



(19)  
Bundesrepublik Deutschland  
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 699 09 838 T2 2004.04.22**

(12) **Übersetzung der europäischen Patentschrift**

(97) **EP 1 141 789 B1**

(51) Int Cl.7: **G05B 5/01**

(21) Deutsches Aktenzeichen: **699 09 838.6**

(86) PCT-Aktenzeichen: **PCT/US99/17763**

(96) Europäisches Aktenzeichen: **99 939 026.3**

(87) PCT-Veröffentlichungs-Nr.: **WO 00/11525**

(86) PCT-Anmeldetag: **05.08.1999**

(87) Veröffentlichungstag  
der PCT-Anmeldung: **02.03.2000**

(97) Erstveröffentlichung durch das EPA: **10.10.2001**

(97) Veröffentlichungstag  
der Patenterteilung beim EPA: **23.07.2003**

(47) Veröffentlichungstag im Patentblatt: **22.04.2004**

(30) Unionspriorität:  
**137358                      20.08.1998                      US**

(84) Benannte Vertragsstaaten:  
**DE, FR, GB**

(73) Patentinhaber:  
**Honeywell, Inc., Minneapolis, Minn., US**

(72) Erfinder:  
**LU, Joseph, Z., Glendale, US**

(74) Vertreter:  
**derzeit kein Vertreter bestellt**

(54) Bezeichnung: **STEUERUNGSGERÄTE ZUR EINSTELLUNG VON OPTIMALEN PARAMETERN IN PROZESSTEUERSYSTEMEN UND VERFAHREN ZUR ANWENDUNG DERSELBEN**

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

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

## Beschreibung

[0001] Die vorliegende Erfindung betrifft im Allgemeinen Steuersysteme für Verarbeitungsanlagen und insbesondere Steuerungen, die proportionale integrale und derivative ("PID") Abstimmungsparameter zur Verwendung in Prozesssteuersystemen bestimmten, um die Verarbeitungsanlagen global zu optimieren.

### ALLGEMEINER STAND DER TECHNIK

[0002] Gegenwärtig werden Verarbeitungsanlagen (z. B. eine Herstellungsanlage, eine Mineral- oder Rohölraffinerie) unter Verwendung verteilter Steuersysteme verwaltet. Gegenwärtige Steuersysteme enthalten zahlreiche Module, die zur Steuerung oder Überwachung verschiedener zugehöriger Prozesse der Anlage zugeschnitten sind. Herkömmliche Mittel verbinden diese Module miteinander, um die verteilte Eigenschaft des Steuersystems zu schaffen. Dies verlangt eine erhöhte Leistung und Fähigkeit, das Steuersystem zu erweitern oder zu verkleinern, um wechselnden Anforderungen der Anlage gerecht zu werden.

[0003] Verarbeitungsanlagenverwaltungsanbieter, wie HONEYWELL, INC., entwickeln Steuersysteme, die angepasst werden können, um weiten Bereichen von Prozessanforderungen (z. B. globalen, lokalen oder andersartigen) und Anlagenarten (z. B. Herstellung, Raffinerie usw.) gerecht zu werden. Eine primäre Zielsetzung solcher Anbieter ist die Zentralisierung der Steuerung von so vielen Prozessen wie möglich, um eine Gesamteffizienz der Anlage zu verbessern. Jeder Prozess oder jede Gruppe zugehöriger Prozesse hat gewisse zugehörige Eingangs(z. B. Fluss, Zuführung, Energie usw.) und Ausgangseigenschaften (z. B. Temperatur, Druck usw.).

[0004] In den letzten Jahren wurden Modellsteuerungstechniken nach Voraussage("model predictive control techniques" MPC-Techniken") zur Optimierung gewisser Prozesse als Funktion solcher Eigenschaften verwendet. Eine Technik verwendet algorithmische Darstellungen zur Schätzung zugehöriger charakteristischer Werte (dargestellt als Parameter, Variable usw.), die zur besseren Steuerung solcher Prozesse verwendet werden können. In den letzten Jahren wurden physikalische, ökonomische und andere Faktoren in Steuersysteme für diese zugehörigen Prozesse aufgenommen. Beispiele für solche Techniken sind in dem US Patent Nr. 5,351,184 mit dem Titel "METHOD OF MULTIVARIABLE PREDICTIVE CONTROL UTILIZING RANGE CONTROL", US Patent Nr. 5,561,599 mit dem Titel "METHOD OF INCORPORATING INDEPENDENT FEEDFORWARD CONTROL IN A MULTIVARIABLE PREDICTIVE CONTROLLER"; US Patent Nr. 5,574,638 mit dem Titel "METHOD OF OPTIMAL SCALING OF VARIABLES IN A MULTIVARIABLE PREDICTIVE CONTROLLER UTILIZING RANGE CONTROL"; und US Patent Nr. 5,572,420 mit dem Titel "METHOD OF OPTIMAL CONTROLLER DESIGN OF MULTIVARIABLE PREDICTIVE CONTROL UTILIZING RANGE CONTROL" (dem "420"-Patent) beschrieben, die alle im gemeinschaftlichen Eigentum des Rechtsnachfolgers der vorliegenden Erfindung sind.

[0005] Der relevante Stand der Technik ist auch in dem Schreiben "Tuning of a Robust PID Controller-Application to Heating Process in Extruder", 2<sup>nd</sup> I. E. E. E. Conference on Control Applications, Band 2, 13. September 1993, S. 811–816, XP-002120364, Kanada, offenbart.

[0006] Allgemein gesagt besteht ein Problem darin, dass herkömmliche Bemühungen, wenn sie bei spezifischen Prozessen angewendet werden, dazu neigen, nicht kooperativ zu sein (z. B., nicht global, nicht anlagenweit usw.) und auch die Effizienz der Verarbeitungsanlage insgesamt nachteilig beeinträchtigen können und dies auch zu häufig tun. Zum Beispiel steuern viele MPC-Techniken Prozessvariable auf im Voraus festgelegte Sollwerte. Häufig sind die Sollwerte eine beste Schätzung eines Wertes des Sollwertes oder der Sollwerte. Wenn ein Prozess auf einen Sollwert gesteuert wird, könnte die Steuerung nicht imstande sein, die besten Steuerleistungen zu erbringen, insbesondere bei einer fehlenden Übereinstimmung zwischen Prozess und Modell.

[0007] Zur weiteren Verbesserung der Gesamtleistung eines Steuersystems ist es wünschenswert, eine Steuerung zu entwerfen, die sich ausdrücklich mit einer Anlagenoder Modell-Unsicherheit beschäftigt. Das "420"-Patent lehrt zum Beispiel Verfahren zum Entwerfen einer Steuerung unter Verwendung einer Bereichsteuerung. Die Steuerung ist zur Steuerung eines Prozesses im ungünstigsten Betriebsfall ausgelegt. Eine optimale Steuerung für den Prozess wird erreicht und wenn der tatsächliche Prozess kein "Prozess im ungünstigsten Betriebsfall" ist, ist die Leistung der Steuerung besser als erwartet.

[0008] Es gibt eine Reihe allgemein bekannter PID-"Abstimmungs"-formeln oder -techniken und der häufigste oder grundlegende PID-Algorithmus enthält drei bekannte benutzerspezifizierte Abstimmungsparameter ( $K$ ,  $\tau_1$ ,  $\tau_2$ ), deren Werte das Verhalten der Steuerung bestimmen. Diese Parameter werden entweder durch Versuch und Irrtum oder durch Methoden bestimmt, die eine Kenntnis des Prozesses voraussetzen. Obwohl viele dieser Methoden, die allgemein Algorithmen sind, für eine verbesserte Steuerung gesorgt haben, wird die PID-Steuerungsleistung, die durch solche Algorithmen abgestimmt ist, für gewöhnlich schlechter, wenn sich die Prozessbedingungen ändern, so dass ein Prozessingenieur notwendig ist, der die Steuerungsleistung überwacht. Wenn die Steuerungsleistung schlechter wird, muss der Prozessingenieur die Steuerung wieder

abstimmen.

