



(19)
Bundesrepublik Deutschland
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 695 35 687 T2 2009.01.02**

(12) **Übersetzung der europäischen Patentschrift**

(97) **EP 1 681 607 B1**

(51) Int Cl.⁸: **G05B 19/4097 (2006.01)**

(21) Deutsches Aktenzeichen: **695 35 687.9**

(96) Europäisches Aktenzeichen: **06 009 079.2**

(96) Europäischer Anmeldetag: **09.11.1995**

(97) Erstveröffentlichung durch das EPA: **19.07.2006**

(97) Veröffentlichungstag

der Patenterteilung beim EPA: **09.01.2008**

(47) Veröffentlichungstag im Patentblatt: **02.01.2009**

(30) Unionspriorität:

338113 09.11.1994 US

386369 09.02.1995 US

(84) Benannte Vertragsstaaten:

DE

(73) Patentinhaber:

Amada Co., Ltd., Isehara, Kanagawa, JP; U.S.

Amada Ltd., Buena Park, Calif., US

(72) Erfinder:

Bourne, David Alan, Pittsburgh Pennsylvania

15211, US; Williams, Duane Thomas, Pittsburgh

Pennsylvania 15217-1834, US; Kim, Kyoung Hung,

Pittsburgh Pennsylvania 15217, US; Krishnan,

Sivaraj Sivarama, Bangalore 560034, IN; Hazama,

Kensuke, Buena Park California 90621, US

(74) Vertreter:

Grünecker, Kinkeldey, Stockmair &

Schwanhäusser, 80802 München

(54) Bezeichnung: **Biegevorrichtung mit Mitteln zur Durchführung von Installationsvorgängen**

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

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

Beschreibung

[0001] Die vorliegende Erfindung betrifft eine Biegevorrichtung, die ein intelligentes Auslegungs-, Planungs- und Herstellungssystem für gebogene Metallbleche aufweist. Insbesondere betrifft die Erfindung eine Biegevorrichtung, die eine Einrichtung zum Ausführen von Anordnungsvorgängen in der Biegevorrichtung aufweist.

[0002] Die [Fig. 1–Fig. 3](#) zeigen in einer vereinfachten Darstellung das Beispiel einer herkömmlichen Bearbeitungsstation **10** zum Biegen eines Blechteils (Werkstücks) **16**, die von einem manuell erzeugten Programm gesteuert wird, das heruntergeladen und zu verschiedenen Steuergeräten übertragen wurde, die innerhalb der Bearbeitungsstation zur Verfügung stehen. Die gezeigte Bearbeitungsstation zum Biegen **10** ist eine Bearbeitungsstation BM100 Amada.

(a) Die Gerätetechnik und ihre Arbeitsweise

[0003] [Fig. 1](#) zeigt eine vereinfachte Gesamtansicht der Bearbeitungsstation zum Biegen **10**. [Fig. 2](#) zeigt eine Teilansicht einer Abkantpresse **29**, die zur Ausführung einer Biegung an einem Werkstück **16** eingestellt ist. Die in [Fig. 2](#) gezeigten Elemente sind ein Roboterarm **12** mit einem Roboterarmgreifer **14**, der ein Werkstück **16** erfasst, ein Stempel **18**, der von einem Stempelhalter **20** gehalten wird, und ein Gesenk **19**, das auf einer Gesenkschiene **22** angebracht ist. Links von Stempel **18** und Gesenk **19** ist ein Rückanschlagmechanismus **24** angedeutet.

[0004] Wie in [Fig. 1](#) gezeigt, weist die Bearbeitungsstation zum Biegen **10** vier wichtige mechanische Bestandteile auf: eine Abkantpresse **29** zum Biegen von Werkstück **16**; einen programmgesteuerten Manipulator (Roboter) mit fünf Freiheitsgraden (5DOF) **12** zum Handhaben und Positionieren des Werkstücks **16** in der Abkantpresse **29**; eine Beschickungs- und Entnahmevorrichtung für Material (L/UL) **30** zum Zuführen eines unbearbeiteten Werkstücks und Positionieren desselben an einer Stelle, an der Roboter **12** es ergreifen kann, und zur Entnahme fertiggestellter Werkstücke; und einen Repositioniergreifer **32** zum Halten von Werkstück **16**, während Roboter **12** seinen Haltegriff wechselt.

[0005] Die Abkantpresse **29** weist mehrere Bestandteile auf, wie in den [Fig. 1–Fig. 3](#) gezeigt. Betrachtet man [Fig. 3](#), so weist Abkantpresse **29** mindestens ein Gesenk **19**, das sich auf einer Gesenkschiene **22** befindet, und mindestens ein zugehöriges Stempelwerkzeug **18** auf, das von einem Stempelwerkzeughalter **20** gehalten wird. Abkantpresse **29** enthält des weiteren einen Rückanschlagmechanismus **24**.

[0006] Wie in [Fig. 2](#) gezeigt, besitzt der Roboterarm **12** einen Roboterarmgreifer **14**, der benutzt wird, um Werkstück **16** zu ergreifen. Wie in [Fig. 1](#) gezeigt, besitzt die Beschickungs- und Entnahmevorrichtung für Material **30** mehrere Saugnäpfe **31**, die eine nach oben gerichtete Saugwirkung erzeugen, um ein Werkstück aus Blech **16** anzuheben, und damit ermöglichen, dass Beschickungs- und Entnahmevorrichtung für Material **30** Werkstück **16** an Greifer **14** von Roboter **12** weitergibt und anschließend ein fertiggestelltes Werkstück **16** von Roboterarmgreifer **14** entnimmt und das fertiggestellte Werkstück abführt.

[0007] Im Betriebszustand wird Beschickungs- und Entnahmevorrichtung für Material **30** ein unbearbeitetes Werkstück **16** aus einem Behälter (nicht gezeigt) herausheben und Werkstück **16** hochheben und zu einer Stelle befördern, an der es von Greifer **14** des Roboters **12** ergriffen werden kann. Roboter **12** steuert sich dann selbst zu einer Position, die einer bestimmten Biegebühne entspricht, die sich in der Bearbeitungsstation zum Biegen **10** befindet. Betrachtet man die [Fig. 1](#) und [Fig. 3](#), so stellt Bühne 1 die Bühne am äußersten linken Abschnitt der Abkantpresse **29** dar, und Bühne 2 liegt auf der Gesenkschiene **22** rechts von Bühne 1.

[0008] Wenn die erste Biegung an Bühne 1 auszuführen ist, wird Roboter **12** das Werkstück **16** zu Bühne 1 bringen und, wie in [Fig. 2](#) gezeigt, Werkstück **16** in der Abkantpresse **29** an eine Stelle zwischen Stempelwerkzeug **18** und Gesenk **19** steuern, bis es einen Anhalteteil des Rückanschlagmechanismus **24** erreicht und berührt. Mit Hilfe des Rückanschlagmechanismus **24** wird die Position von Werkstück **16** durch Roboterarm **12** eingestellt. Dann wird an Bühne 1 mit Werkstück **16** ein Biegevorgang ausgeführt. Bei der Ausführung des Biegevorgangs bewegt sich Gesenkschiene **22** (längs einer Achse D) nach oben, wie in [Fig. 2](#) durch den Richtungspfeil A angedeutet wird. Wenn Stempelwerkzeug **18** und Gesenk **19** gleichzeitig Werkstück **16** berühren, so dass Werkstück **16** eine relativ stabile Position in Abkantpresse **29** einnimmt, löst Greifer **14** seinen Haltegriff an Werkstück **16**, und Roboter **12** fährt Greifer **14** von Werkstück **16** weg. Abkantpresse **29** vollendet dann das Biegen von Werkstück **16**, indem sie die Aufwärtsbewegung von Gesenk **19** so lange fortsetzt, bis die richtige Biegung erzeugt worden ist.

[0009] Sobald sich Gesenk **19** mit Stempelwerkzeug **18** im Eingriff befindet und Werkstück **16** in seinem gebogenen Zustand hält, wird Roboterarm **12**, bevor Gesenk **19** durch Absenken der Abkantpresse **29** ausgerückt wird, seinen Roboterarmgreifer **14** neu positionieren, um Werkstück **16** zu halten. Sobald Greifer **14** Werkstück **16** halt, wird Gesenk **19** durch Entlastung von Abkantpresse **29** ausgerückt. Roboter **12** steuert und positioniert dann Werkstück **16** neu, um die nächste Biegung in der speziellen für Werkstück **16** programmierten Abfolge von Biegungen vorzunehmen. Die nächste Biegung in der Abfolge von Biegungen kann entweder an derselben Bühne oder an einer anderen Bühne, z. B. Bühne 2, ausgeführt werden, je nach Art der auszuführenden Biegungen und der in Abkantpresse **29** vorhandenen Werkzeugbestückung.

[0010] In Abhängigkeit von der nächsten vorzunehmenden Biegung und der Gestalt von Werkstück **16** kann es sich erforderlich machen, die Griffposition von Greifer **14** neu einzustellen. Der in [Fig. 1](#) gezeigte Repositioniergreifer **32** steht zu diesem Zweck zur Verfügung. Bevor die nächste Biegung, für die eine Repositionierung von Roboterarmgreifer **14** erforderlich ist, ausgeführt wird, wird Werkstück **16** von Roboter **12** zum Repositioniergreifer **32** gebracht. Repositioniergreifer **32** wird dann Werkstück **16** ergreifen, so dass Roboterarmgreifer **14** Werkstück **16** an einer für die nächste Biegung oder Abfolge von Biegungen geeigneten Stelle neu ergreifen kann.

(b) Das Steuersystem

[0011] Die in [Fig. 1](#) dargestellte Bearbeitungsstation zum Biegen **10** wird von mehreren Steuervorrichtungen gesteuert, die getrennt untergebracht sind; dazu gehören eine MM20-CAPS-Schnittstelle **40**, ein Steuergerät für die Abkantpresse **42**, ein Steuergerät für den Roboter **44** und ein Steuergerät für die Beschickungs- und Entnahmevorrichtung **46**. Das Steuergerät für die Abkantpresse **42** besteht aus einem Abkantpressen-Steuergerät NC9R, und das Steuergerät für den Roboter **44** ist ein Roboter-Steuergerät **25B**, die beide von Amada geliefert werden. Sowohl das Steuergerät für die Abkantpresse **42** als auch das Steuergerät für den Roboter **44** besitzen ihre eigene Zentraleinheit und Programmierumgebung. Das Steuergerät für die Beschickungs- und Entnahmevorrichtung **46** umfasst ein selbständiges programmierbares Logiksteuergerät (PLC) und ist mit den jeweiligen Konsolen für das Steuergerät für die Abkantpresse **42** bzw. das Steuergerät für den Roboter **44** fest verdrahtet.

[0012] Jedes einzelne der Steuergeräte **42**, **44** und **46** hat einen andersartigen Bus, eine andersartige Architektur und einen anderen Hersteller. Sie werden in erster Linie durch parallele I/O(Eingangs-/Ausgangs-)Signale koordiniert. Serielle Schnittstellen stehen für die Übertragung von Biegungs- und Roboterprogrammen zu den Steuergeräten zur Verfügung, von denen jedes auf andere Weise programmiert wird. Zum Beispiel werden Logikdiagramme benutzt, um das PLC des Steuergeräts für die Beschickungs- und Entnahmevorrichtung **46** zu programmieren, und RML (Reality Modeling Language, Programmiersprache für Realitätsmodellierung) wird zum Programmieren des Steuergeräts für den Roboter **44** verwendet.

(c) Der Konstruktions- und Fertigungsprozess

[0013] Der gesamte Konstruktions- und Fertigungsprozess für das Biegen von Blech umfasst mehrere Schritte. In typischer Weise wird ein zu fertigendes Bauteil zuerst mit Hilfe eines geeigneten CAD-Systems konstruiert. Dann wird ein Plan erzeugt, der die zu verwendende Werkzeugausrüstung und eine Abfolge von auszuführenden Biegungen festlegt. Sobald die erforderliche Werkzeugausrüstung festgelegt ist, wird ein Bediener damit beginnen, die Bearbeitungsstation zum Biegen zu installieren. Wenn die Bearbeitungsstation zum Biegen installiert ist, wird der Plan ausgeführt, d. h. ein Werkstück wird zugeführt, und der Betrieb der Bearbeitungsstation zum Biegen wird so gesteuert, dass die vollständige Abfolge von Biegungen an einem unbearbeiteten Werkstück aus Blech ausgeführt wird. Die Ergebnisse der ersten Arbeitsgänge der Biegestation werden dann an den Konstruktionsprozess zurückgemeldet, wo geeignete Modifikationen an der Konstruktion des Bauteils im Hinblick auf die tatsächliche Arbeitsweise des Systems vorgenommen werden können.

[0014] Beim Planungsschritt wird ein Plan für die Bearbeitungsstation zum Biegen **10** entwickelt, um das System so zu konfigurieren, dass es eine Abfolge von Biegeoperationen ausführt. Benötigte Teile müssen ausgewählt werden, darunter geeignete Gesenke, Stempelwerkzeuge, Greifer und dergleichen. Außerdem muss die Abfolge von Biegungen festgelegt werden, wozu das Einordnen und die Auswahl von Biegungen gehört, die von der Bearbeitungsstation zum Biegen **10** durchzuführen sind. Bei der Auswahl der Geräteteile und der Festlegung der Abfolge von Biegungen sowie von anderen Parameter wird Software für den Betrieb von Bearbeitungsstation zum Biegen **10** generiert, so dass die Bearbeitungsstation zum Biegen **10** automatisch verschiedene Arbeitsgänge des Biegeprozesses ausführen kann.

[0015] Ein Plan für eine Bearbeitungsstation BM100 zum Biegen umfasst generierte Software, wie z. B. ein

Abkantpressen-Programm NC9R und ein Roboterprogramm **25B** in RML Jedes dieser Programme kann mit Hilfe einer mit einem CAD-System erzeugten Konstruktion eines Ausgangsteils erzeugt werden. Sowohl das Roboterprogramm als auch das Biegeprogramm müssen manuell entwickelt werden und sind ziemlich arbeitsaufwendig. Früher entwickelte Programme werden nach der Anzahl der Biegungen und/oder nach den Richtungen der Biegungen klassifiziert. Ingenieure prüfen die Art jedes Teils, um festzustellen, ob früher entwickelte und klassifizierte Programme verwendet werden können oder ob ein neues Programm geschrieben werden muss. Da jedoch jedes klassifizierte Programm typischerweise nur einen engen Bereich von akzeptablen Abmessungen eines Bauteils zulässt, müssen die Ingenieure häufig neue Programme schreiben. Das endgültige Roboterprogramm in RML wird, wenn es vollständig ist, von dem MM20-CAPS-System **40** kompiliert, heruntergeladen und zu Steuergerät für den Roboter **44** übertragen. Das Biegeprogramm wird an einer Steuertastatur, die am Steuergerät für die Abkantpresse **42** hängt, eingegeben und von Fehlern bereinigt. Nachdem das Roboter- und das Biegeprogramm ins System eingegeben worden sind, führt ein Bediener mehrere manuelle Arbeitsgänge durch, um mit dem System all die verschiedenen auszuführenden Arbeitsgänge durchzugehen. Zum Beispiel wird ein Bediener manuell eine Handtastatur des Robotersteuergeräts bedienen, um den Roboter manuell zur Beschickungs- und zur Entnahmeposition zu bewegen, worauf die Schnittstellenkonsole **40** die richtigen Positionen in das endgültige RML-Programm einspeichert, das dann kompiliert, heruntergeladen und zum Steuergerät für den Roboter **44** übertragen wird. Außerdem kann der Bediener bei der Erzeugung des Biegeprogramms das System so steuern, dass es der geplanten Biegungsabfolge folgt, um die Werte für die Positionen des Rückanschlags (L-Achse) und der Gesenkschiene (D-Achse) zu bestimmen.

(d) Intelligente Fertigungsstationen

[0016] Es sind verschiedene Vorschläge gemacht worden, um viele der Nachteile bei früheren Systemen, wie der Biegestation BM100 von Amada, zu beseitigen, und es sind Forschungsarbeiten auf dem Gebiet intelligenter Fertigungsstationen durchgeführt worden. Einige der vorgeschlagenen Merkmale intelligenter Bearbeitungsstationen zum Biegen von Blech waren Merkmale wie offene Architektur, einschließlich offener Systemkonfigurationen und verteilter Entscheidungsfindung, und verbesserte Systeme der rechnerunterstützten Konstruktion und geometrischen Modellierung.

[0017] Auf der Jährlichen Wintertagung der ASME 1992 über Erfahrungsgestützte Prozessautomatisierung wurde am 13. November 1992 von David Alan Boume ein Vortrag mit dem Titel „Intelligent Manufacturing Workstations“ (Intelligente Fertigungsstationen) gehalten. In dem Vortrag wird eine intelligente Fertigungsstation als ein in sich geschlossenes System definiert, das eine neue Konstruktion für ein Bauteil übernimmt und es automatisch fertigt. Es wird dargelegt, dass der Prozess automatisierte Installation, Teilprogrammierung, Steuerung und Rückkopplung zur Konstruktion umfasst.

[0018] Der Vortrag erörtert mehrere Komponenten einer kompletten intelligenten Fertigungsstation, einschließlich solcher Merkmale wie offene Architektur, Verwendung von Software-Moduln, die über eine auf Abfrage basierende Sprache miteinander kommunizieren, Bauteilkonstruktion, Arbeitsablaufplanung, Steuerung der Fertigungsstation und geometrische Modellierung.

(1) Offene Architektur

[0019] Man hat erkannt, dass eine effektive intelligente Fertigungsstation offene Software, eine offene Steuerungseinrichtung und eine offene Mechanismusarchitektur aufweisen sollte. Das heißt, ein Werkzeugmaschinennutzer, der eine derartige Station betreibt, muss in der Lage sein, Erweiterungen an der Software, der Steuerungseinrichtung und den Mechanismusarchitekturen der Station vorzunehmen, um ihre Funktionen zu verbessern.

(2) Software-Moduln, die mit auf Abfrage basierender Sprache arbeiten

[0020] In dem erwähnten Vortrag von David Bourne sind Software-Moduln für den Einsatz in einer intelligenten Fertigungsstation vorgeschlagen worden. Derartige Moduln würden an den Grenzen von Wissensgebieten entlang verteilt, die in der industriellen Praxis definiert worden sind, dazu gehören z. B. Werkzeugausrüstung, Betriebsablauf, Programmierung, Planung und Konstruktion. Die Software-Moduln wären verantwortlich für das Verstehen von Befehlen und Datenspezifikationen sowie für die Beantwortung von Fragen auf ihrem eigenen Spezialgebiet. Ein bestimmter Modul könnte so beschaffen sein, dass er von anderen Moduln Informationen anfordert, damit er hinreichende Informationen zur Verfügung hat, um die ihm zugewiesenen Probleme zu lösen, in einer Standardsprache zu kommunizieren und mehrere Problemen zugleich zu bearbeiten. Zusätzlich würde jeder einzelne Modul wissen, welcher andere Modul um Information zu befragen und zu bitten sei, Hil-

feststellung bei der Formulierung einer Frage für den empfangenden Modul zu geben. Die im genannten Vortrag vorgeschlagene allgemeine Architektur der Software wird in [Fig. 4](#) dargestellt. Die vorgeschlagene Architektur umfasst einen Konstrukteur **50**, einen Planer für die Biegungsabfolge **52**, einen Modul für Abfolgeplanung, Ausführung und Fehlerbearbeitung **54**, einen Modellierer **56**, einen Modul für Sensorinterpretation **58**, einen Modul für Prozesssteuerung **60** und einen Modul für Halten und Festspannen **62**. Ein jeder der Moduln für Sensorinterpretation **58**, Prozesssteuerung **60** und Halten und Festspannen **62** ist mit externen Maschinen- und Sensortreibern **64** gekoppelt. Ein Teilsystem Steuerung **68** wird von mehreren der Moduln gebildet, einschließlich des Moduls für Abfolgeplanung, Ausführung und Fehlerbearbeitung **54**, des Modellierers **56** und der Moduln für Sensorinterpretation **58**, Prozesssteuerung **60** und Halten und Festspannen **62**. Hier wird Teilsystem Steuerung **68** so dargestellt, dass es innerhalb eines Betriebssystems Chimera implementiert ist. Alle Moduln können mit anderen Werkssystemen **66** verbunden werden, darunter z. B. Systeme für Fristenplanung, Betriebsabläufe und Prozessplanung.

