



19 BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENT- UND  
MARKENAMT

12 Übersetzung der  
europäischen Patentschrift

97 EP 0 895 076 B 1

10 DE 698 09 345 T 2

51 Int. Cl.7:  
G 01 M 15/00  
G 01 L 23/22  
F 02 P 5/14

- 21 Deutsches Aktenzeichen: 698 09 345.3
- 96 Europäisches Aktenzeichen: 98 304 395.1
- 96 Europäischer Anmeldetag: 3. 6. 1998
- 97 Erstveröffentlichung durch das EPA: 3. 2. 1999
- 97 Veröffentlichungstag der Patenterteilung beim EPA: 13. 11. 2002
- 47 Veröffentlichungstag im Patentblatt: 20. 3. 2003

DE 698 09 345 T 2

- 30 Unionspriorität:  
883346 26. 06. 1997 US
- 73 Patentinhaber:  
Federal-Mogul Corp., Southfield, Mich., US
- 74 Vertreter:  
Becker, Kurig, Straus, 80336 München
- 94 Benannte Vertragsstaaten:  
DE, FR, GB, IT

- 72 Erfinder:  
Daniels, Chao Fu, Ypsilanti, Michigan 48197, US

84 Erfassung des verbrannten Massenbruchteils und Schätzung des Druckes durch den Ionenstrom der Zündkerze

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.

DE 698 09 345 T 2

Unser Zeichen: 50987 DE (KG/TP)  
 EP Patent Nr. 98 304 395.1-2213

Die Erfindung betrifft das Bestimmen des verbrannten Massenanteils und des Zylinderdrucks in einer Verbrennungskraftmaschine.

5 Verbrannter Massenanteil und Zylinderdruck sind wichtige Parameter, um den Verbrennungsprozess in einem Zylinder einer Verbrennungskraftmaschine zu charakterisieren. Der verbrannte Massenanteil wird herkömmlicherweise aus dem gemessenen Zylinderdruck bestimmt: solche Drucksensoren werden in diesem Zusammenhang in der US-A-5544635 verwendet. In dem 1938 eingeführten Rassweiler-Withrow Verfahren wird der Beginn und das  
 10 Ende des Verbrennungsprozesses bestimmt, indem die Beziehung zwischen Zylinderdruck ( $P$ ) und Volumen ( $V$ ) untersucht wird, die auf logarithmischen Skalen aufgetragen wird, wie in Fig. 12 gezeigt. Die Beziehung zwischen  $\log P$  und  $\log V$  ist während Kompression und Expansion in Abwesenheit einer Verbrennung linear. Deshalb können der Beginn und das Ende der Verbrennung bestimmt werden, indem die Punkte 900 und 910 ermittelt werden, bei denen das  
 15  $\log P$ -zu- $\log V$  Verhältnis von der linearen Charakteristik während Kompression und Expansion abweicht. Sobald der Beginn 900 und das Ende 910 des Verbrennungsprozesses bestimmt sind, kann der verbrannte Massenanteil während der Verbrennung basierend auf Druck und Volumen durch die folgende Gleichung ausgewertet werden:

$$20 \quad x_b = (P^{1/n} V - P_0^{1/n} V_0) / (P_f^{1/n} V_f - P_0^{1/n} V_0)$$

wobei die Indizes  $0$  und  $f$  den Beginn bzw. das Ende des Verbrennungsprozesses anzeigen und  $n$  ein Polytropenexponent ist. Der Polytropenexponent kann sich während des Verbrennungsprozesses und von Zyklus zu Zyklus in einer unbekanntem Weise ändern, was sich  
 25 auf die Zuverlässigkeit und die Anwendbarkeit von diesem Ansatz auswirken kann. Dieser Ansatz benötigt zusätzlich einen Drucksensor in dem Zylinder.

Die Erfindung gestattet, den verbrannten Massenanteil und Druck in einem Zylinder einer Verbrennungskraftmaschine unter Verwendung eines Ionensignals von einer Zündkerze zu  
 30 bestimmen. Das Ionensignal, das einem Strom entspricht, der durch den Zündkerzenspalt fließt, spricht auf Zustände in einem Zylinder während des Verbrennungsprozesses an.

In einem Aspekt zeigt die Erfindung im Allgemeinen das Bestimmen von in einem Zylinder einer Verbrennungskraftmaschine verbranntem Massenanteil auf, indem ein Ionensignal über einen  
 35 Spalt von einer Zündkerze gemessen wird und ein Wendepunkt des Ionensignals ermittelt wird.

Verbrannter Massenanteil wird dann unter Verwendung des Wendepunkts bestimmt.

Ausführungsformen der Erfindung können ein oder mehrere der folgenden Merkmale aufweisen. Der verbrannte Massenanteil kann unter Verwendung eines Ausdrucks dargestellt werden, der eine Konstante einschließt. Ein Wert für die Konstante kann unter Verwendung des Wendepunkts bestimmt werden und verbrannter Massenanteil kann durch eine Berechnung unter Verwendung des Ausdrucks und des Werts der Konstanten bestimmt werden. Der Wendepunkt kann einem Punkt maximaler Flammbeschleunigung entsprechen.

- 10 Verbrannter Massenanteil kann berechnet werden, indem ein zweiter Wendepunkt des Ionensignals ermittelt wird, indem der verbrannte Massenanteil unter Verwendung eines Ausdrucks dargestellt wird, der zwei Konstanten einschließt, Werte für die Konstanten unter Verwendung der Wendepunkte bestimmt werden und der verbrannte Massenanteil unter Verwendung des Ausdrucks und der Werte der Konstanten bestimmt wird. Der erste
- 15 Wendepunkt kann einem Punkt maximaler Flammbeschleunigung entsprechen. Der zweite Wendepunkt kann einem Punkt maximaler Wärmefreisetzung entsprechen. Der Druck in dem Zylinder aufgrund von Verbrennung kann unter Verwendung des verbrannten Massenanteils bestimmt werden.
- 20 In einem anderen Aspekt zeigt die Erfindung im Allgemeinen das Bestimmen des verbrannten Massenanteils auf, indem ein Ionensignal über einen Zündkerzenspalt gemessen wird, ein Punkt maximaler Flammbeschleunigung und ein Punkt maximaler Wärmefreisetzung aus dem gemessenen Ionensignal bestimmt werden und der Punkt maximaler Wärmefreisetzung und der Punkt maximaler Flammbeschleunigung verwendet werden, um eine Konstante von einer
- 25 Funktion zu bestimmen, die verbrannten Massenanteil darstellt. Verbrannter Massenanteil wird dann unter Verwendung der Funktion bestimmt.

- In einem anderen Aspekt zeigt die Erfindung im Allgemeinen das Bestimmen des Drucks in dem Zylinder während des Verbrennungsprozesses auf, indem ein anfänglicher Zylinderdruck
- 30 bestimmt wird, ein Zündpunkt eines Verbrennungsprozesses aus dem gemessenen Ionensignal bestimmt wird, ein Verbrennungsendpunkt aus dem gemessenen Ionensignal bestimmt wird und Druck in dem Zylinder aufgrund von Verbrennung von dem Zündpunkt bis zu dem Verbrennungsendpunkt unter Verwendung des verbrannten Massenanteils bestimmt wird. Der Druck in dem Zylinder aufgrund einer Bewegung eines Kolbens in dem Zylinder von dem
- 35 Zündpunkt bis zu dem Verbrennungsendpunkt kann ebenfalls bestimmt werden. Ein Gesamtdruck in dem Zylinder von dem Zündpunkt bis zu dem Verbrennungsendpunkt kann schließlich bestimmt werden, indem der Druck aufgrund von Verbrennung mit dem Druck

aufgrund von Bewegung des Kolbens in dem Zylinder kombiniert werden.

In noch einem anderen Aspekt zeigt die Erfindung eine Vorrichtung zum Messen eines Ionensignals einer Zündkerze auf. Die Vorrichtung schließt einen Meßschaltkreis, der vorgesehen ist, den Strom über einen Spalt von der Zündkerze zu messen, und einen Mikroprozessor ein, der mit dem Meßschaltkreis verbunden ist. Der Mikroprozessor kann vorgesehen sein, um einen Wendepunkt des Ionensignals zu ermitteln und den verbrannten Massenanteil unter Verwendung von dem Wendepunkt zu bestimmen.

Der Mikroprozessor kann vorgesehen sein, den verbrannten Massenanteil unter Verwendung eines Ausdrucks darzustellen, der eine Konstante aufweist, einen Wert für die Konstante unter Verwendung des Wendepunkts zu bestimmen und den verbrannten Massenanteil unter Verwendung des Ausdrucks und des Werts von der Konstanten zu bestimmen.

Die Vorrichtung kann in eine Verbrennungskraftmaschine eingebettet sein, die einen Zylinder, einen Kolben, der vorgesehen ist, sich innerhalb des Zylinders aufwärts und abwärts zu bewegen, und eine Zündkerze umfasst, die in den Zylinder vorspringt. Die Zündkerze kann einen Spalt, der vorgesehen ist, ein Treibstoff/Luft-Gemisch in dem Zylinder zu zünden, und einen Ionensignal-Meßschaltkreis aufweisen. Der Ionensignal-Meßschaltkreis kann vorgesehen sein, ein Ionensignal über den Spalt der Zündkerze zu messen, einen Wendepunkt von dem Ionensignal zu ermitteln und den verbrannten Massenanteil unter Verwendung des Wendepunkts zu bestimmen.

Andere Merkmale und Vorteile der Erfindung gehen aus der folgenden Beschreibung hervor, die die Zeichnungen einschließt, in denen:

25

Fig. 1 eine Darstellung von den vier Zyklen einer Viertakt-Verbrennungskraftmaschine ist.

Fig. 2 eine schematische Darstellung von einem Schaltkreis zum Messen des Ionensignals von einer Zündkerze ist.

Fig. 3 ein Graph von einem Ionensignal ist.