[0009] Die Steuerungsleistung wird aus vielen Gründen schlechter, obwohl die häufigste Ursache sich ändernde Dynamiken des Prozesses ist. Da die PID-Steuerungsleistung mit der Genauigkeit des gewählten Prozessmodells zusammenhängt, besteht ein Bedarf an einer PID-Steuerung, die eine solche Unsicherheit zulässt, indem sie wechselnde Systemdynamiken berücksichtigt und diese günstigstenfalls eingliedert, bevor irgendwelche Abstimmungsparameter berechnet werden.

[0010] Es besteht ein weiterer Bedarf an einem Mittel, um die zuvor beschriebenen MPC-Techniken zu PID-Steuerungsentwurfstechniken zu erweitern.

#### KURZDARSTELLUNG DER ERFINDUNG

[0011] Die vorliegende Erfindung stellt ein robustes PID-Verarbeitungssystem wie in Anspruch 1 definiert bereit.

[0012] Das System kann die Merkmale von einem oder mehreren der abhängigen Ansprüche 2 bis 6 enthalten.

[0013] Die vorliegende Erfindung stellt auch ein Verfahren wie in Anspruch 7 definiert bereit.

[0014] Das Verfahren kann die Merkmale von einem oder mehreren der abhängigen Ansprüche 8 bis 12 enthalten.

[0015] In Bezug auf die zuvor besprochenen Mängel des Standes der Technik ist es eine primäre Aufgabe der vorliegenden Erfindung, eine Steuerung bereitzustellen, die eine "beste" Steuerung bestimmt, um eine optimale Steuerleistung in einer Verarbeitungsanlage bei einem Prozesssystem im ungünstigsten Betriebsfall zu erreichen, und insbesondere lässt die Steuerung eine Modell-Unsicherheit zu, indem sie wechselnde Systemdynamiken berücksichtigt, indem diese vor der Berechnung der Abstimmungsparameter eingegliedert werden.

[0016] Beim Lösen dieser primären Aufgabe stellt die vorliegende Erfindung ein Prozesssteuersystem und ein Verfahren zum Betreiben desselben zur Steuerung zugehöriger Prozesse in einer Verarbeitungsanlage bereit.

[0017] Das Steuersystem enthält wenigstens eine RPID-Steuerung, die einem Verarbeitungssystem zugeordnet ist. Die Steuerung enthält eine Speichervorrichtung und einen Prozessor. Die Speichervorrichtung ist betriebsbereit, um (i) wenigstens einen von mehreren zugehörigen Prozessen mathematisch darzustellen, um die verschiedenen Verhältnisse zwischen verschiedenen Eingängen und Ausgängen des einen oder der mehreren dargestellten zugehörigen Prozesse zu definieren, und (ii) Unsicherheitsfaktoren darzustellen, die mit diesen definierten Verhältnissen in Zusammenhang stehen. Die Unsicherheitsfaktoren definieren einen Dynamikbereich, über den der eine oder die mehreren dargestellten zugehörigen Prozesse arbeiten, und einen Fehler in der mathematischen Darstellung.

[0018] Abhängig von der mathematischen Darstellung und den Unsicherheitsfaktoren ist der Prozessor imstande (oder betriebsbereit), Abstimmungsparameter zur Verwendung durch das Steuersystem zu bestimmen, um den einen oder die mehreren dargestellten zugehörigen Prozesse zu steuern und dadurch zur Optimierung der Verarbeitungsanlage beizutragen.

[0019] Gemäß einer vorteilhaften Ausführungsform der vorliegenden Erfindung bestimmt ein robustes PID-Verarbeitungssystem die optimale Steuerungsabstimmung für den spezifizierten Bereich von Prozessdynamiken. Es ist allgemein bekannt, dass sich diese Prozessdynamiken aus zahlreichen Gründen innerhalb eines Bereichs bewegen. Zum Beispiel zeigt die folgende Liste allgemeine Anlageneignisse, welche die Art und Weise ändern können, in der ein Prozess auf eine PID-Steuerung anspricht: (i) der Prozessdurchsatz ist erhöht oder verringert, (ii) die Qualität des Ausgangsmaterials ist verändert, (iii) saisonale Temperaturschwankungen und (iv) die Geräte werden schmutzig. In jedem Fall liefert eine RPID-Steuerung gemäß der vorliegenden Erfindung eine bessere Leistung als eine herkömmlich abgestimmte PID-Steuerung, während sich die Prozessdynamiken verschieben, wodurch höhere ökonomische Nutzen erreicht werden.

[0020] Wie zuvor dargestellt, beziehen andere Steuerungsabstimmungstechniken normalerweise PID-Abstimmungsparameterergebnisse auf ein einziges Prozessdynamikmodell. Wenn Unsicherheitsfaktoren für die Ausbeute, Ausregelzeit oder Stillstandszeit spezifiziert sind, ist die berechnete Lösung einfach "verstimmt", um die Unsicherheit auszugleichen. Im Gegensatz zu dem robusten PID der vorliegenden Erfindung, finden diese Pakete nicht die am besten ansprechenden Steuerungsparameter für alle Modelle innerhalb eines Unsicherheitsbereichs.

[0021] Das Vorhergesagte wurde in Verarbeitungsanlagenanwendungen getestet, wie in einer Stripper-Temperatursteuerung, wobei verschiedene PID-Abstimmungsmethoden angewandt wurden, mit den folgenden Ergebnissen:

Abstimmungsmethode	Standardabweichung, Grad C
Ziegler-Nichols	1,2
IMC	0,56
Robuste PID	0,23

[0022] Wie aus dieser Tabelle hervorgeht, zeigt eine robuste PID-Steuerung eine deutlich bessere Leistung als die anderen Abstimmungsmethoden. Dies ist teilweise darauf zurückzuführen, dass die "ökonomische" Prozessleistung häufig eng mit der Prozessvariabilität in Zusammenhang steht, was zeigt, dass die Verwendung des robusten PID-Verarbeitungssystems der vorliegenden Erfindung zu einer besseren Steuerleistung und höheren Prozessrentabilität führen kann. Tatsächlich senkte eine Ausführung einer robusten PID die Standardabweichungen sowohl des Drucks als auch der Temperatur eines Wirbelbetts um einen Faktor von etwa sechs:

Standardabweichung	Drucksteuerung	Temperatursteuerung
IMC	4,8068	0,3974
Robuste PID	0,6925	0,0647

[0023] Für den Fachmann ist offensichtlich, dass "Steuerungen" in Hardware, Software oder Firmware oder einer geeigneten Kombination derselben ausgeführt sein können; im Allgemeinen ist die Verwendung von Rechnersystemen in Steuersystemen von Verarbeitungsanlagen gut bekannt. Wie hier verwendet, können die Phrase "zugehörig" und ihre Ableitungen beinhalten, beinhaltet sein in, verbinden mit, enthalten, enthalten sein in, anschließen an oder mit, koppeln an oder mit, kommunizierbar sein mit, zusammenwirken mit, verschachteln, in Besitz sein von, gebunden sein an oder mit, haben, in Besitz haben oder dergleichen bedeuten.

[0024] Zuvor wurden die Merkmale und technischen Vorteile der vorliegenden Erfindung ziemlich weitläufig umrissen, so dass die Fachleute die folgende ausführliche Beschreibung der Erfindung besser verstehen können. Zusätzliche Merkmale und Vorteile der Erfindung werden in der Folge beschrieben, die Gegenstand der Ansprüche der Erfindung bilden. Für den Fachmann sollte offensichtlich sein, dass das Konzept und die offenbarte spezifische Ausführungsform als Basis für eine Modifizierung oder einen Entwurf anderer Strukturen zur Ausführung derselben Zwecke der vorliegenden Erfindung verwendet werden können. Für den Fachmann sollte auch erkennbar sein, dass solche äquivalenten Konstruktionen nicht von der Erfindung abweichen.