(3) Konstruktionswerkzeuge

[0021] Es sind Versuche mit Konstruktionswerkzeugen durchgeführt worden, die laufend die Beziehung zwischen einem Ausgangsteil und einem Fertigteil gestalten, angewandt auf das Biegen von Metallblech; diese Versuche werden in dem genannten Vortrag erwähnt und von C. Wang in „A Parallel Designer for Sheet Metal Parts“, Mechanical Engineering Masters Report, Camegie Mellon (1992), beschrieben. Die Konstruktionsinformationen, die in dreidimensionaler oder in ebener zweidimensionaler Darstellung beschrieben werden können, werden automatisch mit einer weiteren Darstellung des sich entwickelnden Teils (parallel dazu) beibehalten. Auf diese Weise wird eine Verbindung zwischen jedem einzelnen Merkmal des ursprünglichen Ausgangsteils und des Fertigteils aufrechterhalten.

(4) Das Planungssystem

[0022] Sobald die Konstruktion vollendet ist, erzeugt typischerweise ein Planer einen Plan, der später verwendet wird, um den Fertigungsprozess durchzuführen. Der Plan enthält mehrere Anweisungen in bezug auf die Abfolge der maschinellen Arbeitsgänge zur Fertigung des gewünschten Teils. Ein optimaler Plan wird zu einer Verringerung der Installationszeit, einer Verringerung der Menge des Abfalls nach der Fertigung der Teile, einer Verbesserung der Bauteilqualität und einer Steigerung der Fertigungsrate führen. Um solche Vorteile zu erzielen, empfiehlt der erwähnte Vortrag, so viel spezifisches Wissen wie möglich vom Planer getrennt zu halten, so dass der Planer leicht an unterschiedliche Maschinen und Verfahren angepaßt werden kann. Es wird somit ein „auf Anfrage basierendes“ Planungssystem vorgeschlagen, das den Schwerpunkt bei der Arbeit des Planers auf das Befragen von Experten verschiebt anstatt zu versuchen, als selbständiger Experte zu handeln.

(5) Steuerung der Fertigungsstation

[0023] Im erwähnten Vortrag wird vorgeschlagen, dass die Steuereinrichtung eine fertig lieferbare technische Bearbeitungsstation UNIX als zentrale Berechnungseinrichtung nutzt. Die Bearbeitungsstation kann in ihrer Rückwand ein Erweiterungsregal mit Spezialtafeln und eine zusätzliche Zentraleinheit aufweisen, die mit einer Echtzeitversion des UNIX-Betriebssystems namens CHIMERA-II läuft. Siehe z. B. STEWART u. a., Robotics Institute Technical Report, Titel: „CHIMERA II: A Real Time UNIX-Compatible Multi-processor Operating System for Sensor Based Control Applications“, Camegie Mellon, CMU-RI-TR-89-24 (1989).

(6) Geometrische Modellierung

[0024] Die geometrische Modellierung ist eine wichtige Komponente in intelligenten Fertigungsstationen zur maschinellen Bearbeitung. Im Rahmen eines Projekts im Institut für Robotertechnik an der Camegie-Mellon-Universität ist mit mehreren Modellierern experimentiert worden. Ein geometrischer Modellierer mit der Bezeichnung „NOODLES“ ist für den Einsatz als Modellierer in einer intelligenten Fertigungsstation vorgeschlagen worden. Der NOODLES-Modellierer wird von GURSOZ u. a. in „Boolean Set operations on non-manifold boundary representation objects“ in Computer Aided Design, Butterworth-Heinenmann LTD., Bd. 23, Nr. 1, Januar 1991, diskutiert. Das System NOODLES macht weit weniger Annahmen dazu, was gültige Kantentopologien darstellt, und umgeht auf diese Weise Probleme bei anderen Modellierungssystemen, die in unendliche Schleifen eintreten würden, wenn die Kantentopologie eines geometrischen Modells Systemannahmen verletzen würde.

5. Begriffsdefinitionen

[0025] Aus Gründen der Eindeutigkeit und um Lesern zu helfen, die vorliegende Erfindung zu verstehen, werden die folgenden hier benutzten Begriffe und Kurzwörter definiert.

[0026] Biegevorrichtung/Bearbeitungsstation zum Biegen – eine Bearbeitungsstation oder Vorrichtung zur Ausführung moderner Aufgaben der Bearbeitung von Metallblech einschließlich Biegearbeiten.

[0027] Biegen von Platten aus verformbarem Material – Bearbeitung von Platten aus verformbarem Material, wie z. B. Metallblech, einschließlich und nicht beschränkt auf: Biegen im aufsteigenden Luftstrom, V-Biegen, R-Biegen, Umschlagen, Falzen, Prägen, Bearbeitung von Böden, Biegestanzen, Abstreifen (Wiping), Abkanten, Schablonenbiegen, Biegen nach Kundenwünschen usw.

[0028] Arbeitsablaufplan – eine Abfolge von Arbeitsgängen, die von einer Umformeinrichtung für Bauteile auszuführen sind, um aus einem Stück unfertigen Materials ein Fertigteil herzustellen. Im Rahmen der Planung der Abfolge von Biegungen umfasst ein Arbeitsablaufplan (Plan der Abfolge von Biegungen) eine Abfolge von Arbeitsgängen, die von einer Biegevorrichtung auszuführen sind, um Werkstücke zu biegen, die aus Platten verformbaren Materials bestehen, wobei die Abfolge von Arbeitsgängen eine Abfolge von Biegungen umfasst, die alle Biegungen enthält, die zur Herstellung eines fertig gebogenen Werkstücks erforderlich sind.

[0029] Teilplan (Unterplan) – ein Teil eines vollständigen Arbeitsablaufplans. Im Zusammenhang mit der Planung der Abfolge von Biegungen enthält ein Teilplan einen Teil der Informationen, die benötigt werden, um eine Bearbeitungsstation zum Biegen/Biegevorrichtung zu installieren und/oder zu steuern.

[0030] Im Hinblick auf die vorherigen Ausführungen ist es ein Ziel der vorliegenden Erfindung, eine Vorrichtung zum Biegen zu schaffen, die Anordnungsvorgänge in einer Vorrichtung zum Biegen effektiver vornimmt.

[0031] Diese Aufgabe wird entsprechend der vorliegenden Erfindung durch eine Vorrichtung zum Biegen, wie im Anspruch 1 definiert, gelöst.

[0032] Vorzugsweise weist die Steuerungseinrichtung eine Einrichtung zum Positionieren des Führungsteiles auf, um in einer bestimmten Position entlang der Werkzeugschiene und innerhalb eines bestimmten Abstandes von der Werkzeugschiene zu sein, wodurch ein Werkzeug einer Bearbeitungsstufe anliegend gegen das Führungsteil ausgerichtet werden kann, um die Bearbeitungsstufe entlang der Schiene richtig zu positionieren.

[0033] Weiterhin weist das Führungsteil vorteilhafterweise einen Rückanschlagfinger einer Vorrichtung zum Ausführen des Rückenschlages beim Einbringen eines Werkstücks in die Biegevorrichtung auf.

[0034] Es wird noch weiter bevorzugt, dass jede der Bearbeitungsstufe eine Mehrzahl von Segmenten entlang der Schiene aufweist.

[0035] Weiter wird bevorzugt, dass die Vorrichtung vorgesehen ist, während des Anordnungsvorgangs einen Schritt des automatischen Positionierens des Rückanschlagfingers an einer besonderen Kante von jeder Stufe entlang der Schiene auszuführen.

[0036] Entsprechend eines bevorzugten Ausführungsbeispiels ist die Vorrichtung vorgesehen, während des Anordnungsvorganges einen Schritt des Positionierens des Rückanschlagfingers an einer linken Kante eines Werkzeuges auszuführen, worauf ein erstes Werkzeugsegment entlang der Werkzeugschiene und gegen den Rückanschlagfinger anliegend zur Ausrichtung anliegend platziert wird, bevor die Segmente weiter an der Werkzeugschiene platziert und befestigt werden.

[0037] Außerdem ist die Steuereinrichtung vorzugsweise mit einem Ausrichtungs-Steuerungsmodul versehen, das eine Vorrichtung zum Anleiten einer Rückanschlags-Servo-Steuerung enthält, um die Rückanschlagfinger zu einem oder zu mehreren besonderen Bühnenorten zu bewegen.

[0038] Darin ist vorzugsweise die Steuerungsvorrichtung mit einer Schnittstelle versehen, die die Rückanschlags-Servo-Steuerung enthält.

[0039] Entsprechend eines noch weiteren bevorzugten Ausführungsbeispiels ist die Steuerungseinrichtung mit einem Rückanschlags-Ziel-Modul versehen, das eine Rückanschlagfinger-Werkzeugausrichtungsfunkti-

on aufweist, die in der Lage ist, die Rückanschlags-Servo-Steuerung durch den Gebrauch des Rückanschlags-Vorrichtungsantriebs des zweiten Niveaus zu aktivieren und zu steuern, die ihrerseits mit einem passenden Vorrichtungsantrieb des Niveaus 1, z. B. einem I/O-Vorrichtungsantrieb, im Wechselspiel ist, die mit einer I/O-Karte, verbunden mit einer Rückanschlagsvorrichtung der Biegevorrichtung, im Wechselspiel ist.

[0040] Auch ist die Vorrichtung vorzugsweise versehen mit einem Schritt des Ausrichtens der Segmente des Werkzeugstempels, so dass sie richtig innerhalb des Stempelhalters abgedichtet sind und den zugehörigen Werkzeugsegmenten entsprechen.

[0041] Darin ist vorzugsweise die Vorrichtung vorgesehen, um während des Schritts des Ausrichtens der Werkzeugsegmente der Biegevorrichtung zu arbeiten, so dass die Segmente und die entsprechenden Werkzeugsegmente mit einer festgelegten Größe einer Kraft gegeneinander gepresst werden.

[0042] Vorzugsweise ist die Vorrichtung vorgesehen, um einen Einstellschritt eines Beschickers/Entladers auszuführen, so dass die Saugfüße derselben in Bezug auf das Werkstück richtig positioniert werden.

[0043] Noch genauer ist ein Rückanschlagsziel vorgesehen, das wesentliche Bewegungsfunktionen und/oder Sensor-basierte Bewegungsfunktionen, insbesondere ein Finden der Teilekante und eine abgesicherte Bewegungsfunktion aufweist.

[0044] Überdies weist die Vorrichtung vorzugsweise ein CAD-System, einen Biege-Abfolgeplaner, eine Mehrzahl von Experten und einen Zuordner auf, die durch Hardware und Sensoren über eine Schnittstelle verbunden sind.

[0045] Vorteilhafterweise ist die Biegevorrichtung vorgesehen, um einen Plan zu erzeugen, der die Abfolge aufweist, die von einer Biegevorrichtung durchzuführen sind, um Werkstücke zu biegen, die aus Platten aus verformbarem Material bestehen. Die Biegevorrichtung besitzt einen Greifer zum Erfassen eines Werkstücks während des Ausführens einer Biegung, und die Abfolge der Arbeitsschritte umfaßt eine Reihe von N-Biegungen zur Herstellung eines fertig bearbeiteten Werkstücks aus einer Ausgangsplatte aus verformbarem Material. Die Vorrichtung weist einen Vorschlagsmechanismus zum Vorschlagen, für einen m-ten Arbeitsgang in der Abfolge von Arbeitsgängen, einer Anzahl von vorgeschlagenen Arbeitsgängen einschließlich einer Anzahl von vorgeschlagenen Biegungen auf, die von der Vorrichtung auszuführen sind. Außerdem enthält die Vorrichtung einen Teilplanmechanismus zur Schaffung eines vorgeschlagenen Teilplans, der zu jeder der vorgeschlagenen Biegung gehört, und einen Erzeugungsmechanismus zur Erzeugung eines Plans, der eine Abfolge von Biegungen von einer ersten Biegung bis zu (und einschließlich) einer n-ten Biegung enthält, indem jede Biegung in der Abfolge von Arbeitsgängen auf der Grundlage der vorgeschlagenen Biegungen und des vorgeschlagenen Teilplans, der zu jeder vorgeschlagenen Biegung gehört, ausgewählt wird.

[0046] Weil eine Abschätzeinrichtung zur Veranschlagung der mit jeder einzelnen vorgeschlagenen Biegung verbundenen Kosten bereitgestellt wird, kann die Erzeugungsvorrichtung einen Plan erzeugen, der eine Abfolge von Biegungen von einer ersten bis zu (und einschließlich) einer n-ten Biegung aufweist, indem jede einzelne Biegung in der Abfolge von Arbeitsgängen auf der Grundlage der vorgeschlagenen Biegung, des vorgeschlagenen Teilplans, der zu jeder vorgeschlagenen Biegung gehört, und der mit jeder einzelnen vorgeschlagenen Biegung verbundenen eingeschätzten Kosten ausgewählt wird. Die mit einer n-ten Biegung in der Abfolge von N Biegungen verbundenen eingeschätzten Kosten können einen Kostenanteil k aufweisen, der auf der Grundlage einer geschätzten Zeitdauer berechnet wird, die die Biege Vorrichtung zur Vollendung eines oder mehrerer Arbeitsgänge der Biegung benötigen wird. Die mit einer n-ten Biegung in der Abfolge von N-Biegungen verbundenen eingeschätzten Kosten können einen Kostenanteil h aufweisen, der auf der Grundlage einer geschätzten Gesamtzeitdauer berechnet wird, die die Biegevorrichtung zur Vollendung eines oder mehrerer Arbeitsgänge jeder einzelnen der restlichen Biegungen in der Abfolge von Biegungen benötigen wird, die auf die n-te Biegung folgen.

[0047] Zu dem einen oder den mehreren Arbeitsgängen der Biegung, die zeitlich eingeschätzt werden, um die Kostenanteile k und h zu berechnen, kann das Bewegen des Werkstücks von einer bei einer vorhergegangenen Biegung an der Werkzeugbühne eingenommenen Position zu einer für die betreffende Biegung vorgesehenen Position an der Werkzeugbühne gehören. Zu dem einen oder den mehreren Arbeitsgängen einer gegebenen Biegung kann auch beim Aufbau der Biegevorrichtung die Installation einer zusätzlichen Werkzeugbühne gehören, die erforderlich ist, um die gegebene Biegung auszuführen. Zu dem einen oder den mehreren Arbeitsgängen einer gegebenen Biegung kann auch die Repositionierung des Haltegriffs des Greifers am Werkstück vor der Ausführung der gegebenen Biegung gehören.

[0048] Vorteilhafterweise weisen der Vorschlagsmechanismus und der Erzeugungsmechanismus gemeinsam einen Modul für die Planung der Abfolge von Biegungen auf, und der Teilplanmechanismus und der Abschätzmechanismus weisen gemeinsam eine Anzahl von Expertenmoduln auf. Jeder einzelne der Expertenmoduln kann den Teilplanmechanismus und den Abschätzmechanismus betreiben, wenn der Vorschlagsmechanismus einen vorgeschlagenen Arbeitsgang zur Ausführung als m-ten Arbeitsgang innerhalb der Abfolge von Arbeitsgängen vorschlägt. Zu der Anzahl von Expertenmoduln kann ein Modul Halteexperte gehören, der den Teilplanmechanismus betreiben kann, um einen vorgeschlagenen Teilplan zu liefern, der Informationen zu einer Stelle am Werkstück enthält, an der der Greifer das Werkstück während der Ausführung der Biegungen in der Abfolge von Biegungen halten kann. Zu der Anzahl von Expertenmoduln kann ein Modul Halteexperte gehören, der den Abschätzmechanismus betreiben kann, um Haltekosten zu veranschlagen, die danach berechnet werden, ob ein Haltegriff des Greifers am Werkstück vor Ausführung einer gegebenen Biegung repositioniert werden muß. Außerdem kann zu der Anzahl von Expertenmoduln ein Modul Werkzeugexperte gehören, der den Teilplanmechanismus betreiben kann, um einen vorgeschlagenen Werkzeugteilplan zu liefern, der Informationen über eine Stelle an einer Werkzeughöhne enthält, an der das Werkstück zwecks Ausführung einer gegebenen Biegung in die Biegevorrichtung gebracht wird. Der Werkzeugexperte kann auch in der Lage sein, den Abschätzmechanismus zu betreiben, um Kosten auf der Grundlage einer Zeitspanne zur Installation einer zusätzlichen Werkzeughöhne, die zur Ausführung einer gegebenen Biegung benötigt wird, beim Aufbau der Biegevorrichtung zu veranschlagen. Der Modul Bewegungsexperte kann ebenfalls in der Lage sein, den Abschätzmechanismus zu betreiben, um Kosten auf der Grundlage einer berechneten Fahrzeit für die Bewegung des Werkstücks von einer Stelle der einen Biegung an der Werkzeughöhne zu einer Stelle einer nächsten Biegung an der Werkzeughöhne zu veranschlagen.

[0049] In Übereinstimmung mit einem bevorzugten Ausführungsbeispiel der Erfindung kann der Modul für die Planung der Abfolge von Biegungen in der Lage sein, jeden einzelnen der Expertenmoduln nach einem Teilplan und veranschlagten Kosten abzufragen. Zusätzlich kann ein jeder der Expertenmoduln in der Lage sein, auf eine Abfrage zu antworten, indem er eine Speicherliste an den Modul für die Planung der Abfolge von Biegungen zurückschickt, wobei die Speicherliste eine Liste der Namen von Merkmalen und der den jeweiligen Merkmalen entsprechenden Werte umfaßt, die vom Modul für die Planung der Abfolge von Biegungen zu speichern sind.

