



(12)

Patentschrift

(21) Aktenzeichen: **P 43 04 441.7**
(22) Anmeldetag: **13.02.1993**
(43) Offenlegungstag: **18.08.1994**
(45) Veröffentlichungstag
der Patenterteilung: **16.02.2012**

(51) Int Cl.: **G05B 13/02 (2006.01)**
F02D 41/14 (2006.01)
F02P 5/15 (2006.01)
F02D 41/02 (2006.01)
F02D 41/26 (2006.01)

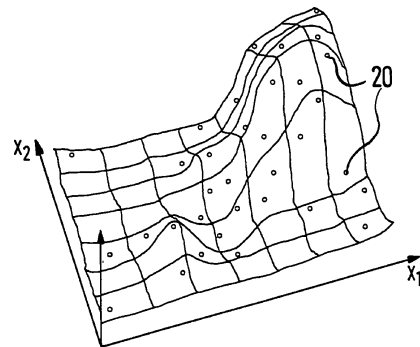
Innerhalb von drei Monaten nach Veröffentlichung der Patenterteilung kann nach § 59 Patentgesetz gegen das Patent Einspruch erhoben werden. Der Einspruch ist schriftlich zu erklären und zu begründen. Innerhalb der Einspruchsfrist ist eine Einspruchsgebühr in Höhe von 200 Euro zu entrichten (§ 6 Patentkostengesetz in Verbindung mit der Anlage zu § 2 Abs. 1 Patentkostengesetz).

(73) Patentinhaber:
Robert Bosch GmbH, 70469, Stuttgart, DE

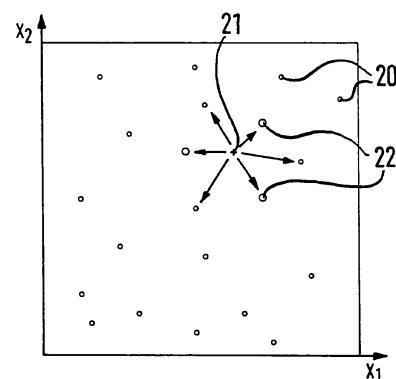
(56) Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht
gezogene Druckschriften:
siehe Folgeseiten

(72) Erfinder:
**Schmitt, Manfred, Dipl.-Ing., W-6148,
Heppenheim, DE; Tolle, Henning, Prof.Dipl.-Ing.
Dr.rer.nat., W-6101, Roßdorf, DE**

(54) Bezeichnung: **Verfahren zum Betreiben eines Prozesses mit Hilfe eines Kennfeldes**



(57) Hauptanspruch: Verfahren zum Betreiben eines Prozesses mit Hilfe eines Kennfeldes, insbesondere eines Prozesses in einem Kraftfahrzeug, mit einem Steuergerät, insbesondere einem Kraftfahrzeug-Steuergerät, wobei das Kennfeld durch Betriebsgrößen des Prozesses aufgespannt wird und durch eine Anzahl von im Speicher des Steuergerätes erbespeicherten Stützstellen repräsentiert wird, wobei pro Stützstelle mindestens eine Nutzinformation über den Wert des Kennfeldes an der Position der Stützstelle im Adreßraum des Kennfeldes im Speicher des Steuergerätes erbespeichert wird, wobei für einen Arbeitspunkt des Prozesses mindestens eine nah am Arbeitspunkt liegende Stützstelle aus dem Kennfeld ausgelesen wird, unter deren Berücksichtigung mindestens eine Steuergröße für die Abgabe eines Steuersignals gebildet wird, dadurch gekennzeichnet, daß pro Stützstelle (20) zusätzlich mindestens eine Information über die Position der Stützstelle (20) innerhalb des Adreßraumes des Kennfeldes im Speicher (12) des Steuergerätes (10) abgespeichert wird, so daß die Stützstellen (20) unabhängig von einem festen Raster der Betriebsgrößen an beliebiger Stelle des Adreßraumes des Kennfeldes platzierbar sind...



(56) Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht
gezogene Druckschriften:

DE	34 38 781	C2
DE	34 08 215	A1
DE	34 36 190	A1
EP	0 151 768	B1

Beschreibung

Stand der Technik

[0001] Die Erfindung geht aus von einem Verfahren nach der Gattung des Hauptanspruchs. Es ist schon ein Verfahren zum Betreiben eines Prozesses mit Hilfe eines Kennfeldes aus der DE-OS 34 08 215 bekannt. Das dortige Verfahren dient zur Steuerung der Betriebskenngrößen einer Brennkraftmaschine. Insbesondere sind daraus Verfahren zur Lambda-Regelung, Klopfregelung, Zündzeitpunkt-Regelung und Einspritz-Regelung bekannt.

[0002] Bei den dortigen Verfahren wird mit Hilfe eines im Speicher des Steuergerätes abgelegten Kennfeldes eine Vorsteuerung der zu regelnden Betriebsgrößen bewirkt. Ein überlagertes Regelungsverfahren führt dann eine multiplikative oder auch additive Beeinflussung der ausgelesenen Kennfeldwerte durch. Darüberhinaus ist es ebenfalls möglich, die Kennfeldwerte an sich mittels der überlagerten Regelung zu verändern. Die Änderung kann sogar ständig während des Betriebes durchgeführt werden, so daß eine Selbstanpassung des Kennfeldes erzielt wird.

[0003] Aus der DE 3436190 ist ein Verfahren zur elektronischen Steuerung eines automatischen Fahrzeuggetriebes bekannt, aus der EP 0151768 ein Kraftstoff-Luft-Gemischzumesssystem für eine Brennkraftmaschine sowie aus der DE 3438781 C2 eine elektronische Steuereinrichtung. In diesen Dokumenten wird ebenfalls eine Regelung auf Basis von Kennfeldwerten beschrieben, ausgehend von einer äquidistanten Stützstellenanordnung, wie im Folgenden erläutert.

[0004] Die Kennfelder werden durch Stützstellen repräsentiert. Dabei sind die Stützstellen nach einem fest vorgegebenen Raster im Kennfeld angeordnet. Pro Stützstelle ist der Wert des Kennfeldes an deren Position im Speicher des Steuergerätes eingeschrieben. Die verwendeten Kennfelder sind maximal dreidimensional. Bei der Bestimmung des Kennfeldwertes für einen Arbeitspunkt, der nicht in einem Knotenpunkt des vorgegebenen Rasters liegt, wird eine Interpolation unter Verwendung der um den Arbeitspunkt liegenden Stützstellen durchgeführt. Bei den dort verwendeten Rasterkennfeldern ergeben sich Probleme bei zeitvarianten Systemen, bei denen eine Kennfeldadaptation erforderlich ist.

[0005] Lernverfahren für Rasterkennfelder müssen einen im allgemeinen an beliebiger Stelle zwischen den Stützstellen liegenden Meßwert auf die umliegenden Stützstellen extrapolieren. Hierdurch ist eine Anpassung der Stützstellen meist nicht in einem Schritt möglich. Vielmehr kann eine bereits gut angepaßte Stützstelle durch einen in der Umgebung ermittelten Korrekturwert wieder verfälscht werden. Durch diese Verkopplung der Stützstellen kann unter ungünstigen Voraussetzungen (Zeitverlauf des Arbeitspunktes und Wahl der Lernparameter) eine Schwingneigung entstehen, die zum abwechselnden Anheben und Absenken der Stützstellen in Form eines Schachbrettmusters führt. Derzeit werden deshalb nur grobe Korrekturen durchgeführt, z. B. multiplikative oder additive Verschiebungen des Gesamtkennfeldes.

[0006] Weiterhin ist die Stützstellendichte nicht lokal anpaßbar, es kann lediglich eine im gesamten Adreßraum gleichermaßen wirksame Linearisierung einzelner Adreßkomponenten durchgeführt werden. Bei grober Quantisierung wird die maximale Kennfelddynamik begrenzt, bei feiner Quantisierung können in selten angefahrenen Bereichen unter Umständen nicht alle Stützstellen häufig genug angepasst werden und es entstehen Wissenslücken. Bei grober Quantisierung und Kennfeldanpassung entstehen Probleme dadurch, daß eine Information nicht am Ort ihres Entstehens eingetragen werden kann.

Vorteile der Erfindung

[0007] Das erfindungsgemäße Verfahren zum Betreiben eines Prozesses mit Hilfe eines Kennfeldes hat dem gegenüber den Vorteil, daß die Stützstellen des Kennfeldes unabhängig von einem festen Raster an beliebiger Stelle des Kennfeldes plazierbar sind. Hierdurch wird es möglich, die Stützstellendichte den lokalen Genauigkeitsanforderungen anzupassen. Hierdurch kann bei minimalem Trainingsaufwand eine sehr hohe lokale Kennfelddynamik, d. h. Steigungsänderung der zu speichernden Funktion, nachgebildet werden. Insbesondere wird der Stützstellenbedarf nur von der geforderten Nachbildungsgenauigkeit, nicht aber von der Kennfelddimension bestimmt, wodurch auch mehrdimensionale Problemstellungen effizient behandelt werden können.

[0008] Da die Stützstellen an beliebiger Stelle im Adreßraum eingetragen werden können, wird die Vermessung und Optimierung durch den Applikateur vereinfacht. Außerdem wird die zentrale Problematik bei der Kennfeldadaptation, die Informationsextrapolation auf umliegende Stützstellen vermieden, wodurch auch eine

effiziente Anpassung der Kennfeldstruktur an Fertigungstoleranzen, Umgebungseinflüsse und Alterungerscheinungen und zwar nicht nur einer von den Rasterkennfeldern bekannten globalen Verschiebung oder Verschiebung von Teilbereichen, sondern eine exakte Anpassung der Kennfeldstruktur durch Anpassung einzelner Stützstellen möglich wird.

[0009] Es ergibt sich die Möglichkeit zur effizienten Realisierung mehrdimensionaler Kennfelder, weil der Speicherbedarf nicht wie beim Rasterkennfeld mit wachsender Kennfelddimension exponentiell steigt, sondern ausschließlich von den vorgegebenen Genauigkeitsanforderungen abhängt. Weiterhin wird es möglich Stützstellen an beliebig vorgegebenen Positionen exakt zu plazieren. Dies ist z. B. zur Plazierung von Stützstellen an Positionen, die für einen Abgastest besonders relevant sind oder bei der Vermessung eines Aggregates auf dem Prüfstand besonders leicht gemessen werden können vorteilhaft.

[0010] Weiterhin vorteilhaft ist, daß bei Anwendung von Lernverfahren zur Anpassung des Kennfeldes an veränderte Bedingungen durch variable Einflußbereiche der Stützstellen der Trainingsaufwand reduziert und Wissenslücken vermieden werden.