#### KURZE BESCHREIBUNG DER ZEICHNUNGEN

[0025] Für ein umfassenderes Verständnis der vorliegenden Erfindung und deren Vorteile wird nun auf die folgenden Beschreibungen Bezug genommen, in Verbindung mit den beiliegenden Zeichnungen, in welchen gleiche Nummern gleiche Objekte bezeichnen und von welchen:

[0026] **Fig. 1a** ein Blockdiagramm eines Prozesssteuersystems gemäß den Prinzipien der vorliegenden Erfindung zeigt;

[0027] **Fig. 1b** ein Blockdiagramm eines geeigneten Verarbeitungssystems gemäß den Prinzipien der vorliegenden Erfindung zeigt;

[0028] **Fig. 2** ein zweidimensionales graphisches Modell von Prozessansprechkurven für eine Fraktionierungseinheit während einer Sommer- und einer Wintersaison zeigt;

[0029] **Fig. 3** ein zweidimensionales graphisches Modell eines nominalen Modells der Prozessansprechkurven für die Fraktionierungseinheit während der Sommer- und der Wintersaison zeigt;

[0030] **Fig. 4** ein zweidimensionales graphisches Modell eines nominalen Steuerungsentwurfs basierend auf dem nominalen Modell der Prozessansprechkurven für die Fraktionierungseinheit von **Fig. 3** zeigt;

[0031] **Fig. 5** ein zweidimensionales graphisches Modell der nominalen Steuerung von **Fig. 4** zeigt, die gewisse "Unsicherheitsfaktoren" einrechnet; und

[0032] **Fig. 6** ein zweidimensionales graphisches Modell eines robusten PID-Steuerungsentwurfs basierend auf den Prinzipien der vorliegenden Erfindung zeigt.

#### AUSFÜHRLICHE BESCHREIBUNG

[0033] Unter Bezugnahme zunächst auf **Fig. 1a** ist ein Blockdiagramm eines Prozesssteuersystems **100** gemäß den Prinzipien der vorliegenden Erfindung dargestellt. Das beispielhafte Steuersystem **100** enthält eine

Steuerung **105** und einen Prozess **110**. Die beispielhafte Steuerung **105** ist eine robuste PID- (RPID-) Steuerung gemäß der vorliegenden Erfindung und ist betriebsbereit, um eine zuverlässige Steuerleistung zu liefern, insbesondere wenn Bedingungen des Prozesses **110** schwanken oder Fehler dabei auftreten. Der beispielhafte Prozess **110** kann zweckdienlich mehrere "steuerbare" Elemente (z. B. Ventile, Heizvorrichtungen usw.) enthalten, die möglicherweise in der Form eines Modells (Laplace, ARX, FIR, Step-Response usw.) spezifiziert sind. Gemäß der vorliegenden Ausführungsform kann ein solches Modell entweder auf gesammelten Daten oder Daten beruhen, die manuell eingegeben werden, oder als Alternative auf einer geeigneten Kombination derselben.

[0034] Es sollte festgehalten werden, dass das Prozesssteuersystem **100** als Veranschaulichung eine RPID-Steuerungsschleife und eine Verzögerung erster Ordnung enthält. Für den vorliegenden Zweck sind die Phrasen "robust", "Robustheit" und Ableitungen davon weitgehend als die Fähigkeit des Steuersystems **100** definiert, unter zahlreichen Betriebsbedingungen beständig zu arbeiten.

[0035] Beispielhafte Prozessvariable, "y", umfassen Temperatur, Druck, Pegel, Fluss und dergleichen. Beispielhafte Eingangsvariable oder manipulierte Variable "u" und beispielhafte Ausgangsvariable oder gesteuerte Variable ("cv", z. B. reguliert, eingeschränkt, optimiert usw.) sind in dem "420"-Patent definiert und machen den Prozess **110** zu einem dynamischen Prozess mit sowohl manipulierten Variablen als auch gesteuerten Variablen.

[0036] Gemäß der dargestellten Ausführungsform steuert das Prozesssteuersystem **100** zugehörige Prozesse (z. B. Prozess **110**) einer Verarbeitungsanlage unter Verwendung mehrerer optimaler Abstimmungsvariablen. Diese Abstimmungsvariablen werden vorteilhaft unter Verwendung eines Verarbeitungssystems erzeugt (d. h., weitgehend als jedes beliebige System oder jede beliebige Vorrichtung definiert, egal ob auf Hardware, Firmware, Software oder einer geeigneten Kombination derselben beruhend; ein Verarbeitungssystem **115** ist in Fig. 1b dargestellt und enthält als Veranschaulichung einen Speicher oder eine andere herkömmliche Speichervorrichtung 120, und einen Prozessor oder eine andere herkömmliche Verarbeitungsschaltung 130), das der Steuerung **105** zugeordnet oder als Alternative unabhängig von dieser sein kann (für den vorliegenden Zweck wird angenommen, dass das Verarbeitungssystem mit der Steuerung **105** integriert ist).

[0037] Die Steuerung **105** arbeitet, um einen oder mehrere optimale PID-Abstimmungsparameter basierend auf technischen Eingaben zu bestimmen oder zu berechnen. Die bestimmten Abstimmungsparameter werden dann in das Prozesssteuersystem **100** über die Steuerung **105** integriert, die durch die Abstimmungsparameter zu einer RPID-Steuerung wird. Insbesondere stellt die Steuerung **105** einen oder mehrere der zugehörigen Prozesse in einem damit verbundenen Speicher mathematisch dar. Die mathematische Darstellung definiert Verhältnisse zwischen verschiedenen Eingängen und Ausgängen des einen oder der mehreren zugehörigen Prozesse. Die Steuerung **105** stellt auch einen oder mehrere Unsicherheitsfaktoren ebenfalls in dem Speicher dar. Die Unsicherheitsfaktoren sind den definierten Verhältnissen zugeordnet und definieren (i) einen Bereich von Dynamiken, über den der eine oder die mehreren zugehörigen Prozesse arbeiten und (ii) einen Fehler in der mathematischen Darstellung. Die Steuerung **105** bestimmt als Reaktion auf die oder als Funktion der mathematischen Darstellung und der Unsicherheitsfaktoren einen oder mehrere Abstimmungsparameter zur Verwendung durch das Steuersystem **100** in der Steuerung des einen oder der mehreren zugehörigen Prozesse.

[0038] Gemäß der dargestellten Ausführungsform werden die objektive Funktion oder die Leistungskriterien "J" zur Darstellung entweder von Prozessdynamikbereichen oder Modellfehlern oder als Alternative einer Kombination derselben verwendet:

$$J = f(k_c, \tau_i, \tau_d, \tau_f, \text{Modell}(p)).$$

[0039] Bei richtiger Verwendung kann die RPID-Steuerung **105** für eine beständige Steuerleistung über den Bereich identifizierter Prozessdynamiken sorgen. Das Nettoergebnis ist eine verbesserte regulatorische Steuerung und somit sind Werte von Konstanten der RPID-Steuerung **105** auf innerhalb gewisser Bereiche beschränkt. Beispielhafte Abstimmungsparameter und ihre entsprechenden Bereiche sind:

1.  $k_c$ , die "proportionale Konstante", wird während der Berechnung angezeigt, die Suche ist skaliert, aber der Endwert ist ein uneingeschränkter Wert; die Steuerungsverstärkung hat keine effektiven Grenzen.
2.  $\tau_i$ , die "integrale Konstante", Terme sind auf positive Werte beschränkt, ein kleiner Wert muss größer Null sein (relativ kleinere Werte implizieren relativ größere Integrationsraten), während ein großer Wert (impliziert relativ keine Integralaktion) willkürlich auf  $1.e30$  gestellt wird.
3.  $\tau_d$ , die "derivative Konstante", Terme sind auf positive Werte beschränkt, Null impliziert relativ keine derivative Aktion.
4.  $\tau_f$ , die "Filterkonstante", Terme sind auf für gewöhnlich auf positive Werte beschränkt, Null impliziert kein Filter; wenn eine diskrete Option aufgerufen wird, können Werte (welche die diskreten Zeitfilterkoeffizienten darstellen) auf einschließlich  $-1$  bis  $+1$  begrenzt sein.
5. Modell(p), der "Modellparameter", kann entweder auf gesammelten Daten oder Daten beruhen, die manuell eingegeben werden, oder als Alternative auf einer geeigneten Kombination derselben und kann eine

Modellform, wie Laplace, ARX, FIR, Step-Response oder dergleichen annehmen.