[0050] Vorteilhafterweise enthält die Steuerungseinrichtung einen Prioritätsmechanismus zur Festlegung der Rangfolge (Priorität) vorgeschlagener Biegungen im Einklang mit einer Biegeheuristik, die auf der Grundlage der Geometrie des Werkstücks bestimmt wird. Der Erzeugungsmechanismus kann einen Plan erzeugen, der eine Abfolge von Biegungen von einer ersten bis zu (und einschließlich) einer m-ten Biegung enthält, indem er jede einzelne Biegung in der Abfolge von Arbeitsgängen auf der Grundlage der nach Rangfolge geordneten vorgeschlagenen Biegungen und des vorgeschlagenen Teilplans auswählt, der zu jeder vorgeschlagenen Biegung gehört. Der Prioritätsmechanismus kann mit einem Mechanismus zur Verringerung der veranschlagten Kosten einer Biegung mit hoher Priorität und Erhöhung der veranschlagten Kosten einer Biegung mit niedriger Priorität ausgestattet sein. Außerdem kann ein Bestimmungsmechanismus bereitgestellt werden, mit dem die Zeit, die benötigt wird, um mit der Biegevorrichtung auf der Grundlage des erzeugten Plans ein oder mehrere Teile herzustellen, und die Durchführbarkeit dieses Vorhabens bestimmt werden kann. Außerdem kann die Vorrichtung mit einem Mechanismus zur Durchführung von Berechnungen der Kosten für die Herstellung eines gegebenen Postens von Teilen auf der Grundlage der vom Bestimmungsmechanismus ermittelten Zeit versehen sein. Zusätzlich, oder als Alternative, kann die Vorrichtung mit einem Mechanismus zur Umkonstruktion des Teils auf der Grundlage der durch den Bestimmungsmechanismus ermittelten Zeit und Durchführbarkeit ausgestattet sein. Die Vorrichtung kann ferner mit einem Mechanismus zur Zeitplanung der Fertigung mit der Biegevorrichtung in Abhängigkeit von der für die Herstellung eines oder mehrerer Teile ermittelten Zeitdauer versehen sein.

[0051] Überdies kann die zuvor beschriebene Steuerungseinrichtung ein rechnergestütztes Verfahren zur Auswahl eines Greifers zum Halten eines Werkstücks auf. Der Greifer wird für den Einsatz in einer Biegevorrichtung zum Biegen unfertiger Werkstücke, bei denen es sich um Platten aus verformbarem Material handelt, ausgewählt. Das Verfahren umfaßt das Lesen von Informationen, die die Geometrie einer Reihe von zur Auswahl stehenden Greifern beschreiben, die Zusammenstellung eines Satzes verfügbarer Greifer unter Ausschluß von Greifern mit bestimmten unerwünschten geometrischen Merkmalen und die Auswahl eines Greifers aus einem Satz verfügbarer Greifer. Der Greifer wird in Abhängigkeit von der Breite des Greifers, der Länge des Greifers sowie der Gelenkhöhe des Greifers ausgewählt. Der Greifer kann einen Greifer zum Halten des Werkstücks, während das Werkstück in einen Gesenkraum der Biegevorrichtung eingebracht und aus diesem entnommen wird, enthalten. In diesem Zusammenhang kann das Verfahren einen Schritt enthalten, bei dem für einen jeden Greifer in dem Satz verfügbarer Greifer eine Anzahl von Repos vorhergesagt wird, die gleich

einer abgeschätzten Anzahl dafür ist, wie oft die Biegevorrichtung die Position wechseln muß, an der der Greifer das Werkstück hält, um eine vollständige Abfolge von Biegearbeitsgängen am Werkstück auszuführen. Die kleinste vorhergesagte Anzahl von Repos wird dann bestimmt, und der Satz verfügbarer Greifer wird so angeglichen, daß er diejenigen verfügbaren Greifer enthält, deren Anzahl von Repos gleich der kleinsten vorhergesagten Anzahl von Repos ist, ehe (aus dem Satz verfügbarer Greifer) ein Greifer in Abhängigkeit von der Breite, Länge und Gelenkhöhe des Greifers ausgewählt wird.

[0052] Der Greifer kann alternativ einen Repogreifer zum Halten des Werkstücks, während ein Roboter seinen Haltegriff am Werkstück wechselt, umfassen. Im Hinblick darauf kann das Verfahren weiterhin einen Schritt aufweisen, bei dem Datendarstellungen der jeweiligen Zwischenformen des Werkstücks für Situationen erzeugt werden, in denen Reposchritte von der Biegevorrichtung auszuführen sind, und bei dem die Zwischenformen benutzt werden, um zu bestimmen, welche Greifer aus dem Satz verfügbarer Greifer ausgeschlossen werden. Die Greifer, die unter Berücksichtigung aller erzeugten Darstellungen von Zwischenformen das Werkstück nicht sicher erfassen können, werden aus dem Satz verfügbarer Greifer ausgeschlossen.

[0053] Zusätzlich dazu weist die zuvor beschriebene Steuerungseinrichtung ein rechnergestütztes Verfahren zur Ermittlung einer Stelle auf, an der ein Greifer ein aus einer verformbaren Platte bestehendes Werkstück halten kann, während eine Biegevorrichtung einen m-ten Arbeitsgang am Werkstück ausführt. Die Biegevorrichtung führt eine Abfolge von Arbeitsgängen einschließlich des m-ten Arbeitsgangs nach einem Biegeplan aus. Die Abfolge von Arbeitsgängen umfaßt eine Abfolge von Biegungen von einer ersten Biegung bis zu (und einschließlich) einer n-ten Biegung, und die Gestalt des Werkstücks nimmt mehrere Zwischenformen an, während die Biegevorrichtung die Abfolge von Biegungen ausführt. Ein Satz topographischer Darstellungen wird erzeugt, indem wiederholt entlang der Kanten des Werkstücks, während eine Variable i variiert wird, eine graphische Darstellung von Zonen am Werkstück erzeugt wird, innerhalb derer die Greiferstelle liegen kann, ohne die Ausführung eines i -ten Arbeitsgangs zu behindern. Es wird eine Entscheidung getroffen, ob die Ausführung des i -ten Arbeitsgangs behindert wird oder nicht, indem die Zwischenform des Werkstücks bei der Ausführung des i -ten Arbeitsgangs in Betracht gezogen wird. Das Verfahren enthält weiterhin den Schritt der Bestimmung der Überschneidung aller geographischen Darstellungen innerhalb des Satzes, um dadurch die Zonen zu ermitteln, die der gegebenen Anzahl von Arbeitsgängen in der Abfolge von Arbeitsgängen gemeinsam sind. Der m -te Arbeitsgang kann das Wechseln des Haltegriffs eines Roboters am Werkstück zwischen einzelnen Biegungen in der Abfolge von Biegungen und/oder die Ausführung einer Biegung in der Abfolge von Biegungen umfassen.

[0054] Zusätzlich zu dem zuvor Geschilderten kann die Steuerungseinrichtung ein rechnergestütztes Verfahren zur Auswahl der in einer Biegevorrichtung zum Biegen eines Werkstücks enthalten, das aus einer Platte aus verformbarem Material besteht, zu verwendenden Werkzeugausrüstung. Die Werkzeugausrüstung umfaßt mindestens ein Gesenk und einen Stempel, und die Biegevorrichtung führt mit Hilfe der ausgewählten Werkzeugausrüstung eine Abfolge von Arbeitsgängen aus, die eine Abfolge von Biegungen von einer ersten Biegung bis zu (und einschließlich) einer n-ten Biegung umfaßt. Das Verfahren weist Schritte auf, bei denen Informationen gelesen werden, die die Geometrie von Gesenken und Stempeln beschreiben, und bei denen Sätze geeigneter Gesenke und Stempel unter Ausschluß von Gesenken und Stempeln gebildet werden, deren Kraftkapazität nicht ausreicht, das Werkstück zu biegen, und die nicht in der Lage sind, die gewünschten Biegungen im Werkstück mit den erwünschten Winkeln und den erwünschten Innenradien zustandezubringen. Außerdem enthält das Verfahren einen Schritt der Auswahl eines geeigneten Gesenks und eines geeigneten Stempels, die am besten den Anforderungen an Kraft, Biegewinkel und Innenradien genügen, wobei Stempel ausgeschlossen werden, die wahrscheinlich mit dem Werkstück kollidieren würden, wie es durch Nichtbestehen eines geometrischen Kollisionstest ermittelt wird.

[0055] Der geometrische Kollisionstest kann durchgeführt werden, indem ein fertiges dreidimensionales Werkstück modelliert und für jede Biegung in der Abfolge von Biegungen das modellierte fertige dreidimensionale Werkstück zwischen einem Modell eines jeden geeigneten Stempels und einem Modell eines ausgewählten Gesenks ausgerichtet angeordnet wird.

[0056] Es kann ein rechnergestütztes Verfahren zur Ermittlung einer Anordnung von Werkzeugbühnen entlang einer Gesenkschiene einer Biegevorrichtung vorgesehen sein. Die Biegevorrichtung ist dafür eingerichtet, Werkstücke zu biegen, die aus Platten aus verformbarem Material bestehen, indem sie eine Abfolge von Arbeitsgängen ausführt, die eine Abfolge von Biegungen von einer ersten Biegung bis zu (und einschließlich) einer n-ten Biegung umfaßt. Das Verfahren weist einen Schritt auf, bei dem über eine Anordnung einer Anzahl von Bühnen an der Gesenkschiene entlang entschieden wird und seitliche Begrenzungen auf der Grundlage des Betrags berechnet werden, um den das Werkstück über eine Seitenkante einer Werkzeugbühne für die

Biegungen in der Abfolge von Biegungen hinausragt. Außerdem umfaßt das Verfahren die Bestimmung einer größten seitlichen Begrenzung für jede Seite der Bühne und die abstandsmäßige Anordnung benachbart angeordneter Bühnen dergestalt, daß eine Lücke zwischen benachbarten Seitenkanten entsteht, die größer ist als oder gleich groß wie die größere der ermittelten größten seitlichen Begrenzungen der benachbarten Seitenkanten.

[0057] Weiter kann eine Steuerungseinrichtung vorgesehen sein zur Erzeugung eines Plans und zur Steuerung einer Biegevorrichtung eine Abfolge von Arbeitsgängen, die von der Biegevorrichtung auszuführen sind, und die Biegevorrichtung ist zum Biegen von Werkstücken eingerichtet, die aus Platten aus verformbarem Material bestehen. Die Abfolge von Arbeitsgängen umfaßt eine Abfolge von Biegungen von einer ersten Biegung bis zu (und einschließlich) einer n-ten Biegung zur Herstellung eines fertigen Werkstücks aus einer Ausgangsplatte aus verformbarem Material. Das System enthält einen Mechanismus für die Installationsplanung zur Generierung der Abfolge von Biegungen und eines Installationsteilplans, der Informationen hinsichtlich der Art enthält, in der die Biegevorrichtung zu installieren ist, ehe mit der ersten Biegung in der Abfolge von Biegungen begonnen wird. Außerdem enthält das System einen Absendemechanismus für die Weitergabe des Installationsteilplans, sobald er generiert ist, an ein Anzeigegerät zur Meldung des Beginns der gemäß dem Installationsteilplan auszuführenden Installationsarbeiten. Weiterhin gibt es einen Vollendungsmechanismus zum Erzeugen detaillierter Teilplaninformationen, um den Plan zu vervollständigen, nachdem der Installationsteilplan generiert worden ist. Zumindest ein Teil der detaillierten Teilplaninformationen wird erzeugt, nachdem der Beginn der Installationsarbeiten von dem Anzeigegerät gemeldet worden ist. Der Installationsteilplan kann eine oder mehrere der folgenden Arten von Informationen enthalten: Informationen zur Anordnung von Werkzeugbühnen; Informationen zu Gesenk- und Stempelprofilen der Werkzeugausrüstung, die in der Biegevorrichtung eingesetzt werden sollen; Positionen von Werkzeugbühnen an einer Gesenkschiene der Biegevorrichtung; Informationen zur Art des zu verwendenden Greifers für die Handhabung des Werkstücks im Verlauf der Abfolge von Biegungen; sowie Informationen zur Art des zu verwendenden Repogreifers zum Halten des Werkstücks, während ein Greifer zwischen den Biegungen der Abfolge von Biegungen seinen Haltegriff am Werkstück wechselt.

[0058] Dadurch kann die Absendevorrichtung eine Vorrichtung zur Weitergabe von Anweisungen an einen Modul Zuordner enthalten, der die Ausführung automatisierter Installationsarbeiten an der Biegevorrichtung steuert. Zusätzlich oder als Alternative kann die Absendevorrichtung auch, oder alternativ dazu, eine visuelle Darstellung der Installationsarbeiten erzeugen, die an der Biegevorrichtung auszuführen sind, so daß ein Bediener (Mensch) anhand dieser Darstellung die Installationsarbeiten ausführen kann.

[0059] Zusätzlich zu der zuvor beschriebenen Steuerungseinrichtung und zu den Verfahren kann ein Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung auf eine Steuerungseinrichtung gerichtet sein, um Installationsarbeiten an einer Biegevorrichtung auszuführen, so daß die Biegevorrichtung zur Ausführung von Biegearbeiten an Werkstücken verwendet werden kann, die aus Platten verformbaren Materials bestehen. Die Biegevorrichtung weist ein Gesenk, einen Haltemechanismus für das Stempelwerkzeug und eine oder mehrere Werkzeugbühnen auf. Jede Werkzeugbühne weist ein auf der Gesenkschiene montiertes Gesenk und einen Werkzeugstempel auf, der vom Haltemechanismus für den Stempel gehalten wird. Das System umfaßt weiterhin einen Mechanismus zum Empfang von Informationen hinsichtlich der Position jeder einzelnen der einen oder mehreren Werkzeugbühnen an der Gesenkschiene und einen Steuermechanismus für die Steuerung einer Position eines Führungsglieds an zumindest einer der Gesenkschienen und am Haltemechanismus für das Stempelwerkzeug auf der Grundlage der erhaltenen Informationen, so daß zumindest eines der Gesenke und der Werkzeugstempel in bezug auf das Führungsglied ausgerichtet werden können und daß sich die so entstandene Werkzeugbühne an einer gewünschten Stelle entlang der Gesenkschiene befindet.

[0060] Der Steuermechanismus kann in der Lage sein, das Führungsglied so zu positionieren, daß es sich an einer vorgegebenen Position entlang der Gesenkschiene und innerhalb einer bestimmten Entfernung von der Gesenkschiene befindet, so daß ein Gesenk einer auszurichtenden Werkzeugbühne bis an das Führungsglied herangefahren werden kann, um die Werkzeugbühne entlang der Gesenkschiene genau zu positionieren. Das Führungsglied kann einen Rückanschlagfinger eines Mechanismus für den Rückanschlag beim Einbringen eines Werkstücks in die Biegevorrichtung aufweisen.

[0061] Überdies kann eine Steuerungseinrichtung vorgesehen sein, um einen Plan zur Steuerung einer Biegevorrichtung zum Biegen von Werkstücken abzuarbeiten, die aus Platten verformbaren Materials bestehen. Der Plan umfaßt eine Abfolge von Arbeitsgängen, die von der Biegevorrichtung auszuführen sind. Ein Steuermechanismus auf Sensorbasis steht für die Ausführung eines Arbeitsgangs einschließlich des Transports eines Werkstücks von einer Position zur anderen zur Verfügung, wobei die Biegevorrichtung ein Ausgangssignal

des Sensors nutzt, um die Bewegungen des Werkstücks zu modifizieren. Ein Meßgerät mißt einen Betrag, um den die Bewegung des Werkstücks aufgrund des Ausgangssignals des Sensors modifiziert wurde, und ein intelligenter Steuermechanismus führt den Arbeitsgang einschließlich des Transports des Werkstücks von einer Position zur anderen aus, ohne die Bewegung des Werkstücks anhand eines Ausgangssignals des Sensors zu modifizieren. Der intelligente Steuermechanismus steuert die Ausführung des Arbeitsgangs anhand des vom Meßgerät gemessenen Betrags.

[0062] Wie zuvor erwähnt worden ist, kann das erfinderische System für das Erzeugen eines Planes ein intelligente Biegearbeitsstation-Umgebung/System vorsehen, das leicht mit zusätzlicher oder alternierender Gerätetechnik- und software-Modulen höher eingestuft und integriert werden kann. Demzufolge kann solch ein System verwendet werden, um sehr kleine Losgrößen (eines oder mehrere Werkstücke) mit hoher Qualität ökonomisch und in einer kurzen Zeitdauer herzustellen. Zusätzlich ist solch ein System flexibel und ist in der Lage, neue und unterschiedliche Teilarten in dem Design und in dem Herstellungsverfahren aufzunehmen. Das System der vorliegenden Erfindung ist in der Lage, in der Produktion mit großem Volumen effizient zu arbeiten und von der Anfangsproduktion in dem Verlaufe zu lernen, um die Effizienz zu maximieren.

[0063] Ein zusätzliches Merkmal solch einer Biegevorrichtung ist der, dass sie in der Lage ist eine hohe Qualität der erzeugten Teile durch den gesamten Vorgang beizubehalten und Fehler und Kollisionen während des Ausführens des Verfahrens durch die Biegearbeitsstation zu vermeiden, wobei außerdem das System der vorliegenden Erfindung eine intelligente Blechbiege-Arbeitsstation vorzusehen, die kleine Losgrößen von Blechmetallteilen aus den CAD-Beschreibungen herstellt. In dieser Hinsicht ist ein Vorhangsplaner vorgesehen, der vorsieht, dass die notwendige Gerätetechnik (z. B. Gesenke, Stempel, Greifer, Sensoren), die durch die Biegearbeitsstation verwendet werden soll, auswählt, die Biegeabfolge bestimmt und die die notwendige Software erzeugt, um die Biegemaschine zu betätigen.

[0064] Durch das Vorsehen solch einer Biegearbeitsstation, die zuerst einen Biegeplan erzeugt und dann den Plan erzeugt, der ein auf Echtzeit basiertes Steuerverfahren verwendet, können die Ergebnisse, wenn das Verfahren ausgeführt wird, für eine spätere Überprüfung aufgezeichnet werden, so dass das Verfahren verfeinert werden kann, um es effizienter zu machen, und um das Auftreten von Fehlern während der Ausführung zu reduzieren.

[0065] Als ein zusätzliches Merkmal kann die Steuervorrichtung einen Plan für das Biegen eines Blechwerkstückes erzeugen, in dem die kleinste Anzahl der Werkzeugbühnen verwendet werden wird, um das Teil zu erzeugen. Demzufolge wird das System effizient und automatisch den Plan erzeugen, um ihn in der Biegearbeitsstation zu verwenden, um die Biegearbeitsstation einzurichten und um den Plan auszuführen.

[0066] Mehrere Systeme, Verfahren und Sub-Bauteile sind in Verbindung mit einem System für das Erzeugen eines Planes vorgesehen, der eine Abfolge von Biegevorgängen aufweist, die durch die Biegevorrichtung für das Biegen von Werkstücken, die Bleche aus verformbaren Material aufweisen, ausgeführt werden sollen. Die Biegevorrichtung hat einen Greifer zu dem Ergreifen eines Werkstückes während des Ausführens einer Biegung und die Abfolge von Vorgängen einen Satz von N-Biegungen für das Bilden eines fertig bearbeiteten Werkstückes aus einem Plattenstapel von verformbaren Material enthält. Das System enthält eine Vorschlagsvorrichtung für das Vorschlagen für einen m-ten Betrieb innerhalb der Abfolge von Vorgängen, wobei eine Mehrzahl von vorgeschlagenen Vorgängen eine Mehrzahl von vorgeschlagenen Biegungen, die durch die Biegevorrichtung ausgeführt werden sollen, enthält. Zusätzlich enthält das System einen Sub-Planvorrichtung für das Vorbereiten eines vorgeschlagenen Sub-Planes, der jede vorgeschlagene Biegung begleitet, und eine Erzeugungsvorrichtung für das Erzeugen eines Planes, der eine Abfolge von Biegungen von einer ersten Biegung bis zu einer n-ten Biegung durch Auswählen einer Biegung in der Abfolge von Vorgängen auf der Grundlage der vorgeschlagenen Biegungen und den vorgeschlagenen Sub-Plan, der jede Biegung begleitet, enthält.