30 Fig. 4 ein Graph von einem Ionensignal und einem Drucksignal ist.

Fig. 5 ein Graph von einem Ionensignal und einem Drucksignal ist.

Fig. 6 ein Graph des verbrannten Massenanteils ist.

Fig. 7 ein Graph der ersten Ableitung des verbrannten Massenanteils ist.

Fig. 8 ein Graph der zweiten Ableitung des verbrannten Massenanteils ist.

35 Fig. 9 ein Flußdiagramm eines Verfahrens zum Bestimmen des verbrannten Massenanteils und des Zylinderdrucks ist.

Fig. 10 ein Graph von gemessenem Zylinderdruck im Vergleich mit berechnetem Zylinderdruck

ist.

Fig. 11 ein Graph von Ionensignalen für unterschiedliche Zündkerzen-Geometrien ist.

Fig. 12 ein logarithmischer Graph von Zylindervolumen gegen Zylinderdruck ist.

- 5 Der Betrieb einer Verbrennungskraftmaschine kann durch eine Folge von Zyklen oder Takten beschrieben werden. Die meisten Maschinen weisen einen Zweitakt- oder Viertakt-Betrieb auf. In einem typischen Kraftfahrzeugmotor kann zum Beispiel der Betrieb in vier Zyklen unterteilt werden: Ansaugen, Kompression, Expansion und Auslassen, wie in Fig. 1 gezeigt. Die vier Zyklen treten während zwei Drehungen der Kurbelwelle 10 auf, so dass sich die Kurbelwelle über einen Kurbelwinkel von  $720^\circ$  während der vier Zyklen dreht. Die Kurbelwelle ist innerhalb jedes Zylinders 30 durch eine Pleuelstange 40 mit einem Kolben 20 verbunden. Der Kolben 20 bewegt sich innerhalb des Zylinders 30 aufwärts und abwärts wenn sich die Kurbelwelle 10 dreht. Während des Ansaugzyklus bewegt sich der Kolben abwärts (weg von einer Zündkerze 50 des Zylinders), ein Ansaugventil 60 öffnet sich und ein Auslaßventil 70 schließt sich, um einem Gemisch von Luft und Treibstoff zu gestatten, in den Zylinder 30 eingezogen zu werden.
- 15 Während des Kompressionstakts bewegt sich der Kolben aufwärts und die Ventile schließen, um das Treibstoff/Luft-Gemisch zu verdichten und die Temperatur und den Druck in dem Zylinder zu erhöhen. Nahe dem Ende des Kompressionszyklusses zündet die Zündkerze 50 das Treibstoff/Luft-Gemisch, was die Verbrennung einleitet. In dem Expansionszyklus vervielfacht der Verbrennungsprozess den Druck innerhalb des Zylinders 30 und zwingt den Kolben 20 abwärts, der treibende Kraft an der Kurbelwelle 10 bereitstellt.

- Der Verbrennungsprozess in einem Ottomotor setzt sich im allgemeinen aus den folgenden Stadien zusammen: Verbrennungseinleitung (die Zündung und die Flammkernentwicklung einschließt), Verbrennungsfortpflanzung (die Flammbeschleunigung und maximale Wärmefreisetzung einschließt) und Verbrennungsende. Um die Verbrennung einzuleiten, wird eine hohe Spannung (8 - 30 kV) über einen Zündkerzenspalt angelegt. Dies führt zu dem Durchschlag oder der Ionisation der gasförmigen Moleküle in dem Zylinder in geladene Partikel (Ionen). Die Ionen wirken als Ladungsträger, die einem Strom erlauben, über den Zündkerzenspalt zu fließen. Ionenbildung tritt in dem Treibstoff/Luft-Gemisch in einem unterschiedlichen Ausmaß in jedem Verbrennungsstadium auf. Der Strom, der über den Zündkerzenspalt fließt, oder das Ionensignal, hängt direkt von dem Ionenbildungsmaß ab. Das Ionensignal kann verwendet werden, um den verbrannten Massenanteil oder freigesetzten Anteil an Treibstoffenergie als eine Funktion des Kurbelwinkels zu berechnen. Der verbrannte Massenanteil kann wiederum verwendet werden, um den Zylinderdruck zu berechnen.

Die Ionenbildungs-Mechanismen in einem Flammgebiet sind: thermische Ionisation von

Verschmutzungen, thermische Ionisation von Reaktionsprodukten und Zwischenprodukten mit geringen Ionisationspotentialen, thermische Ionisation von Kohlenstoffpartikel, Ionisation durch Nichtgleichgewichts-Bewegungsenergie, Gesamtanregung und chemische Ionisation. Ein Zerfall der Ionisation, auf die als Ionen-Rekombination Bezug genommen wird, folgt dem Ionenbildungsprozess. Ionen-Rekombination kann durch chemische Rekombination, Kollision mit einer kalten Oberfläche oder Neutralisation durch andere Ionen oder Elektronen erreicht werden. Ein Ionensignal, das zu einer bestimmten Zeit gemessen wird, ist tatsächlich ein Maß des Gleichgewichts zwischen Ionenbildung und Rekombination.

Fig. 2 zeigt eine Ausführungsform eines Ionensignal-Meßschaltkreises 100 einer Zündkerze, der in einem typischen Fahrzeugzündsystem integriert ist. Das Zündsystem umfasst eine 12 V Quelle (Batterie) 110 und eine Zündspule 120. Die Zündspule 120 ist ein Transformator, der die Quellenspannung an der Primärspule 130 auf eine höhere Spannung (typischerweise 8 - 30 kV) an der Sekundärspule 140 hinauf transformiert. Die Spannung an der Sekundärspule wird verwendet, um einen Zündfunken über den Zündspalt 150 zu erzeugen. Eine zusätzliche 150 V Gleichstrom-Spannungsquelle 160 ist über einen 100 K $\Omega$  Widerstand 170 und einen 5 M $\Omega$  Widerstand 180 angelegt, die in Serie mit dem Zündspalt 150 angeordnet sind. Die zusätzliche Quelle 160, die durch die Autobatterie über einen Transformator versorgt sein kann, erhöht den Strom, der über den Zündspalt 150 fließt, so dass das Ionensignal einfacher gemessen werden kann. Ein zusätzlicher Spalt 185 mit einer Durchschlagsspannung von ungefähr 3 kV ist zwischen dem Ionensignal-Meßschaltkreis (d.h. der Quelle 160, den Widerständen 170,180 und dem Zündspalt 150) und der Sekundärspule 140 bereitgestellt, um zu verhindern, dass der Ionensignal-Meßschaltkreis durch die Sekundärspule 140 geerdet wird. Das Ionensignal wird durch einen digital-nach-analog-Wandler 190 über den 100 K $\Omega$  Widerstand 170 gemessen. Die Ionensignal-Messung wird dann an einen Mikroprozessor 195 übertragen, der vorgesehen ist, Berechnungen zu verbranntem Massenanteil und Druck durchzuführen.

Eine Ionensignal-Wellenform 200 für einen Motorzylinder ist in Fig. 3 gezeigt. Die Ionensignal-Wellenform weist drei Spitzenwerte auf, die in Bezug zu wichtigen Ereignissen während des Verbrennungsprozesses stehen: Zündung, Flammkernentwicklung und Flammfortpflanzung. Die erste Ableitung 205 von dem Ionensignal ist ebenfalls nützlich, um die Dauer von den Stadien von dem Verbrennungsprozess zu bestimmen.

Der erste Spitzenwert 210 des Ionensignals ist der Zündpunkt der Verbrennung. In einem normalen Motorzyklus beginnt sich nach dem Zündimpuls ein Flammkern zu bilden und zwischen dem Zündkerzenspalt zu wachsen. Der Ionenstrom vergrößert sich in einer Periode 240 aufgrund der Flammfront allmählich, die durch den Zündkerzenspalt läuft, die ein Stadium von

früher Flammentwicklung ist. Die Ionen, die während dieses Prozesses gebildet werden, sind hauptsächlich das Ergebnis von chemischer Ionisation.

5 In Richtung auf das Ende der Flammfront erreicht das Ionensignal den zweiten Spitzenwert 220 und fällt ab, wenn die Flammfront sich fort bewegt. Da das Ionensignal das Gleichgewicht zwischen der Ionenbildung und Rekombination darstellt, stellen die Spitzenwerte in dem Ionensignal Punkte dar, an denen die Bildungsrate gleich der Rekombinationsrate ist. Nach dem zweiten Spitzenwert 220 fällt die Ionenbildungsrate allmählich ab, die aus chemischer Ionisation hervorgeht. Der Wendepunkt 250 nach dem zweiten Spitzenwert 220 ist der Punkt maximaler Flammbeschleunigung, der das Ende an Ionenbildung aufgrund der Flammfront und den Beginn von Flammfortpflanzung in Richtung auf den tieferen Teil des Zylinders kennzeichnet. Dies kennzeichnet ebenfalls das Ende des frühen Flammentwicklungsabschnitts des Verbrennungsprozesses, der auftritt, bevor die Flamme ihren Punkt maximaler Beschleunigung nach Verlassen des Zündkerzenspalts erreicht.

15

Wenn die Flammfront sich von der Zündkerze fortbewegt, wird das verbrannte Gas in der Umgebung von der Zündkerze durch die sich bewegende Flamme verdichtet und zurück in Richtung auf die Zündkerze gezwungen. Einige der Reaktionsprodukte, andere Moleküle (wie zum Beispiel  $N_2$ ) oder Kohlenstoffmoleküle, die in dem Spalt verbleiben, die schon eine sehr hohe Temperatur aufweisen, werden aufgrund der Temperaturerhöhung ionisiert, die von dieser Kompression herrührt. Diese Ionisation führt zu einem dritten Spitzenwert 230 in dem Ionensignal. Wie in Fig. 4 gezeigt ist, stimmt der dritte Spitzenwert 230 normalerweise mit dem Spitzenwert-Druckpunkt 260 der Charakteristik 270 des Zylinderdrucks überein. Wie in Fig. 5 gezeigt ist, kann der dritte Spitzenwert 230 unter Bedingungen von niedriger Last oder später ZündEinstellung durch den zweiten Spitzenwert 220 verdeckt sein, wird aber weiterhin einen kleinen Höcker in der Ionensignal-Wellenform zeigen.