[0040] Kurz gesagt, die RPID-Steuerung **105** ist eine PID-Steuerung, die so abgestimmt ist, dass sie über einen Bereich von Dynamiken arbeitet; sie liefert keine verbesserte Steuerung für alle Dynamiken. Die RPID-Steuerung **105** kann vorteilhaft verwendet werden, wenn eine verbesserte PID-Steuerung das Potenzial hat, die Prozessausbeute zu erhöhen, die Produktqualität zu verbessern, die Gerätewartung zu vermindern, Sicherheitsrisiken zu minimieren oder dergleichen. Die Prinzipien der vorliegenden Erfindung bewirken die Schaffung einer PID-Steuerung, die am besten zur Steuerung eines Prozesses über einen Bereich identifizierter Dynamiken geeignet ist. Zum Beispiel ist die RPID gut zur Abstimmung von Schleifen unterhalb einer multivariablen Steuerung nach Voraussage geeignet, da RPID-Steuerungen dazu tendieren, die Leistungsbeständigkeit geschlossener Regelschleifen zu maximieren.

[0041] Zum Zwecke der Veranschaulichung bezieht sich die Besprechung der **Fig. 2** bis **6** gleichzeitig auf **Fig. 1a** und zeigt Aspekte und Vorteile einer beispielhaften RPID-Steuerung **105**, insbesondere da sie sich auf die Bestimmung optimaler Abstimmungsparameter bezieht. Vor einer solchen Besprechung muss an das Vorhergesagte erinnert werden, dass gegenwärtige PID-Steuerungen durch Techniken abgestimmt werden, die auf einem Prozessmodell beruhen. Wenn solche Techniken verwendet werden, erhält ein Ingenieur Informationen, welche die Prozessreaktion auf eine Änderung einer spezifischen Variablen betreffen. Diese Informationen werden zur Bildung empirischer Modelle verwendet, die für den Entwurf eines Steuersystems und insbesondere einer zugehörigen Steuerung verwendet werden.

[0042] Ein Nachteil ist, dass es eine realistische Grenze in Bezug auf die Menge an Informationen gibt, die ein Ingenieur in Bezug auf den Prozess sammeln kann. Zusätzlich kann sich ein bestimmter Prozess im Laufe der Zeit ändern und somit die Genauigkeit des Modells herabsetzen. Dies führt zu einer inhärenten Unsicherheit beim Entwerfen der Steuerung. Die **Fig. 2** bis **6** zeigen gemeinsam ein Beispiel dafür gemeinsam mit einer beispielhaften Ausführungsform einer RPID-Steuerung **105**, die Verbesserungen gegenüber gegenwärtigen Ausführungen zeigt.

[0043] Unter Bezugnahme zunächst auf **Fig. 2** ist ein zweidimensionales graphisches Modell von Prozessansprechkurven für eine Fraktionierungseinheit während einer Sommer- und einer Wintersaison dargestellt. Unter Bezugnahme auf diese Graphik muss zur Erinnerung festgehalten werden, dass die meisten gegenwärtigen PID-Steuerungen durch Techniken abgestimmt werden, die auf einem Prozessmodell beruhen. Wenn diese Techniken verwendet werden, muss ein Ingenieur Kenntnisse erlangen, wie ein bestimmter Prozess auf eine Änderung einer spezifizierten Variable reagiert. Diese Kenntnisse werden dann zur Formulierung empirischer Modelle verwendet, die für den Entwurf des Steuersystems verwendet werden. Leider gibt es immer eine Grenze hinsichtlich des Umfangs der Erkenntnisse, die über einen Prozess erworben werden können, und daher gibt es immer eine inhärente Unsicherheit in Bezug auf den endgültigen Steuerungsentwurf. Das folgende Beispiel veranschaulicht diesen Punkt.

[0044] Es wird angenommen, dass ein Prozessingenieur der Fraktionierungseinheit zugeteilt ist und annimmt, dass die Steuerung des Turms verbessert werden könnte, und entscheidet, einige Prozessinformationen zu erlangen. Er sammelt sowohl in der Sommer- als auch Wintersaison Daten und zeichnet die Prozessansprechkurven, wie in **Fig. 2** dargestellt. Aus diesen Informationen schließt der Ingenieur, dass saisonale Temperaturschwankungen die Prozessdynamiken des Turms beeinflussen. Für den Entwurf einer PID-Steuerung, die in beiden Saisons gut arbeitet, beschließt er, ein kontemporäres Durchschnitts-, oder nominales, Prozessmodell zu verwenden.

[0045] Unter Bezugnahme nun auf **Fig. 3**, ist ein zweidimensionales graphisches Modell eines nominalen Modells der Prozessansprechkurven für die Fraktionierungseinheit während der Sommer- und der Wintersaison dargestellt. Das nominale Modell liefert eine "beste" Schätzung des tatsächlichen Prozessmodells unter bestimmten Umständen. Der nominale PID-Steuerungsentwurf, der auf dem nominalen Modell beruht, kann zur "Beschleunigung" oder "Verlangsamung" der Prozesssteuerleistung eingestellt werden. In diesem Fall stellt " $T_o$ " eine Zeitkonstante der offenen Regelschleife dar und " $t_{cl}$ " stellt die Zeitkonstante der geschlossenen Regelschleife dar.

[0046] Unter Bezugnahme nun auf **Fig. 4** ist ein zweidimensionales graphisches Modell eines nominalen Steuerungsentwurfs basierend auf dem nominalen Modell der Prozessansprechkurven für die Fraktionierungseinheit von **Fig. 3** dargestellt. Dieser beispielhafte Entwurf soll abgestimmt werden, dass er so "schnell" oder so "langsam" wie notwendig ist. Soweit hat der Ingenieur nichts gemacht, dass intuitiv "falsch" erscheint, es gibt jedoch ein heikles Problem – der Ingenieur hat angenommen, dass die Prozessmodelle korrekt oder genau wären, und dies ist für gewöhnlich nicht der Fall. Tatsächlich sind die meisten identifizierten Prozessmodelle tatsächlich um 20 bis 40% ungenau. Modellunsicherheiten dieser Größenordnung verursachen häufig Probleme in nominalen Steuerungsentwürfen – wenn es zu einer fehlerhaften Übereinstimmung mit dem Modell kommt, können nominale PID-Steuerungsentwürfe unerwünschte Ergebnisse liefern. Unter Bezugnahme nun auf **Fig. 5** ist ein zweidimensionales graphisches Modell der nominalen Steuerung von **Fig. 4** dargestellt, das gewisse "Unsicherheiten" einberechnet. Diese Graphik zeigt eine Verstärkung des Schwingungsverhaltens,

wenn eine Modellfehlpassung (20–40% Unsicherheit) in das Steuersystem eingeführt wird.

[0047] Unter Bezugnahme nun auf **Fig. 6** ist ein zweidimensionales graphisches Modell eines RPID-Steuerungsentwurfs darstellt, der auf den Prinzipien der vorliegenden Erfindung beruht. Die Graphik zeigt einen Steuerungsentwurf, der gegenüber einer Modellfehlpassung unempfindlich ist, wobei robuste Entwurfstechniken angewendet werden, welche die Bandbreite des nominalen PID-Steuerungsentwurfs minimieren, um eine beständige gute Leistung über den erwarteten Dynamikbereich zu liefern.

[0048] Der beispielhafte RPID-Steuerungsentwurf zeigt eine gute Leistung trotz der Unsicherheiten, die in den Prozessmodellen enthalten sind. Er hält auch eine gute Steuerung aufrecht, wenn die Leistung der Steuerung sich von einer trägen Steuerung ( $T_{cl} = 48$ ) zu einer aggressiven Steuerung ( $T_{cl} = 5$ ) verschoben wird. Der Entwurf ist an sich stabil und seine Leistung kann eingestellt werden, um "reibunglose" Steuerreaktionen zu erreichen.