[0011] Durch die in den Unteransprüchen aufgeführten Maßnahmen sind vorteilhafte Weiterbildungen und Verbesserungen des im Hauptanspruch angegebenen Verfahrens möglich. So ist es besonders vorteilhaft, Adreß- und Nutzinformation der Stützstelle gleichberechtigt zu speichern. Damit wird ein inverser Kennfeldzugriff, d. h. das Vertauschen der Adreß und Nutzinformation möglich. Dies bringt insbesondere bei lernfähigen Systemen Vorteile, weil eine koordinierte Mitführung zweier separater Rasterkennfelder nur sehr schwer möglich wäre. Weiterhin vorteilhaft ist es, für einzelne Stützstellen oder für Gruppen benachbarter Stützstellen Umgebungsinformationen im Speicher des Steuergerätes abzuspeichern. Da sich der Arbeitspunkt eines technischen Prozesses in aller Regel kontinuierlich mit begrenzter Änderungsgeschwindigkeit durch den Adreßraum des Kennfeldes bewegt, kann das Steuergerät schneller auf die für den Arbeitspunkt relevanten Stützstellen zugreifen. Durch Einführen einer Umgebungsstruktur können eventuell vorhandene Mehrdeutigkeiten beim inversen Kennfeldzugriff aufgelöst werden. Dies ist bei der detailliertesten Umgebungsstruktur, der Stützstellenkopplung über Zeiger, am besten möglich.

[0012] Die Abspeicherung von Zeigern auf die benachbarten Stützstellen für die einzelnen Stützstellen ist vorteilhaft, weil dadurch ein sehr schneller Zugriff zu den benachbarten Stützstellen ermöglicht wird. Die Suche der benachbarten Stützstellen wird dadurch stark vereinfacht. Es ist weiterhin vorteilhaft den Adreßraum des Kennfeldes in mehrere Bereiche zu unterteilen und den einzelnen Bereichen bestimmte Segmente im Speicher des Steuergerätes zuzuweisen und die Stützstellen des jeweiligen Bereiches im entsprechenden Speichersegment abzulegen. Auch dadurch wird eine Umgebungsinformation im Speicher des Steuergerätes abgelegt, so daß die relevanten Stützstellen für einen gegebenen Arbeitspunkt schneller aufgefunden werden können. Das Verfahren ist durch die Aufteilung des Kennfeldes in Bereiche benachbarter Stützstellen besonders geeignet für parallel verarbeitende Hardwarestrukturen, z. B. den Einsatz von inhaltsadressierbaren Speichern.

[0013] Die Durchführung einer Zwischenwertberechnung aus den Kennfeldwerten geeigneter Stützstellen zur Bestimmung eines Kennfeldwertes für einen gegebenen Arbeitspunkt des Prozesses bietet die Möglichkeit einer genauen Wiedergabe des Kennfeldes ohne einen zu großen Speicherbedarf für das Kennfeld zu verursachen. Dabei ist es vorteilhaft diejenigen Stützstellen als geeignete Stützstellen auszuwählen, die nah am Arbeitspunkt liegen und gleichmäßig um diesen verteilt sind. Bei der Auswahl derartiger Stützstellen ist die Wahrscheinlichkeit für eine möglichst genaue Kennfeldnachbildung am größten. Die Wahrscheinlichkeit für die Durchführung von Extrapolationen zur Bestimmung von Kennfeldwerten wird dadurch minimiert. Insbesondere die Kriterien nach den Ansprüchen 7 bis 10 bieten günstige Suchstrategien.

[0014] Weiterhin vorteilhaft ist es, bei der Abstandsberechnung zur Feststellung der möglichst nah am Arbeitspunkt liegenden Stützstellen statt der euklidischen Norm die L_1 -Norm (Cityblock-Distanz) zu bilden, da zur Berechnung der L_1 -Norm weniger Rechenaufwand erforderlich ist. Es ist weiterhin vorteilhaft zur Zwischenwertberechnung in einem n-dimensionalen Kennfeld $n + 1$ Stützstellen heranzuziehen. Auch dadurch wird der Rechenaufwand verringert. Die mehrstufige Auslegung eines Kennfeld-Zugriffs ist ebenfalls vorteilhaft, um ein schnelles Auffinden der geeigneten Stützstellen zu ermöglichen. Dabei ist es vorteilhaft, daß bei einem Zugriff auf Stützstellen des Kennfeldes in einer ersten Stufe der Bereich, in dem die gewünschten Stützstellen enthalten sind, ermittelt wird und daß in einer zweiten Stufe das dem ermittelten Bereich zugeordnete Segment im Speicher des Steuergerätes unstrukturiert nach geeigneten Stützstellen durchsucht wird.

[0015] Weiterhin vorteilhaft ist es, zur Ermittlung des Bereiches, in dem die gewünschten Stützstellen enthalten sind, eine feste Adreßrechnung durchzuführen. Hierdurch wird ein schneller Zugriff auf die grobe Umgebung des aktuellen Arbeitspunktes ermöglicht.

[0016] Eine günstige Bereichseinteilung des Adreßraumes ist eine Einteilung mit orthogonal verlaufenden Bereichsgrenzen, wobei die Unterteilung für jede Adreßkomponente separat durchgeführt wird. Diese Einteilung ist vor allem hinsichtlich der festen Adreßrechnung für die erste Zugriffsstufe vorteilhaft, da der Rechenaufwand dabei gering ist. Die Durchführung einer Bereichseinteilung nach dem Kriterium, daß die Anzahl der Stützstellen in jedem Bereich möglichst gleich groß wird, ist deswegen von Vorteil, weil dadurch größere Zeitunterschiede bei der Durchsuchung von Adreßraumbereichen vermieden werden. Eine günstige Einteilung des Kennfeldes wird erreicht, indem die Bereichsgrenzen manuell oder automatisch so festgelegt werden, daß für jede Adreßkomponente die Gesamtmenge der Stützstellen durch die $(K - 1)$ -Bereichsgrenzen dieser Adreßkomponente in K möglichst gleichgroße Teilmengen benachbarter Stützstellen unterteilt wird. Mit Hilfe dieser Einteilung der Bereichsgrenzen wird eine relativ gleichmäßige Verteilung der Stützstellen auf die einzelnen Bereiche erreicht.

[0017] Eine weitere vorteilhafte Möglichkeit zur Kennfeldunterteilung besteht darin, die Stützstellen eines Bereiches jeweils einem Repräsentativpunkt zuzuordnen, der ebenfalls in den Speicher des Steuergerätes eingeschrieben wird, wobei der Repräsentativpunkt aus den Adreßkomponenten seiner Position im Kennfeld und einem Zeiger auf den Anfang des entsprechenden Speichersegmentes, in dem die Stützstellen des Bereiches abgelegt sind, besteht. Durch diese Maßnahme ist eine freiere Gestaltung der Bereichsgrenzen möglich, um z. B. auch bei lokal stark variierender Stützstellendichte die Stützstellen gleichmäßig auf die Bereiche zu verteilen. Eine einfache Zuordnung der Stützstellen zu einem Repräsentativpunkt wird dadurch erreicht, daß jedem Repräsentativpunkt all diejenigen Stützstellen des Kennfeldes zugeordnet werden, die zu diesem Repräsentativpunkt näher liegen als zu irgendeinem anderen Repräsentativpunkt. Umgekehrt ist es vorteilhaft, die Position jedes Repräsentativpunktes dadurch zu bestimmen, daß die Mittelwerte der Adreßkomponenten aller ihm zugeordneter Stützstellen die Position des Repräsentativpunktes festlegen. Zur Durchführung der ersten Zugriffsstufe kann der aktuelle Kennfeldbereich sehr einfach bestimmt werden, indem der dem aktuellen Arbeitspunkt nächst gelegene Repräsentativpunkt ermittelt wird. Geeignete Interpolationsstützstellen können nun z. B. durch unstrukturiertes Durchsuchen der diesen Punkt zugeordneten Stützstellen ausgewählt werden.

[0018] Weiterhin vorteilhaft ist es, das Kennfeld automatisch an ein verändertes Prozeßverhalten des technischen Prozesses anzupassen. Damit wird eine Lernfähigkeit des Steuergerätes hinsichtlich des Kennfeldes erreicht. Bei der Anpassung des Kennfeldes an ein verändertes Prozeßverhalten ist es vorteilhaft, neue Stützstellen in den Speicher des Steuergerätes einzuschreiben. Eine Korrektur von vorhandenen Stützstellen ist dann nicht mehr erforderlich, die neuen Stützstellen können an beliebiger Stelle des Adreßraumes plaziert werden. Um den Speicherbedarf für das Kennfeld weiter gering zu halten, ist es vorteilhaft ebenfalls alte Stützstellen zu löschen.

[0019] Weiterhin vorteilhaft ist es, zur Abspeicherung der Stützstellen des Kennfeldes und zur Auswahl geeigneter Stützstellen einen inhaltsadressierbaren Speicher zu verwenden. Der Einsatz eines inhaltsadressierbaren Speichers bietet den Vorteil der schnellen Auffindung von geeigneten Stützstellen bei nur geringem Rechenzeitbedarf.

Zeichnung

[0020] Ein Ausführungsbeispiel der Erfindung ist in der Zeichnung dargestellt und in der nachfolgenden Beschreibung näher erläutert. Es zeigen [Fig. 1](#) eine schematische Darstellung einer Anordnung zur Steuerung einer Brennkraftmaschine; [Fig. 2](#) ein dreidimensionales Kennfeld mit einer erfindungsgemäßen Stützstellenverteilung;

[0021] [Fig. 3](#) ein erstes Ausführungsbeispiel für die Aufteilung des Adreßraumes des Kennfeldes mit einer Darstellung der Interpolationsstützstellenauswahl bei einem dreidimensionalen Kennfeld; [Fig. 4](#) eine Darstellung für einen Arbeitspunkt mit ausgewählten Stützstellen des Kennfeldes für einen ein-, zwei und dreidimensionalen Adreßraum; [Fig. 5](#) ein zweites Ausführungsbeispiel für die Aufteilung des Adreßraumes eines dreidimensionalen Kennfeldes; [Fig. 6](#) eine Baumdarstellung der in [Fig. 5](#) gezeigten Adreßraumaufteilung; [Fig. 7](#) ein drittes Ausführungsbeispiel für die Aufteilung des Adreßraumes eines dreidimensionalen Kennfeldes; [Fig. 8](#) ein viertes Ausführungsbeispiel für die Aufteilung des Adreßraumes eines dreidimensionalen Kennfeldes; [Fig. 9](#) eine schematische Darstellung für einen Zugriff zu den Stützstellen des Kennfeldes mit der Adreßraumaufteilung nach [Fig. 8](#); [Fig. 10](#) ein fünftes Ausführungsbeispiel für die Aufteilung des Adreßraumes eines dreidimensiono-

nen Kennfeldes und [Fig. 11](#) ein sechstes Ausführungsbeispiel für die Aufteilung des Adreßraums eines dreidimensionalen Kennfeldes, wobei die Stützstellen miteinander verkettet sind.