25

Die lokale Temperatur um die Zündkerze herum steigt mit der Verbrennungsstärke an. Die Rate von Ionenbildung oder Rekombination um die Zündkerze herum steht deshalb in direktem Zusammenhang mit der Wärmefreisetzrate der fortschreitenden Verbrennung nahe der Zündkerze. Die Wärmefreisetzrate oder die Treibstoff-Luft-Gemisch-Brennrate erreicht ihr Maximum ungefähr in der Mitte des Verbrennungsprozesses. An diesem Punkt weist die Ionenbildungsrate ebenfalls ein Maximum auf. Wenn die Verbrennung endet, endet die Ionenbildung und die Ionenrekombinationsrate beginnt anzuwachsen. Unter wiederholter Bezugnahme auf Fig. 3 zeigen die Punkte, an denen die Steigung der ersten Ableitung des Ionensignals 205 gleich Null ist, die Wendepunkte 250, 280 und 285 in dem Ionensignal 200 an. Der Wendepunkt 250 in dem Ionensignal nach dem zweiten Spitzenwert 220 zeigt den Punkt

30

35

maximaler Flammbeschleunigung an, der Wendepunkt 280 vor dem dritten Spitzenwert 230 zeigt den Punkt maximaler Wärmefreisetzung an und der Wendepunkt 285 nach dem dritten Spitzenwert 230 zeigt das Ende des Verbrennungsprozesses an.

5 Unter Bezugnahme auf Fig. 6 ist der verbrannte Massenanteil 310 der Abdruck bzw. Kriterium des Verbrennungsprozesses in einem Motorzylinder. Er weist eine charakteristische S-Form auf und steigt von Null zu Beginn des Verbrennungsprozesses auf Eins am Ende von dem Prozess an. Wie in Fig. 7 gezeigt, steigt die Rate, mit der das Treibstoff-Luft-Gemisch brennt, d.h. die  
 10 Ableitung 320 von verbranntem Massenanteil, von Null der Zündung folgend auf einen Spitzenwert 330 ungefähr in der Mitte des Verbrennungsprozesses an und sinkt dann auf Null, wenn der Verbrennungsprozess endet. Die zweite Ableitung des verbrannten Massenanteils erreicht, wie in Fig. 8 gezeigt, den Punkt 340 von maximaler Verbrennungsbeschleunigung nach der frühen Flammentwicklung bei ungefähr 10% verbrannter Masse und erreicht die niedrigste Beschleunigung bei ungefähr 90% verbrannter Masse.

15 Unter Bezugnahme auf Fig. 9 können der verbrannte Massenanteil und Zylinderdruck unter Verwendung des Zündkerzen-Ionensignals eher als mit einem Drucksensor gemäß einem Verfahren 400 bestimmt werden. Das Ionensignal wird anfänglich über den Zündspalt in einem Zylinder (Schritt 410) gemessen. Die Anfangs- und Endpunkte von dem Verbrennungsprozess  
 20 werden aus dem Ionensignal und der ersten Ableitung von dem Ionensignal wie vorstehend beschrieben (Schritt 420) bestimmt.

Bevor der Verbrennungsprozess beginnt, folgt die Druck-Volumen-Charakteristik eng dem polytropen Prozess mit  $n = 1,3$ , wie durch die Gleichung gegeben ist:

25 
$$PV^n = \text{constant}$$

Um diese Vorverbrennungs-Charakteristik zu bestimmen, wird der anfängliche Verteilerdruck durch den Einlaßverteiler-Drucksensor (MAP Sensor) (Schritt 430) erhalten und der Druck in  
 30 dem Zylinder wird von dem Punkt, an dem das Einlaßventil geschlossen wird, bis zu dem Zündpunkt unter Verwendung des vorstehend bereitgestellten Ausdrucks (Schritt 440) bestimmt.

Während des Verbrennungsprozesses kann der Treibstoffsverbauchs-Prozentsatz gegen den Kurbelwinkel, oder verbrannten Massenanteil, durch die Wiebe-Funktion beschrieben werden:

35 
$$x_b = 1 - \exp\left(-a\left(\frac{\theta - \theta_0}{\Delta\theta}\right)^{n+1}\right)$$

wobei  $a$  und  $m$  Konstanten sind,  $\theta$  der Kurbelwinkel während der Verbrennung ist,  $\theta_0$  der Zünd-Kurbelwinkel ist und  $\Delta\theta$  die Dauer der Verbrennung ist. Der Zündpunkt, Verbrennungsendpunkt, Punkt maximaler Flammbeschleunigung und Punkt maximaler Wärmefreisetzung können durch eine mathematische Auswertung des gemessenen Ionensignals wie vorstehend beschrieben bestimmt werden. Wenn die zweite Ableitung von der Wiebe-Funktion an dem Punkt maximaler Wärmefreisetzung auf Null gesetzt wird und die dritte Ableitung von der Wiebe-Funktion an dem Punkt maximaler Beschleunigung auf Null gesetzt wird, können die Konstanten  $a$  und  $m$  bestimmt werden (Schritt 450). Der verbrannte Massenanteil gegen den Kurbelwinkel kann dann unter Verwendung der Wiebe-Funktion berechnet werden (Schritt 460) und der Druckanstieg aufgrund von Verbrennung kann aus dem verbrannten Massenanteil berechnet werden. Der Druck aufgrund von Verbrennung kann dann mit dem berechneten Druck aufgrund von Zylindervolumenänderung kombiniert werden, um den Gesamtdruck zu berechnen (Schritt 470).

Wie in Fig. 3 gezeigt, ist die Steigung der ersten Ableitung 205 von dem Ionensignal an dem Punkt maximaler Wärmefreisetzung 280 gleich Null. Die zweite Ableitung von dem Ionensignal ist deshalb gleich Null. Setzen der zweiten Ableitung von der Wiebe-Funktion an dem Kurbelwinkel, der dem Punkt maximaler Wärmefreisetzung 280 entspricht, auf gleich Null ergibt:

$$x_b'' = d^2 x_b / d\theta^2 = 0$$

An dem Kurbelwinkel, der dem Punkt maximaler Beschleunigung entspricht, ist die dritte Ableitung der Wiebe-Funktion gleich Null:

$$x_b''' = d^3 x_b / d\theta^3 = 0$$

Die Konstanten  $a$  und  $m$  von der Wiebe-Funktion können unter Verwendung von diesen Beziehungen bestimmt werden.

Nachdem das Einlaßventil geschlossen ist und bevor die Zündung eintritt, kann für das Gemisch in dem Zylinder angenommen werden, dass es einer polytropen Kompression mit einem Polytropenexponenten von 1,3 unterzogen wird. Wenn der anfängliche Druck durch den Einlaßverteiler-Drucksensor erhalten wird, kann der Druck an dem Zündpunkt ( $P_{ig}$ ) bestimmt werden:

$$P_{int} V_{int}^{1,3} = P_{ig} V_{ig}^{1,3}$$

wobei  $P_{\text{int}}$  der anfängliche Zylinderdruck ist,  $V_{\text{int}}$  das anfängliche Zylindervolumen ist,  $P_{\text{ig}}$  der Druck an dem Zündpunkt ist und  $V_{\text{ig}}$  das Volumen an dem Zündpunkt ist.

- 5 Nach dem Zündpunkt kann die Druckänderung aufgrund von Verbrennung und Kolbenbewegung getrennt berechnet werden. Es kann angenommen werden, dass Verbrennung in einem konstanten Volumen gleich dem Volumen zu dem Zündpunkt abläuft. Durch Kombinieren der Druckänderung aufgrund von Verbrennung mit konstantem Volumen mit der Druckänderung aufgrund von Kolbenbewegung kann der Druck an jedem Kurbelwinkel abgeschätzt werden.

10

Für eine Verbrennung mit konstantem Volumen kann die folgende Energiegleichung verwendet werden:

$$(m_a + m_f) C_v (T_f - T_{\text{ig}}) = m_f \Delta H_{\text{comb}}$$

15

wobei  $m_a$  die Masse der Luft ist,  $m_f$  die Masse des Treibstoffs ist,  $C_v$  die spezifische Wärme bei einem konstanten Volumen ist,  $T_f$  die Temperatur an dem Verbrennungsende ist,  $T_{\text{ig}}$  die Temperatur an dem Zündpunkt ist und  $\Delta H_{\text{comb}}$  die Verbrennungswärme ist. Für eine Verbrennung mit konstantem Volumen ist ebenfalls folgende Gleichung gültig:

20

$$P_f / P_{\text{ig}} = T_f / T_{\text{ig}}$$

Diese Gleichungen können kombiniert werden, um eine Beziehung zwischen dem Druck an dem Verbrennungsbeginn und an dem Verbrennungsende zu erhalten:

25

$$P_f / P_{\text{ig}} = T_f / T_{\text{ig}} = m_f \Delta H_{\text{comb}} / [(m_a + m_f) C_v T_{\text{ig}}] + 1$$

Die Druckänderung zwischen dem Beginn und dem Verbrennungsende ist:

30

$$\Delta P = P_f - P_{\text{ig}} = \left[ m_f \Delta H_{\text{comb}} / [(m_a + m_f) C_v T_{\text{ig}}] \right] \cdot P_{\text{ig}}$$

Für bestimmte Treibstoffe kann die Druckänderung von dem Luft/Treibstoff-Verhältnis und der Temperatur an dem Zündpunkt abhängen. Für Benzin unter stöchiometrischen Verhältnissen variiert der Ausdruck für Druckänderung jedoch nur ein wenig und ist näherungsweise:

