΔM_2
ΔM_1
t
n
Δt_1
Δt_2
n_0
16
15
Δn
t
t_0
t_1
t_2
t_3

FIG 5

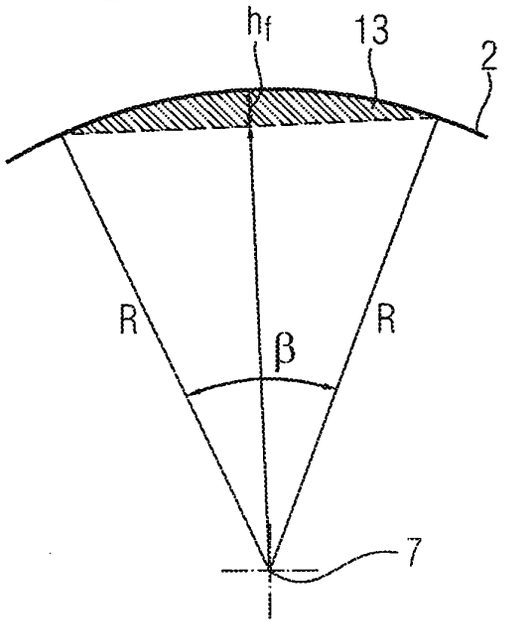

h_f
13
2
R
β
R
7

FIG 6

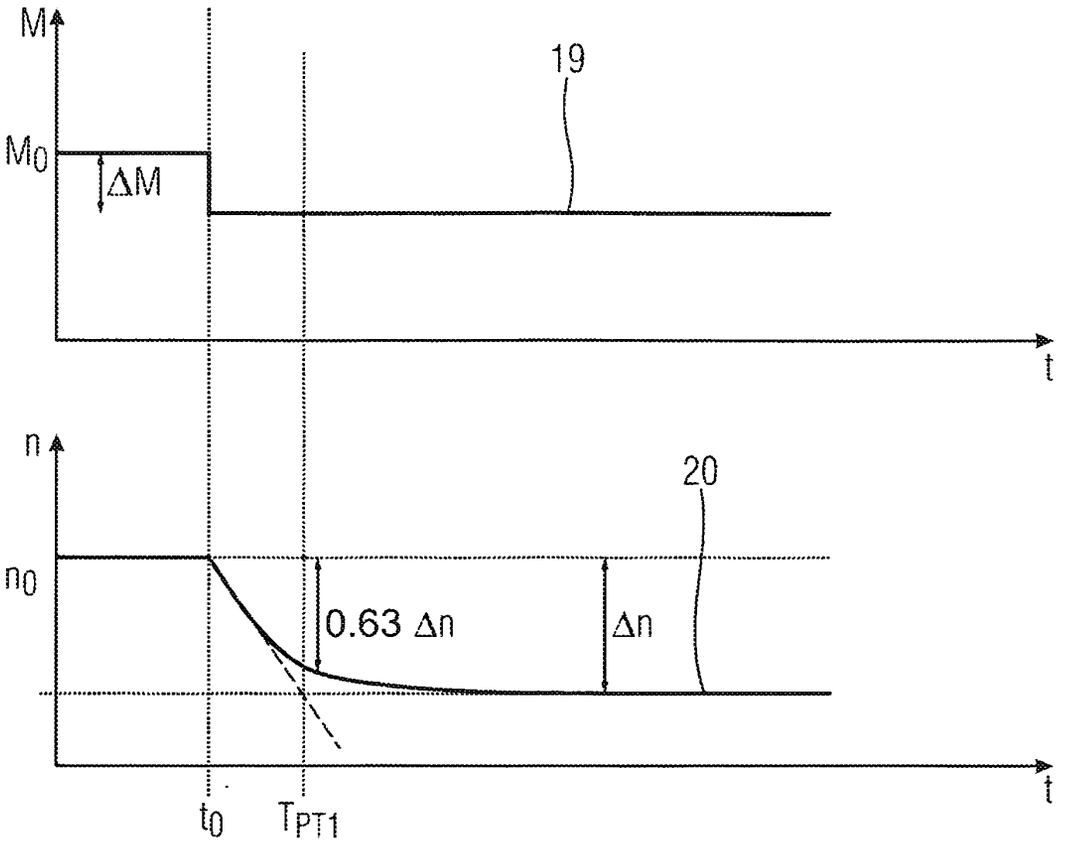
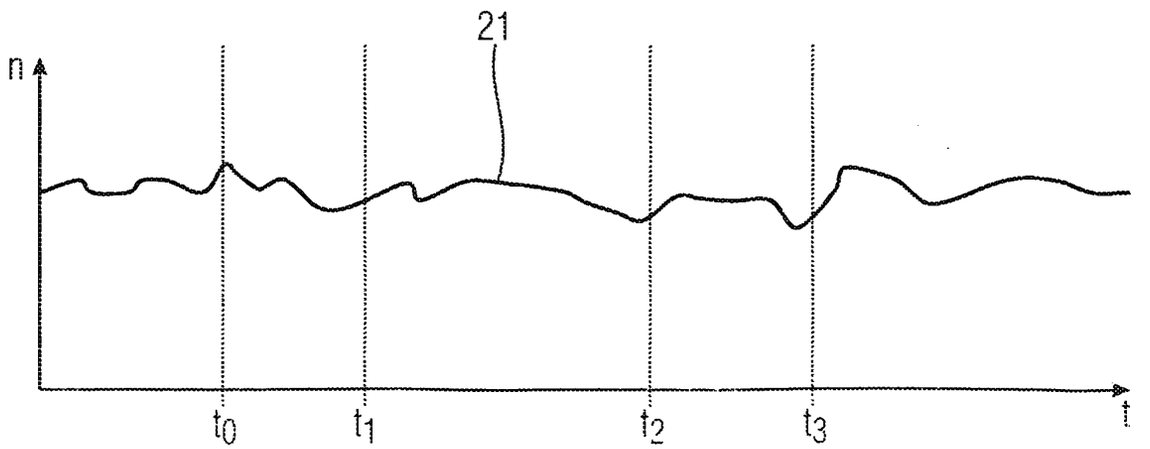


FIG 7



IN DER BESCHREIBUNG AUFGEFÜHRTE DOKUMENTE

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

In der Beschreibung aufgeführte Patentdokumente

- DE 4215455 A1 **[0005]**