Beschreibung der Erfindung

[0022] In [Fig. 1](#) ist mit der Bezugszahl **10** ein Steuergerät bezeichnet. Das Steuergerät ist für die Steuerung eines technischen Prozesses vorgesehen. Als Beispiel wird ein Motorsteuergerät genannt. Dieses steuert als technischen Prozeß den Verbrennungsvorgang einer Brennkraftmaschine. Mit der Bezugszahl **14** ist der technische Prozeß in diesem Fall der Verbrennungsvorgang bei einer Brennkraftmaschine bezeichnet. Der Aufbau des Steuergerätes **10** ist nur grob dargestellt. Die Bezugszahl **11** bezeichnet dabei einen Mikrorechner. Mit der Bezugszahl **12** ist der Speicher des Steuergerätes **10** bezeichnet. Weiterhin ist mit der Bezugszahl **13** eine Ein-/Ausgabeeinheit bezeichnet. Der konkrete Aufbau des Steuergerätes **10** für die Steuerung einer Brennkraftmaschine ist aus dem Stand der Technik hinreichend bekannt. Bei einem 4-Takt-Motor kann sowohl Zündung als auch Benzineinspritzung elektronisch gesteuert werden. Für die Zündwinkelsteuerung berechnet der Mikrorechner **11** den Zündwinkel zwischen zwei Zündvorgängen aus den Informationen Last und Drehzahl. Die Informationen Last und Drehzahl werden dem Steuergerät **10** über angeschlossene Geber zugeführt. Im Speicher **12** des Steuergerätes **10** ist ein komplexes Zündkennfeld gespeichert. Der Mikrorechner **11** entnimmt für die Berechnung des Zündwinkels zwischen zwei Zündvorgängen den zum aktuellen Last- und Drehzahlwert gehörigen Wert aus dem gespeicherten Zündkennfeld. Der vom Mikrorechner **11** aus dem Kennfeld entnommene Zündwinkelwert wird eventuell vom Mikrorechner **11** korrigiert. Dies kann in Abhängigkeit von weiteren Einflußgrößen wie z. B. Motortemperatur, Ansauglufttemperatur oder in Form eines geschlossenen Regelkreises durch Rückführung einer oder mehrerer Prozessgrößen wie Brennraumdruckverlauf, Klopfsignal, Abgastemperatur usw. und Auswertung durch einen geeigneten Regler durchgeführt werden. Das Steuergerät **10** löst dann den Zündvorgang zu dem entsprechenden Zündzeitpunkt aus. Das gleiche Steuergerät **10** übernimmt ebenfalls die Steuerung der Gemischaufbereitung. Dabei werden zum richtigen Zeitpunkt Einspritzventile betätigt, die dann eine definierte Kraftstoffmenge in den Ansaugtrakt des Verbrennungsmotors einspritzen. Die Gemischzusammensetzung ist dabei abhängig vom Betriebszustand des Verbrennungsmotors. Der Mikrorechner **11** bildet die Einspritzzeit aus dem Luftmengensignal, dem Drehzahlsignal und eventueller Korrekturfaktoren. Das Luftmengensignal und das Drehzahlsignal ergeben ein Maß für die Motorlast (Luftmenge pro Hub). Die für den Betriebszustand beste Einspritzmenge entnimmt der Mikrorechner **11** aus einem im Speicher **12** des Steuergerätes **10** abgelegten Einspritz-Kennfeld. Das Einspritz-Kennfeld wird durch die Betriebsparameter Motorlast und Motordrehzahl aufgespannt. Bezüglich weiterer Einzelheiten zu dem Motorsteuergerät wird auf die Druckschrift Bosch Technische Unterrichtung "kombiniertes Zünd und Benzineinspritzsystem", Januar 1983, verwiesen. Im folgenden wird auf das Steuergerät **10** und den zu steuernden Prozeß **14** nur insoweit eingegangen, als er die abgespeicherten Kennfelder und den Zugriff des Mikrorechners **11** auf diese Kennfelddaten betrifft.

[0023] Die [Fig. 2](#) zeigt ein Beispiel eines einfachen Kennfeldes wie es im Speicher **12** des Steuergerätes **10** abgelegt ist. Dabei wird der Adreßraum des Kennfeldes durch die Größen X_1 und X_2 aufgespannt. Diese Größen entsprechen sowohl beim Zündkennfeld als auch beim Einspritz-Kennfeld den Größen Motorlast und Motordrehzahl respektive. Das Kennfeld ist nicht vollständig im Speicher **11** des Steuergerätes **10** enthalten, sondern durch ausgewählte Stützstellen **20** repräsentiert. Die bei herkömmlichen Kennfeldstrukturen übliche Speicherung eines festen Stützstellenrasters und direkter Zugriff auf die aktuellen Stützstellen **20** über eine feste Adreßrechnung, z. B. mit Hilfe von Stützstellentabellen wird zugunsten einer freien Plazierbarkeit der Stützstellen **20** aufgegeben. Stattdessen wird ein neues Stützstellenformat gebildet, bei dem Informationseinheiten, bestehend aus mindestens einer Nutzinformation (Ausgangsgröße, Funktionswert), den zugehörigen Adreßinformationen (Eingangswerte, Position im Adreßraum) und ggfs. Umgebungsinformation (Zeiger auf benachbarte Stützstellen, Ordnungsinformation in Baumstruktur etc.) gespeichert werden. Nutz- und Adreßinformationen werden hierbei gleichberechtigt behandelt, um einen inversen Zugriff (Vertauschen einer Adresse mit der Nutzinformation) zu ermöglichen, falls die Problemstellung dies erfordert. Hierdurch können Stützstellen **20** an jeder beliebigen Stelle im Adreßraum gespeichert und die lokale Stützstellendichte beliebig angepaßt werden. Beim Auslesen der aktuellen Nutzinformation werden die den aktuellen Arbeitspunkt möglichst gut repräsentierenden Stützstellen **20** gesucht. Es werden diejenigen Stützstellen **20** zur Interpolation ausgewählt, die möglichst dicht am Arbeitspunkt liegen und möglichst gleichmäßig um diesen verteilt sind (Arbeitspunkt im Schwerpunkt der Stützstellen, um Extrapolationen zu vermeiden). Nachfolgend werden einige mögliche Adreßraumteilungen von Kennfeldern und Methoden zur Bestimmung der günstigsten Interpolationsstützstellen für einen im Adreßraum des Kennfeldes gegebenen Arbeitspunkt vorgestellt.

[0024] In [Fig. 3](#) ist der Adreßraum für ein dreidimensionales Kennfeld mit eingetragenen Stützstellen **20** dargestellt. Darüberhinaus ist ein aktueller Arbeitspunkt **21** des technischen Prozesses dargestellt. Für jede Stütz-

stelle **20** wird die Adreßinformation, d. h. deren Koordinaten (X_1, X_2) und der zugehörige Funktionswert im Speicher **12** des Steuergerätes **10** eingetragen. Es ist der allgemeine Fall dargestellt, daß der aktuelle Arbeitspunkt **21** nicht mit einer Stützstelle **20** des Kennfeldes übereinstimmt. Um die Information des Kennfeldes für diesen Arbeitspunkt **21** auszulesen, wird eine Interpolation aus den zu dem Arbeitspunkt **21** am nächsten benachbarten Stützstellen **22** durchgeführt. Dabei durchsucht der Mikrorechner **11** den gesamten Adreßraum, d. h. alle abgespeicherten Stützstellen **20** des Kennfeldes nach geeigneten Stützstellen **22**. Er führt dabei eine Abstandsberechnung durch. Dabei ermittelt er den Abstand zwischen einer ausgelesenen Stützstelle **20** und dem aktuellen Arbeitspunkt **21**. Ausgehend von diesen Berechnungen wählt er dann drei geeignete Interpolationsstützstellen **22** aus. Es findet also eine unstrukturierte Suche der für den aktuellen Arbeitspunkt **21** relevantesten Umgebungsstützstellen statt. Den Abstand berechnet der Mikrorechner vorzugsweise nicht nach der euklidischen Norm, sondern nach der L_1 -Norm, die auch unter dem Begriff Cityblockdistanz in der Literatur bekannt ist. Dabei werden die Abstände zwischen zwei Punkten P_1, P_2 im Adreßraum nach der Formel

$$d(x_1, x_2) = \sum_{i=1}^n |x_{2i} - x_{1i}|$$

berechnet. n = Kennfelddimension

[0025] Die Abstandsberechnung ist in [Fig. 3](#) durch Pfeile angedeutet. Der Mikrorechner wählt die drei nächstgelegenen Stützstellen für die Interpolation aus. Handelt es sich um ein n -dimensionales Kennfeld, so wählt er $n + 1$ Stützstellen für die Interpolation aus.

[0026] Der Mikrorechner **11** kann auch so programmiert sein, daß er bei der Auswahl der für die Interpolation geeigneten Stützstellen **22** überprüft, ob der Arbeitspunkt **21** innerhalb der konvexen Hülle des durch die betrachteten Stützstellen **20** gebildeten Simplex liegt. Geringfügige Abweichungen bis zu einem vorgegebenen Maß werden dabei noch toleriert.

[0027] In [Fig. 4](#) wird dieses Kriterium verdeutlicht. Dort ist ein Arbeitspunkt **21** dargestellt, der von den betrachteten Stützstellen **20** umgeben ist. Für ein eindimensionales Kennfeld, d. h. eine Kennlinie, muß der Arbeitspunkt **21** zwischen den zwei ausgewählten Stützstellen **20** liegen. Dies ist in [Fig. 4a](#) dargestellt. Für ein dreidimensionales Kennfeld muß der Arbeitspunkt **21** innerhalb des durch die ausgewählten Stützstellen **20** gebildeten Dreiecks liegen (s. [Fig. 4b](#)). Bei einem dreidimensionalen Kennfeld werden für die Interpolation vier Stützstellen **20** ausgewählt. Der Arbeitspunkt **21** muß dann innerhalb der durch die ausgewählten Stützstellen **20** gebildeten Pyramide liegen. Dies ist in [Fig. 4c](#) dargestellt.