35

$$\Delta P \cong 3 P_{\text{ig}}$$

Nachdem die Wiebe-Funktion bestimmt ist, wird für die erste Ableitung von dem verbrannten Massenanteil angenommen, gleich der Prozentsatzänderung von Druck gegen Kurbelwinkel während dem Verbrennungsprozess zu sein:

$$5 \quad dP/d\theta = dx_b/d\theta * \Delta P$$

Wenn  $P(i+1) + P(i)$  der Gesamtdruckzuwachs aufgrund von sowohl Verbrennung als auch Kolbenbewegung zwischen zwei Kurbelwinkeln ist und  $P(i) * (V(i)/V(i+1))^{1,3} - P(i)$  der Druckzuwachs aufgrund von Kolbenbewegung ist, dann ist  $P(i+1) - P(i) * (V(i)/V(i+1))^{1,3}$  der  
 10 Druckzuwachs aufgrund von Verbrennung. Der Druckzuwachs zwischen zwei Kurbelwinkel unter Bezugnahme auf das Volumen an dem Zündpunkt ist:

$$dP(i)/d\theta(i) = dx_b(i)/d\theta(i) * \Delta P \\ = [P(i+1) - P(i) * (V(i)/V(i+1))^{1,3}] V(i)/V_{ig}$$

15 Der Druck an jedem Kurbelwinkel ist schließlich:

$$P(i+1) = dx_b(i)/d\theta(i) * \Delta P * V_{ig}/V(i) + P(i) * [V(i)/V(i+1)]^{1,3}$$

Unter wiederholter Bezugnahme auf Fig. 9 wird an dem Verbrennungsende wieder das polytrope  
 20 Prozeßmodell mit  $n=1,3$  verwendet und der Druck wird bis zu dem Öffnungspunkt des Auslaßventils (Schritt 480) abgeschätzt. Fig. 10 zeigt, dass der Zylinderdruck, der aus dem gemessenen Ionensignal berechnet wird, sich in signifikanter Übereinstimmung mit dem befindet, der sich aus Drucksensor-Messungen ergibt.

25 Das Verfahren 400, das verwendet wird, um den Zylinderdruck aus dem Ionensignal zu berechnen, gründet sich eher auf die Wendepunkte in dem Ionensignal und die Ableitungen von dem Ionensignal als auf dem absoluten Pegel von dem Ionensignal. Dies führt zu einer genaueren Zylinderdruck-Bestimmung, da der absolute Pegel von dem Ionensignal Fluktuationen unterliegt, die nicht in Bezug zu dem Zylinderdruck stehen.

30 Zum Beispiel hat die Versuchsdurchführung gezeigt, dass das Ionensignal stark von Faktoren abhängt, die in keinem Bezug zu dem Zylinderdruck stehen, wie zum Beispiel die Geometrie von der Zündkerzen-Elektrode. Zahlreiche Zündkerzen mit unterschiedlichen Vorsprüngen oder Elektroden-Geometrien wurden unter den gleichen Motorbetriebsbedingungen getestet (d.h.  
 35 Motorgeschwindigkeit und Last wurden während des Tests konstant gehalten). Obwohl es keinen signifikanten Unterschied in dem angezeigten mittleren effektiven Druck (IMEP) zwischen

unterschiedlichen Zündkerzen-Gestaltungen gab, zeigten die Ionensignale, die durch unterschiedliche Zündkerzen erfasst wurden, große Unterschiede. Alle Tests wurden in einem Chrysler 3.5L, V6 Motor durchgeführt, in dem das Ionensignal und Drucksignal von dem zweiten Zylinder mit einem Test-Meßsystem verbunden und überwacht wurden.

5

Fig. 11 zeigt das Ionensignal, das mit der gleichen RC12LYV Zündkerze mit zwei unterschiedlichen Spalten: ,040" und ,060" erfasst ist. Das Signal, das mit der Zündkerze mit dem größeren Spalt erfasst wird, ist stärker als das Signal des kleineren Spalts. Wenn die Spaltgröße die gleiche ist, aber Zündkerzen mit unterschiedlichen Vorsprüngen verwendet werden (RC12LYC und RC12YC), mißt die Zündkerze mit dem kürzeren Vorsprung in ähnlicher Weise ein viel stärkeres Ionensignal als die Zündkerze mit dem längeren Vorsprung, da eine stärkere Akkumulation von Ionen nahe der Zylinderwand aufgrund von dem langsameren Fluß von Verbrennungsgasen vorliegt.

10

15

Die experimentellen Ergebnisse zeigen ebenfalls, dass eine größere Elektrodengröße zu einem stärkeren Ionensignal führt. Die Intensität von dem Ionensignal hängt ebenfalls von der Elektroden-Oberflächentemperatur ab. Zum Beispiel weist eine Kupferkern-Erdelektrode, die eine geringere Elektroden-Oberflächentemperatur als andere Gestaltungen besitzt, eine höhere Ionenintensität auf. Dies tritt auf, da größere oder kältere Elektrodenoberflächen zu einer höheren Ionenrekombinationsrate führen. Wenn nicht die Ionenrekombinationsrate berücksichtigt wird, die sich aus unterschiedlichen Elektroden-Gestaltungen ergibt, ist die Berechnung von Flammtemperatur, die auf dem Ionensignal basiert, nicht zuverlässig.

20

21.07.02

Unser Zeichen: 50987 DE DE (KG/TP)  
EP Patent Nr. 98 304 395.1-2213

Ansprüche

- 5 1. Verfahren zum Bestimmen von in einem Zylinder einer Verbrennungskraftmaschine verbranntem Massenanteil, das umfaßt:  
Messen eines Ionensignals über einen Spalt einer Zündkerze,  
Ermitteln eines Wendepunkts des Ionensignals und  
Bestimmen von verbranntem Massenanteil unter Verwendung des Wendepunkts.
- 10 2. Verfahren gemäß Anspruch 1, das ferner die Schritte umfaßt:  
Darstellen des verbrannten Massenanteils unter Verwendung eines Ausdrucks, der eine erste Konstante einschließt und  
Bestimmen eines Werts für die erste Konstante unter Verwendung des Wendepunkts,  
wobei die Bestimmung des verbrannten Massenanteils eine Berechnung unter Verwendung  
15 des Ausdrucks und des Werts für die erste Konstante umfaßt.
3. Verfahren gemäß Anspruch 2, wobei der erste Wendepunkt einem Punkt maximaler Flammbeschleunigung entspricht.
- 20 4. Verfahren gemäß Anspruch 1, das ferner die Schritte umfaßt:  
Ermitteln eines zweiten Wendepunkts des Ionensignals,  
Darstellen des verbrannten Massenanteils unter Verwendung eines Ausdrucks, der eine erste und zweite Konstante einschließt und  
Bestimmen von Werten für die erste und zweite Konstante unter Verwendung des ersten und  
25 zweiten Wendepunkts,  
wobei das Bestimmen des verbrannten Massenanteils eine Berechnung unter Verwendung des Ausdrucks und der Werte für die erste und zweite Konstante umfaßt.
- 30 5. Verfahren gemäß Anspruch 4, wobei der erste Wendepunkt einem Punkt maximaler Flammbeschleunigung entspricht.

6. Verfahren gemäß Anspruch 4, wobei der zweite Wendepunkt einem Punkt maximaler Wärmefreisetzung entspricht.
- 5 7. Verfahren gemäß Anspruch 1, das ferner das Bestimmen von Druck in dem Zylinder unter Verwendung des verbrannten Massenanteils umfaßt.
8. Verfahren zum Bestimmen von in einem Zylinder einer Verbrennungskraftmaschine verbranntem Massenanteil, das umfaßt:
  - 10 Messen eines Ionensignals über einen Spalt einer Zündkerze,  
Bestimmen eines Punkts maximaler Flammbeschleunigung aus dem gemessenen Ionensignal,  
Bestimmen eines Punkts maximaler Wärmefreisetzung aus dem gemessenen Ionensignal,  
Darstellen des verbrannten Massenanteils unter Verwendung eines Ausdrucks, der eine Konstante einschließt; Bestimmen eines Werts für die Konstante unter Verwendung des
  - 15 Punkts maximaler Wärmefreisetzung und des Punkts maximaler Flammbeschleunigung und Bestimmen von verbranntem Massenanteil unter Verwendung des Ausdrucks.
9. Verfahren gemäß Anspruch 8, das ferner das Bestimmen des Drucks in dem Zylinder umfaßt durch:
  - 20 Bestimmen eines anfänglichen Zylinderdrucks,  
Bestimmen eines Zündpunkts eines Verbrennungsprozesses aus dem gemessenen Ionensignal,  
Bestimmen eines Verbrennungsendpunkts aus dem gemessenen Ionensignal,  
Bestimmen von Druck in dem Zylinder aufgrund von Verbrennung von dem Zündpunkt bis
  - 25 zu dem Verbrennungsendpunkt unter Verwendung des verbrannten Massenanteils,  
Bestimmen von Druck in dem Zylinder aufgrund von Bewegung eines Kolbens in dem Zylinder von dem Zündpunkt zu dem Verbrennungsendpunkt und  
Bestimmen eines Gesamtdrucks in dem Zylinder von dem Zündpunkt zu dem Verbrennungsendpunkt durch Kombinieren des Drucks aufgrund von Verbrennung mit dem
  - 30 Druck aufgrund von Bewegung des Kolbens in dem Zylinder.



10. Vorrichtung zum Messen eines Ionensignals einer Zündkerze, wobei die Vorrichtung umfaßt:  
einen Messschaltkreis, der ausgeführt ist, einen Strom über einen Spalt einer Zündkerze als  
ein Ionensignal zu messen und  
einen Mikroprozessor, der mit dem Messschaltkreis verbunden ist, wobei der Mikroprozessor  
ausgeführt ist, einen Wendepunkt des Ionensignals zu identifizieren und den verbrannten  
Massenanteil unter Verwendung des Wendepunkts zu bestimmen.

11. Vorrichtung gemäß Anspruch 10, die ferner umfaßt:  
einen mit Erde verbundenen Widerstand,  
eine mit dem Widerstand verbundene Spannungsquelle,  
eine Zündkerze mit einem ersten Spalt, wobei die Zündkerze zwischen Erde und der ersten  
Spannungsquelle geschaltet ist,  
einen zweiten Spalt, der mit einem Punkt zwischen der Spannungsquelle und der Zündkerze  
geschaltet ist und mit einem Zündschaltkreis verbunden ist.