[0067] Die vorgeschlagene Vorrichtung kann so ausgelegt werden, dass sie Biegungen zwischen dem vollständigen Satz von N-Biegungen vorschlägt, der noch verbleibt, oder Biegungen zwischen dem vollständigen Satz von Biegungen vorschlägt, der noch, weniger die Biegungen, die infolge von Behinderungen verbleiben, verbleibt. Zusätzlich kann eine Vorschlagsvorrichtung für einen m-ten Vorgang eine Repositionierung einer Hand des Greifers, die das Werkstück halt, vorschlagen.

[0068] In Übereinstimmung mit einem besonderen Ausführungsbeispiel enthält der erzeugte Plan außerdem zumindest einen Teil des vorgeschlagenen Sub-Planes, der die ausgewählten Biegungen begleitet. Das System kann außerdem eine Vorrichtung für das Repräsentieren des m-ten Vorgangs als ein n-tes Niveau eines Suchbaumes enthalten. Der vorgeschlagene Sub-Plan kann eine Einrichtungs- und Steuerungsinformation für

die Biegevorrichtung enthalten und kann außerdem endgültige Orte an dem Werkstück aufweisen, an denen der Greifer das Werkstück greifen wird, während die Biegungen der Biegeabfolge ausgeführt werden. Der vorgeschlagene Sub-Plan kann weitere Bereiche von Orten enthalten, an denen der Greifer das Werkstück greifen kann, während die Biegungen der Biegeabfolge ausgeführt werden. Zusätzlich kann der vorgeschlagene Sub-Plan aufweisen: Anzahl des Repräsentierens einer vorhergesagten Anzahl von Repositionierungen des Greifers, die notwendig sind, um die Abfolge der Biegungen zu vervollständigen, Anzeigen, dass die nächste Biegung in der abfolge nicht ausgeführt werden kann, es sei den, dass der Greifer zuerst repositioniert ist, und/oder Orte an dem Werkstück, an dem der Repositionier-Greifer (d. h., ein Repo-Greifer) das Werkstück greifen wird, während ein Repositionierungsvorgang ausgeführt wird. Zusätzlich kann der vorgeschlagene Sub-Plan enthalten: Werkzeugbühnen, die verwendet werden, um die Biegungen in der Biegeabfolge auszuführen, Positionen entlang einer Werkzeugbühne, bei denen das Werkstück in die Biegevorrichtung geladen wird, um die Biegungen auszuführen, und/oder Bewegungspläne für das Manövrieren rund um die Werkzeugbühnen während des Ausführens der Biegungen. Weitere vorteilhafte Gesichtspunkte der Erfindung sind Gegenstand der Unteransprüche.

[0069] Die vorliegende Erfindung wird in der folgenden detaillierten Beschreibung weiter erläutert, wobei Bezug auf die zahlreichen beigefügten Zeichnungen im Sinne von nicht einschränkenden Beispielen erläuternder Anwendungsbeispiele der vorliegenden Erfindung genommen wird, in denen gleiche Bezugszahlen in den einzelnen Ansichten der Zeichnungen durchgängig gleichartige Teile bezeichnen und wobei:

[0070] [Fig. 1](#) eine Bearbeitungsstation zum Biegen nach dem Stand der Technik zeigt;

[0071] [Fig. 2](#) einen Teil einer Seitenansicht einer Biegepresse nach dem Stand der Technik zeigt;

[0072] [Fig. 3](#) eine teilweise Vorderansicht einer Biegepresse nach dem Stand der Technik zeigt;

[0073] [Fig. 4](#) ein Planungs- und Steuersystem für Biegungen nach dem Stand der Technik zeigt;

[0074] [Fig. 5A](#) ein Planungs- und Steuersystem für Biegungen gemäß einem erläuterten Anwendungsbeispiel der vorliegenden Erfindung zeigt;

[0075] [Fig. 5B](#) ein Steuersystem für die Bühneninstallation zeigt;

[0076] [Fig. 5C](#) eine Draufsicht auf eine Gesenkschiene zeigt, auf der ein Arbeitsgang der Bühneninstallation ausgeführt wird;

[0077] [Fig. 6](#) ein Planungs- und Steuersystem für Biegungen mit einem detaillierten Schema des in [Fig. 5A](#) dargestellten Steuersystems **75** zeigt;

[0078] [Fig. 7](#) eine Flussschiene höheren Niveaus für einen Gesamtplanungs-Prozess zeigt, das von dem erläuterten Planungssystem abzuarbeiten ist;

[0079] [Fig. 8](#) ein ebenes Werkstück zur Beschreibung markierter geometrischer biegebezogener Merkmale zeigt;

[0080] [Fig. 9](#) ein ebenes Werkstück und einen zugehörigen Suchbaum zeigt;

[0081] [Fig. 10](#) eine Dickentransformation eines einzelnen Werkstücks erläutert;

[0082] [Fig. 11](#) eine Dickentransformation einer Anordnung von Werkstücken erläutert;

[0083] [Fig. 12](#) eine Dateistruktur für die geometrische Modellierung mit und ohne eine Dickentransformation zeigt;

[0084] [Fig. 13A](#) eine Anzahl von Funktionen eines Konstruktionssystems für intelligente Biegeplanung zeigt;

[0085] [Fig. 13B](#) einen Teilemodellierer zur Modellierung von Teilen auf der Grundlage der Datei der Ergebnisformen eines Konstruktionssystems zeigt;

- [0086] die [Fig. 13C](#) bzw. [Fig. 13D](#) eine zweidimensionale Darstellung bzw. eine dreidimensionale Darstellung eines Werkstücks zeigen;
- [0087] die [Fig. 14A–Fig. 14E](#) ein Beispiel einer graphischen Nutzer-Schnittstelle des im erläuterten Anwendungsbeispiel vorhandenen CAD-Systems und die Schritte der Konstruktion eines Teils mit Hilfe einer solchen graphischen Schnittstelle zeigen;
- [0088] [Fig. 15A](#) eine Seitenansicht eines gebogenen Werkstücks mit Dicke zeigt;
- [0089] [Fig. 15B](#) eine Draufsicht auf eine unentwickelte ebene zweidimensionale Darstellung eines Werkstücks zeigt;
- [0090] [Fig. 15C](#) eine Draufsicht auf eine entwickelte ebene zweidimensionale Darstellung eines Werkstücks zeigt;
- [0091] [Fig. 16](#) eine zweidimensionale Zeichnung entsprechend einer Auflistung von Biegungsgraphen zeigt;
- [0092] [Fig. 17A](#) eine Dateistruktur der geometrischen Modellierung für die BM100 zeigt;
- [0093] [Fig. 17B](#) eine Dateistruktur der Werkzeugmodellierung zeigt;
- [0094] [Fig. 18A](#) eine Dateistruktur der Greifermodellierung zeigt;
- [0095] [Fig. 18B](#) eine Dateistruktur der Teilemodellierung zeigt;
- [0096] [Fig. 19](#) eine Planungsmeldung in FEL zeigt, die von einem Planer der Abfolge von Biegungen an einen Bewegungsexperten zu senden ist;
- [0097] [Fig. 20A](#) ein Beispiel eines Werkstücks und einen Suchbaum zeigt, der in Übereinstimmung mit dem Werkstück generiert wurde;
- [0098] [Fig. 20B](#) ein Beispiel eines Werkstücks und einen Suchbaum mit Zwillingknoten für Biegungen zeigt;
- [0099] [Fig. 20C](#) ein Beispiel eines Werkstücks und einen Suchbaum mit einem Zwillingknoten zeigt, der eine verhinderte Biegung aufweist;
- [0100] [Fig. 20D](#) und [Fig. 20E](#) Beispiele von Werkstücken mit kollinearen Biegungen zeigen;
- [0101] [Fig. 21](#) ein allgemeines Beispiel eines Programmablaufplans von A* zeigt, angewandt auf das Biegen von Blech;
- [0102] [Fig. 22A–Fig. 22D](#) den Hauptablaufplan eines Anwendungsbeispiels des hier erläuterten Planers der Abfolge von Biegungen zeigen;
- [0103] [Fig. 23A–Fig. 23D](#) ein Verfahren für die Durchführung von Teilplanung und Kostenzuweisung zeigen;
- [0104] [Fig. 24](#) ein Beispiel eines Werkstücks und einen Suchbaum mit Darstellung der berechneten Kosten zeigt;
- [0105] [Fig. 25A](#) ein Beispiel eines Werkstücks mit einer inneren Lasche zeigt;
- [0106] [Fig. 25B](#) ein Beispiel eines Werkstücks mit äußeren und inneren Biegelinien zeigt;
- [0107] [Fig. 25C](#) ein Beispiel eines Werkstücks mit kurzen und langen Biegelinien zeigt;
- [0108] [Fig. 25D](#) ein Beispiel eines Teils eines gebogenen Werkstücks mit stumpf anstoßender innerer und äußerer Eckkante zeigt;
- [0109] [Fig. 25E](#) ein Beispiel eines Abschnitts eines Werkstücks mit kollinearen Biegungen darstellt;

- [0110] [Fig. 26A](#), [Fig. 26B](#), [Fig. 27A–Fig. 27C](#) Beispiele von Werkstücken zeigen, die verwendet werden, um Beschränkungsausdrücke zu erklären;
- [0111] [Fig. 28](#) ein Schema ist, das die Entwicklungsgeschichte der Knoten b6' und b6 miteinander vergleicht;
- [0112] [Fig. 29](#) ein Schema eines Dialogs zwischen dem Planer der Abfolge von Biegungen und dem Halteexperten zeigt;
- [0113] [Fig. 30](#) ein Schema eines Dialogs zwischen dem Planer der Abfolge von Biegungen und dem Werkzeugexperten zeigt;
- [0114] [Fig. 31](#) ein Schema eines Dialogs zwischen dem Planer der Abfolge von Biegungen und dem Bewegungsexperten zeigt;
- [0115] [Fig. 32](#) ein Verfahren der Auswahl eines Robotergreifers zeigt; [Fig. 33A](#) ein ebenes zweidimensionales Werkstück mit darauf dargestellten diskretisierten x Punkten zeigt;
- [0116] [Fig. 33B](#) ein gebogenes dreidimensionales Werkstück mit darauf aufgelegten diskretisierten x Punkten zeigt;
- [0117] die [Fig. 34A–Fig. 34B](#) ein Verfahren für die Vorhersage einer Mindestanzahl von Repos zeigen, die vor der Suche auszuführen sind;
- [0118] die [Fig. 35A–Fig. 35B](#) ein Verfahren für die Vorhersage einer Mindestanzahl von Repos zeigen, die während der Suche auszuführen sind;
- [0119] die [Fig. 36A–Fig. 36B](#) ein Verfahren für die Ermittlung der Stellen für den Haltegriff des Roboters am Werkstück zeigen;
- [0120] [Fig. 37](#) ein zweidimensionales Werkstück mit sowohl Platten- als auch Kantenkoordinatensystem zeigt;
- [0121] [Fig. 38](#) ein zweidimensionales Werkstück und die erläuterte Generierung verfügbarer Y-Positionen für den Haltegriff zeigt;
- [0122] [Fig. 39](#) ein Schema ist, das die sich überschneidenden Griffzonen zum Zwecke der Festlegung einer endgültigen Griffzone vor der Durchführung einer Repo zeigt;
- [0123] [Fig. 40](#) Beispiele von Griffzonen auf unterschiedlichen Ebenen der Suche zeigt;
- [0124] [Fig. 41](#) ein Verfahren zur Bestimmung der Repo-Greiferstelle zeigt;
- [0125] [Fig. 42](#) ein Verfahren zur Auswahl eines Repo-Greifers vor Durchführung einer Zustands-Raum-Suche zeigt;
- [0126] [Fig. 43A–Fig. 43B](#) ein Verfahren zur Auswahl eines Repo-Greifers zeigen, die nach einer Zustands-Raum-Suche durchzuführen ist;
- [0127] [Fig. 44](#) ein Verfahren für bin-packing (Zusammenstellung von Segmenten) zeigt, das vor einer Suche durchzuführen ist;
- [0128] [Fig. 45](#) in einer graphischen Darstellung die Schritte erläutert, die abzuarbeiten sind, um den anfänglichen Anteil h der Werkzeugkosten zu ermitteln (auf der Grundlage der insgesamt vorhergesagten Bühnen, die erforderlich sein werden, um die komplette Abfolge von Biegungen auszuführen);
- [0129] [Fig. 46](#) die Schritte eines Verfahrens zur Ermittlung des anfänglichen Anteils h der Werkzeugkosten zeigt;
- [0130] [Fig. 47A](#) ein Verfahren zur Auswahl der zu verwendenden Werkzeugausrüstung zeigt;

- [0131] [Fig. 47B–Fig. 47C](#) ein Verfahren zur Durchführung der Bühnenplanung zeigen;
- [0132] [Fig. 48A–Fig. 48C](#) graphische Darstellungen einer modellierten Biegepresse und eines Werkstücks sind, die während der Bühnenplanung verwendet werden;
- [0133] [Fig. 49](#) ein Verfahren zur Planung der Feinbewegung zeigt;
- [0134] [Fig. 50](#) Verfahrensschritte zeigt, die von dem Bewegungsexperten ausgeführt werden, um die Kostenanteile k und h zu berechnen;
- [0135] [Fig. 51](#) eine graphische Darstellung von Modellen einer Biegepresse, eines Roboters und eines Werkstücks ist, wobei die Modelle zur Erstellung eines Plans der Grobbewegung verwendet werden;
- [0136] [Fig. 52](#) ein Blockdiagramm ist, das die Struktur der Steuerungssoftware des hier erläuterten Planungssystems zeigt;
- [0137] [Fig. 53](#) die Hauptprozessschritte der Aufgabe Zuordner zeigt, die innerhalb des Zuordners des hier erläuterten Planungssystems bereitgestellt wird;
- [0138] [Fig. 54](#) die Schritte zeigt, die bei Ausführung einer Biegung gemäß einem erstellten Plan abgearbeitet werden;
- [0139] [Fig. 55](#) eine Aufgabe Roboter zeigt, die einen Teil des Steuersystems darstellt; [Fig. 56](#) eine Aufgabe Presse und Beschickung/Entnahme (L/UL) des Steuersystems verdeutlicht;
- [0140] [Fig. 57](#) eine Aufgabe Rückanschlag des Steuersystems verdeutlicht; und
- [0141] [Fig. 58](#) ein Flussdiagramm ist, das die Hauptschritte darstellt, die bei einem Lernprozess abgearbeitet werden, der von dem hier erläuterten Planungssystem ausgeführt werden kann.

KURZE BESCHREIBUNG DER ANHÄNGE

- [0142] Die vorliegende Erfindung wird weiterhin durch eine Anzahl von Auflistungen, die in den Anhängen vorgelegt werden, beispielhaft veranschaulicht; wobei
- Anhang A eine Datei der Ergebnisformen ist, die von einem CAD-System erzeugt wurde und die eine geometrische/topologische Datenstruktur eines Werkstücks aufweist, wie in [Fig. 14E](#) gezeigt;
- Anhang B ein Beispiel einer Auflistung von Biegungsgraphen darstellt, die aus der in der Auflistung von Anhang A vorgelegten geometrisch/topologischen Datenstruktur gebildet wurde;
- Anhang C eine beispielhafte Auflistung ist, die die Mitteilungen in FEL darstellt, die während des Planungsprozesses generiert und zwischen dem Planer der Abfolge von Biegungen und verschiedenen Experten hin- und hergeschickt werden können; und Anhang D ein Beispiel einer Spezifikation für eine Auflistung ist, die den endgültigen Plan in FEL darstellt, der vom Planer der Abfolge von Biegungen an den Zuordner des hier erläuterten Planungs- und Steuersystems **71** abgeschickt wird.

DETAILLIERTE BESCHREIBUNG DER DARGESTELLTEN AUSFÜHRUNGSBEISPIELE

1. Planung, Installation und Steuerung

- [0143] Geht man jetzt detaillierter auf die Figuren ein, so zeigt **Fig. 5** ein Blockdiagramm eines Ausführungsbeispiels eines Planungs- und Steuersystems **70** für eine intelligente Fertigungsstation zum Biegen. In dem dargestellten Ausführungsbeispiel umfasst Planungs- und Steuersystem **70** ein CAD-System **74**, einen Planer für die Biegungsabfolge **72**, eine Anzahl von Experten (Teilplanern) und einen Zuordner **76**. Planungs- und Steuersystem **70** ist über eine Schnittstelle **77** mit Hardware und Sensoren **78** verbunden.

- [0144] Zu den Experten gehört ein Werkzeugexperte **80**, ein Halteexperte **82** und ein Bewegungsexperte **84**. Weitere Experten können zur Verfügung gestellt werden, wie z. B. der in gestrichelten Linien gezeigte Sensorexperte **85**. Der Planer für die Biegungsabfolge **72**, die Experten **80**, **82** und **84** sowie CAD-System **74** können innerhalb einer UNIX-kompatiblen Umgebung auf einem Workstation-Rechner, wie z. B. einem Spare **10** Sun OS v.4.1.3, implementiert werden. Zuordner **76** kann innerhalb einer zusätzlichen Zentraleinheit implementiert werden, die über einen Busadapter an die Sun-Workstation angekoppelt wird. Der Busadapter kann ein Busa-

dapter BIT 3 VME-to-VME sein, der sich zwischen der Sun-Workstation und einer passiven Rückwand eines entfernten VME-Bus befindet. Die passive Rückwand kann mehrere Schnittstellenmechanismen aufweisen, wie z. B. VME-Tafeln (VME: virtuelle Speichererweiterung), die zusammen einen Teil der Schnittstelle 77 bilden, wie in Fig. 5 dargestellt. Zuordner 76 kann im Rahmen eines UNIX-kompatiblen Echtzeit-Multiprozessor-Betriebssystems, wie z. B. CHIMERA, implementiert und mit Hilfe der zusätzlichen Zentraleinheit betrieben werden, die in der Rückwand der Rechner-Workstation bereitgestellt wird. Dementsprechend werden im erläuterten Ausführungsbeispiel (in Fig. 51 gezeigt) CAD-System 74, der Planer für die Biegungsabfolge 72, die Experten 80, 82, 84 (und 85) und Zuordner 76 jeweils in erster Linie mit Software implementiert, die den Betrieb eines Computers steuert, der mit einem UNIX-kompatiblen Betriebssystem arbeitet. Zuordner 76 wird im Rahmen eines UNIX-kompatiblen Echtzeit-Multiprozessor-Betriebssystems, wie z. B. CHIMERA, implementiert.

[0145] CAD-System 74 wird verwendet, um eine Konfiguration des Metallblechs zu entwerfen, indem es die Form eines (ebenen) Ausgangsteils aus Metallblech und die Biegungen definiert, die an dem Ausgangsteil auszuführen sind, um ein gewünschtes dreidimensionales Fertigteil zu erzeugen. Bei der Konstruktion des Blechteils erzeugt CAD-System 74 eine oder mehrere Informationsdateien, die das Teil beschreiben. Während ein dreidimensionales Teil konstruiert wird, behält das CAD-System in einem bevorzugten Ausführungsbeispiel im Speicher und visuell eine dreidimensionale Darstellung des Blechteils parallel mit einer zweidimensionalen Darstellung des Teils bei. Der Konstrukteur kann die Konstruktion modifizieren, indem er zu jeder beliebigen der beiden Darstellungen Einzelheiten hinzufügt oder von jeder beliebigen der beiden entfernt. CAD-System 74 kann auch Aufgaben erledigen wie das Einholen und/oder Generieren von Informationen, die für die geometrische Modellierung benötigt werden, und das Abrufen von Hinweisen vom Planer für die Biegungsabfolge 72 in bezug darauf, ob bestimmte Konstruktionsmerkmale von der Bearbeitungsstation zum Biegen realisiert werden können.