[0028] Der Mikrorechner **11** des Steuergerätes **10** kann auch so programmiert sein, daß er für die Auswahl der geeigneten Stützstellen **22** das Kriterium überprüft, ob die (räumlichen) Winkel, die vom Arbeitspunkt **21** und je zwei Stützstellen **20** aufgespannt werden, möglichst gleich groß sind. Auch hier sind geringfügige Abweichungen bis zu einem vorgegebenen Maß noch tolerierbar. Ein weiteres Kriterium für die Auswahl der geeigneten Stützstellen **22** ist dadurch gegeben, daß bezüglich jeder Adreßkomponente X_1, X_2 Stützstellen oberhalb und unterhalb des Arbeitspunktes **21** liegen. Dieses Kriterium (kartesische Hülle) ist sehr leicht vom Mikrorechner **11** überprüfbar, da er dazu lediglich die Adreßkomponenten (X_1, X_2) der ausgewählten Stützstellen **20** mit den Adreßkomponenten des Arbeitspunktes **21** vergleichen muß.

[0029] [Fig. 5](#) zeigt eine Aufteilung des dreidimensionalen Adreßraumes in unterschiedlich stark verfeinerte Teilbereiche. Durch die Linien L_1 wird der Adreßraum in die vier Teilbereiche B0 bis B3 unterteilt. Der Teilbereich B0 wird durch die Linien L_2 ebenfalls in vier Teilbereiche unterteilt. Der Teilbereich B1 ist durch die Linie L_3 in zwei Teile unterteilt. Der Teilbereich B2 ist durch die Linie L_4 ebenfalls in zwei Teilbereiche unterteilt. Der Teilbereich B3 ist nicht mehr weiter unterteilt. In jedem Teilbereich ist eine Stützstelle eingezeichnet. Mit dieser Art der Einteilung des Adreßraumes kann die Stützstellendichte den Genauigkeitsanforderungen angepaßt werden. In Bereichen sehr starker Kennfelddynamik d. h. hohen Informationsgehalts durch starke Steigungsänderung der gespeicherten Funktion wird die Adreßraumunterteilung sehr fein durchgeführt, in Bereichen kleiner Kennfelddynamik wird sie nur grob durchgeführt.

[0030] Die Aufteilung des Adreßraumes wie in [Fig. 5](#) dargestellt, ist in [Fig. 6](#) in Form einer Baumstruktur gezeigt. Ohne Unterteilung würde der gesamte Adreßraum nur durch eine Stützstelle repräsentiert werden. Von dem Baum wäre dann nur der Stamm S dargestellt. Nach der ersten Unterteilung des Adreßraumes durch die Linien L_1 entstehen vier Teilbereiche B0–B3. Der Teilbereich B0 ist seinerseits in vier Teilbereiche unterteilt, so daß von ihm vier Zweige ausgehen. Der Teilbereich B1 ist nur in zwei Teilbereiche eingeteilt, so daß von

diesem nur zwei Zweige ausgehen. Dabei ist die Unterteilung durch die Linie L_3 so durchgeführt, daß in dem einen Zweig die Teilbereiche UB0 und UB2 und in dem anderen Zweig die Teilbereiche UB1 und UB3 zusammengefaßt sind. Der Teilbereich B2 der ersten Unterteilungsstufe ist seinerseits durch die Linien L_4 in zwei Teilbereiche unterteilt. Dabei ist die Linie L_4 so gezogen, daß in dem einen Zweig die Teilbereiche UB0 und UB1 und in dem anderen Zweig die Teilbereiche UB2 und UB3 zusammengefaßt sind. Der Teilbereich B3 der ersten Unterteilungsstufe ist nicht weiter unterteilt.

[0031] In dem Speicher **12** des Steuergerätes **10** ist für jede Stützstelle eine Positionsinformation hinsichtlich der Baumstruktur abgespeichert. Die Tabelle 1 zeigt für die einzelnen Stützstellen S0 bis S8 die Positionsinformation mit Hilfe von Binärzahlen ausgedrückt. Jede Binärzahl besteht aus zwei zweistelligen Binärzahlen. Mit Hilfe einer zweistelligen Binärzahl lassen sich die Dezimalzahlen 0 bis 3 entsprechend der vier möglichen Bereiche pro Unterteilungsstufe darstellen. Pro Unterteilungsstufe ist eine zweistellige Binärzahl erforderlich. Der Buchstabe d gibt an, daß der Eintrag in die entsprechende Binärstelle beliebig sein kann. Allgemein gilt: die Ordnung des verwendeten Baumes hängt von der Kennfelddimension ab. Für eine Kennlinie ist ein Binärbaum, für ein dreidimensionales Kennfeld ein Quadtree, für drei Dimensionen ein Octtree, für n-Dimensionen ein Baum der Ordnung 2^n zu verwenden.

[0032] Für die Positionsangabe innerhalb des Binärbaumes kann jeweils die binäre Zahlenkodierung, für den Quadtree eine Binärkodierung in zwei Adreßrichtungen verwendet werden, usw..

Tabelle 1

Stützstellennummer	Binärkodierung für Positionsinformation
S0	00 00
S1	00 01
S2	00 10
S3	00 11
S4	01 d0
S5	01 d1
S6	10 0d
S7	10 1d
S8	11 dd

[0033] **Fig. 7** zeigt eine weitere Einteilung des Adreßraumes eines dreidimensionalen Kennfeldes. Der Adreßraum ist durch die Linien L_5 in sechs gleich große Rechtecke **23** unterteilt. Den einzelnen Bereichen des Adreßraumes sind Segmente im Speicher **12** des Steuergerätes **10** zugeordnet. Die Unterteilung des Adreßraumes in Rechtecke **23** (im allgemeinen Fall in Hyperquader) entspricht einer Grobrasterung des Adreßraumes. In **Fig. 7** ist ebenfalls ein Arbeitspunkt **21** eingezeichnet. Bei der Suche der für die Interpolation geeigneten Stützstellen **22** ermittelt der Rechner **11** erst in welchem Rechteck **23** sich der Arbeitspunkt **21** befindet. Die dort enthaltenen Stützstellen **20** werden dann unstrukturiert durchsucht. Dabei wird ebenfalls eine Abstandsberechnung durchgeführt. Es können außerdem die gleichen Auswahlkriterien zur Anwendung kommen, wie in **Fig. 3** bzw. **Fig. 4** beschrieben. Eine derartige Adreßraumaufteilung wie in **Fig. 7** dargestellt, ist wegen der festen Grobrasterung hauptsächlich bei relativ konstanter Stützstellendichte im gesamten Adreßraum effizient.

[0034] **Fig. 8** zeigt eine weitere Adreßraumaufteilung eines dreidimensionalen Kennfeldes. Der Adreßraum ist ebenfalls in Rechteckform (Quaderform) unterteilt. Im Unterschied zu **Fig. 7** sind hier die Rechtecke nicht alle gleich groß. Die Rechteckgröße ist so gewählt, daß in den einzelnen Rechtecken möglichst eine gleich große Stützstellenzahl erreicht wird, nämlich SSG/SBG (SSG = Stützstellen-Gesamtzahl, SBG = Anzahl der Bereiche). Dadurch wird eine grobe Umgebungsstruktur erzeugt. Die Verteilung der Stützstellen **20** innerhalb des Adreßraumes wird durch fortlaufende Kennfeldanpassung während des Betriebs des Steuergerätes **10** ständig verändert. Dies dient dazu, um veränderte Betriebsbedingungen (z. B. Alterungserscheinungen) im Kennfeld zu berücksichtigen. Zur Erhaltung einer gleichmäßigen Verteilung der Stützstellen auf die Rechtecke muß auch die Einteilung des Adreßraumes in die Rechtecke mit Hilfe der Linien L_6 ständig mitgeführt werden. Die dynamische Festlegung der Bereichsgrenzen wird hierbei separat für jede Adreßkomponente durchgeführt. Dies dadurch, indem die Bereichsgrenzen jeder Adreßkomponente so festgelegt werden, daß sie jeweils grobe Bereiche mit SSG/AK-Stützstellen abtrennen (AK = Anzahl der Adreßklassen der betrachteten Adreßkomponente). Durch die Grenzen G1 (X_1) und G2 (X_1) wird der gesamte Adreßraum in drei Bereiche abgeteilt, die

jeweils $19/3 = 6$ bzw. in einem Fall 7 Stützstellen **20** enthalten. Die Anzahl der Bereiche ist nach der Zahl der für einen Lesezugriff zu durchsuchenden Stützstellen zu bestimmen. Die Adreßklassenzahl AK_i der n -Adreßkomponenten kann unterschiedlich groß sein, wenn die Segmentzahl $SEG \neq AK^n$ gewählt werden soll (z. B. $SEG = 2 \times 3 = 6$ anstatt 3×3 wie in [Fig. 8](#)).

[0035] Im folgenden wird eine mögliche Softwarerealisierung der Bereichseinteilung und des Zugriffs des Mikrorechners **11** zu den Stützstellen **20** vorgestellt und anhand der [Fig. 9](#) erläutert. Die Grenzen $G_k(X_i)$, ($i = 1, \dots, n$), ($k = 1, \dots, m$) innerhalb der Adressen X_i werden in separaten Tabellen abgelegt und liefern für jede Adreßkomponente X_i eine Bereichsnummer, im dargestellten Beispiel zwischen eins und drei. Für jeden Bereich sind n Bereichsnummern erforderlich (hier 2). Die beiden Bereichsnummern werden dazu verwendet, um die Anfangsadresse des Adreßraumsegmentes, in dem sich der Arbeitspunkt **21** befindet, aus dem Speicher **12** zu lesen. Dazu ist im Speicher **12** eine zweidimensionale Matrix abgelegt, die die Anfangsadressen der Adreßraumbereiche enthält. In [Fig. 9](#) liegt der Arbeitspunkt **21** im Segment SEG_A . Für diesen Fall wird folgender Zugriff vom Mikrorechner durchgeführt: Der Wert der Adreßkomponente X_1 ist größer als die Grenze $G_1(X_1)$ aber kleiner als $G_2(X_1)$, d. h. bei X_1 wird die Bereichsnummer zwei ermittelt. Bei X_2 wird in gleicher Weise die Bereichsnummer drei ermittelt. Mit der Kombination **(2, 3)** wird nun auf die Matrix der Segmentanfangsadressen zugegriffen. Diese ist in drei Spalten mit je drei Einträgen organisiert, die sequentiell im Speicher des Steuergerätes **10** abgelegt sind, d. h. es wird auf das Element: Startadresse + $(2 - 1) \times 3 + 3$ zugegriffen. Hier ist die Startadresse des zu durchsuchenden Speichersegments eingetragen. Falls die einzelnen Bereiche unmittelbar aufeinanderfolgen, d. h. ohne "Luft" für Neueintragungen im Speicher **12** abgelegt werden sollen, kann die Endadresse aus: "Startadresse des nächsten Blocks -1" ermittelt werden. Sollen aber Stellen für Neueintragungen freigelassen werden, reicht es aus, bis zur letzten belegten Zelle (Endemarkierung) zu suchen, oder es wird am Anfang jedes Segments die Segmentlänge explizit angegeben. Bei direkt aufeinanderfolgenden Segmenten empfiehlt es sich bei zeitkritischen Anwendungen neue Stützstellen **20** zuerst in einem Pufferbereich einzutragen. So können mehrere Neueintragungen gleichzeitig ins Kennfeld einsortiert werden und es ist hierfür nur eine Umsortierung erforderlich. Die gleichzeitig mit einem Neueintrag zu löschenden alten Stützstellen **20** werden sinnvollerweise auch erst beim Einsortieren der neuen Stützstellen **20** gelöscht. Soll die volle Aktualität auch vor dem Einsortieren erhalten bleiben, muß bei jedem Lesezugriff neben dem aktuellen Segment auch der Pufferbereich durchsucht werden.