12. Vorrichtung gemäß Anspruch 11, die ferner umfaßt:  
eine Zündspule mit einer primären Spule und einer sekundären Spule, wobei die sekundäre  
Spule zwischen Erde und dem zweiten Spalt geschaltet ist,  
eine zweite Spannungsquelle, die mit der primären Spule verbunden ist.

13. Vorrichtung gemäß Anspruch 12, wobei der zweite Spalt eine geringere  
Durchschlagspannung als die Durchschlagspannung der Zündkerze aufweist.

14. Vorrichtung gemäß Anspruch 10, wobei der Mikroprozessor ferner ausgelegt ist um:  
den verbrannten Massenanteil unter Verwendung eines Ausdrucks darzustellen, der eine erste  
Konstante einschließt, und  
einen Wert für die erste Konstante unter Verwendung des ersten Wendepunkts zu bestimmen,  
wobei das Bestimmen des verbrannten Massenanteils eine Berechnung unter Verwendung  
des Ausdrucks und der ersten Konstanten umfaßt.

15. Verbrennungskraftmaschine, die umfaßt:

einen Zylinder,

einen Kolben, der ausgeführt ist, sich innerhalb des Zylinders aufwärts und abwärts zu bewegen,

5 eine Zündkerze, die in den Zylinder vorspringt, wobei die Zündkerze einen Spalt aufweist, der ausgeführt ist, ein Treibstoff/Luft-Gemisch in dem Zylinder zu zünden und

einen Ionensignal-Messschaltkreis, der ausgeführt ist, ein Ionensignal über den Spalt der Zündkerze zu messen, einen ersten Wendepunkt des Ionensignal zu ermitteln und den verbrannten Massenanteil unter Verwendung des ersten Wendepunkts zu bestimmen.