[0049] Unter der Annahme, dass das Verarbeitungssystem **115** einen integralen quadratischen Fehler und eine gewichtete Zweinormbewegungsstrafe als Steuerungsleistungskriterien verwendet, um einen optimalen PID-Steuerungsentwurf zu finden, beginnt der Entwurfsprozess mit der Standard-PID-Steuerungsschleife und einer optimalen Verzögerung erster Ordnung. Der erste Schritt in dem robusten Entwurfsprozess ist die Spezifizierung des identifizierten Prozessmodells in der Form einer mathematischen Darstellung, wie des Laplace-Modells von (p). Die mathematische Darstellung kann entweder auf Daten beruhen oder manuell eingegeben werden. Unsicherheitsfaktoren werden auch dargestellt und zur Darstellung von entweder Prozessdynamikbereichen oder Modellfehlern verwendet. Das Verarbeitungssystem **115** berechnet optimale Abstimmungskoeffizienten ( $K_c$ ,  $t_i$ ,  $t_d$ ,  $t_f$ ) durch Anwendung des geschützten min-max Algorithmus der in dem "420"-Patent offenbart ist, das heißt, der darin beschriebenen geschützten "min-max"-Formel.

[0050] Der Algorithmus bearbeitet eine Reihe verschiedener herkömmlicher PID-Gleichungsformen und berechnet im Wesentlichen Abstimmungskoeffizienten, welche die beste Steuerleistung für Prozessdynamiken im ungünstigsten Betriebsfall liefern. Ein wichtiger Aspekt der vorliegenden Erfindung ist, dass das Verarbeitungssystem nicht auf die Ableitung einer optimalen Leistung von der RPID-Steuerung **105** im ungünstigsten Fall ausgerichtet ist, sondern vielmehr auf eine Nettowirkung zur Verbesserung der gesamten Steuerungsleistung innerhalb des spezifizierten dynamischen Bereichs, wodurch die RPID-Steuerung **105** veranlasst wird, relativ stabil und zunehmend unempfindlich gegenüber Modellfehlern zu sein.

[0051] Es ist daher eine Aufgabe eines robusten Steuerentwurfs der vorliegenden Erfindung, sich ausdrücklich mit Anlagen- oder Modellunsicherheiten zu befassen. Allgemein gesagt ist erwünscht, dass die Steuerung einen vorbestimmten Leistungspegel selbst bei einer Änderung des Prozesses aufrechterhält. Der robuste Steuerentwurf garantiert sowohl eine robuste Stabilität als auch eine robuste Leistung. Die erstere garantiert, dass die Unsicherheit, während die letztere garantiert, dass eine vernünftige Leistung für dieselbe Gruppe von Anlagen erwartet werden kann.

[0052] Daher wird durch die vorliegende Erfindung ein Verfahren zur Entwicklung einer optimalen Steuerung unter Verwendung einer Bereichsteuerung bereitgestellt. Ein Prozesssteuersystem, das wenigstens eine manipulierte Variable und wenigstens eine gesteuerte Variable enthält, stellt ein Verfahren für eine robuste Steuerung eines Prozesses bereit. Vorbestimmte Einschränkungen der manipulierten Variablen und der gesteuerten Variablen und die aktuellen Werte der manipulierten Variablen werden erhalten. Die Steuerung wird mit Parametern geladen, die eine optimale Steuerung definieren, wobei die Parameter unabhängig berechnet werden. Zur Bestimmung der Parameter kann eine einfache min-max Aussage für ein Modell für den ungünstigsten Betriebsfall des Prozesses definiert werden, der in Verbindung mit einer Steuerung für den günstigsten Fall arbeitet. Die einfache min-max Aussage wird in einen entsprechenden kanonischen Ausdruck in der Form eines Minimierungsproblems umgewandelt, wobei die erhaltene Lösung des Minimierungsproblems der Parameter ist. Neue Werte werden für die gesteuerte Variable für eine vorbestimmte Anzahl von Punkten in der Zukunft berechnet, so dass die Werte der gesteuerten Variablen innerhalb des vorbestimmten Bereichs liegen, wodurch eine optimale Robustheit der erhaltenen Steuerung erreicht wird. Die manipulierten Variablen können auch so berechnet werden, dass sie innerhalb vorbestimmter Einschränkungen liegen, und die gesteuerten Variablen innerhalb eines vorbestimmten Bereichs fallen, wenn sie steuerbar sind. Aus mehreren Lösungen wird die robusteste Lösung gewählt. Dann werden die manipulierten Variablen eingestellt, um das Prozesssteuersystem zu veranlassen, die Werte der gesteuerten Variablen zu den berechneten Werten zu treiben.

[0053] Obwohl die vorliegende Erfindung und ihre Vorteile ausführlich beschrieben wurden, sollte für den Fachmann verständlich sein, dass hier verschiedene Änderungen, Ersetzungen und Abänderungen durchgeführt werden können, ohne von der Erfindung abzuweichen.

### Patentansprüche

1. Robustes PID-Verarbeitungssystem zur Verwendung mit einem Steuersystem, das zugehörige Prozesse einer Verarbeitungsanlage steuert, wobei das Verarbeitungssystem umfasst:  
eine Speichervorrichtung, die betriebsbereit ist, um eine Darstellung von (i) wenigstens einem der zugehörigen

Prozesse mathematisch zu speichern, wobei die mathematische Darstellung Verhältnisse zwischen Eingängen und Ausgängen des wenigstens einen zugehörigen Prozesses definiert, und (ii) eine Darstellung von Unsicherheitsfaktoren, die mit den definierten Verhältnissen in Zusammenhang stehen, zu speichern, wobei die Unsicherheitsfaktoren wenigstens einen Dynamikbereich definieren, über den der wenigstens eine zugehörige Prozess arbeitet, wie auch einen Fehler in der mathematischen Darstellung definieren; und einen Prozessor, der in der Lage ist, als Reaktion auf die mathematische Darstellung und die Unsicherheitsfaktoren optimale Abstimmungsparameter zur Verwendung durch das Steuersystem zu bestimmen, um den wenigstens einen zugehörigen Prozess zu steuern und dadurch zur Optimierung der Verarbeitungsanlage beizutragen.

2. Verarbeitungssystem nach Anspruch 1, wobei die Speichervorrichtung des Weiteren betriebsbereit ist, um allgemeine Anlagenereignisse darzustellen, die aus einer Gruppe ausgewählt sind, die aus Änderungen bei Verfahrensdurchsatz, Qualität des Ausgangsmaterials, saisonaler Temperatur und Gerätestatus besteht.

3. Verarbeitungssystem nach Anspruch 2, wobei der Prozessor die Abstimmungsparameter als Reaktion auf die allgemeinen Anlagenereignisse bestimmt.

4. Verarbeitungssystem nach Anspruch 1, wobei die Unsicherheitsfaktoren mit einer objektiven Funktion  $J$  in Zusammenhang stehen, wobei

$J = f(k_c, T_i, T_d, T_f \text{ Modell } (p));$   
 $k_c$  = proportionale Konstante;  
 $T_i$  = integrale Konstante;  
 $T_d$  = derivative Konstante;  
 $T_f$  = weitere Konstante;  
 Modell(p) = Modellparameter.

5. Verarbeitungssystem nach Anspruch 4, wobei das Modell(p) aus einer Gruppe ausgewählt ist, die aus Laplace, ARX, FIR, Step-Response besteht.

6. Verarbeitungssystem nach Anspruch 1, wobei die Unsicherheitsfaktoren mit wenigstens einer von einer proportionalen Konstante, einer integralen Konstante, einer derivativen Konstante und einer Filterkonstante in Zusammenhang stehen.

7. Verfahren zum Betreiben eines robusten PID-Verarbeitungssystems zur Verwendung mit einem Steuersystem, das zugehörige Prozesse einer Verarbeitungsanlage steuert, umfassend die folgenden Schritte: mathematisches Speichern in einer Speichervorrichtung (i) einer Darstellung von wenigstens einem der zugehörigen Prozesse, wobei die mathematische Darstellung Verhältnisse zwischen Eingängen und Ausgängen des wenigstens einen der zugehörigen Prozesse definiert, und Speichern (ii) einer Darstellung von Unsicherheitsfaktoren, die mit den definierten Verhältnissen in Zusammenhang stehen, wobei die Unsicherheitsfaktoren wenigstens einen Dynamikbereich definieren, über den der wenigstens eine der zugehörigen Prozesse arbeitet, wie auch einen Fehler in der mathematischen Darstellung definieren; und Bestimmen mit einem Prozessor, als Reaktion auf die mathematische Darstellung und die Unsicherheitsfaktoren, optimaler Abstimmungsparameter zur Verwendung durch das Steuersystem, um den wenigstens einen der zugehörigen Prozesse zu steuern und dadurch zur Optimierung der Verarbeitungsanlage beizutragen.