[0036] Beim Eintragen neuer, und gleichzeitigen Löschen alter Stützstellen verändert sich im allgemeinen die Stützstellenanzahl, in den durch die $G_k(X_i)$ definierten Teilbereichen. Aus diesem Grund sollten die $G_k(X_i)$ nach einer gewissen Zahl von Kennfeldanpassungen neu berechnet werden. Hierzu werden die (im Segmentkopf vermerkten) Längen der zu dem betrachteten Teilbereich gehörenden Segmente addiert und mit dem Sollwert $SSG/AK(X_i)$ verglichen. Bei einer Abweichung von $+\Delta$, werden die Δ der betrachteten Grenze nächstgelegenen Stützstellen **20** dem entsprechenden, oberhalb der Grenze liegenden Bereich zugerechnet und die Grenze neu festgelegt. Diese Überprüfung und ggfs. Anpassung wird für alle Teilbereiche durchgeführt, beginnend jeweils mit dem niederwertigsten Bereich der betrachteten Adreßkomponente. Das beschriebene Verfahren erzeugt eine Klassifikation bei der in einem Bereich maximal SSG/AK Stützstellen, bei ungünstiger, z. B. streng diagonaler Stützstellenverteilung enthalten sind. Bei relativ gleichmäßiger Stützstellenverteilung nähert sich die Stützstellenmaximalzahl dem Idealwert SSG/SEG an.

[0037] Falls zwischen Arbeitspunkt und Segmentrand keine ausreichende Informationsabdeckung vorliegt, d. h. daß in dieser Richtung keine Stützstellen gefunden werden, wird das Nachbarsegment mit durchsucht um Extrapolationen zu vermeiden. Um stärkere Extrapolationen zu erkennen, wird geprüft, ob bezüglich jeder Adreßkomponente (x_i) oberhalb und unterhalb des Arbeitspunktes **21** Stützstellen **20** liegen. Falls eine Extrapolation festgestellt wird und innerhalb des aktuellen Bereichs keine geeignete Stützstelle **20** in Extrapolationsrichtung gefunden wird (dies kann insbesondere am Bereichsrand auftreten), wird der in Hauptextrapolationsrichtung benachbarte Bereich mit durchsucht. Im Zweifelsfall wird der Bereich mit kleinerer Stützstellenzahl ausgewählt, weil hierdurch die Suchzeit minimiert wird.

[0038] Bei der Adreßraumunterteilung können bei ungünstiger Stützstellenverteilung leere Bereiche entstehen. Hierdurch würden rechenzeitintensive Lesezugriffe hervorgerufen, weil mehrere benachbarte Bereiche nach geeigneten Interpolationsstützstellen **22** durchsucht werden müßten. Um dies zu verhindern, kann eine künstliche, vorzugsweise aus umliegenden Stützstellen **20** der angrenzenden Bereiche berechnete (Hilfs-) Stützstelle in der Bereichsmitte eingetragen werden. Mit dieser Maßnahme wird außerdem erreicht, daß immer eine minimale, von den lokalen Genauigkeitsanforderungen abhängige, Stützstellendichte sichergestellt ist. Wird eine höhere Stützstellendichte gewünscht, kann die Minimalzahl der Stützstellen **20** je Bereich entsprechend erhöht werden. Die lokalen Genauigkeitsanforderungen werden hierbei automatisch berücksichtigt, weil

durch die Segmentierung eine Linearisierung der Adreßgrößen bezüglich des (lokalen) Informationsgehalts vorgenommen wird.

[0039] **Fig. 10** zeigt eine weitere Einteilung des Adreßraumes eines dreidimensionalen Kennfeldes in unterschiedliche Bereiche **25**. Der wesentliche Unterschied zu den vorherigen Beispielen liegt darin, daß die Bereiche **25** nicht quaderförmig eingeteilt sind. Die Gesamtheit aller Stützstellen **20** des Kennfeldes wird zu Beginn in Gruppen von jeweils SSG/SEG benachbarten Stützstellen unterteilt. Es empfiehlt sich hierfür die Standard-Stützstellenverteilung für den vorliegenden Anwendungsfall zu verwenden. Die Stützstellen **20** einer Gruppe werden jeweils einem Repräsentativpunkt **24** zugeordnet. Ein Repräsentativpunkt besteht aus n-Adreßkomponenten, die seine Position im Eingangsraum definieren und einem Zeiger auf den Anfang der zugeordneten Stützstellenliste im Speicher **12** des Steuergerätes **10**. Seine Position im Adreßraum ist durch die Mittelwerte der Adreßkomponenten aller ihm zugeordneter Stützstellen **20** bestimmt (Schwerpunkt). Bei fortlaufender Kennfeldanpassung wird eine neue Stützstelle **20** mit der Gewichtung $1/K$ eingearbeitet, während die alte Position mit $(K - 1)/K$ gewichtet wird ($K =$ Stützstellenanzahl der Klasse). Hierdurch paßt sich die Position des Repräsentativpunktes **24** einer veränderten Stützstellenverteilung an. Beim Lesezugriff wird der Abstand des Arbeitspunktes **21** zu allen Repräsentativpunkten **24** gebildet. Der nächstgelegene Repräsentativpunkt wird ausgewählt und die zugehörige Stützstellengruppe durchsucht.

[0040] Wenn Stützstellen **20** neu eingetragen und alte gelöscht werden, muß nach mehreren Neueintragen eine Neuaufteilung der Stützstellen **20** auf die Repräsentativpunkte **24** und Neuberechnung der Positionen der Repräsentativpunkte **24** durchgeführt werden.

[0041] Im Unterschied zur Einteilung des Adreßraumes in Quaderform wird hier der Grobzugriff auf den aktuellen Bereich nicht über eine Adreßrechnung durchgeführt, sondern es wird zweistufig unstrukturiert gesucht. Hierdurch wird die Flexibilität des Verfahrens bezüglich Anordnung und Gestaltung der Bereiche **25** erhöht. Durch das beschriebene Klassifikationsverfahren läßt sich der Suchaufwand auf $2 \times (\text{Stützstellenanzahl})^{1/2}$ reduzieren. Z. B. bei 100 Stützstellen, zehn Repräsentativpunkte a 10 Stützstellen entspricht 20 Suchschritten. In **Fig. 10** ist die Zuordnung der Stützstellen zu den Repräsentativpunkten durch Striche angedeutet.

[0042] Die zuvor beschriebenen Verfahren zur Adreßraumaufteilung erzeugen durch Klassifikation des Adreßraumes eine grobe Umgebungsstruktur. Durch Verfeinerung der Umgebungsstruktur bis auf Stützstellenniveau ist es möglich, auf die Umgebung eines Arbeitspunktes **21** direkt zuzugreifen. Hierzu werden die Stützstellen z. B. über Zeiger mit ausgewählten Nachbarstützstellen gekoppelt. Dies ist in **Fig. 11** dargestellt. Die Pfeile in **Fig. 11** deuten die Verkettung der Stützstellen **20** zu benachbarten Stützstellen an. Weiterhin ist durch die gestrichelte Linie dargestellt, wie der Arbeitspunkt **21** sich langsam durch den Adreßraum des Kennfeldes bewegt. Das Verfahren nutzt die Zusatzinformation, daß die Änderungsgeschwindigkeit des Arbeitspunkts bezogen auf die Zugriffsintervallzeit bei den zugrundeliegenden technischen Problemstellungen begrenzt ist. Es kann deshalb vorausgesetzt werden, daß sich der Arbeitspunkt **21** beim aktuellen Kennfeldzugriff noch in der Umgebung der Stützstellen **20** befindet, die beim vorausgegangenen Kennfeldzugriff zur Interpolation herangezogen wurden. Durch eine Verkettung benachbarter Stützstellen **20** über Zeiger ist somit ein schneller Zugriff auf geeignete Interpolationsstützstellen **12** möglich, ohne ein größeres Adreßgebiet durchsuchen zu müssen. Zu Beginn ist die minimal erforderliche Zeigerzahl zu bestimmen. Um die gesamte Umgebung einer Stützstelle sicher abzudecken sind bei einem n-dimensionalen Kennfeld $n + 1$ linear unabhängige Zeiger ausreichend. Um eine effiziente Realisierung zu ermöglichen und geringen Speicherbedarf sicherzustellen, wird die Zeigerzahl bei allen Stützstellen gleich groß gewählt. Nun wird eine, für das verwendete Interpolationsverfahren optimale Verkettung aller Stützstellen **20** berechnet. Die Auswahl der geeigneten Nachbarstützstellen erfolgt nach denselben Kriterien wie die Auswahl der einen beliebigen Arbeitspunkt umgebenden Interpolationsstützstellen. Beim ersten Zugriff auf das Kennfeld sind die Umgebungsstützstellen des Arbeitspunktes **21** noch nicht bekannt. Die geeigneten Interpolationsstützstellen können entweder über einen festen Einstiegspunkt gefunden werden, wenn der Arbeitspunkt z. B. immer aus dem Kennfeldursprung losläuft, oder es wird einmalig eine unstrukturierte Suche durchgeführt. Danach ist stets ein direkter Zugriff auf benachbarte Stützstellen über Zeiger möglich. Wird eine Korrektur des Kennfeldes erforderlich, d. h. es muß eine neue Stützstelle **20** eingetragen und eine ältere, weniger relevante Stützstelle **20** gelöscht werden, muß auch die Nachbarschaftsverkettung in diesem Bereich geändert werden. Um Rechenzeit zu sparen und zu ermöglichen, daß der Neueintrag einer Stützstelle **20** durch das Löschen einer benachbarten, älteren Stützstelle **20** bezüglich der Verkettung quasi kompensiert wird, können mehrere Korrekturen gesammelt und gemeinsam eingetragen werden. Hierzu werden die neuen Stützstellen zunächst in einem Puffer zwischengespeichert oder sie werden provisorisch, d. h. ohne Anspruch auf optimale Verkettung ins Kennfeld eingetragen. Nach K-Neueintragen wird die Verkettung des Kennfeldes komplett überprüft. Diese Berechnung findet offline in einem Hintergrundprogramm statt.