[0146] Der Planer für die Biegungsabfolge 72 arbeitet mit dem Werkzeugexperten 80, dem Halteexperten 82, dem Bewegungsexperten 84 und eventuellen anderen Experten (z. B. Sensorexperte 85) zusammen, um einen Plan zur Fertigung des kompletten Teils, das mit Hilfe des CAD-Systems 74 konstruiert wurde, durch eine Bearbeitungsstation zum Biegen zu erstellen. Der Planer für die Biegungsabfolge 72 erledigt Aufgaben wie Vorschlagen einer bestimmten Biegung in einer hypothetischen Abfolge von Biegungen und Ermittlung, welche ersten Schritte von dem System ausgeführt werden müssen, um eine derartige Biegung mit einer Position in der hypothetischen Abfolge von Biegungen auszuführen. Bei der Ermittlung der Konsequenzen der vorgeschlagenen Biegung kann der Planer für die Biegungsabfolge 72 den Werkzeugexperten 80 dahingehend abfragen, welche Werkzeuge benötigt würden, um die vorgeschlagene Biegung auszuführen, während er den Halteexperten 82 in bezug darauf befragt, wie das Werkstück während der Ausführung der vorgeschlagenen Biegung gehalten werden kann, und den Bewegungsexperten 84 dahingehend abfragt, ob und in welchem Ausmaß der Roboter (der das Werkstück hält) betätigt werden kann, um bei der Ausführung der Biegung zu helfen. Wenn ein Sensorexperte 85 vorhanden ist, könnte der Planer für die Biegungsabfolge 72 den Sensorexperten 85 in bezug darauf abfragen, ob eine besondere Steuerstrategie auf Sensorbasis erforderlich ist, um die Ausführung der vorgeschlagenen Biegung durch die Bearbeitungsstation zu erleichtern, und wie hoch die mit einer besonderen Steuerstrategie auf Sensorbasis verbundenen Kosten sind. Der Planer für die Biegungsabfolge 72 kann so gestaltet werden, dass er ständig Biegungen von einer ersten Biegung fortlaufend bis zu einer letzten Biegung in einer vollständigen Abfolge von Biegungen vorschlägt, was somit zu einer vollständigen Reihe von Biegungen zur Herstellung des fertigen Werkstücks führt. Sobald auf diese Weise die endgültige Abfolge von Biegungen erfolgreich generiert worden ist, kann der Planer für die Biegungsabfolge 72 so gestaltet werden, dass er einen endgültigen Plan generiert (der eine allgemeine Liste von Schritten und zugehörigen Informationen enthält, die erforderlich sind, um die Arbeit der verschiedenen Komponenten der Gerätetechnik der Bearbeitungsstation zu steuern) und den Plan an Zuordner 76 schickt.

[0147] Zuordner 76 leitet die Ausführung des vom Planer für die Biegungsabfolge 72 entwickelten Plans. Zuordner 76 interpretiert Befehle, die vom Planer für die Biegungsabfolge 72 im resultierenden Plan erteilt werden, und steuert die zeitliche Abfolge der verschiedenen Befehle, indem er die Befehle und die zu den Befehlen gehörenden Informationen analysiert („parst“) und sie in die Warteschlangen einreicht, die für jede einzelne Hauptkomponente der Gerätetechnik der Bearbeitungsstation zum Blechbiegen bereitstehen.

[0148] Steuereinheit 75 umfasst eine Anzahl von Aufgaben, die den verschiedenen Komponenten der Gerätetechnik der Bearbeitungsstation entsprechen. Jede Aufgabe wird vom Zuordner in geeigneter Weise gemäß dem vom Planer übergebenen Plan in Betrieb gesetzt.

(a) Die Arbeitsweise des Planungssystems: Planer und Teilplaner

[0149] Der Planer für die Biegungsabfolge **72** und die einzelnen Teilplaner, einschließlich z. B. des Werkzeugexperten **80**, Halteexperten **82** und Bewegungsexperten **84** (und des Sensorexperthen **85**), bilden ein Planungssystem **71**.

[0150] Der Planer für die Biegungsabfolge **72** analysiert das konstruierte Teil (Werkstück aus Blech), das von CAD-System **74** bereitgestellt wurde, und bietet eine Abfolge von Biegungen an, die von der Bearbeitungsstation zum Biegen auszuführen ist. Der Planer für die Biegungsabfolge **72** wendet ein Verfahren der Zustands-Raum-Suche an, um eine effektive Abfolge von Biegevorgängen zu ermitteln, die von der Bearbeitungsstation zum Biegen genutzt werden kann. Der Planer **72** setzt sich mit dem Werkzeugexperten **80**, dem Halteexperten **82** und dem Bewegungsexperten **84** in Verbindung, um die Informationen zu erhalten, die er für seine Entscheidungen benötigt.

[0151] Werkzeugexperte **80** spricht auf Anfragen von Planer **72** an und liefert dem Planer für die Biegungsabfolge Informationen, wie z. B., welche Werkzeuge für einen bestimmten Biegevorgang oder eine bestimmte Abfolge von Biegungen benötigt werden. Außerdem kann Werkzeugexperte **80** den Planer für die Biegungsabfolge **72** über die Anordnung von Werkzeugen in der Bearbeitungsstation informieren. Der Werkzeugexperte wird zusammen mit dem Planer **72** versuchen, einen Aufbau der Werkzeugausrüstung in einer Weise zu erarbeiten, dass zur Fertigung eines bestimmten Teils, d. h. zur Ausführung einer vollständigen Abfolge von Biegungen für die Herstellung des Teils, die geringste Anzahl von Bühnen/Werkzeugen verwendet wird.

[0152] Halteexperte **82** trifft Entscheidungen im Zusammenhang mit Haltevorgängen, wie z. B. die, ob der Roboter das Werkstück halten kann, während eine bestimmte Biegung, die vom Planer für die Biegungsabfolge **72** vorgegeben wurde, ausgeführt wird. Halteexperte **82** kann auch die Stelle festlegen, an der der Roboter das Werkstück halten soll, so dass das Werkstück ohne Kollision und ohne die Notwendigkeit, den Haltegriff des Roboters am Werkstück zu wechseln, durch eine Reihe von Biegungen manövriert werden kann. Außerdem kann Halteexperte **82** die Position bestimmen, an der der Repositioniergreifer das Werkstück halten soll, wenn der Haltegriff des Roboters gewechselt wird, und wo Saugnäpfe **31** der Beschickungs- und Entnahmeverrichtung (L/UL) **30** während der Werkstückentnahme und der Zuführung des Werkstücks angesetzt werden sollen.

[0153] Bewegungsexperte **84** ist verantwortlich für die Erstellung eines Bewegungsplans, d. h. für die Festlegung der Art und Weise, in der der Roboter zu steuern ist, um das Werkstück durch verschiedene Räume und entlang verschiedener Routen zu bewegen, wie es sich für die Ausführung der Biegungen erforderlich macht.

[0154] Der Planer für die Biegungsabfolge **72** und die jeweiligen Experten können nach dem Baukastenprinzip aufgebaut sein, um miteinander auf der Grundlage von Abfragen zu kommunizieren. Zum Beispiel kann der Planer für die Biegungsabfolge **72** vor der Entscheidung, eine bestimmte Biegung in die Abfolge von Biegungen einzubeziehen, beim Werkzeugexperten **80** anfragen, ob eine ausreichende Werkzeugausstattung vorhanden ist, um die Biegung ausführen zu können. Der Planer für die Biegungsabfolge **72** wird dann eine Antwort vom Werkzeugexperten **80** abwarten. Werkzeugexperte **80** wird die Anfrage vom Planer für die Biegungsabfolge **72** akzeptieren und darauf antworten, indem er z. B. angibt, dass die vorhandenen Werkzeuge ausreichen, um diese besondere vom Planer für die Biegungsabfolge **72** genannte Biegung auszuführen. Im Rahmen eines weiteren Beispiels kann der Planer für die Biegungsabfolge **72** auch den Halteexperten **82** fragen, ob Roboterarmgreifer **14** während eines bestimmten Biegevorgangs das Werkstück weiter halten kann, ohne seinen Haltegriff am Werkstück zu repositionieren. Halteexperte **82** wird dann auf die vom Planer für die Biegungsabfolge **72** an ihn gerichtete Anfrage antworten, und der Planer für die Biegungsabfolge **72** wird dann die Information nutzen, um seine nächste Festlegung zu treffen.

[0155] Jeder der Moduln von Planungssystem **71** nutzt eine oder mehrere Funktionen, die von einer Bibliothek der geometrischen Modellierung (nicht gezeigt) zur Verfügung gestellt werden, um die relativen Wechselwirkungen und Positionen einer jeden Komponente der Gerätetechnik des Systems zu modellieren, wie es sich für seine Entscheidungen erforderlich machen kann.

(b) Systeminstallation

[0156] Sobald vom Planungssystem ein Plan erstellt worden ist, wird das System einen Installationsprozess ausführen. Der Installationsprozess kann vollständig manuell durchgeführt werden, er kann aber auch vollständig oder teilweise automatisiert mit Hilfe automatischer Werkzeugwechsler ablaufen. Zu den während des Installationsprozesses vorzunehmenden manuellen Aktivitäten können das Herunterladen von Programmdateien

und ihre Übertragung zu Steuereinheiten für bestimmte Funktionen, wie zu den in [Fig. 1](#) dargestellten, gehören.

[0157] Wie in [Fig. 5C](#) gezeigt, muss jede Bühne (Bühne 1 und Bühne 2, wie in [Fig. 5C](#) dargestellt) installiert werden, indem eine Anzahl von Gesenksegmenten – **810a**, **810b** und **810c** in Bühne 1 sowie **811a**, **811b** und **811c** für Bühne 2 – entlang der Gesenkschiene **22** angebracht wird. Um die Stelle zu ermitteln, an der Gesenksegmente für jede Bühne angebracht werden sollen, wird in einem typischen Fall ein Bediener (Mensch) den Abstand von der Kante der Gesenkschiene **22** zu einer bestimmten Kante des zu jeder Bühne gehörenden Gesenks messen. Beispielsweise kann eine Messung von der linken Kante der Gesenkschiene **22** zur linken Kante eines jeden Gesenksatzes für jede einzelne Bühne vorgenommen werden, um die zu jeder Bühne gehörenden Gesenksegmente zu positionieren. Bei Realisierung eines speziellen Ausführungsbeispiels der vorliegenden Erfindung kann ein Mechanismus für die automatische Bereitstellung einer Führung vorgesehen werden, die vom Bediener, der die Installation vornimmt, verwendet werden kann, um die Gesenksegmente an die geeignete Stelle an der Gesenkschiene **22** zu bringen. Ein derartiger Mechanismus kann einen Rückanschlagfinger **88** aufweisen, der automatisch an einer bestimmten Kante jeder Bühne an der Gesenkschiene **22** entlang positioniert werden kann. Zum Beispiel kann Rückanschlagfinger **88** zuerst an Stelle A als Widerlager positioniert werden, so dass zuerst Gesenksegment **810a** an Rückanschlagfinger **88** anstößt, und anschließend können das zweite und das dritte Gesenksegment **810b** und **810c** installiert werden. Nach dem Anordnen der Gesenksegmente für Bühne 1 kann Rückanschlagfinger **88** automatisch an der nächsten Bühne positioniert werden, also an Bühne 2. Genauer gesagt: Rückanschlagfinger **88** kann an einer Seite des Gesenks positioniert werden, das zu Bühne 2 gehört. Im dargestellten Beispiel ist Rückanschlagfinger **88** an der linken Kante von Gesenk **811** positioniert. Während sich Rückanschlagfinger **88** in dieser Position befindet, kann zuerst Gesenksegment **811a** auf der Gesenkschiene **22** entlang geschoben und zur genauen Anordnung gegen Rückanschlagfinger **88** angeschlagen werden. Danach können die Gesenksegmente **811b** und **811c** auf die Gesenkschiene **22** gesetzt und auf ihr befestigt werden.

[0158] [Fig. 5B](#) verdeutlicht die Hauptkomponenten für die Steuerung des Rückanschlagfingers **88** zur Unterstützung bei der Positionierung einer Aneinanderreihung der Gesenke **810** und **811**. Das Teilsystem enthält einen Eingabesteuerungsmodul **87a**, der einen Mechanismus aufweist, um das Servosteuergerät für den Rückanschlag **87b** anzuweisen, den Rückanschlagfinger **88** an eine oder mehrere bestimmte Stellen der Bühne zu bewegen.

[0159] Gemäß [Fig. 5A](#) kann der Steuerungsmodul für die Ausrichtung **87a** im Steuerteil **75** des Planungs- und Steuersystems **70** bereitgestellt werden, während das Servosteuergerät für den Rückanschlag **87b** mit einer Schnittstelle **77** versehen sein kann. Noch spezieller kann Steuereinheit **75** mit einem Aufgabenmodul Rückanschlag ausgerüstet sein. Der Aufgabenmodul Rückanschlag kann eine Funktion Gesenkanordnung mit Rückanschlagfinger aufweisen, die vom Aufgabenmodul Rückanschlag aufgerufen werden kann. Beim Aufrufen der Funktion Gesenkanordnung kann der Aufgabenmodul Rückanschlag ein Servosteuergerät für den Rückanschlag mit Hilfe eines Rückanschlag-Gerätetreibers der zweiten Ebene **206** (siehe [Fig. 6](#)) aktivieren und steuern, der wiederum mit einem geeigneten Gerätetreiber der Ebene 1 in Wechselwirkung steht, wie z. B. einem I/O-Gerätetreiber **220**, der mit einer Parallel-I/O-Steckkarte in Wechselwirkung steht, die mit der Rückanschlag-Hardware der Bearbeitungsstation zum Biegen verbunden ist.

[0160] Ein weiterer manueller Arbeitsgang, der durchgeführt werden kann, ist die Positionierung und/oder Einstellung der Stempelhalter **20**. Des weiteren können Standardaufgaben ausgeführt werden, um Werkzeugstempelsegmente auszurichten, so dass sie in jedem Stempelhalter **20** richtig angebracht sind und zu den zugehörigen Gesenksegmenten passen. Dazu kann die Bedienung der Presse gehören, so dass die Gesenksegmente und die entsprechenden Werkzeugstempelsegmente mit einer Kraft vorgegebener Größe gegeneinander gepreßt werden. Zusätzlich können andere Standardeinstellungen und -verfahren, die den einschlägigen Fachleuten bekannt sind, während der Installation durchgeführt werden. Beispielsweise kann es sein, dass die Beschickungs- und Entnahmevorrichtung **30** so eingestellt werden muss, dass die Saugnäpfe **31** in bezug auf das Werkstück **16** richtig positioniert sind.

[0161] Bearbeitungsstation **10** kann so beschaffen sein, dass sie automatisch vom Planungssystem gesteuert wird, ohne dass sich ein menschlicher Eingriff erforderlich macht. Falls bestimmte Steuermoduln noch separat belassen werden, z. B. ein separater Steuermodul für den Roboter **44**, wie in [Fig. 1](#) gezeigt, zusammen mit einem separaten Steuergerät für die Abkantpresse **42** und Steuergerät für die Beschickungs- und Entnahmevorrichtung **46**, kann das Planungssystem so konfiguriert werden, dass es geeignete Komponenten des Plans herunterlädt und zu den entsprechenden Steuermoduln überträgt.

(c) Zuordnung und Steuerung

[0162] In dem erläuterten Ausführungsbeispiel wird Zuordner **76** innerhalb einer UNIX-kompatiblen Echtzeit-Oberfläche, wie z. B. in einem Computer Ironics IV-3230 mit einem Betriebssystem CHIMERA II, implementiert. Zusätzliche Informationen zu möglichen Implementierungen eines Echtzeit-Ablaufplaners wie Zuordner **76** werden in dem CHIME-RA-Handbuch von Stewart, Schmitz und Khosla mit dem Titel „CHIMERA II Real-Time Programming Environment, Version 1.02“ (29. Oktober 1990) gegeben. Zuordner **76** legt die allgemeine Abarbeitung des erstellten Plans durch Steuersystem **75** zeitlich fest, das Schnittstellenarchitektur **77** benutzt, um mit verschiedenen Hardwarekomponenten und Sensoren innerhalb des Systems in Verbindung zu treten, die in **Fig. 5** als Hardware und Sensoren **78** dargestellt sind.

[0163] **Fig. 6** stellt den Zuordner **76**, das Steuersystem **75** und die Schnittstellenarchitektur **77** detaillierter dar. Wie in **Fig. 6** dargestellt, ist der Zuordner **76** mit dem Planer für die Biegungsabfolge **72** und weiterhin mit einer Anzahl von Moduln verbunden, die zu Steuersystem **75** gehören. Die Moduln von Steuersystem **75** umfassen eine Aufgabe Roboter **92**, eine Aufgabe Presse und Beschickung/Entnahme **94**, eine Aufgabe Rückanschlag **96**, eine Bewegungsbibliothek **98**, einen Modul Geschwindigkeitsregelung **102** und einen Modul Kollisionserkennung **100**. Schnittstellenarchitektur **11** umfasst eine Reihe Gerätetreiber der Ebene **2** und eine weitere Reihe Gerätetreiber der Ebene **1**. Zu den Gerätetreibern (DDs) der Ebene **2** können Roboter-Gerätetreiber **202**, Gerätetreiber für Presse und Beschickung/Entnahme **204**, Rückanschlag-Gerätetreiber **206**, Greifer-Gerätetreiber **208**, Greifersensor-Gerätetreiber **210**, Durchhangsensor-Gerätetreiber **212**, Gerätetreiber für den Rückanschlagsensor **214** und Winkelsensor-Gerätetreiber **216** gehören. Zu den Gerätetreibern der Ebene **1** können die Gerätetreiber **220** bzw. **222** bzw. **224** für eine oder mehrere Parallel-I/O-VME-Steckkarten bzw. eine oder mehrere Parallel-A/D-VME-Steckkarten (A/D; Analog-Digital-Wandler) bzw. eine Steckkarte für Roboter-Servosteuerung gehören.

[0164] Dementsprechend wird, wie durch Schnittstellenarchitektur **77** verdeutlicht, ein Format für Gerätetreiber in zwei Ebenen für das Anbinden der verschiedenen Aufgaben und Steuermoduln des Steuersystems **75** an die verschiedenen Hardwarekomponenten der Bearbeitungsstation zum Biegen empfohlen. Die Gerätetreiber der ersten Ebene weisen eine UNIX-artige Schnittstelle auf, die Befehle unterstützt einschließlich der Befehle open (), close (), read (), write (), ioctl () und mmap (). Die Gerätetreiber der ersten Ebene standardisieren die Schnittstelle zu den I/O-Ports, an die die Hardware-Geräte angeschlossen sind, wie z. B. Parallel-I/O-Ports, Analog/Digital-Wandler und ein Mechanismus für die Roboter-Servosteuerung. Die Gerätetreiber der zweiten Ebene bilden eine Schnittstelle zwischen den verschiedenen Moduln des Steuersystems **75** und dem Gerätetreiber der ersten Ebene. Obwohl für die Gerätetreiber der zweiten Ebene keine Standard-Schnittstellenroutinen vorhanden sind, können die Gerätetreiber der zweiten Ebene mit Hilfe einer Standardform implementiert werden, wie in dem oben erwähnten CHIMERA-Handbuch dargelegt wird. Mit Hilfe eines Formats für Gerätetreiber in zwei Ebenen läßt sich ein System von Software-Schnittstellen bereitstellen, das zuverlässig und portierbar ist und einen Programmcode besitzt, der ohne weiteres lesbar ist. Spezifische Einzelheiten zu den Gerätetreibern und Beispiele ihrer Implementierung werden in dem oben erwähnten CHIMERA-Handbuch mitgeteilt, das durch Verweis herein einbezogen worden ist.