8. Verfahren zum Betreiben eines Prozesssteuersystems nach Anspruch 7, des Weiteren umfassend den Schritt des Darstellens allgemeiner Anlagenereignisse in der Speichervorrichtung, die ausgewählt sind aus einer Gruppe, die aus Änderungen bei Verfahrensdurchsatz, Qualität des Ausgangsmaterials, saisonaler Temperatur und Gerätestatus besteht.

9. Verfahren zum Betreiben eines Prozesssteuersystems nach Anspruch 8, des Weiteren umfassend den Schritt des Bestimmens der Abstimmungsparameter mit dem Prozessor als Reaktion auf die allgemeinen Anlagenereignisse.

10. Verfahren zum Betreiben eines Prozesssteuersystems nach Anspruch 7, wobei die Unsicherheitsfaktoren mit einer objektiven Funktion  $J$  in Zusammenhang stehen, wobei

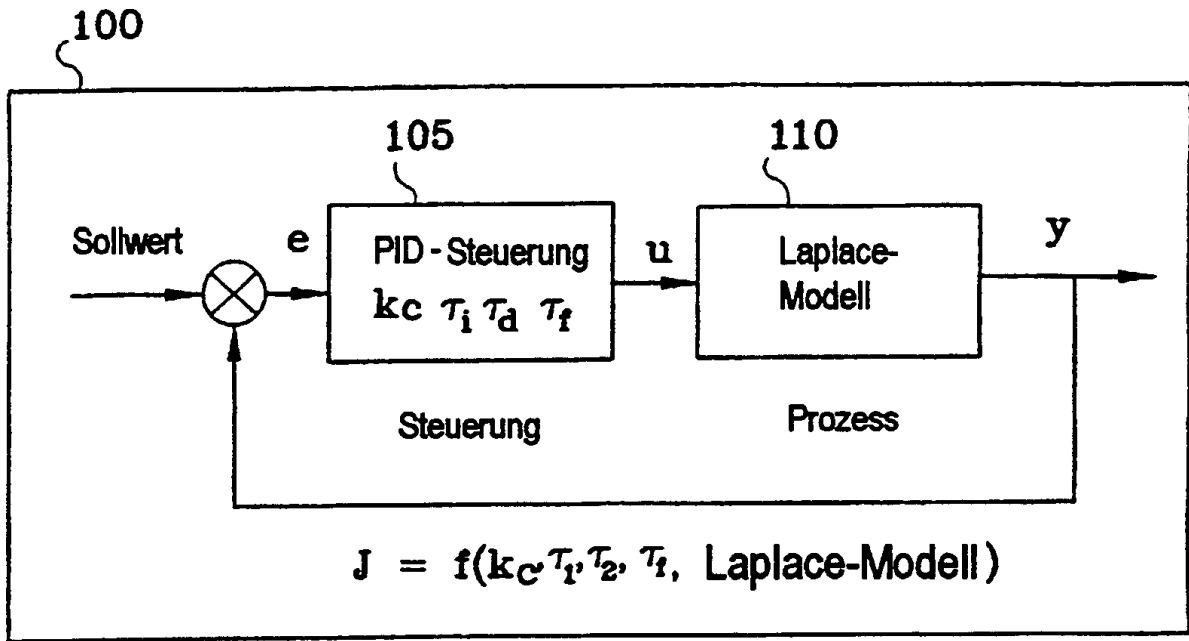
$J = f(k_c, T_i, T_d, T_f \text{ Modell } (p));$   
 $k_c$  = proportionale Konstante;  
 $T_i$  = integrale Konstante;  
 $T_d$  = derivative Konstante;

$T_f$  = weitere Konstante;  
Modell(p) = Modellparameter.

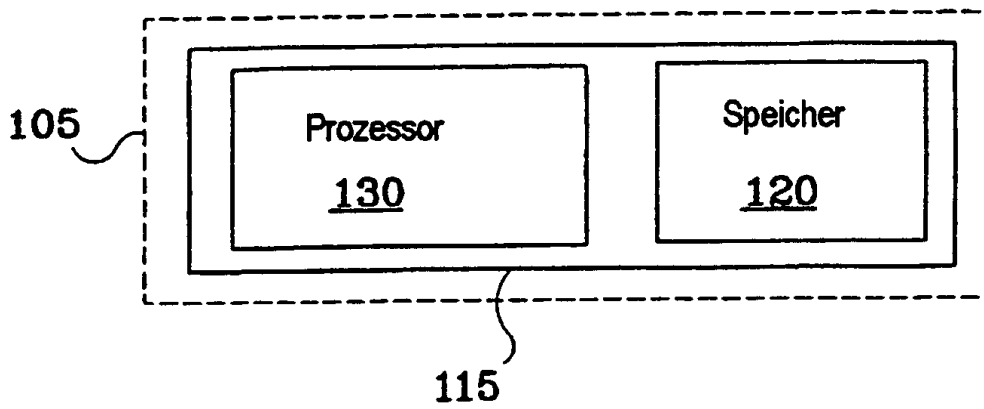
11. Verfahren zum Betreiben eines Prozesssteuersystems nach Anspruch 10, wobei das Modell(p) aus einer Gruppe ausgewählt ist, die aus Laplace, ARX, FIR, Step-Response besteht.

12. Verfahren zum Betreiben eines Prozesssteuersystems nach Anspruch 7, wobei die Unsicherheitsfaktoren mit wenigstens einer von einer proportionalen Konstante, einer integralen Konstante, einer derivativen Konstante und einer Filterkonstante in Zusammenhang stehen.