Automatische Kennfeldgenerierung:

[0043] Sowohl die Stützstellen, d. h. deren Position und ggfs. ihr Funktionswert, als auch die Aufteilung in Adreßraumbereiche bzw. die Festlegung der Repräsentativpunktpositionen können manuell oder automatisch erfolgen.

[0044] Soll eine vorgegebene Stützstellenzahl automatisch, optimal im Kennfeld plaziert werden, können die Stützstellenpositionen und Funktionswerte einem Optimierungsprogramm als Variable vorgegeben werden. Das Optimierungsverfahren variiert nun Positionen und Funktionswerte so lange, bis z. B. die Abweichung der interpolierten Kennfeldflächen von einer vorgegebenen Meßpunktmenge (Soll-Kennfeld) minimal wird. Diese Abweichung wird z. B. dadurch ermittelt, daß für alle Meßpunkte deren Abstand zu dem an dieser Stelle aus dem Kennfeld interpolierten Wert gebildet wird.

[0045] Soll eine vorgegebene Funktion (Meßpunktmenge) mit einem vorgegebenen maximalen Fehlermaß durch möglichst wenig Stützstellen nachgebildet werden (Ermittlung des Informationsgehalts) können mehrere Optimierungsläufe wie zuvor beschrieben durchgeführt werden, wobei die Stützstellenzahl so lange erhöht wird, bis das Fehlermaß erstmalig unterschritten wird.

[0046] Zur automatischen Bereichseinteilung des Adreßraumes mit Hilfe von Repräsentativpunkten müssen lediglich die Repräsentativpunkte optimal positioniert werden. Dies kann geschehen, indem die Repräsentativpunktpositionen einem Optimierungsprogramm als Variable vorgegeben werden. Das Optimierungsprogramm variiert die Positionen so lange, bis z. B. der mittlere Abstand aller Stützstellen zum jeweils nächstgelegenen Repräsentativpunkt minimal wird.

[0047] Für die Bereichseinteilung des Adreßraumes kann es für bestimmte Anwendungen sinnvoll sein in Bereichen, in denen sich der Arbeitspunkt sehr häufig aufhält, weniger Stützstellen einzutragen, als in Bereichen, in denen sich der Arbeitspunkt häufig aufhält, weil hierdurch die mittlere Suchzeit minimiert, d. h. die Zugriffszeit verringert wird.

[0048] Dem hier beschriebenen Verfahren eröffnet sich ein breites Anwendungsfeld. Es ist insbesondere für den Einsatz in Großseriensteuergeräten geeignet. Außer den genannten Anwendungsfällen werden noch die Anwendungen Fahrwerkregelung, Dieselregelung, Hinterachslenkung genannt. Dabei kann die aus dem Kennfeld ausgelesene Information auch zur Ermittlung einer zur Steuerung oder Regelung des Prozesses wichtigen aber nicht gemessenen Betriebsgröße dienen.

Patentansprüche

1. Verfahren zum Betreiben eines Prozesses mit Hilfe eines Kennfeldes, insbesondere eines Prozesses in einem Krafffahrzeug, mit einem Steuergerät, insbesondere einem Krafffahrzeug-Steuergerät, wobei das Kennfeld durch Betriebsgrößen des Prozesses aufgespannt wird und durch eine Anzahl von im Speicher des Steuergerätes erbespeicherten Stützstellen repräsentiert wird, wobei pro Stützstelle mindestens eine Nutzinformation über den Wert des Kennfeldes an der Position der Stützstelle im Adreßraum des Kennfeldes im Speicher des Steuergerätes erbespeichert wird, wobei für einen Arbeitspunkt des Prozesses mindestens eine nah am Arbeitspunkt liegende Stützstelle aus dem Kennfeld ausgelesen wird, unter deren Berücksichtigung mindestens eine Steuergröße für die Abgabe eines Steuersignals gebildet wird, **dadurch gekennzeichnet**, daß pro Stützstelle **(20)** zusätzlich mindestens eine Information über die Position der Stützstelle **(20)** innerhalb des Adreßraumes des Kennfeldes im Speicher **(12)** des Steuergerätes **(10)** abgespeichert wird, so daß die Stützstellen **(20)** unabhängig von einem festen Raster der Betriebsgrößen an beliebiger Stelle des Adreßraumes des Kennfeldes plazierbar sind und daß zur Auswahl der mindestens einen möglichst nah am Arbeitspunkt **(21)** liegenden Stützstelle eine Abstandsberechnung durchgeführt wird, bei der der Abstand von mindestens einer Stützstelle des Kennfeldes zum Arbeitspunkt **(21)** berechnet wird.

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß Adreß und Nutzinformation der Stützstellen **(20)** gleichberechtigt gespeichert werden, um einen inversen Kennfeldzugriff zu ermöglichen.

3. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß für einzelne Stützstellen **(20)** oder für Gruppen benachbarter Stützstellen **(20)** Umgebungsinformationen im Speicher **(12)** des Steuergerätes **(10)** abgespeichert werden.

4. Verfahren nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, daß als Umgebungsinformation Zeiger auf die benachbarten Stützstellen (20) für die einzelnen Stützstellen (20) im Speicher (12) des Steuergerätes (10) abgespeichert werden.
5. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß der Adreßraum des Kennfeldes in mehrere Bereiche unterteilt wird, daß den einzelnen Bereichen bestimmte Segmente im Speicher (12) des Steuergerätes (10) zugewiesen werden und daß die Stützstellen (20) des jeweiligen Bereiches im entsprechenden Speichersegment abgelegt werden.
6. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß zu einer Bestimmung des Kennfeldwertes des Arbeitspunktes (21) des Prozesses eine Zwischenwertberechnung, vorzugsweise eine Interpolation, aus den Kennfeldwerten einer Anzahl nah am Arbeitspunkt (21) und gleichmäßig um diesen verteilt liegender Stützstellen (20) des Kennfeldes durchgeführt wird.
7. Verfahren nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, daß die nah am Arbeitspunkt (21) und gleichmäßig um diesen verteilt liegenden Stützstellen (20) so ausgewählt werden, daß der Arbeitspunkt (21) innerhalb des durch sie aufgespannten Simplex liegt.
8. Verfahren nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, daß die nah am Arbeitspunkt (21) und gleichmäßig um diesen verteilt liegenden Stützstellen (20) so ausgewählt werden, daß die Winkel, die vom Arbeitspunkt (21) und je zwei Stützstellen (20) aufgespannt werden, möglichst gleich groß werden.
9. Verfahren nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, daß die nah am Arbeitspunkt (21) und gleichmäßig um diesen verteilt liegenden Stützstellen (20) so ausgewählt werden, daß bezüglich jeder Adreßkomponente Stützstellen (20) oberhalb und unterhalb des Arbeitspunktes (21) liegen.
10. Verfahren nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, daß die nah am Arbeitspunkt (21) und gleichmäßig um diesen verteilt liegenden Stützstellen (20) so ausgewählt werden, daß der Arbeitspunkt (21) im Schwerpunkt der ausgewählten Stützstellen (20) liegt.
11. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 6, dadurch gekennzeichnet, daß bei der Abstandsberechnung die L1-Norm gebildet wird.
12. Verfahren nach einem der Ansprüche 6 bis 11, dadurch gekennzeichnet, daß zur Zwischenwertberechnung in einem n-dimensionalen Kennfeld $n + 1$ Stützstellen (20) herangezogen werden.
13. Verfahren nach einem der Ansprüche 5 bis 12, dadurch gekennzeichnet, daß ein Zugriff zu den Stützstellen (20) des Kennfeldes mehrstufig, insbesondere zweistufig, durchgeführt wird.
14. Verfahren nach Anspruch 13 dadurch gekennzeichnet, daß bei einem Zugriff zu Stützstellen (20) des Kennfeldes in einer ersten Stufe der Bereich, in dem die gewünschten Stützstellen (20) enthalten sind ermittelt wird, und daß in einer zweiten Stufe das dem ermittelten Bereich zugeordnete Segment im Speicher (12) des Steuergerätes (10) unstrukturiert nach geeigneten Stützstellen (20) durchsucht wird.
15. Verfahren nach Anspruch 14, dadurch gekennzeichnet, daß zur Ermittlung des Bereiches, in dem die gewünschten Stützstellen (20) enthalten sind, eine feste Adressrechnung, abhängig von der Arbeitspunktposition (21) durchgeführt wird.
16. Verfahren nach einem der Ansprüche 5 bis 15, dadurch gekennzeichnet, daß die Adreßraumbereiche quaderförmig eingeteilt werden und die Unterteilung des Adreßraumes für jede Adreßkomponente (x_1 , x_2) separat durchgeführt wird.
17. Verfahren nach einem der Ansprüche 5 bis 16, dadurch gekennzeichnet, daß die Bereichseinteilung so gewählt wird, daß die Anzahl der Stützstellen (20) in jedem Bereich möglichst gleich groß wird.
18. Verfahren nach einem der Ansprüche 15 bis 17, dadurch gekennzeichnet, daß die Bereichsgrenzen zwischen den einzelnen Adreßraumbereichen für jede Adreßkomponente (x_1 , x_2) in einer separaten Tabelle im Speicher (12) des Steuergerätes (10) abgelegt werden.

19. Verfahren nach einem der Ansprüche 5 bis 16, dadurch gekennzeichnet, daß die Bereichsgrenzen manuell oder automatisch so festgelegt werden, daß für jede Adreßkomponente (x_1 , x_2) die Gesamtmenge der Stützstellen (**20**) durch eine erste Anzahl Bereichsgrenzen dieser Adreßkomponente (x_1 , x_2) in eine zweite Anzahl möglichst gleichgroßer Teilmengen benachbarter Stützstellen (**20**) unterteilt wird, wobei die zweite Anzahl der um Eins vermehrten ersten Anzahl entspricht.