[0165] Was die VME-Steckkarten betrifft, die die eigentlichen I/O-Ports sind, die den Rechner mit den Hardwarekomponenten verbinden, so können zu derartigen Karten, wie weiter oben erwähnt, eine oder mehrere Parallel-I/O-Steckkarten gehören, wobei derartige Karten vorzugsweise optisch isolierte Verbindungen zwischen dem Rechner und den verschiedenen damit verbundenen Hardwarekomponenten haben. Außerdem können zu den VME-Steckkarten eine oder mehrere Geonics-Steckkarten II MCCII zur Servosteuerung der Bewegung in zwei Achsen und ein oder mehrere Analog-Digital-Wandler mit einer ausreichenden Anzahl von Kanälen und ausreichender Bit-Auflösung gehören, z. B. ein Analog-Digital-Wandler mit 16 Kanälen und 12-Bit-Auflösung, wie der IMV-1645 Ironics (Pentland-Burr-Brown MPV 950S). Zu den Parallel-I/O-Steckkarten können eine 80-Kanal-Steckkarte (mit 64 nutzbaren Kanälen) Xycom XVME-240 und/oder Digitalausgabetafeln mit 32 Kanälen wie die Tafeln Xycom XVME-220 und/oder XVME-212 gehören. Ein oder mehrere Analog-Digital-Wandler können zum Eingeben von Informationen zur Verfügung stehen, z. B. für das Einlesen verschiedener Daten, die von den in der Bearbeitungsstation vorhandenen Sensoren, wie Greifersensor, Durchhangsensor, Rückanschlagsensor und/oder Winkelsensor, erzeugt wurden.

[0166] Jede einzelne der Aufgabe Roboter **92**, Aufgabe Presse und Beschickung/Entnahme **94** und Aufgabe Rückanschlag **96** steuert die jeweiligen Gerätetreiber zur Steuerung der entsprechenden Hardwarekomponenten der Bearbeitungsstation zum Biegen. Mehrere Funktionen, die während der Ausführung verschiedener bewegungsbezogener Funktionen abgearbeitet werden müssen, können in Bewegungsbibliothek **98** zur Verfügung gestellt werden. Zu solchen Funktionen können Kinematik, Bahnberechnungen und Filterung gehören.

Alle Steuerfunktionen im Zusammenhang mit der Geschwindigkeitsregelung, d. h. der Steuerung der Geschwindigkeit, mit der verschiedene körperliche Komponenten (wie der Roboter) der Biegestation bewegt werden, können im Rahmen von Modul Geschwindigkeitsregelung **102** realisiert werden. Modul Kollisionserkennung **100** steht zur Verfügung, um die Kollisionserkennung vorzunehmen, die bei bestimmten Prozessen der Bewegungssteuerung während des Ablaufs des Biegevorgangs erforderlich ist.

[0167] Bewegungsbibliothek **98** kann ferner Moduln zur dynamischen Bewegungssteuerung und zur Bewegungssteuerung auf Sensorbasis enthalten, die direkt mit den Gerätetreibern der zweiten Ebene kommunizieren, um die Bewegung verschiedener Komponenten der Bearbeitungsstation zum Biegen dynamisch zu steuern und um diese Steuerung in Übereinstimmung mit Sensorsignalen zu verändern, die von den verschiedenen in diesem System vorhandenen Sensoren erzeugt werden.

[0168] Es ist zu erwähnen, dass es bei den Parallel-I/O-Steckkarten vorzuziehen ist, dass der Rechner optisch von den eigentlichen Hardwareverbindungen isoliert ist, um Schäden zu verhindern, die von in den Hardwarekomponenten herrschenden Überspannungen verursacht werden können. Andere Gründe für die optische Isolierung der Parallel-I/O-Steckkarten sind der Schutz des Rechners und der Steckkarten sowie die Verhinderung des Auftretens von Erdungsschleifen. Es ist jedoch nicht notwendig, die Analog-Digital-Wandler optisch von den Sensoren zu isolieren.

2. Planer für die Biegungsabfolge

[0169] Der Planer für die Biegungsabfolge **72** in dem in der [Fig. 5A](#) gezeigten Ausführungsbeispiel erfüllt drei Hauptfunktionen. Er generiert eine Abfolge von Biegungen einschließlich der mit jeder einzelnen Biegung verbundenen begleitenden Arbeitsgänge, befragt Experten hinsichtlich der Konsequenzen der Abfolge von Biegungen, während sie generiert wird, sowie hinsichtlich weiterer Einzelheiten des Plans (der Teilpläne), die sich erforderlich machen, um die generierte Abfolge von Biegungen zu bewerkstelligen, und stellt alle eingeholten/generierten Informationen zusammen, um einen Gesamtplan zu erstellen. Der Plan legt die Schritte fest, die notwendig sind, um die Abfolge von Biegungen mit Hilfe eines Steuersystems auszuführen, das die Funktionsweise der Bearbeitungsstation zum Biegen für Blech steuert. Jeder einzelne der Experten des erläuterten Planungssystems **71** erfüllt drei Hauptfunktionen, wenn er vom Planer für die Biegungsabfolge **72** dazu aufgefordert wird. Jeder von ihnen ermittelt einen Kostenzuwachs für die Durchführung eines einzelnen Arbeitsschritts innerhalb der Abfolge von Biegungen, entwickelt vorgeschlagene Planinformationen bzw. Zwischenplaninformationen und übermittelt die Kostenzuwächse und Planinformationen an den Planer für die Biegungsabfolge **72**. Die vorgeschlagene Planinformationen bzw. Zwischenplaninformationen umfassen zwei Arten von Informationen: eindeutige Informationen und unbestimmte Informationen. Zum Beispiel wird Halteexperte **82** zu einem bestimmten Zeitpunkt während der Planung wissen, welche Bereiche des Werkstücks vom Robotergreifer ergriffen werden können, um eine gegebene Biegung innerhalb einer Abfolge von Biegungen auszuführen (die Griffbereiche sind eindeutig), wird aber noch nicht die genaue Griffstelle kennen (die genaue Griffstelle ist unbestimmt). Der Halteexperte **82** wird eine vorläufige (unbestimmte) Griffstelle zuweisen, die zu einem späteren Zeitpunkt verifiziert werden kann. Wie bereits erwähnt wurde, wird der Abfolgeplaner jeden Experten in bezug auf die Konsequenzen einer Abfolge von Biegungen abfragen, wenn sie generiert wird.

[0170] Die Konsequenzen der Abfolge von Biegungen werden als Kosten dargestellt. Die Kosten der Abfolge von Biegungen, wenn sie generiert wird, können als Funktion einer oder mehrerer der folgenden Variablen ermittelt werden: die Zeitdauer, die erforderlich ist, um einen bestimmten Arbeitsgang innerhalb der Abfolge von Biegungen auszuführen, das Ausmaß, in dem ein Arbeitsgang innerhalb der Abfolge von Biegungen die Präzision des Arbeitsgangs und die Qualität des erzeugten Werkstücks beeinflussen wird, ob es Sicherheitsbedenken im Zusammenhang mit der Ausführung eines bestimmten Arbeitsgangs an einem bestimmten Punkt in einer Abfolge von Biegungen gibt oder nicht, und ob heuristische Möglichkeiten vorhanden sind, die bei ihrer Nutzung der Durchführung des eines Arbeitsgangs anstelle eines anderen an einem bestimmten Punkt in der Abfolge von Biegungen den Vorzug geben würden.

[0171] Der Planer für die Biegungsabfolge **72** kann Experten nach Informationen abfragen, wie z. B.: was für ein Werkzeugprofil verwendet werden sollte, um bestimmte Biegungen in der Abfolge von Biegungen auszuführen, was für Bühnensegmente benötigt werden, um eine gegebene Bühne herzustellen, die erforderlich sein wird, um eine Biegung auszuführen, und wo der Robotergreifer das Werkstück bei der Ausführung einer oder mehrerer Biegungen in der Abfolge von Biegungen ergreifen kann/soll. Außerdem kann Planer **72** die Experten danach befragen, wann eine Repositionierung des Werkstücks in der Abfolge von Biegungen vorgenommen werden soll und wie der Roboter und das Werkstück bewegt werden sollen, um innerhalb der gesamten Abfolge verschiedene Arbeitsgänge zu erledigen, wie eine Biegung, Repositionierung, Beschickung der Bearbei-

tungsstation und/oder Entleerung der Bearbeitungsstation. [Fig. 7](#) zeigt in einem Überblicks-Flussschiene die wichtigsten Schritte, die von einem Ausführungsbeispiel des Planers für die Biegungsabfolge **72** ausgeführt werden. In einem ersten Schritt S1 wird von CAD-System **74** die Bearbeitung der Parallelkonstruktion vorgenommen. Die Bearbeitung der Parallelkonstruktion kann neben anderen Funktionen die Markierung verschiedener Geometrien umfassen, die jeweiligen Abschnitten des Werkstücks entsprechen, wobei die resultierenden Markierungen später (in Schritt S3) vom Planer für die Biegungsabfolge benutzt werden, um zu entscheiden, ob heuristische Möglichkeiten bei der Generierung des Plans der Abfolge von Biegungen in Betracht zu ziehen sind. Anschließend wird in Schritt S2 ein Heuristikrahmen erzeugt, um den Planer für die Biegungsabfolge bei der Auswahl der Biegungen zu leiten, aus denen die Biegungsabfolge bestehen wird. Bei der Erzeugung des Heuristikrahmens für die Abfolge von Biegungen im Schritt S2 wird eine partielle Reihenfolge von Biegeschritten berechnet, die bestimmten festgelegten Heuristiken genügt. Anschließend wird in Schritt S3 ein Algorithmus für eine Zustands-Raum-Suche abgearbeitet, der von dem Heuristikrahmen beeinflusst wird. Der Algorithmus für die Zustands-Raum-Suche führt eine Analyse der Folgen der Ausführung verschiedener Biegungen in einer vorgeschriebenen Reihenfolge durch, indem er in Schritt S4 jeder Biegung Kosten zuweist. Um bei der Zuweisung von Kosten Hilfe zu leisten, wird in Schritt S5 eine geometrische Beurteilung vorgenommen, z. B. um die physikalischen Folgen zu bestimmen, die eine spezielle Biegung haben wird, indem die Maschine und das resultierende Werkstück modelliert werden, wie sie während der Ausführung jeder einzelnen Biegung zueinander in Beziehung stehen.

[0172] Die Heuristik wird berücksichtigt, indem entweder die zugewiesenen Kosten für eine bestimmte Biegung verringert werden (falls sie aufgrund der Heuristik vorzuziehen ist), oder indem die zugewiesenen Kosten erhöht werden (wenn die Biegung der Heuristik gemäß nicht bevorzugt wird). In Schritt S3 wird somit eine bestimmte Abfolge von Biegungen entwickelt, die ausgeführt werden können, um das gewünschte fertige Werkstück zu erzeugen. Sobald der Algorithmus für die Zustands-Raum-Suche in Schritt S3 abgearbeitet ist, wird in Schritt S6 eine Entscheidung getroffen, ob ein vollständiger Plan einschließlich einer vollständigen Abfolge von Biegungen generiert worden ist oder nicht. Wenn für die vorgelegte Konstruktion kein Plan aufgestellt werden kann, wird der Vorgang zu Schritt S1 zurückgeführt, wo das Werkstück umkonstruiert werden kann, so dass eine Bauteilkonstruktion entsteht, für die ein Bearbeitungsplan aufgestellt werden kann.

[0173] Wenn in Schritt S6 entschieden wird, dass ein vollständiger Plan erzeugt worden ist, geht der Prozess zu Schritt S7 weiter, und der vollständige Plan wird mit Hilfe von FEL an den Zuordner weitergeleitet, er kann aber auch in einer Datei gespeichert werden, um später vom Zuordner entnommen und abgearbeitet zu werden. Der Algorithmus für die Zustands-Raum-Suche wird vorzugsweise einen A*-Algorithmus aufweisen, wie er zum Beispiel von Nils J. Nilsson in „Problem-Solving Methods in Artificial Intelligence“, McGraw-Hill Book Company, 1971, S. 43–67 behandelt wird.

[0174] Es ist zu erwähnen, dass im Schritt der Kostenzuweisung, S4, Variable wie Roboterbewegung, Greifpositionen, die Notwendigkeit des Umgreifens, die Notwendigkeit des Greiferwechsels, Werkzeugpositionen sowie die Notwendigkeit des Werkzeugwechsels berücksichtigt werden können. Hohe Kosten werden für Variable zugewiesen, die zeitaufwendig sind, die Qualität beeinträchtigen und/oder das System einem hohen Risiko aussetzen.

[0175] Die beschriebene Planungsmethode für den Arbeitsablauf lässt sich als generative Planung (da sie automatisch einen Biegeplan generiert) mit schwacher Heuristik und Zustands-Raum-Suche bezeichnen. Bei der Anwendung der Methode gibt ein Mensch die Konstruktion ein. Ein Heuristikrahmen wird unter Zuhilfenahme von Heuristiken definiert, die „schwache Heuristiken“ genannt werden, weil sie nur eine begrenzte Menge von Regeln umfassen. Mögliche Biegungen werden betrachtet, und jeder betrachteten Biegung werden Kosten zugewiesen. Die den Biegungen zugewiesenen Kosten werden von dem Heuristikrahmen durch Erhöhung oder Verringerung der Kosten einer bestimmten Biegung beeinflusst. Eine Abfolge von Biegungen mit den niedrigsten Gesamtkosten wird mit Hilfe eines Algorithmus für die Zustands-Raum-Suche gewählt.

[0176] Generative Planung mit schwacher Heuristik, wie sie hier beschrieben wird, sollte anderen Verfahren zur Arbeitsablaufplanung gegenübergestellt werden. Ein derartiges Verfahren umfasst Variantenplanung mit fallbezogener Beurteilung. Bei der Variantenplanung gibt ein Mensch eine Konstruktion eines neuen Bauteils ein, und die Konstruktion wird gemäß einem Index codiert. Der Index wird verwendet, um eine alte Konstruktion aufzusuchen, die dem derzeitigen zu konstruierenden Teil und den zu lösenden Problemen am meisten ähnelt. Eine Bedienerperson editiert den alten Plan, um die neuen Probleme zu lösen, z. B. durch Editierung eines Programms in RML. Eines der bei der Variantenplanung aufgefallenen Probleme besteht darin, dass eine ähnliche Konstruktion völlig andere oder abweichende Lösungen erfordern kann, die durch Vergleiche mit alten Plänen nicht gefunden werden.

[0177] Ein weiteres Verfahren zur Arbeitsablaufplanung ist die generative Planung mit starker Heuristik. Bei generativer Planung mit starker Heuristik gibt der Mensch die Konstruktion und mehrere markierte Merkmale des neuen Bauteils ein. Dann werden Heuristiken verwendet, um die gesamte Reihenfolge von Biegungen und maschinellen Arbeitsgängen zu bestimmen, daher als „starke Heuristiken“ bezeichnet. Einem generativen Planungssystem mit starker Heuristik fehlt die Flexibilität und Intelligenz eines generativen Planungssystems mit schwacher Heuristik, und es wird wahrscheinlich nicht in der Lage sein, mit unorthodoxen Problemen umzugehen. Ein derartiges System besitzt kein Verständnis dafür, welche Heuristiken in einer bestimmten Situation besser funktionieren und welche Heuristiken zu verwerfen sind. Solch ein System wird in vielen Fällen sogar unfähig sein, überhaupt einen Plan zu entwickeln.

(a.1) Heuristiken

[0178] Heuristiken für das Biegen von Blech können vom Planer für die Biegungsabfolge der vorliegenden Erfindung berücksichtigt werden. Mehrere Beispiele von Biegeheuristiken werden im Folgenden beschrieben. Eine Heuristik besteht darin, innere Laschen frühzeitig zu biegen. [Fig. 25A](#) zeigt ein Werkstück **16** mit einer inneren Lasche **33**, die an einer Biegelinie **34a** entlang gebogen werden soll. Gemäß dieser Heuristik wird es vorgezogen, die innere Lasche **33** an Biegelinie **34a** entlang zuerst zu biegen, obwohl andere Biegungen an den Biegelinien **34b**, **34c** und **34d** entlang auszuführen sind.

[0179] Einer anderen Heuristik entsprechend ist es wünschenswert, die Biegungen an den am weitesten außen liegenden Biegelinien vor denen an den inneren Biegelinien auszuführen. Beispielsweise wird in [Fig. 25B](#) ein Werkstück **16** gezeigt, das die äußeren Biegelinien **35a**, **35b**, **35c** und **35d** zusammen mit den inneren Biegelinien **36a**, **36b**, **36c** und **36d** aufweist. In diesem dargestellten Beispiel ist es nach der Heuristik erwünscht, dass die äußeren Biegungen, die den äußeren Biegelinien **35a–35d** entsprechen, vor den Biegungen ausgeführt werden, die den inneren Biegelinien **36a–36d** entsprechen.

[0180] Nach einer dritten Heuristik werden vorzugsweise die kürzeren Biegungen vor den längeren Biegungen ausgeführt. [Fig. 25C](#) zeigt ein Werkstück mit kürzeren Biegungen entlang den Biegelinien **37a** und **37b** und längeren Biegungen entlang den Biegelinien **38a** und **38b**. Es wird demgemäß vorgezogen, die Biegungen an den Biegelinien **37a** und **37b** vor den Biegungen an den Biegelinien **38a** und **38b** auszuführen.

[0181] In Übereinstimmung mit einer vierten Heuristik ist es vorzuziehen, dass Biegungen, die eine Außenfläche einer Ecke eines dreidimensionalen Werkstücks erzeugen, vor der anstoßenden Innenfläche der Ecke ausgeführt werden. [Fig. 25D](#) zeigt ein Werkstück **16** mit einer Außenfläche **39a** und einer Innenfläche **39b**, die an einer Ecke **390** stumpf aneinanderstoßen. Falls die der Innenfläche entsprechende Biegung hier zuerst ausgeführt würde, wäre die Presse bei Ausführung der Biegung, die der Außenfläche **39a** entspricht, nicht in der Lage, den Flansch über seinen vorgesehenen Winkel von 90° hinaus zu biegen. Demzufolge würde die Außenfläche, wenn sie zurückfederte, nicht bündig mit dem Endstück der Innenfläche **39b** ausgerichtet liegen.

[0182] Nach einer weiteren Heuristik werden kollineare Biegungen gleichzeitig ausgeführt. Wie in [Fig. 25E](#) zu sehen ist, weist ein dargestelltes Werkstück **16** zwei Fahnen **26a** bzw. **26b** auf, die jeweils an der Biegelinie **27a** bzw. **27b** entlang umzubiegen sind. Da die Biegelinien **27a** und **27b** kollinear sind, wird es in Übereinstimmung mit der Heuristik vorgezogen, die Biegungen an diesen Biegelinien gleichzeitig auszuführen.

[0183] Die beschriebenen Heuristiken sind lediglich Beispiele für die Arten von Heuristiken, die vom Planer für die Biegungsabfolge der vorliegenden Erfindung in Betracht gezogen werden können. Eine größere oder kleinere Menge von Heuristiken, die alle oder einen Teil der angeführten Heuristiken umfasst, kann vom Planer für die Biegungsabfolge genutzt werden.