0895076

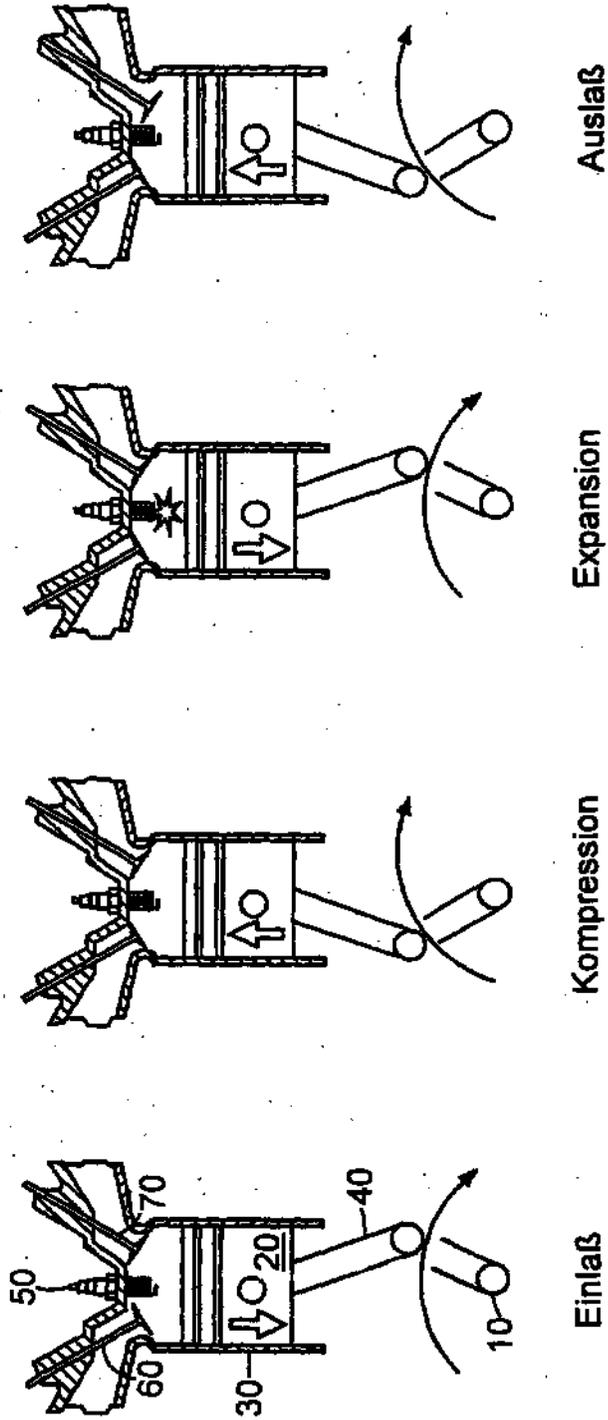


Fig. 1

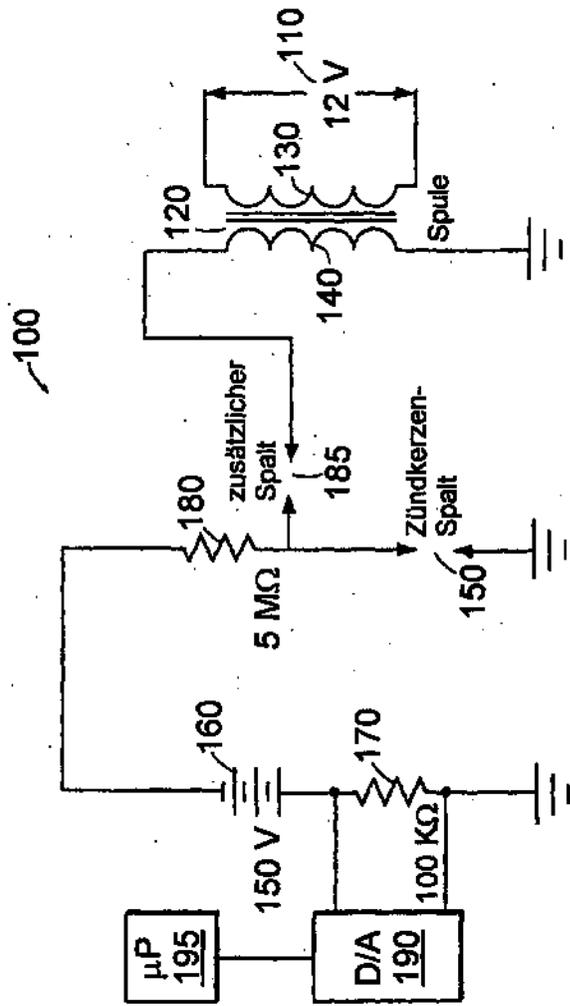


Fig. 2

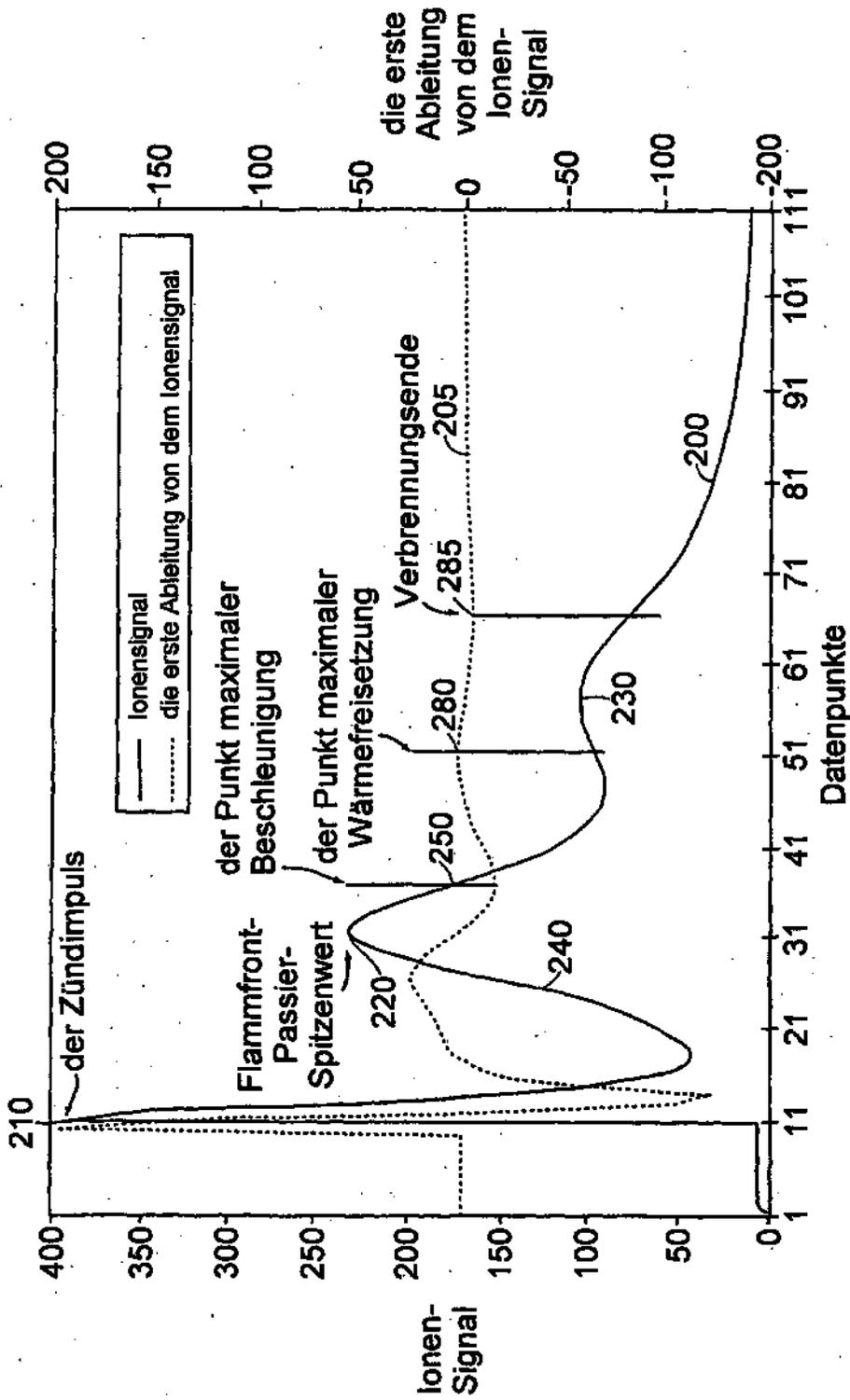


Fig. 3

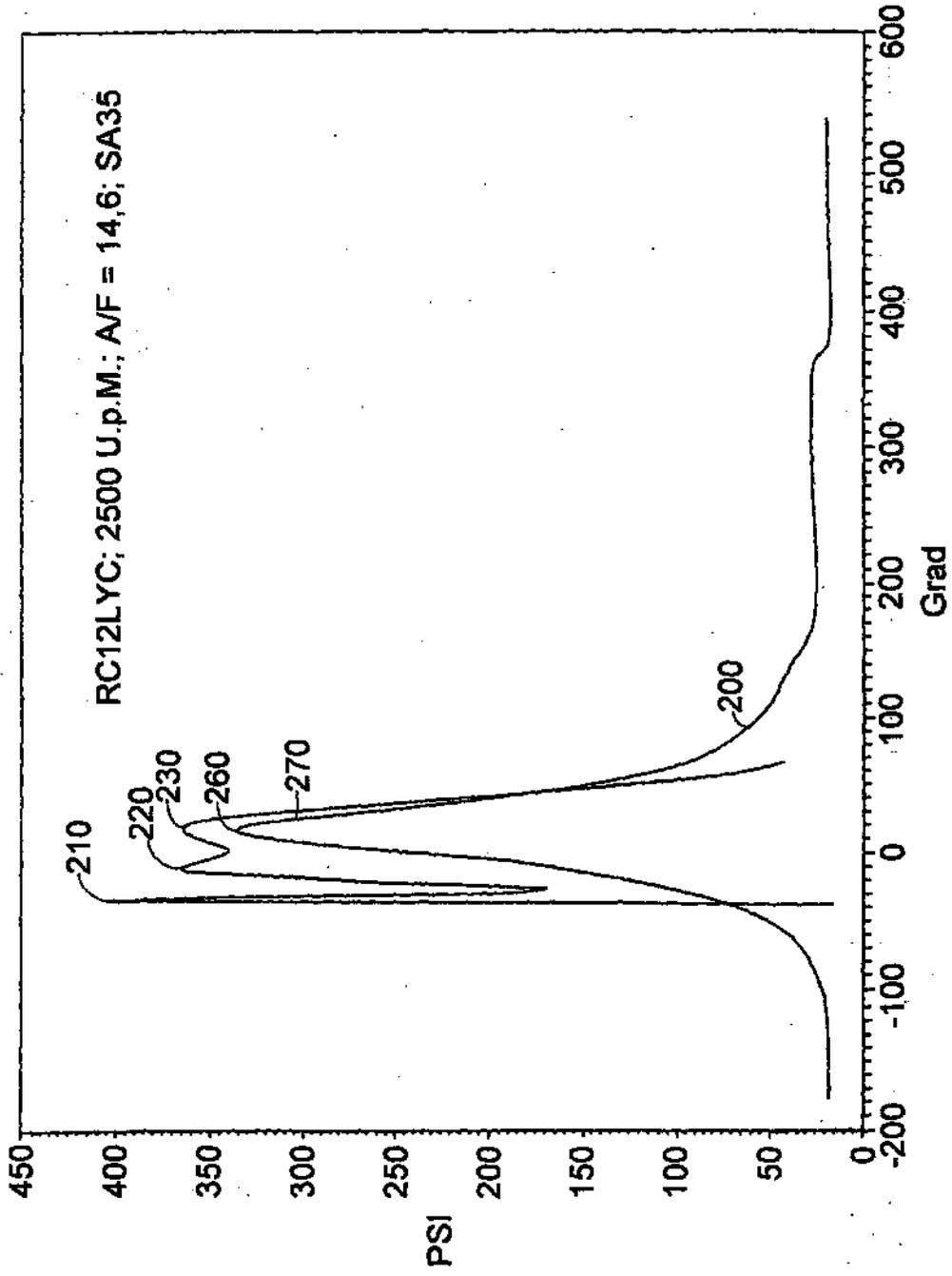


Fig. 4