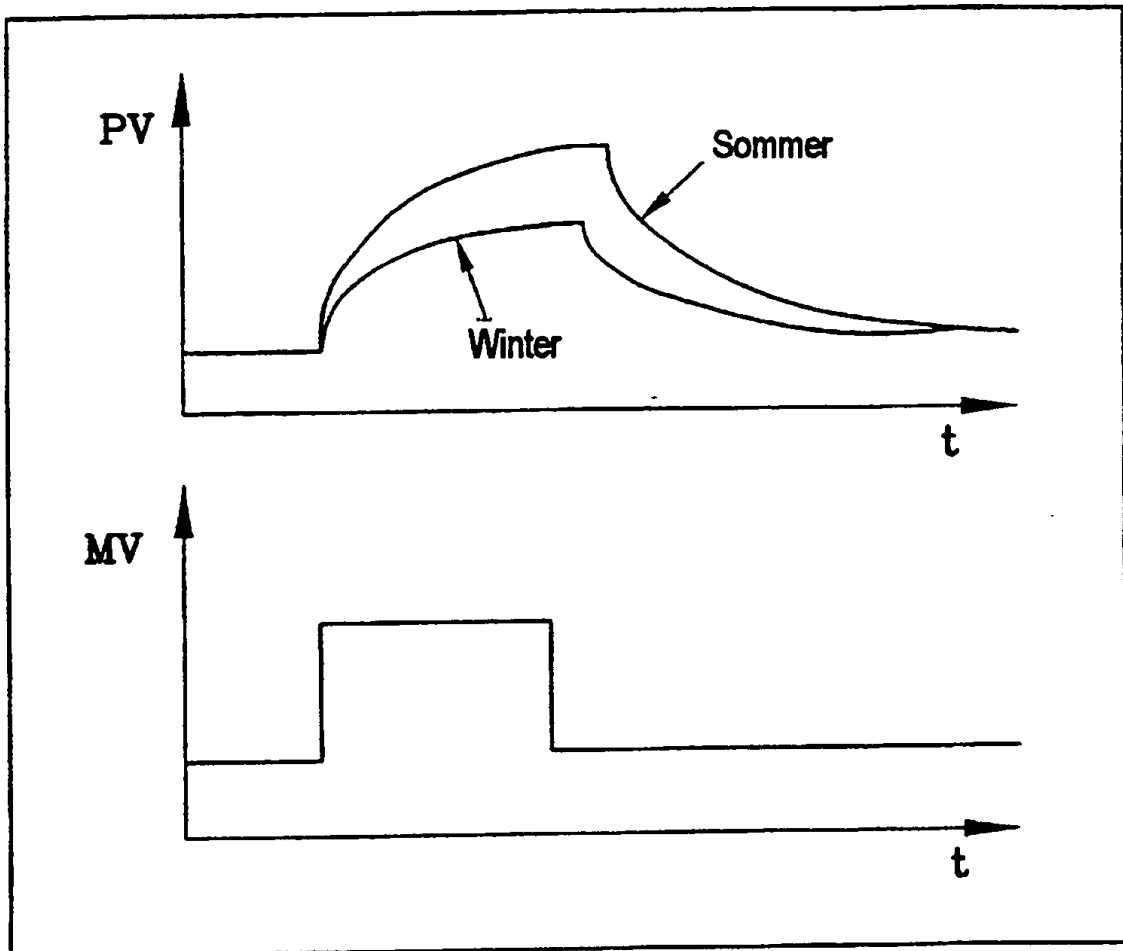
Es folgen 6 Blatt Zeichnungen



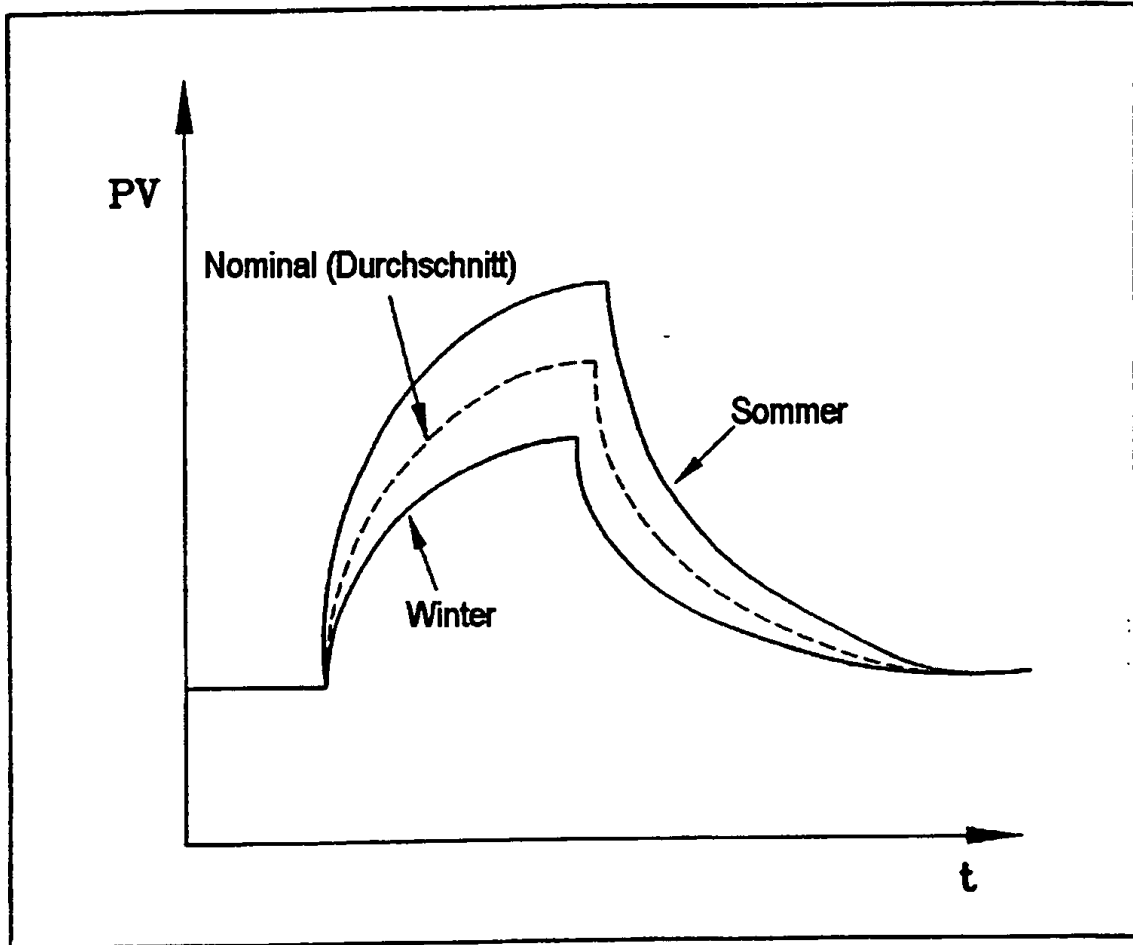
*Fig.1a*



*Fig.1b*



*Fig.2*



*Fig. 3*