[0184] Um zu erkennen, wann bestimmte Heuristiken bei der Entwicklung des Plans auf ein gegebenes Werkstück anzuwenden sein können, kann eine Liste von Schlüsselmerkmalen erstellt werden, die verschiedene geometrische Merkmale des Werkstücks beschreiben, die dann vom Planer für die Biegungsabfolge bei der Anwendung der heuristischen Regeln verwendet werden können. Ein Liste von Schlüsselmerkmalen kann mit Bezug auf das in [Fig. 8](#) dargestellte Beispiel eines Werkstücks **16** beschrieben werden. Mehrere Merkmale lassen sich aus dem Werkstück **16** herleiten, während es sich noch in seinem zweidimensionalen Zustand befindet. Ein Beispiel derartiger Merkmale kann die Flanschnummer, die Breite des Flanschs und die Höhe des betreffenden Flanschs umfassen. Im Falle des Flanschs **7** wäre die Nummer des Flanschs z. B. **7**, ein Wert w würde der Breite dieses Flanschs und ein Wert h der Höhe dieses Flanschs zugeordnet. Außerdem lassen sich Werte definieren, die eine Winkelklasse bezeichnen, d. h. eine Klasse von Flanschen, die alle den gleichen Biegewinkel aufweisen.

[0185] Zu weiteren Merkmalen, die markiert werden können, um zusätzliches Suchen im Suchraum zu vermeiden, gehört eine Angabe, dass das Teil in bezug auf eine oder mehrere Achsen symmetrisch ist.

[0186] [Fig. 9](#) zeigt ein Werkstück **16** und einen zu ihm gehörenden Suchbaum **15**. Werkstück **16** hat eine Symmetrieachse Y, die es in der Mitte teilt und in Längsrichtung nach unten durch Werkstück **16** verläuft. Dementsprechend sind auf der ersten Suchebene die den Biegungen 3 und 5 entsprechenden Knoten eliminiert worden (wie durch die Kreise um diese Biegungen angedeutet wird), weil sie zu den Knoten 2 und 4 symmetrisch sind. Es ist nicht notwendig, auf der ersten Ebene auch die Biegungen 3 und 5 zu bewerten und zu durchsuchen, da die gleichen effektiven Ergebnisse erhalten würden, wenn die Suche mit einer der Biegungen beginnt, die einem dieser Knoten entspricht, anstatt mit einer der Biegungen 2 und 4 auf der Gegenseite. Wenn die erste gewählte Biegung Biegung 1 ist, dann sind auf der nächsten Ebene der Suche die Biegungen 2 und 4 immer noch zu den Biegungen 3 und 5 symmetrisch. Daher werden die den Biegungen 3 und 5 entsprechenden Knoten aufgrund der Tatsache, dass sie zu den Biegungen 2 und 4 symmetrisch sind, wieder eliminiert. Falls jedoch der der Biegung 4 entsprechende Knoten der erste gewählte Knoten in der Abfolge ist, beseitigt dies die Symmetrie von Werkstück **16**. Infolgedessen werden auf der nächsten Ebene der von dem Knoten der Biegung 4 ausgehenden Suche keine Knoten aufgrund von Symmetrie eliminiert.

(a.2) Beschränkungen

[0187] In Abhängigkeit von den geometrischen Merkmalen, die ein zu fertigendes Teil aufweist, kann es Arbeitsschritte im Zusammenhang mit Biegungen geben, die an bestimmten Punkten in der Abfolge von Arbeitsgängen, die gerade geplant wird, nicht ausgeführt werden können. Diese biegebezogenen Arbeitsschritte können mit Hilfe eines Mechanismus auf bestimmte Stellen in der Abfolge von Biegungen gezwungen (oder von ihnen ausgeschlossen) werden, der als „Beschränkung“ bezeichnet wird. Ein Modul Merkmalsextraktion (nicht gezeigt) kann bereitgestellt werden, um automatisch geometrische Merkmale von geometrischen Modellen zu markieren, die vom Konstruktionssystem erzeugt wurden (z. B. unter Verwendung von Datenstrukturen, die den oben beschriebenen ähnlich sind), und die Markierungen der geometrischen Merkmale lassen sich verwenden, um legale Ausdrücke (Beschränkungen genannt) in einer Sprache für die Schnittstellen-Kommunikation, wie FEL, zu bilden. Beschränkungen können mit Hilfe einer Datenstruktur definiert werden, die es ermöglicht, eine bestimmte Anordnung von Biegevorgängen festzulegen, und zwar in variierenden Flexibilitätsstufen. Zum Beispiel kann für ein Bauteil **16** mit vier Seiten, wie es in [Fig. 26A](#) zu sehen ist, die folgende Beschränkungsaussage verwendet werden, um die Reihenfolge festzulegen, in der die Biegungen 1, 2, 3 und 4 ausgeführt werden:

(Beschränkungen ((1234)))

[0188] Dieser Ausdruck bedeutet, dass die erste Biegung vor der zweiten ausgeführt werden muss, die vor der dritten ausgeführt werden muss, welche vor der vierten auszuführen ist. Weiterhin kann es sein, da in dem Ausdruck keine Operatoren enthalten sind, dass keine anderen Biegevorgänge vor, zwischen oder nach irgendeiner der Biegungen 1–4 ausgeführt werden.

[0189] Falls die Biegung 2 vor Biegung 3 ausgeführt werden muss, es aber keine anderen Beschränkungen zu der Anordnung der Biegevorgänge in der Abfolge von Biegungen gibt, kann die folgende Beschränkungsaussage verwendet werden:

(Beschränkung ((*2*3*)))

[0190] Der Operator „*“ wirkt als „Jokerzeichen“ und gestattet, an seiner Stelle in der Abfolge von Biegungen entweder keinen Biegevorgang oder eine beliebige Anzahl von Biegevorgängen auszuführen, und die Art der Biegevorgänge, die an seiner Stelle ausgeführt werden dürfen, kann zu irgendeinem der verbleibenden Biegevorgänge gehören, die in der Beschränkungsaussage nicht festgelegt worden sind.

[0191] Ein weiterer Operator, der als Jokerzeichen wirkt, „?“, kann ebenfalls verwendet werden, und er bedeutet, dass genau ein Biegevorgang aus der Reihe derer, die in der Beschränkungsaussage nicht festgelegt worden sind, an seiner Stelle in der Abfolge von Biegungen ausgeführt werden muss. Falls daher bei dem in [Fig. 26A](#) gezeigten Bauteil genau ein Biegevorgang vor Biegung 2 ausgeführt werden muss, es aber keine Einschränkung in bezug auf Anzahl oder Art der Biegevorgänge nach Biegung 2 gibt (außer dass Biegung 2 nicht dazugehören darf), kann die folgende Beschränkungsaussage verwendet werden:

(Beschränkung ((?2*)))

[0192] Die Beschränkungsaussagen können auch Gruppierungsoperatoren enthalten, die verlangen, dass bestimmte Biegevorgänge zu Gruppen zusammengefasst werden, wobei es keine Einschränkung zur Reihen-

folge der Biegevorgänge innerhalb der Gruppe gibt. Zum Beispiel fordert die folgende Beschränkungsaussage, dass die Biegungen 2 und 3 in der Abfolge von Biegungen vor Biegung 4 kommen müssen und dass die Biegungen 2 und 3 zu einer Gruppe zusammengefasst werden, ohne dass zwischen ihnen Biegevorgänge erfolgen:

(Beschränkungen ($(\{23\}^4)$)).

[0193] In einer Beschränkungsaussage kann mehr als ein Beschränkungs Ausdruck enthalten sein. Beispielsweise enthält die folgende Beschränkungsaussage den oben angeführten Beschränkungs Ausdruck zur Gruppierung sowie einen zusätzlichen Beschränkungs Ausdruck, der weiterhin festlegt, dass Biegung 1 vor Biegung 4 kommen muss, ohne dass es weitere Einschränkungen hinsichtlich der Einbeziehung und Anordnung der anderen Vorgänge in Bezug auf die Biegungen 1 und 4 gibt:

(Beschränkungen ($(\{23\}^4)(M^4)$)).

[0194] Es kann jede beliebige Anzahl von Biegevorgängen innerhalb einer Gruppe geben, und Gruppen können verschachtelt werden, um festzulegen, dass nicht gefordert wird, dass eine Anzahl von Gruppen in einer bestimmten Reihenfolge aufzutreten habe. Beispielsweise legt der folgende Ausdruck fest, dass die Biegungen 1 und 2 in der Abfolge von Biegungen unmittelbar nebeneinander stehen müssen und dass die Biegungen 3 und 4 in der Abfolge von Biegungen unmittelbar nebeneinander stehen müssen. Es gibt jedoch keine anderen Beschränkungen hinsichtlich der Einbeziehung und Anordnung anderer Biegevorgänge infolge dieses Beschränkungs Ausdrucks.

($\{12\}^{\{34\}}$).

[0195] Einige weitere Beispiele für Beschränkungs Ausdrücke können sein: ($*7$), was bedeutet, dass Biegevorgang 7 als letzter Biegevorgang in der Abfolge ausgeführt werden muss, und ($*7?$), was bedeutet, dass Biegevorgang 7 als vorletzter Biegevorgang in der Abfolge ausgeführt werden muss.

[0196] Die Arten von Operatoren, die verwendet werden können, um Beschränkungen zu definieren, lassen sich so erweitern, dass sie auch Boolesche Operatoren wie NICHT, ODER und UND umfassen. Zum Beispiel könnte eine Beschränkung unter Verwendung eines Operators NICHT lauten ($*NICHT 7$), was bedeuten würde, dass der siebente Biegevorgang nicht der letzte Vorgang in der Abfolge sein könnte.

[0197] Es gibt faktisch keine Einschränkung in Bezug auf die Arten von Beschränkungen, die festgelegt werden können, und jede beliebige Einheit im Planungssystem, einschließlich der verschiedenen Experten sowie auch einer Person als Bediener des Planer für die Biegungsabfolge, kann Beschränkungen definieren. Ein Beschränkungsmanager kann, z. B. im Rahmen des Planers für die Biegungsabfolge, bereitgestellt werden, um die Widerspruchsfreiheit von Beschränkungen bewahren zu helfen und Konflikte zu lösen, die sich zwischen Beschränkungen ergeben.

[0198] Zum Beispiel können zu den Arten von Beschränkungen die folgenden gehören: Beschränkungen für (1) Kanäle (z. B. wie in [Fig. 26B](#) gezeigt), (2) Winkelbiegungen, wo die Biegelinie für den zu biegenden Flansch einen Teil einer Biegelinie einer anderen Biegung, der nicht der Endpunkt ist, kreuzt und ihm nahe kommt (und beide Biegungen in derselben Richtung auszuführen sind, d. h., sie sind beide positive Biegungen) (wie z. B. in [Fig. 27A](#) dargestellt), und (3) Flansche, die nach dem Biegen eine Ecke mit einem äußeren Flansch und einem inneren stumpf anstoßenden Flansch bilden (wie z. B. in [Fig. 27C](#) gezeigt).

[0199] Der Beschränkungs Ausdruck für den in [Fig. 26B](#) gezeigten Kanal muss normalerweise ($*2^1*3^*$) lauten, wenn auch eine gebräuchliche Heuristik es vorzieht, dass Biegungen an äußeren Biegelinien vor denen an inneren Biegelinien ausgeführt werden, so dass die Beschränkung ($*3^2*1^*$) vorgeschlagen werden könnte. Bei diesem Konflikt zwischen den Beschränkungs Ausdrücken müsste, wenn er bestünde, zugunsten der Beschränkung für Kanäle ($*2^1*3^*$) entschieden werden.

[0200] Der Beschränkungs Ausdruck für die in [Fig. 27A](#) gezeigten Paarbiegungen kann wie folgt lauten:

($*2^1*1^*$)

[0201] Wenn die Reihenfolge der Biegungen anders wäre, d. h., wenn Biegung 1 vor Biegung 2 ausgeführt würde, könnte der Flansch von Biegung 2 nicht über 90 Grad hinaus gebogen werden, und die Biegung ließe sich somit nicht ordentlich ausführen (da beim Biegen verformbarer Werkstoffe mit elastischen Tendenzen, wie Blech, das Teil leicht über den gewünschten Biegewinkel hinaus gebogen werden muss).

[0202] Der Beschränkungs Ausdruck für das in [Fig. 27C](#) gezeigte Biegungepaar kann wie folgt lauten:

(*2*1*).

[0203] Die Bedeutung der Einhaltung dieser Beschränkung wird weiter oben in bezug auf [Fig. 25D](#) erläutert.

[0204] Wo es angemessen erscheint, kann eine Person als Bediener des Planers für die Biegungsabfolge (oder ein anderer Experte/Teilplaner des Systems) einen Beschränkungs Ausdruck definieren, der alle Biegungen an jeder einzelnen Seite eines Bauteils zu einer Gruppe zusammenfaßt, so dass bei einer Suche nach einer Lösung für die Abfolge von Biegungen weniger Zeit durch das Wechseln zwischen den Seiten des Bauteils verbraucht wird. [Fig. 27B](#) zeigt ein Bauteil mit mehreren Biegungen an jeder Seite des Teils, wo es angebracht sein kann, die Biegungen für eine jede Seite zu gruppieren, z. B. durch Verwendung des folgenden Beschränkungs Ausdrucks:
 (*{{12}{34}{56}}*).

[0205] Da es zwischen Beschränkungen Konflikte geben kann, sollte ein Mechanismus zur Lösung von Konflikten vorgesehen werden. Wie bereits erwähnt, kann zu diesem Zweck ein Beschränkungsmanager im Rahmen des Planers für die Biegungsabfolge bereitgestellt werden. Ein mögliches System für die Prioritätseinhaltung könnte einfach Beschränkungs Ausdrücke, denen eine höhere Priorität zugewiesen ist, verwerfen oder ignorieren. Die Priorität, die Beschränkungs Ausdrücken zugewiesen wird, könnte davon abhängen, um welche Art von Beschränkung es sich handelt. Beispielsweise könnte von Personen eingegebenen Beschränkungen die höchste Priorität zugewiesen werden, während Maschinen-Beschränkungen, Bauteil-Beschränkungen bzw. Optimierungs-Beschränkungen jeweils niedrigere Prioritäten zugewiesen würden. Demnach hätten Maschinen-Beschränkungen die zweithöchste Priorität, Bauteil-Beschränkungen hätten die dritthöchste, und Optimierungs-Beschränkungen hätten die viert höchste (d. h. die niedrigste) Priorität.

[0206] Eine von Personen eingegebene Beschränkung ist eine Beschränkung, die eine Bedienperson, die den Planer für die Biegungsabfolge über eine persönliche Schnittstelle steuert, eingegeben hat. Eine Maschinen-Beschränkung ist eine Beschränkung, die durch die Grenzen der Maschinen und der Werkzeuge auferlegt wird (z. B. eine Kanal-Beschränkung). Eine Bauteil-Beschränkung ist eine Beschränkung, die durch die Merkmale des Bauteils auferlegt wird (z. B. eine Beschränkung, die durch das Vorhandensein von inneren und äußeren stumpf aneinanderstoßenden Ecken diktiert wird). Optimierungs-Beschränkungen sind Beschränkungen, die geschaffen werden, um die Suche nach einer Abfolge von Biegungen zu beschleunigen (z. B. eine Beschränkung, die fordert, dass Biegungen, die an einer bestimmten Seite des Bauteils liegen, zu Gruppen zusammengefasst werden).

[0207] Um festzustellen, ob ein Konflikt zwischen Beschränkungs Ausdrücken besteht, kann ein Algorithmus bereitgestellt werden, der zuerst prüft, ob innerhalb eines gegebenen Paares von Beschränkungs Ausdrücken gemeinsame Operationen vorhanden sind. Falls es unter den Beschränkungs Ausdrücken eine gemeinsame Operation gibt, können sie dann miteinander vereinigt werden, um festzustellen, ob sie zueinander im Widerspruch stehen. Wenn zum Beispiel (*1*2*) mit (*2*3*) vereinigt würde, würde der resultierende vereinigte Beschränkungs Ausdruck (*1*2*3*) lauten. Wenn (*1*2*) mit einem dazu im Widerspruch stehenden Ausdruck wie z. B. (*2*1*) vereinigt würde, wäre das Ergebnis Null und damit ein Zeichen dafür, dass die Beschränkungs Ausdrücke zueinander im Widerspruch stehen.

(a.3) Kolineare (und kompatible) Biegungen

[0208] Wenn zwei Biegungen Biegelinien haben, die kolinear sind, z. B. die Biegungen 5 und 6 in [Fig. 8](#), und die kompatibel sind (d. h., dass sie den gleichen Biegewinkel, den gleichen Biegeradius und andere Eigenschaften aufweisen, die es erlauben, die Biegungen gleichzeitig auszuführen), dann ist es vorzuziehen, die Biegungen gleichzeitig auszuführen. Zu diesem Zweck können Heuristiken bereitgestellt werden, um die vom Planer für die Biegungsabfolge durchgeführte Suche zu beeinflussen, so dass gleichzeitiges Biegen kolinearer Biegungen vorgezogen wird und es somit wahrscheinlicher ist, dass es Bestandteil der durch die Suche erzeugten Abfolge von Biegungen wird. Zusätzlich oder wahlweise können unter Verwendung von Beschränkungs Ausdrücken Beschränkungen festgelegt werden, die fordern, dass bestimmte kompatible kolineare Biegungen gleichzeitig ausgeführt werden, falls das möglich ist (d. h., falls der Beschränkungs Ausdruck nicht im Widerspruch zu einem Beschränkungs Ausdruck höherer Priorität steht).

(b) Der Zustands-Raum-Such-Algorithmus des Planers für die Biegungsabfolge

[0209] In einem Algorithmus für die Zustands-Raum-Suche wird eine Lösung erhalten, indem Operatoren auf Zustandsbeschreibungen angewandt werden, bis ein Ausdruck erreicht wird, der einen Zielzustand beschreibt.

Bei der Anwendung einer Zustands-Raum-Suchmethode wird ein Startknoten mit einer Beschreibung des Ausgangszustands verbunden, und Nachfolger des Startknotens werden mit Hilfe von Operatoren berechnet, die auf die mit dem Knoten verbundene Zustandsbeschreibung anwendbar sind. Durch Berechnung aller Nachfolger eines Knotens wird der Knoten somit fortentwickelt.

[0210] Zeiger werden von jedem Folgeknoten zurück zu seinem Ausgangsknoten eingesetzt. Die Zeiger können später benutzt werden, um einen Lösungsweg zum Startknoten zurück anzugeben, wenn schließlich ein Zielknoten gefunden worden ist. Die Folgeknoten werden daraufhin geprüft, ob sie Zielknoten sind, indem die verbundenen Zustandsbeschreibungen, die den Folgeknoten entsprechen, daraufhin geprüft werden, ob sie den Zielzustand beschreiben. Wenn noch kein Zielknoten gefunden worden ist, wird der Prozess der Fortentwicklung der Knoten und des Einsetzens entsprechender Zeiger fortgesetzt. Wenn ein Zielknoten gefunden ist, werden die Zeiger zum Startknoten zurückverfolgt, so dass ein Lösungsweg entsteht. Die mit den Bögen des Wegs verbundenen Operatoren der Zustandsbeschreibungen werden dann zu einer Lösungsabfolge zusammengestellt.