20. Verfahren nach einem der Ansprüche 5 bis 19, dadurch gekennzeichnet, daß die Startadressen der Segmente in Form einer Matrix im Speicher (**12**) des Steuergerätes (**10**) abgelegt werden.

21. Verfahren nach einem der Ansprüche 5 bis 14, dadurch gekennzeichnet, daß die Stützstellen (**20**) eines Bereiches jeweils einem Repräsentativpunkt (**24**) zugeordnet werden, der ebenfalls in den Speicher (**12**) des Steuergerätes (**10**) eingeschrieben wird, wobei der Repräsentativpunkt (**24**) aus den Adreßkomponenten (x_1 , x_2) seiner Position im Kennfeld und einem Zeiger auf den Anfang des entsprechenden Speichersegmentes, in dem die Stützstellen (**20**) des Bereiches abgelegt sind, besteht.

22. Verfahren nach Anspruch 21, dadurch gekennzeichnet, daß dem Repräsentativpunkt (**24**) als Umgebungsinformation ein Verweis auf benachbarte Repräsentativpunkte (**24**) zugeordnet wird.

23. Verfahren nach Anspruch 21 oder 22, dadurch gekennzeichnet, daß jedem Repräsentativpunkt (**24**) all diejenigen Stützstellen (**20**) des Kennfeldes zugeordnet werden, die zu diesem Repräsentativpunkt (**24**) näher liegen als zu irgendeinem anderen Repräsentativpunkt (**24**).

24. Verfahren nach einem der Ansprüche 21 bis 23, dadurch gekennzeichnet, daß die Position jedes Repräsentativpunktes (**24**) durch die Mittelwerte der Adreßkomponenten (x_1 , x_2) aller ihm zugeordneter Stützstellen (**20**) bestimmt ist.

25. Verfahren nach einem der Anspruch 21 bis 24, dadurch gekennzeichnet, daß zur Ermittlung des Bereiches, in dem die gewünschten Stützstellen (**20**) enthalten sind, eine unstrukturierte Suche derart durchgeführt wird, daß der aktuelle Kennfeldbereich durch Ermitteln des nächstgelegenen Repräsentativpunktes (**24**) bestimmt wird.

26. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, daß zur Auswahl der nah am Arbeitspunkt (**21**) liegenden Stützstellen (**20**) die Stützstellen (**20**) des Kennfeldes unstrukturiert durchsucht werden.

27. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß das Kennfeld an ein verändertes Prozessverhalten manuell oder automatisch angepaßt wird.

28. Verfahren nach Anspruch 27, dadurch gekennzeichnet, daß zur Anpassung des Kennfeldes neue Stützstellen (**20**) in den Speicher (**12**) des Steuergerätes (**10**) eingeschrieben werden.

29. Verfahren nach Anspruch 28, dadurch gekennzeichnet, daß ebenfalls alte Stützstellen (**20**) gelöscht werden, um einen vorgegebenen Speicherbedarf einzuhalten.

30. Verfahren nach Anspruch 28 oder 29, dadurch gekennzeichnet, daß eine Bereichseinteilung des Kennfeldes erst nach einer vorbestimmten Anzahl von Neueintragungen durchgeführt wird.

31. Verfahren nach Anspruch 30, dadurch gekennzeichnet, daß die Bereichseinteilung mit niedriger Priorität im Hintergrundprogramm des Steuergerätes (**10**) durchgeführt wird.

32. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß zur Abspeicherung der Stützstellen (**20**) des Kennfeldes und zur Auswahl der mindestens einen nah am Arbeitspunkt (**21**) liegenden Stützstelle (**20**) ein inhaltsadressierbarer Speicher (**12**) verwendet wird.