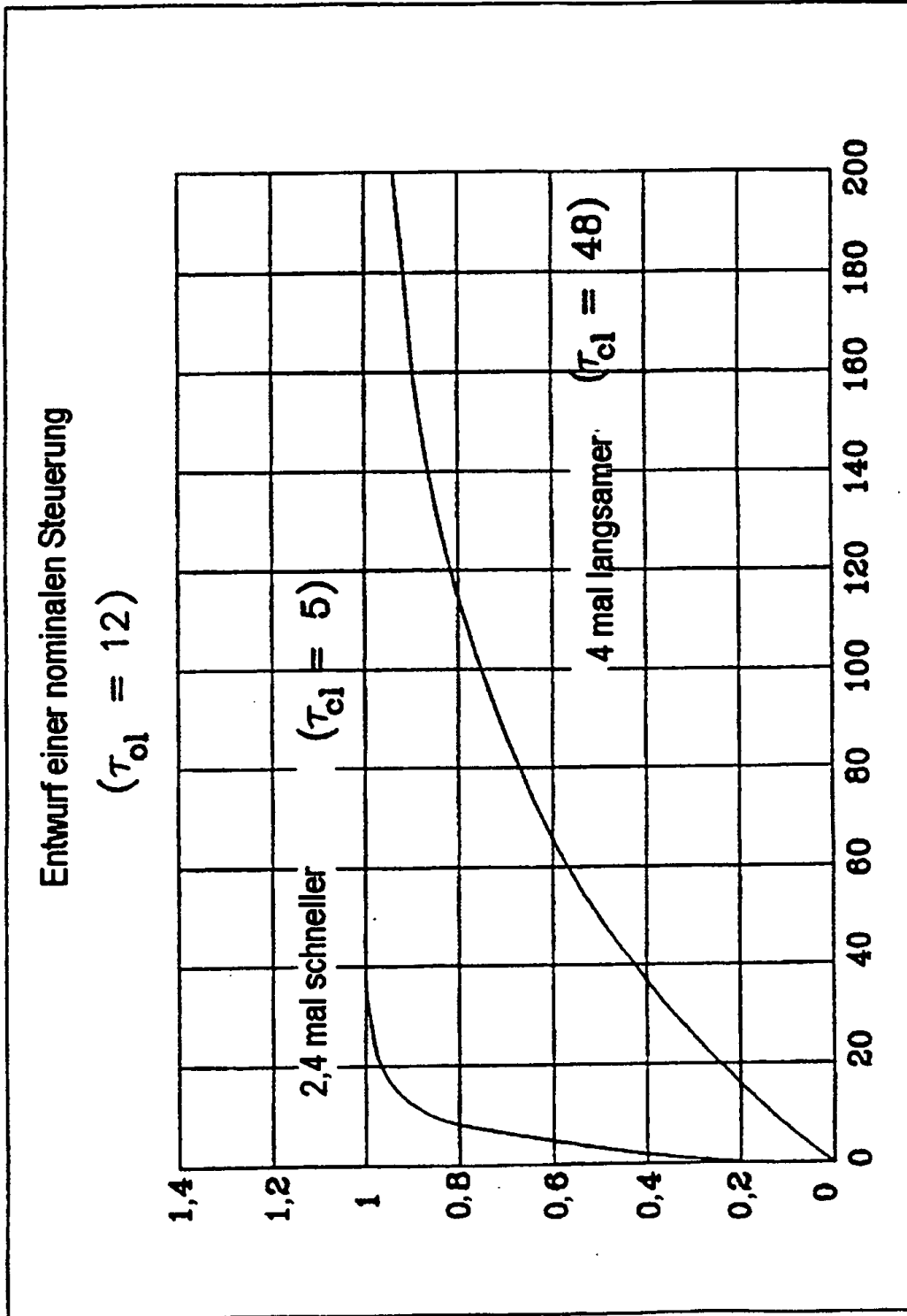


Fig. 4

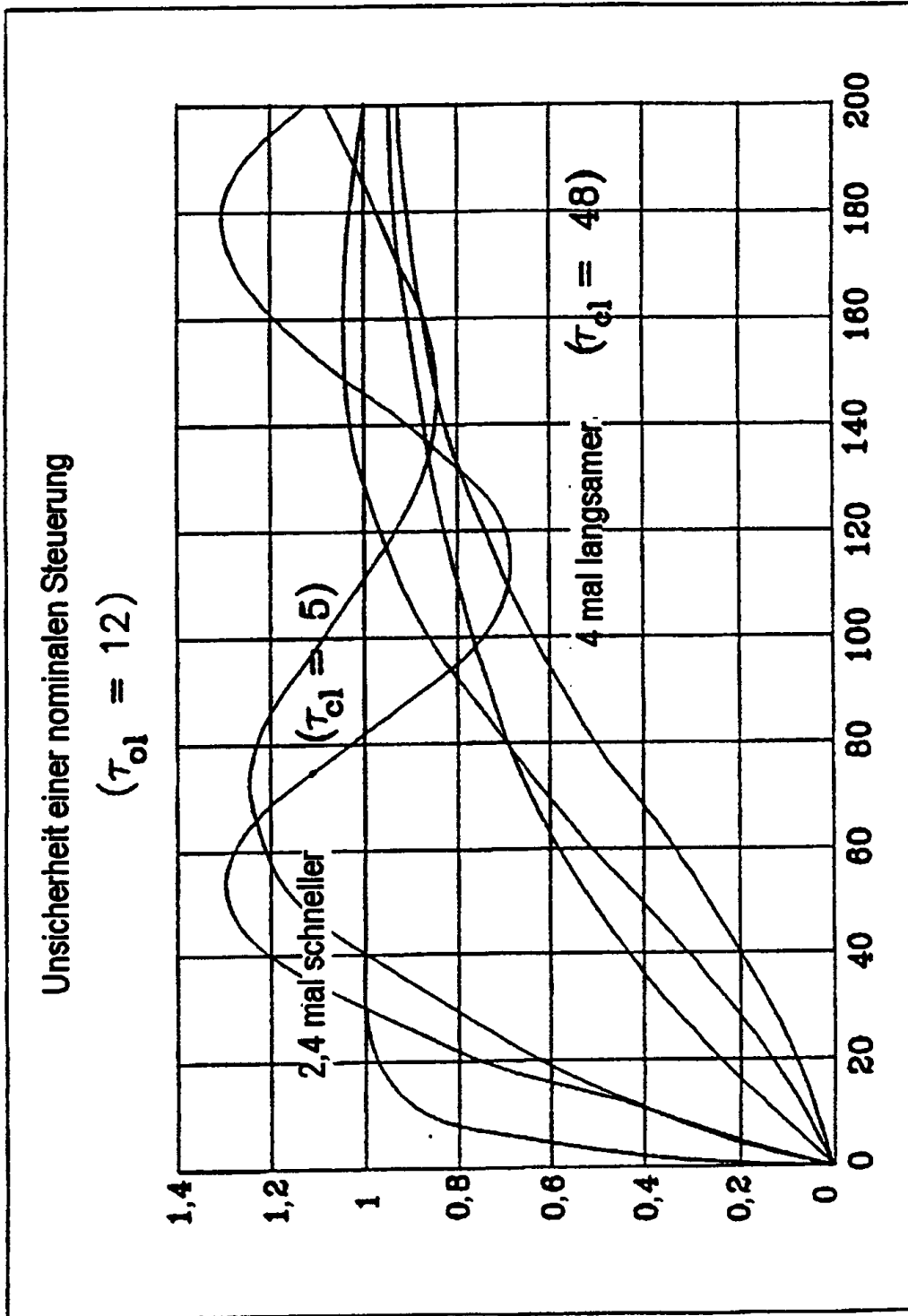


Fig. 5

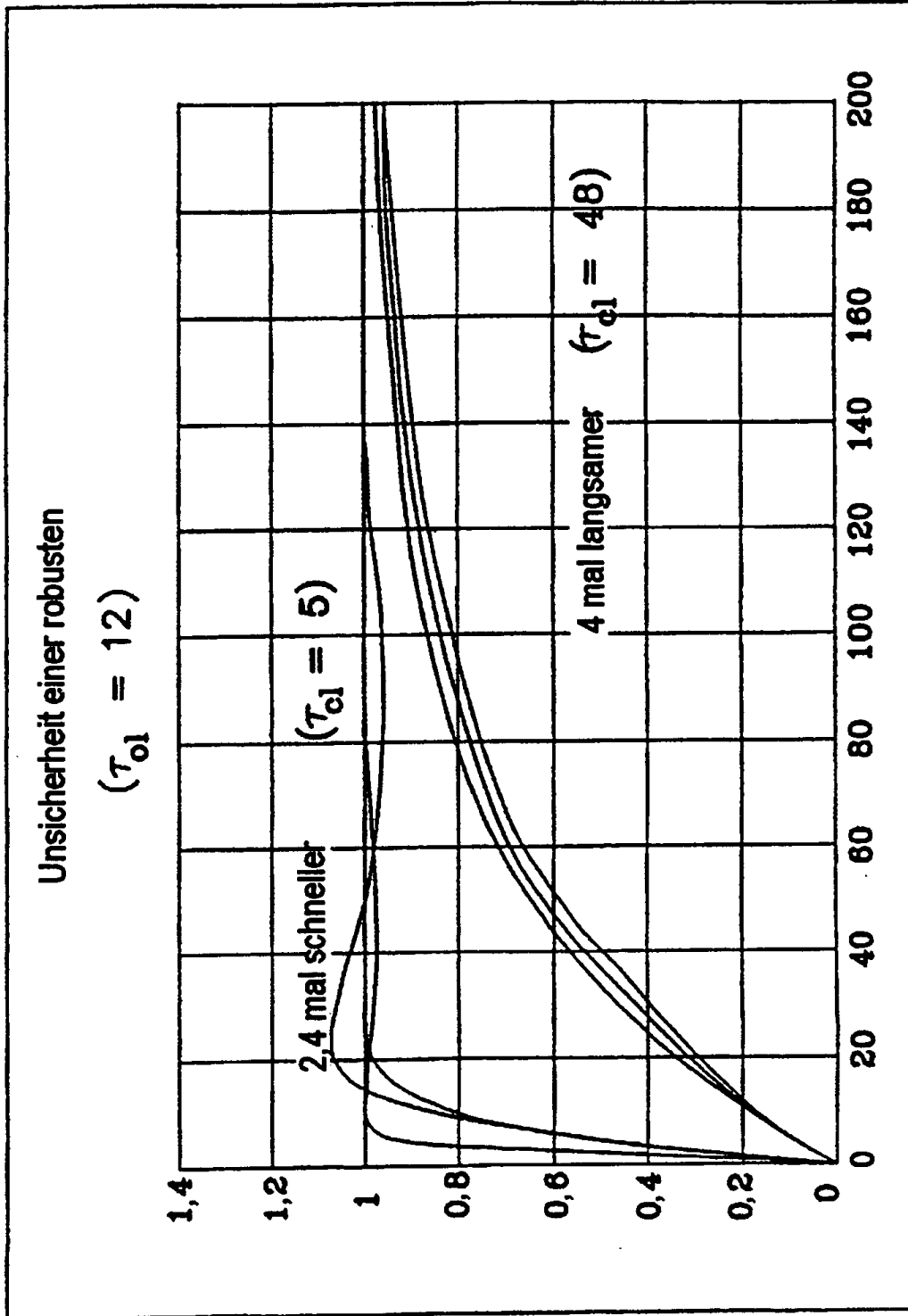


Fig. 6