5/11

210702

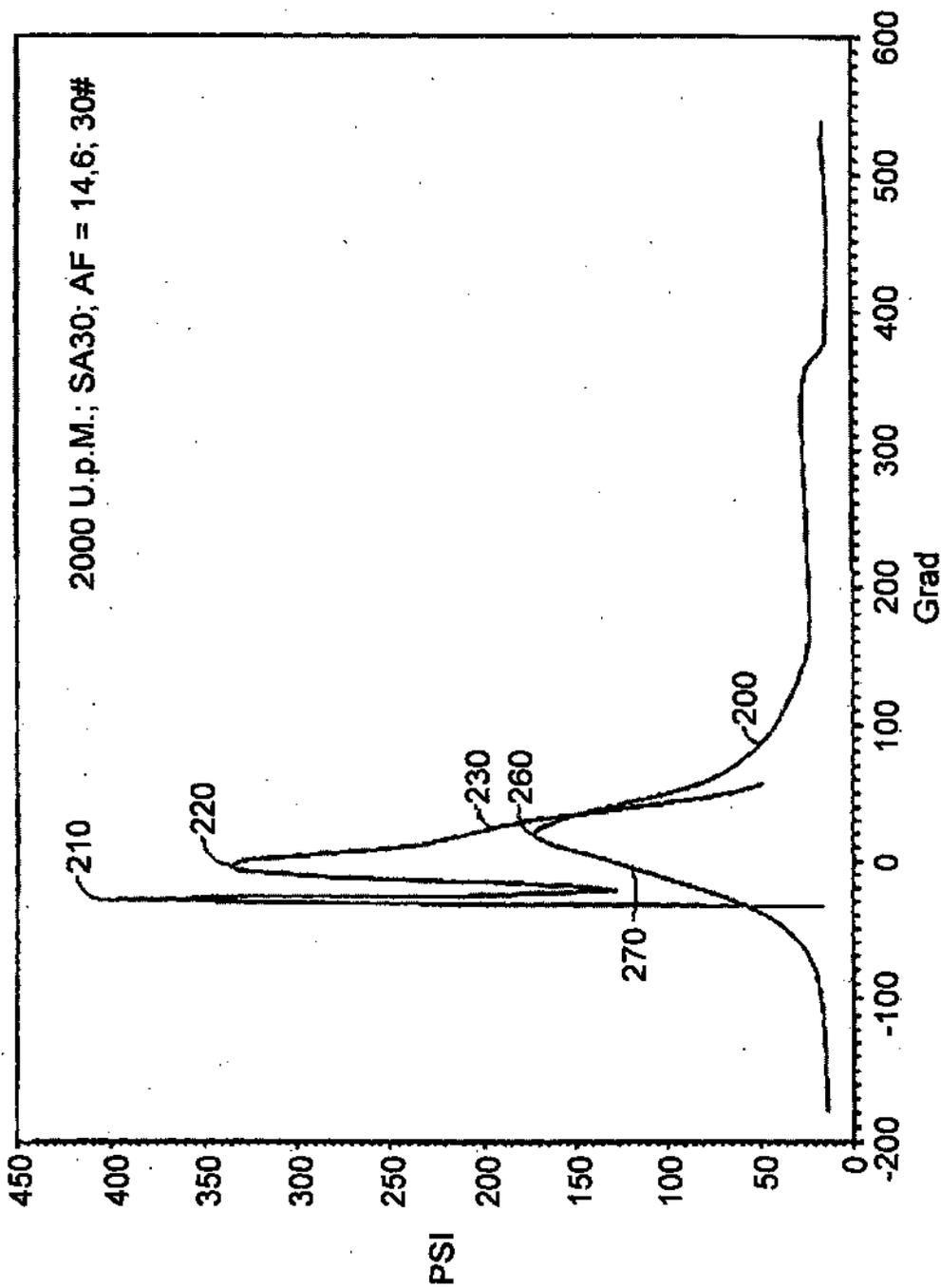


Fig. 5

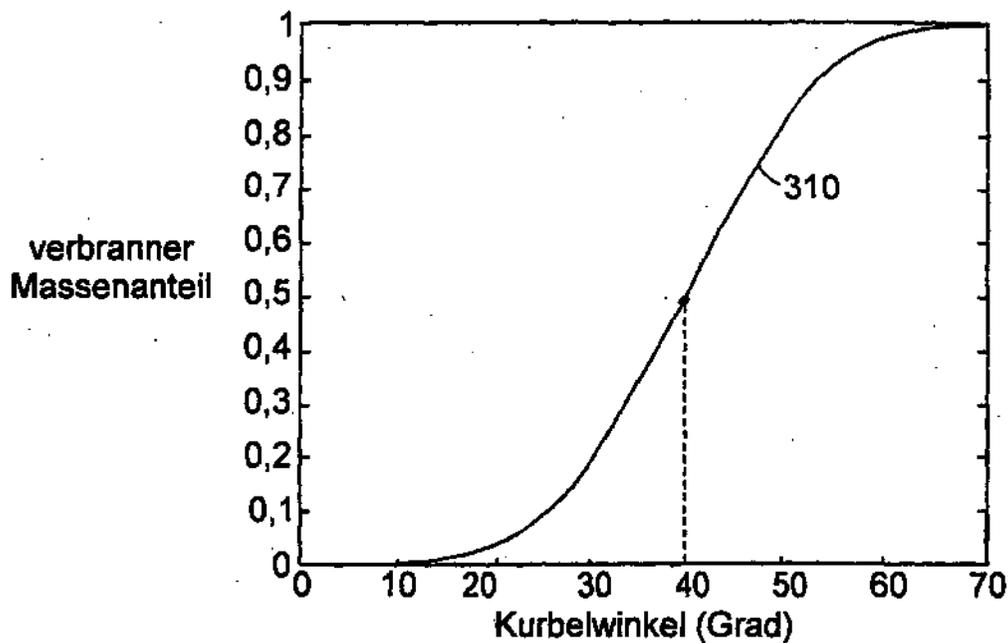


Fig. 6

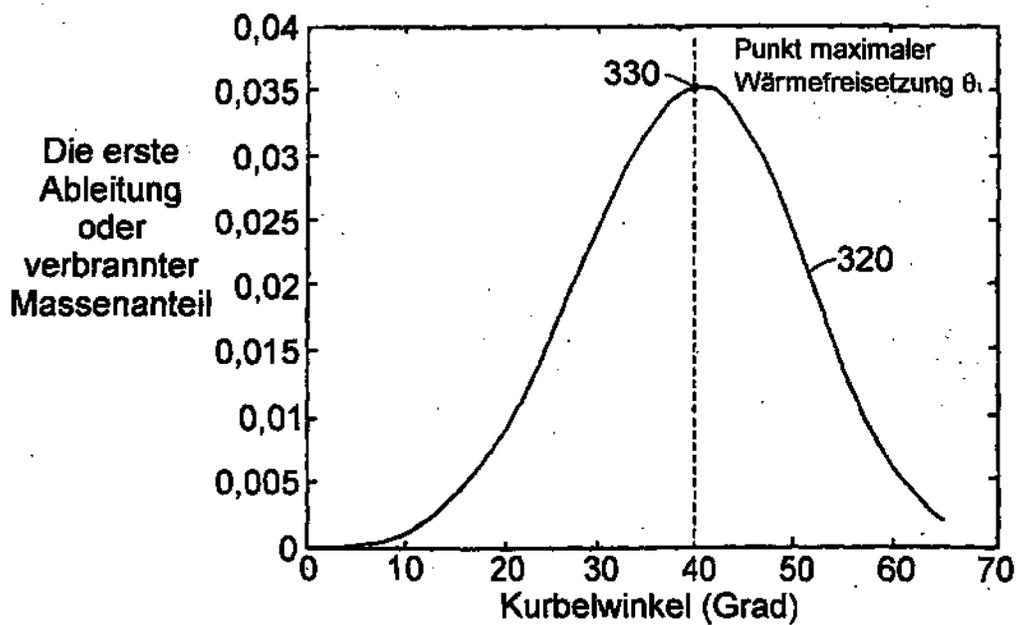


Fig. 7

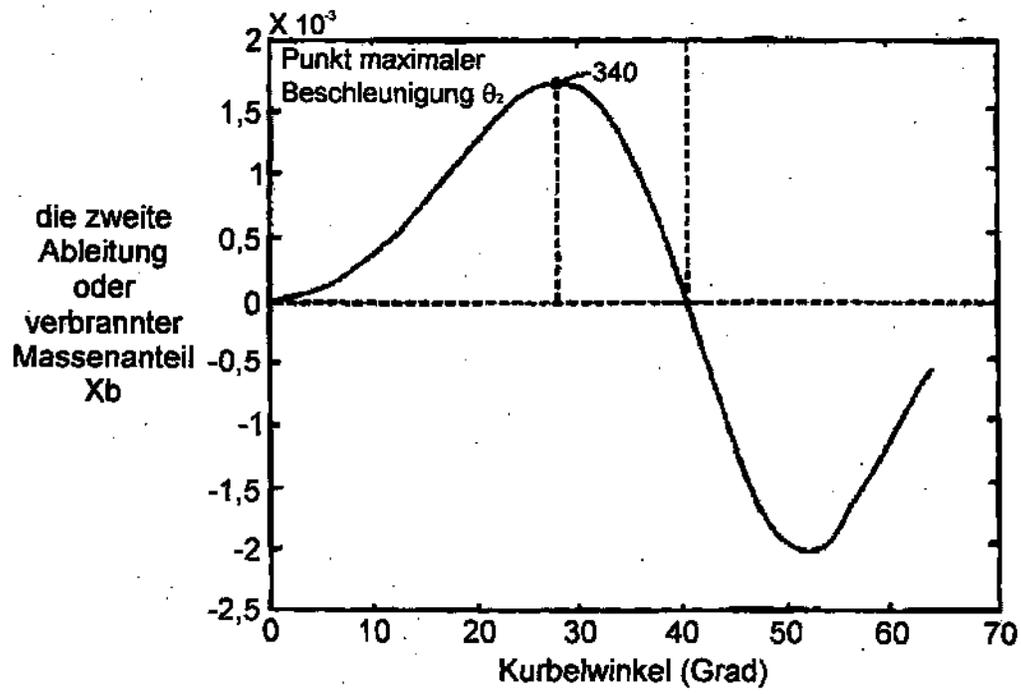