Es folgen 7 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

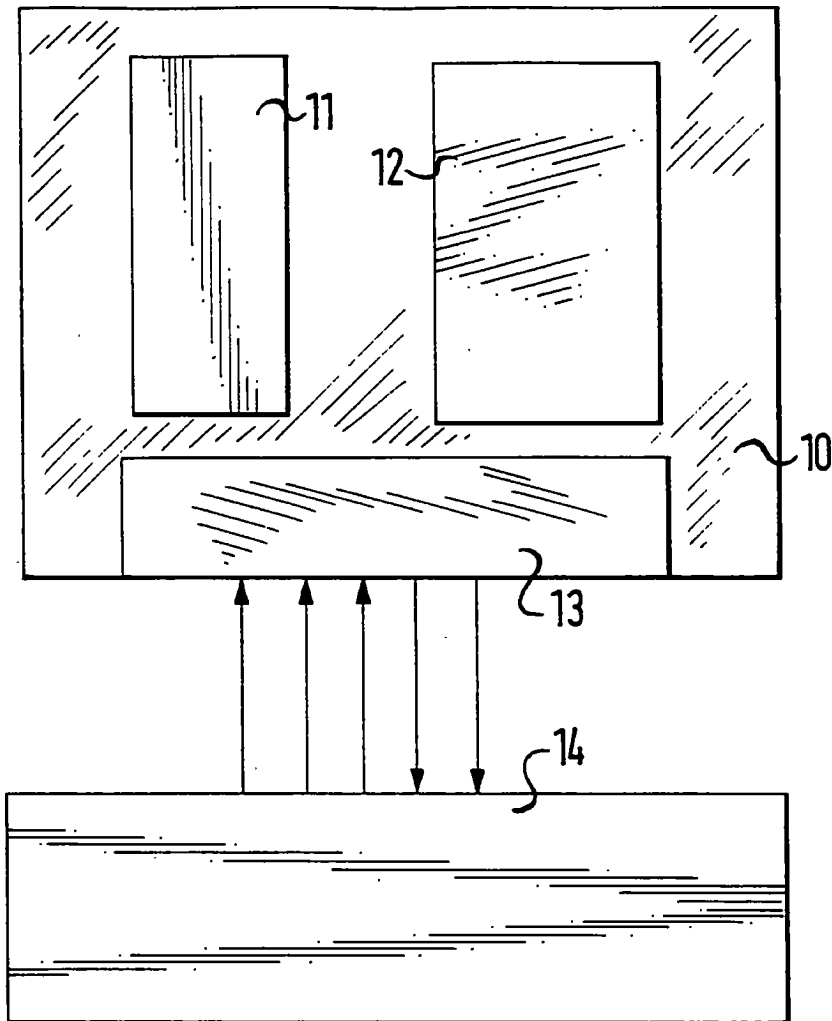


FIG. 1

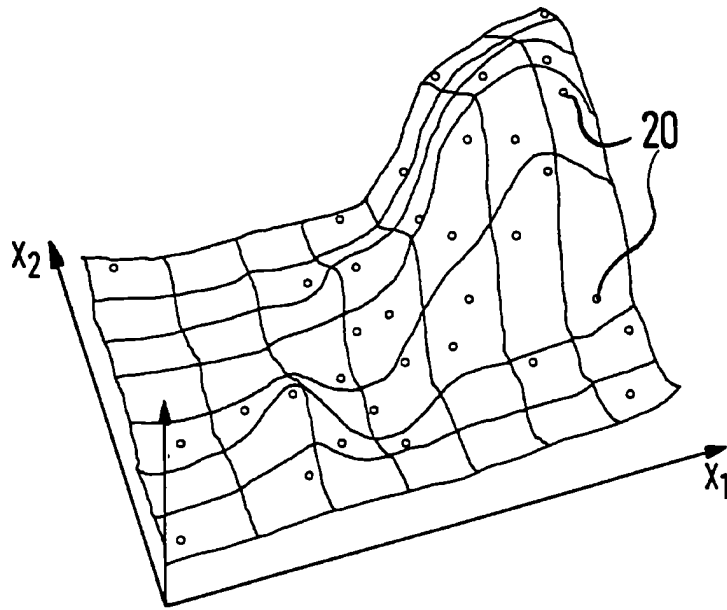


FIG. 2

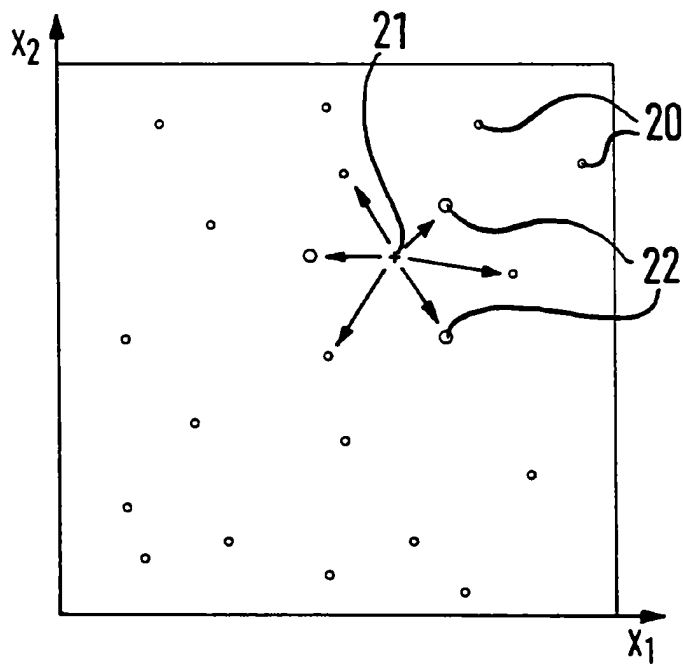


FIG. 3

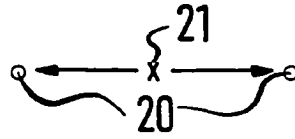


FIG. 4a

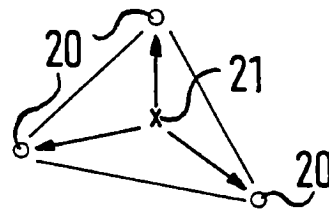


FIG. 4b

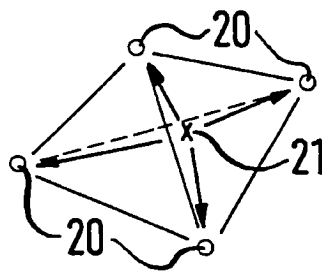


FIG. 4c

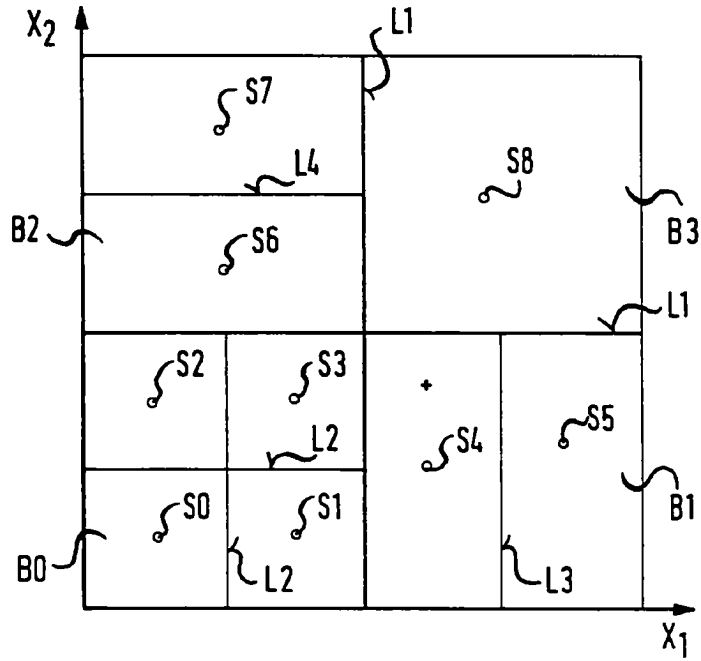


FIG. 5

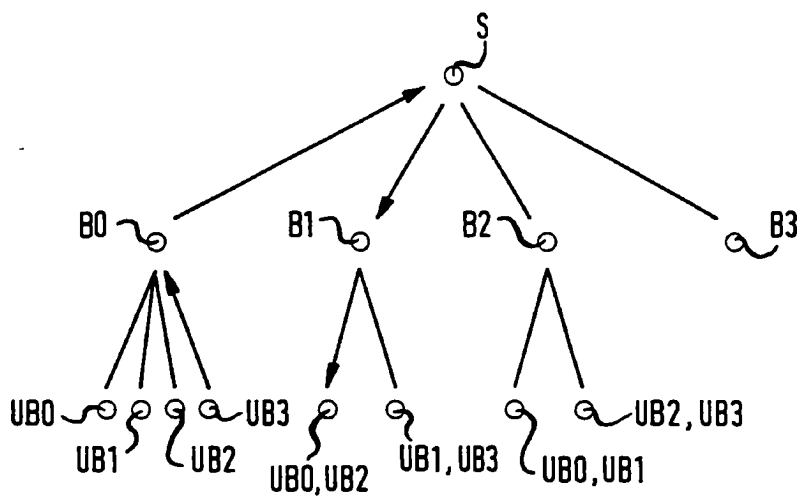


FIG. 6

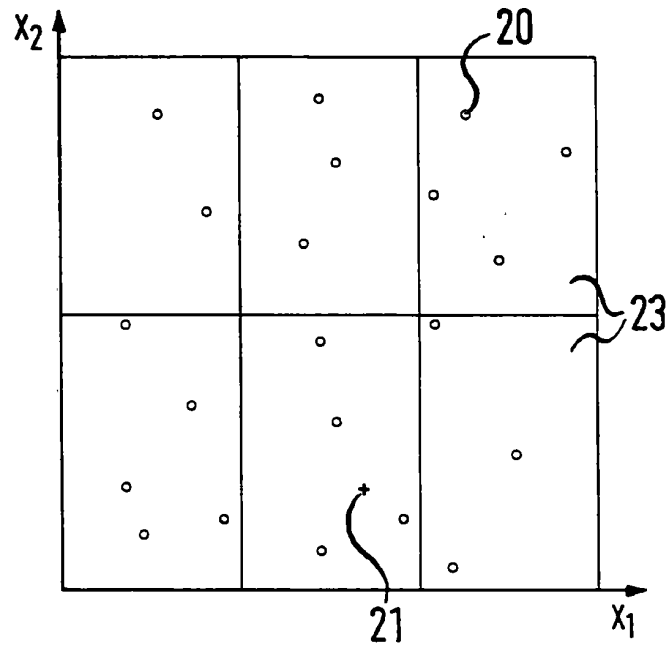


FIG. 7

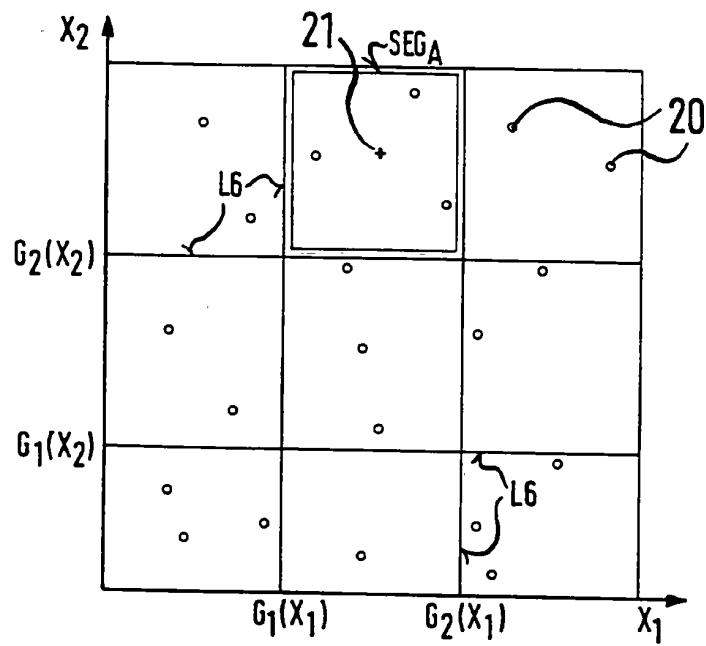


FIG. 8

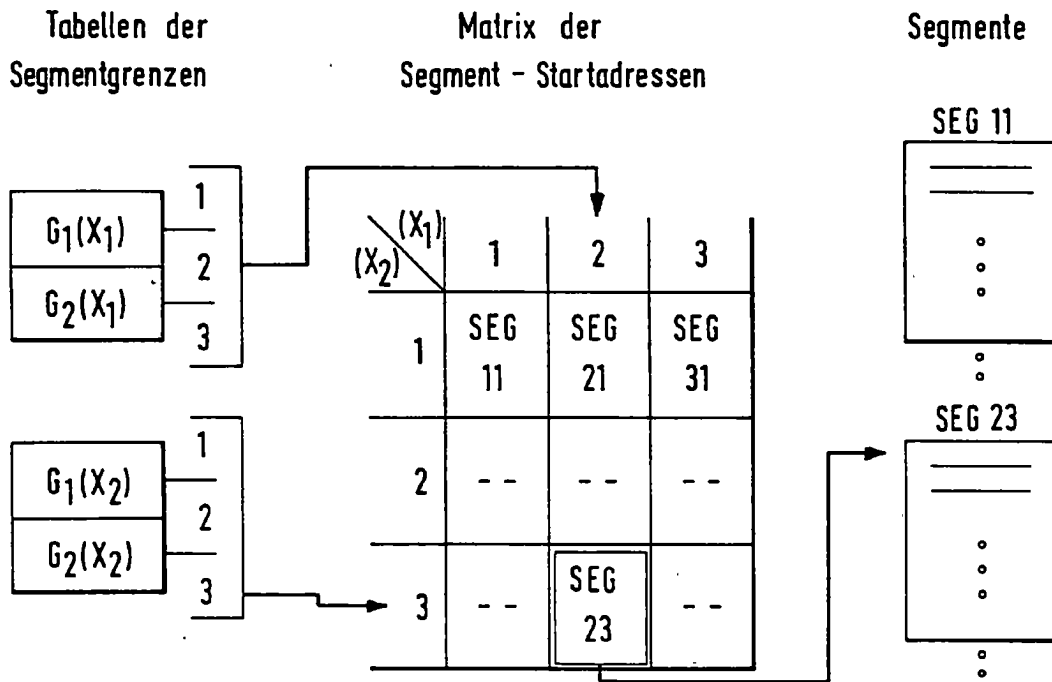


FIG. 9

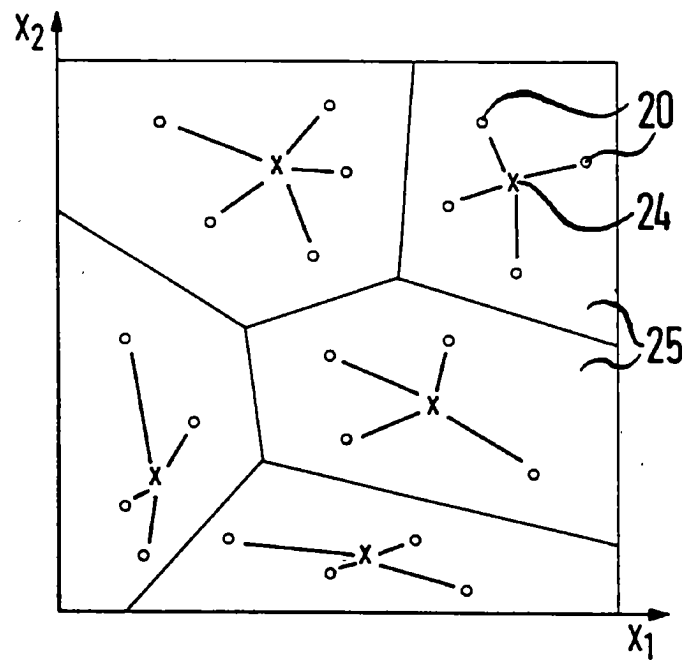


FIG. 10

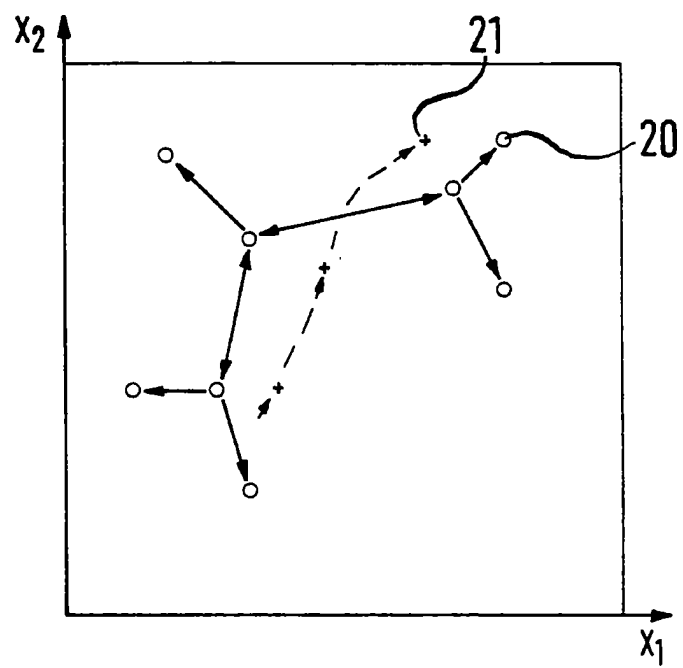


FIG. 11