Fig. 8

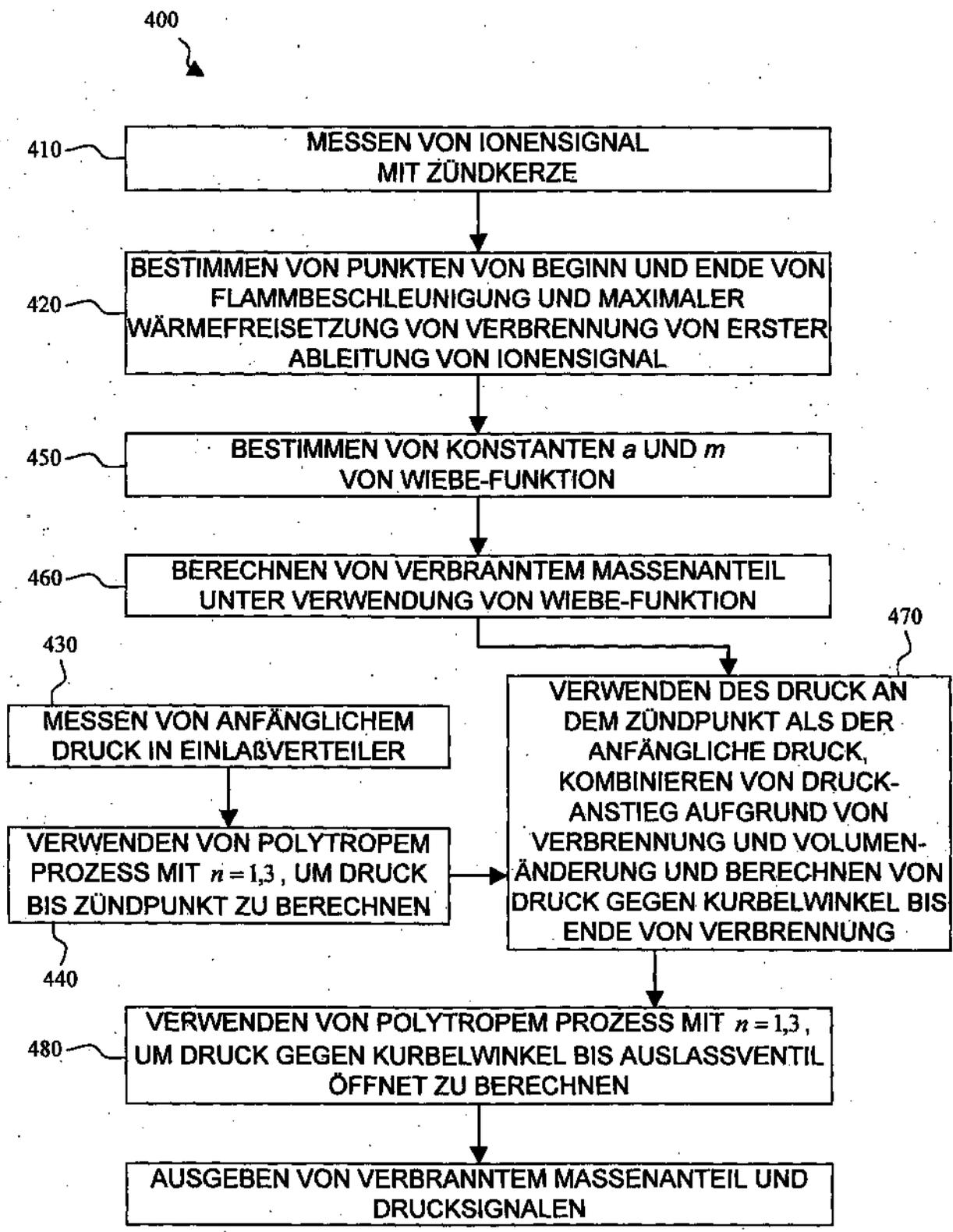


Fig. 9

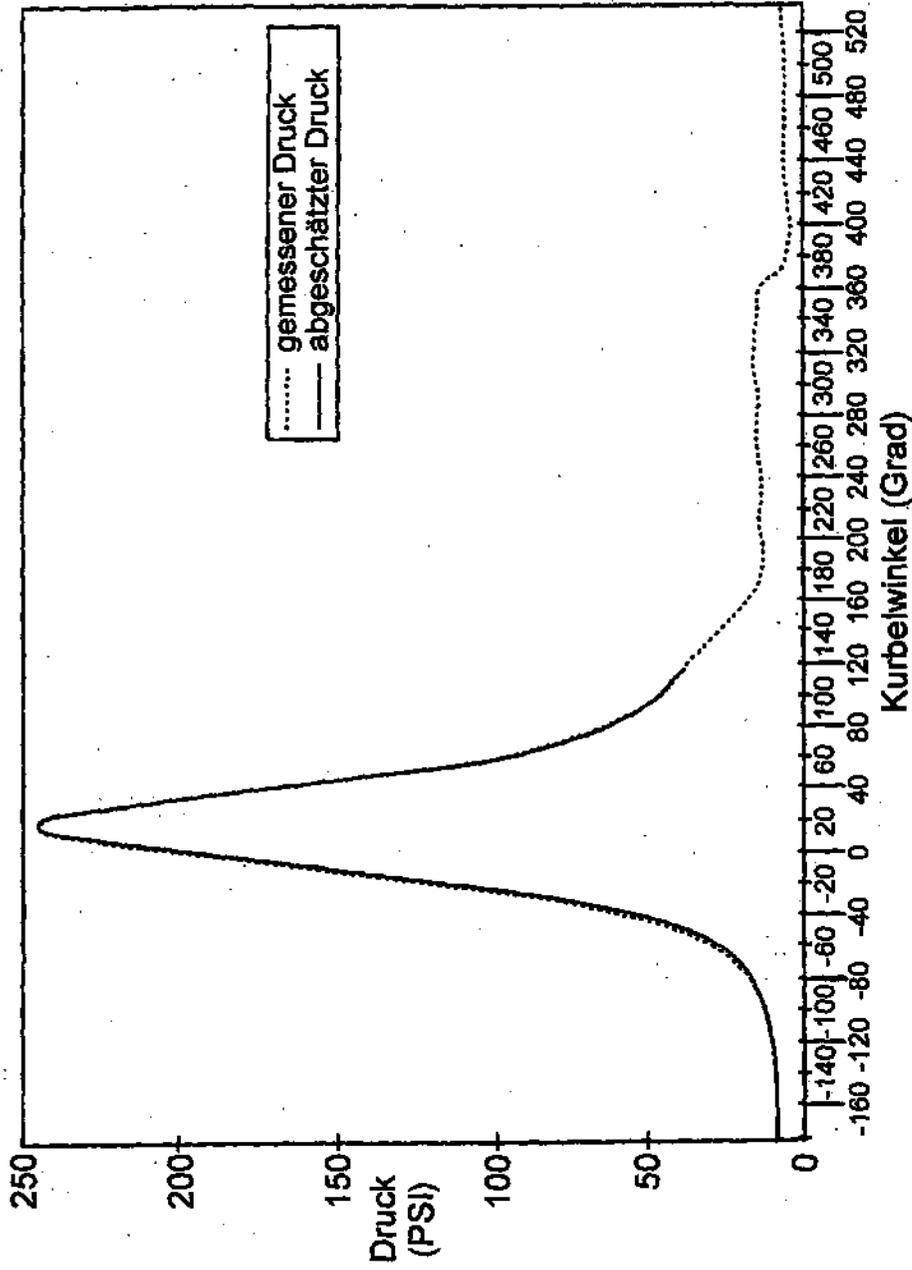


Fig. 10

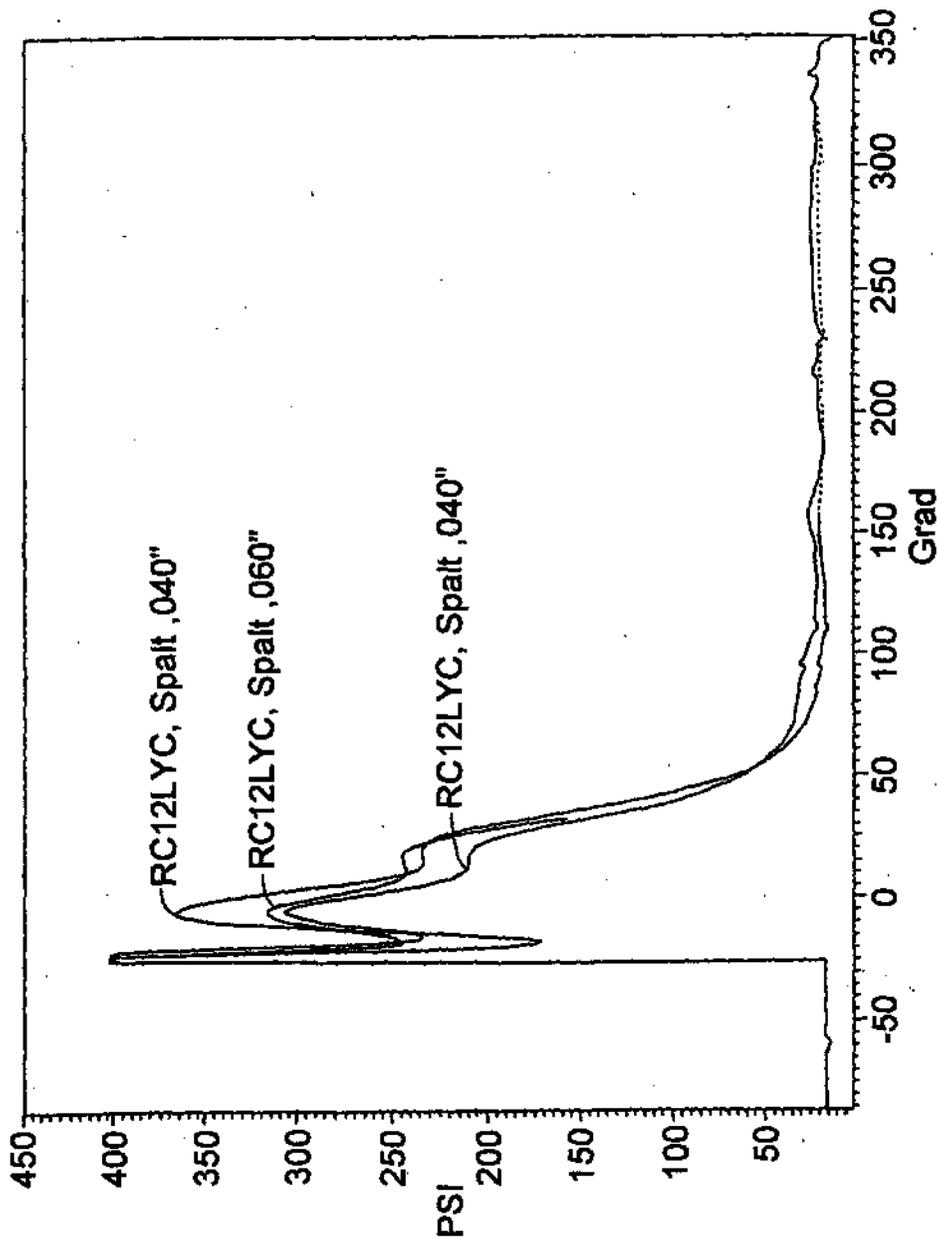


Fig. 11

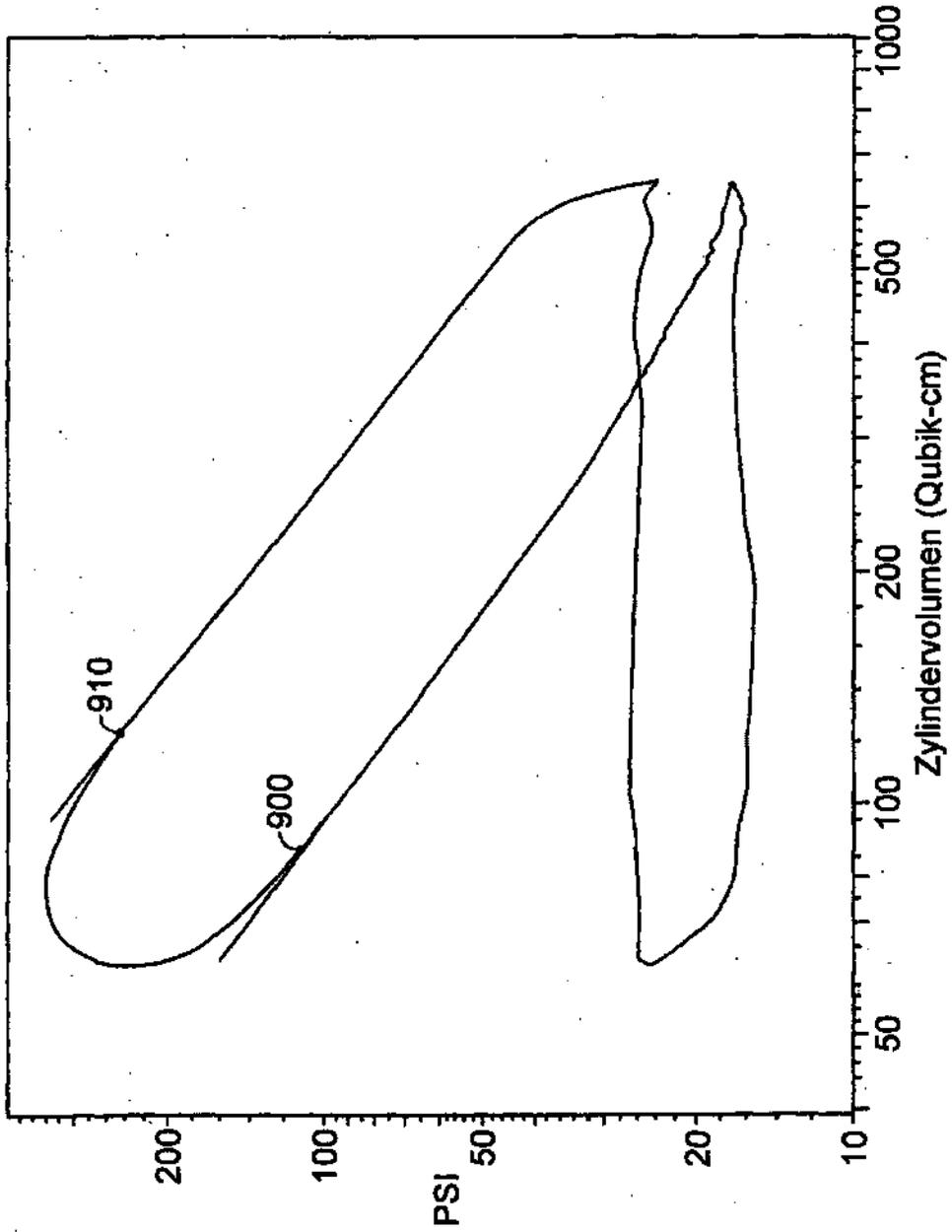


Fig. 12