[0211] Die beschriebenen Schritte bilden einen Algorithmus für die Zustands-Raum-Suche. Variationen des oben beschriebenen Algorithmus lassen sich durch die Reihenfolge definieren, in der die Knoten fortentwickelt werden. Wenn die Knoten in einer Reihenfolge fortentwickelt werden, in der sie generiert werden, wird die Suchmethode als „Methode Breitensuche“ bezeichnet. Wenn die zuletzt erzeugten Knoten zuerst fortentwickelt werden, wird die Methode „Methode Tiefensuche“ genannt. Die Methode Breitensuche und die Methode Tiefensuche sind Blindsuch-Algorithmen, da die Reihenfolge, in der die Knoten fortentwickelt werden, von der Lage des Zielknotens nicht beeinflusst wird. Heuristische Informationen über die Gesamtnatur des Graphen und die allgemeine Richtung des Ziels können genutzt werden, um den Suchvorgang zu modifizieren. Derartige Informationen können verwendet werden, um die Suche auf das Ziel richten zu helfen, indem versucht wird, die vielversprechendsten Knoten zuerst fortzuentwickeln. Eine Art einer heuristischen Suchmethode wird z. B. von Nils J. Nilsson in der oben erwähnten Arbeit „Problem-Solving Methods in Artificial Intelligence“ beschrieben.

[0212] Blindsuch-Algorithmen, wie z. B. Breitensuche oder Tiefensuche, sind in ihrer Vorgehensweise zur Auffindung eines Lösungsweges zu einem Zielknoten gründlich. Im Einsatz ist es oft unpraktisch und zeitaufwendig, solche Methoden zu verwenden, da die Suche eine übermäßige Anzahl von Knoten fortentwickeln wird, bevor ein Lösungsweg gefunden wird. Eine derart erschöpfende Fortentwicklung von Knoten blockiert mehr Speicherplatz im Rechner, um die mit jedem Knoten verbundenen Informationen zu speichern, und verbraucht mehr Zeit, z. B. um Fortentwicklungen von Knoten und Punkte zu berechnen. Daher werden effektive Alternativen zu Blindsuchmethoden bevorzugt. Heuristiken können angewandt werden, um die Suche bündeln zu helfen, und zwar auf der Grundlage von speziellen Informationen, die über das Problem vorliegen, das durch den Graphen dargestellt wird. Eine Möglichkeit, die Suche zu bündeln, ist die Verringerung der Anzahl von Nachfolgern eines jeden fortentwickelten Knotens. Eine andere Art der Bündelung der Suche besteht in der Abwandlung der Reihenfolge, in der die Knoten fortentwickelt werden, so dass sich die Suche nach außen zu Knoten hin entwickeln kann, die am vielversprechendsten erscheinen. Suchalgorithmen, die die Reihenfolge der Fortentwicklung von Knoten abwandeln, werden geordnete Suchalgorithmen genannt. Geordnete Suchalgorithmen nutzen eine Bewertungsfunktion, um die Knoten, die Kandidaten für die Fortentwicklung sind, einzustufen und dadurch den Knoten zu ermitteln, der am wahrscheinlichsten auf dem besten Weg zum Zielknoten liegt. Beim Abarbeiten des geordneten Suchalgorithmus wird bei jedem Knoten n_i , der zur Fortentwicklung in Frage kommt, ein Wert f bestimmt, wobei f ein Schätzwert für die Kosten eines Weges der geringsten Kosten vom Startknoten zum Zielknoten ist, der gezwungen ist, durch Knoten n_i zu verlaufen. Jeder nachfolgende Knoten mit dem kleinsten Wert f wird dann der Reihe nach zur Fortentwicklung ausgewählt.

[0213] [Fig. 20A](#) zeigt einen Baum, der durch Anwendung eines geordneten Suchalgorithmus auf ein unbearbeitetes Werkstück erzeugt wurde, das vier Abschnitte besitzt, die nach oben zu biegen sind, so dass sie vier Seiten einer Schachtel bilden, wobei jede Seite in [Fig. 20A](#) durch eine entsprechende Zahl 1, 2, 3 und 4 repräsentiert wird. Jede nummerierte Seite der Schachtel entspricht einer bestimmten Biegung, nämlich Biegung 1, Biegung 2, Biegung 3 und Biegung 4.

[0214] Das unbearbeitete Werkstück (Ausgangsteil) entspricht Startknoten n_0 , der auch als Wurzelknoten bezeichnet werden kann, der mit der Beschreibung des Ausgangszustands des Werkstücks verbunden ist. Die Nachfolger des Startknotens n_0 können durch Fortentwicklung des Startknotens (des Wurzelknotens) zur Bildung von Folgeknoten n_1 , n_2 , n_3 und n_4 berechnet werden. Auf dieser Ebene der Suche entsprechen die Knoten n_1 – n_4 Biegung 1, Biegung 2, Biegung 3 bzw. Biegung 4.

[0215] Knoten 1 wird fortentwickelt, so dass er die Folgeknoten n_5 , n_8 und n_7 , die Biegung 2, Biegung 3 bzw. Biegung 4 entsprechen, sowie einen zusätzlichen Folgeknoten n_8 umfasst, der einer Repositionierung (d. h. einer Repo) des Haltegriffs des Robotergreifers am Werkstück entspricht. Knoten 5 wird fortentwickelt, so dass er die Folgeknoten n_9 bzw. n_{10} , die Biegung 3 bzw. Biegung 4 entsprechen, sowie einen zusätzlichen Folgeknoten n_{12} umfasst, der einer Repo entspricht. Knoten 9 wird fortentwickelt, so dass er die Folgeknoten n_{13} bzw. n_{14} aufweist, die Biegung 4 bzw. einer Repo entsprechen. Knoten n_{14} wird fortentwickelt, so dass er einen Folgeknoten n_{15} aufweist, der der Zielknoten ist, da er die letzte Biegung für das Werkstück zum Ergebnis hat.

[0216] Der Planer für die Biegungsabfolge **72** ist vorzugsweise so strukturiert, dass er eine Zustands-Raum-Suche vornimmt, in der der Beste zuerst weiterbehandelt wird, um eine vollständige Abfolge von Biegungen zu entwickeln, die von der Bearbeitungsstation zum Biegen auszuführen ist. Ein geordneter Suchalgorithmus verwendet eine Bewertungsfunktion, um die Knoten, die Kandidaten für die Fortentwicklung sind, einzustufen, um den Knoten zu ermitteln, der am wahrscheinlichsten auf dem besten Weg zum Zielknoten liegt, d. h. zu dem Knoten, der der beste ist. Der erste Knoten entspricht dem ebenen Bauteil, wie es z. B. in [Fig. 20A](#) dargestellt ist. Auf jeder Ebene der Suche wird der beste Knoten, der auf einer Liste OPEN steht, fortentwickelt, und der fortentwickelte Knoten wird aus der Liste OPEN gelöscht. Je nachdem, ob es Beschränkungen zur Reihenfolge bestimmter Operationen gibt oder nicht, werden alle oder ein Teil der fortentwickelten Knoten auf OPEN gesetzt. Die fortentwickelten Knoten, die auf OPEN gesetzt werden, entsprechen den verbleibenden Biegevorgängen abzüglich derjenigen, die infolge von Beschränkungen ausgeschlossen worden sind.

[0217] Gemäß einem speziellen Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung wird es zu jeder einzelnen Biegung Zwillingknoten geben, die ihr entsprechen, und zwar einen ersten Zwillingknoten, der der Ausführung der Biegung entspricht, während das Werkstück von einer Seite des Werkstücks gehalten wird, und einen zweiten Zwillingknoten, der der Ausführung derselben Biegung entspricht, wobei aber das Werkstück von der anderen Seite des Werkstücks gehalten wird. Die fortentwickelten Knoten, die auf OPEN gesetzt werden, können ebenfalls einen Knoten aufweisen, der eine Repositionierung des Haltegriffs des Robotergreifers am Werkstück (d. h. eine „Repo“) repräsentiert. In Übereinstimmung mit einem weiteren Merkmal der vorliegenden Erfindung können bestimmte Ebenen der Suche Beschränkungen unterworfen werden, so dass sie keinen Knoten für eine Repo aufweisen. Der Grund dafür ist, dass es keinen Sinn hätte, eine Repo auf einer Suchebene durchzuführen und direkt auf der nächsten Ebene wieder eine Repo vorzunehmen. Demgemäß wird der Planer für die Biegungsabfolge **72**, wenn bei einem unmittelbaren Ausgangsknoten eine Repo durchgeführt wird, das Setzen eines Repo-Knotens auf OPEN unterdrücken.

[0218] Die [Fig. 20B](#) und [Fig. 20C](#) zeigen je ein einfaches Beispiel eines Werkstücks **16** mit zwei Flächen **262** und einer Biegelinie **260**. Außerdem enthalten beide [Fig. 20B](#) und [Fig. 20C](#), je ein dazugehöriges Diagramm der Fortentwicklung eines Knotens vom Wurzelknoten n_0 zur ersten Ebene eines Suchbaums, die zwei fortentwickelte Knoten enthält. [Fig. 20B](#) zeigt zwei fortentwickelte Knoten, während in [Fig. 20C](#) ein fortentwickelter Knoten gezeigt und angegeben wird, dass der andere Knoten unterdrückt worden ist. In [Fig. 20B](#) werden, da nur eine Biegung an Werkstück **16** auszuführen ist, nur zwei Knoten gezeigt. Die Biegung lässt sich gemäß Knoten n_1 ausführen, wonach Biegung 1 durchgeführt wird, indem Fläche 2 in den Gesenkraum der Bearbeitungsstation zum Biegen eingelegt wird, oder Biegung 1 lässt sich gemäß n_2 ausführen, wonach Biegung 1 durchgeführt wird, indem Fläche 1 in den Gesenkraum eingelegt wird. Bei [Fig. 20C](#) ist folgendes offensichtlich: Sobald Werkstück **16** an Biegelinie **260** entlang gebogen wurde, wird Fläche 1 ein Flansch ergeben, dessen Höhe zu gering ist, als dass Werkstück **16** an dieser Seite des Werkstücks ergriffen werden kann, wenn die Biegung ausgeführt wird. Demgemäß muss Werkstück **16**, um Biegung 1 an Biegelinie **260** auszuführen, von derjenigen Seite des Werkstück **16** von einem Robotergreifer ergriffen werden, die der Fläche 2 entspricht. Mit anderen Worten, Biegung 1 muss so ausgeführt werden, dass Fläche 1 in den Gesenkraum eingelegt wird. Somit weist der in [Fig. 20C](#) dargestellte Suchbaum nur einen Knoten n_1 auf und zeigt – obwohl der Ausgangsknoten n_0 normalerweise so fortentwickelt werden könnte, dass er einen zweiten Knoten aufweist – dass der zweite Knoten unterdrückt worden ist.

[0219] Ein Knoten kann unterdrückt werden, indem er von der Berücksichtigung als möglicher Arbeitsgang innerhalb der Abfolge von Biegungen ausgeschlossen wird. Ein solcher Ausschluß eines Knotens lässt sich erreichen, indem verhindert wird, dass eine Fortentwicklung den Knoten enthält, oder indem es einfach unterlassen wird, den Knoten auf die Liste OPEN zu setzen.

[0220] [Fig. 20D](#) zeigt ein Beispiel eines Werkstücks **16**, das zwei kollineare Biegungen mit den Biegelinien 1 und 2 aufweist. Zu den Knoten, die aus diesem Werkstück generiert werden können, gehören folgende: (1,2), (1,1), (2,2), (2,1), ((12),1) und ((12),2). Nach Übereinkunft werden die Halteflächen auf jeder Seite der ersten Biegelinie der kollinearen Biegung definiert. [Fig. 20E](#) zeigt ein weiteres Beispiel eines Werkstücks **16**. Die Hal-

teseiten für diese kolineare Biegung (gleichzeitiges Biegen an Linien 1 und 2) werden in den folgenden Zwillingknoten definiert: ((12)1), ((12)2). Zu beachten ist, dass die Haltefläche für die Zwillingsbiegung Fläche 1 ist, auch wenn Fläche 1 sich auch auf die andere Seite der Biegelinie erstreckt (d. h., auch wenn sie sich bis zu einer Position erstreckt, die während einer Biegung hinter dem Gesenkraum liegen würde). Der Grund dafür ist die oben erwähnte Übereinkunft, die genutzt wird, um die Haltefläche für die Zwillingsbiegung zu wählen.

[0221] [Fig. 21](#) verdeutlicht in einem vereinfachten Flussdiagramm ein Ausführungsbeispiel eines Algorithmus für die Zustands-Suche, der einen geordneten Suchalgorithmus umfasst, der auf dem Algorithmus beruht, der von Nils J. Nilsson in „Problem-Solving Methods in Artificial intelligence“ beschrieben wird, welcher vom Planer für die Biegungsabfolge der vorliegenden Erfindung benutzt werden kann, um eine Abfolge von Biegungen zu erstellen, die von einer Bearbeitungsstation zum Biegen verwendet werden kann. Nach dem Start des Algorithmus wird bei Schritt S10 ein Startknoten n_0 auf eine Liste mit der Bezeichnung OPEN gesetzt, und ein Funktionswert f wird gleich 0 gesetzt. Danach wird in Schritt S12 festgestellt, ob sich in der Liste OPEN etwas befindet. Wenn die Liste OPEN leer ist, schreitet der Prozess zu Schritt S14 fort, und eine Fehleranzeige erfolgt. Wenn in Schritt S12 festgestellt wird, dass die Liste OPEN nicht leer ist, schreitet der Prozess zu Schritt S18 fort.

[0222] In Schritt S18 werden die in der Liste OPEN enthaltenen Knoten geprüft, und der Knoten mit dem niedrigsten Wert f wird aus OPEN entfernt und auf eine Liste CLOSED gesetzt. Dieser Knoten wird mit n_i bezeichnet. Danach wird in Schritt S20 eine Entscheidung getroffen, ob der Knoten n_i ein Zielknoten ist. Falls es ein Zielknoten ist, geht der Prozess zu Schritt S22 weiter, wo ein Lösungsweg generiert wird, indem von Knoten n_i über seinen Zeiger und die Zeiger der vorhergehenden Knoten bis zum Startknoten n_0 zurückgegangen wird. Wenn jedoch Knoten n_0 gemäß Feststellung in Schritt S20 nicht der Zielknoten ist, wird der Prozess zu Schritt S24 weitergeleitet. In Schritt S24 wird Knoten n_i fortentwickelt, so dass alle seine Folgeknoten, n_j genannt, erzeugt werden. Wenn es keine Folgeknoten n_j gibt, kehrt der Prozess zu Schritt S12 zurück. Für jeden Folgeknoten n_j , der erzeugt wird, wird eine Berechnung eines entsprechender Wertes f vorgenommen, $f(n_j) = k'(n_j) + h(n_j)$, wobei k' gleich der Summe der Kostenanteile k für die Ausführung eines jeden Knotens vom Startknoten bis zum gegenwärtigen Knoten ist, und h ist gleich den vorhergesehenen Kosten vom gegenwärtigen Knoten bis zum Zielknoten. In Schritt S24 wird auch jeder einzelne berechnete Wert f mit seinen entsprechenden Folgeknoten n_j verbunden, die sich noch nicht auf den Listen OPEN oder CLOSED befinden. Diese Folgeknoten n_j werden dann auf die Liste OPEN gesetzt, und Zeiger werden von diesen Folgeknoten n_j zurück zu n_i gerichtet. Für jeden Folgeknoten n_j , der bereits auf einer Liste OPEN oder CLOSED war, wird ein Wert f mit diesem Folgeknoten n_j verbunden, der gleich dem kleineren Wert von dem soeben für diesen Knoten berechneten Wert f und dem Wert f ist, der bereits mit diesem Knoten verbunden ist. Die Folgeknoten n_j auf der Liste CLOSED, deren verbundene Werte f verkleinert worden sind, werden auf die Liste OPEN gesetzt, und die Zeiger für diese Folgeknoten n_j werden zu n_i zurückgerichtet. Nach Ausführung von Schritt S24 kehrt der Prozess zu Schritt S12 zurück.

(c) Dargestelltes Beispiel eines Planers für die Biegungsabfolge

[0223] Die [Fig. 22A–Fig. 22D](#) zeigen ein besonderes Ausführungsbeispiel eines Planungsprozesses für eine Abfolge von Biegungen, der von dem in [Fig. 5A](#) dargestellten Planer für die Biegungsabfolge **72** auszuführen ist. Der Planungsprozess für eine Abfolge von Biegungen wird nach Erhalt eines Befehls zum Beginn des Vorgangs gestartet, wie z. B. in Schritt S26 angegeben, indem nach Erhalt eines Befehls in FEL mit der Planung begonnen wird. Sobald der Prozess anläuft und mit Schritt S28 weitergeht, werden eine oder mehrere der zu fertigenden Teilen entsprechende Dateien vom Planer für die Biegungsabfolge gelesen. Solche Dateien können in Gestalt einer Formendatei vorliegen, die Informationen enthält, wie zum Beispiel geometrische und topologische Informationen (eine dreidimensionale Datenbeschreibung des Bauteils und eine parallele zweidimensionale Datenbeschreibung des Teils, die der dreidimensionalen Datenbeschreibung entspricht), markierte geometrische Merkmale, die Entscheidungen berühren, die vom Planer für die Biegungsabfolge zu treffen sind, und einen Biegungsgraphen, der auszuführende Biegungen mit geometrischen und topologischen Informationen korreliert.

[0224] Sobald die Bauteildatei in Schritt S28 gelesen worden ist, geht der Prozess zu den Schritten S30, S32 und S34 über, in denen jeder einzelne Experte initialisiert wird. Genauer gesagt, werden der Halteexperte, der Werkzeugexperte und der Bewegungsexperte jeweils initialisiert. Sobald die verschiedenen Experten initialisiert worden sind, wird in Schritt S36 eine Liste von Biegungen erstellt, und Berechnungen zu den verschiedenen Merkmalen der Bauteile werden vorgenommen. Zum Beispiel kann eine Berechnung dahingehend erfolgen, wie lang die Biegungen sind und welche Biegungen kolinear sind. Danach wird in Schritt S38 ein A*-Algorithmus initiiert, der Schritte enthält wie: einen Wurzelknoten n_0 auf eine Liste OPEN setzen und einen Wert

f gleich 0 setzen. Dann wird in Schritt S40 eine Entscheidung getroffen, ob die Liste OPEN leer ist. Wenn die Liste leer ist, geht der Prozess zu Schritt S42 weiter und endet mit einer Fehleranzeige. Andernfalls geht der Prozess, wenn die Liste OPEN nicht leer ist, mit Schritt S44 weiter, bei dem der auf der Liste OPEN befindliche Knoten mit dem niedrigsten Wert f entnommen und auf eine Liste CLOSED gesetzt wird. Der gewählte Knoten wird zur Erläuterung der Schritte in den Flusslinien der [Fig. 22A–Fig. 22D](#) n_i genannt.

[0225] In Schritt S46 wird eine Entscheidung getroffen, ob Knoten n_i ein Zielknoten ist. Wenn Knoten n_i ein Zielknoten ist, geht der Prozess zu Schritt S48 über, wo ein Lösungsweg generiert wird. Andernfalls, wenn n_i kein Zielknoten ist, geht der Prozess zu Schritt S50 über, der in [Fig. 22C](#) ganz oben gezeigt wird.

[0226] Nach dem Generieren eines Lösungswegs in Schritt S48 geht der Prozess mit Schritt S56 weiter, der in [Fig. 22D](#) ganz oben gezeigt wird. Im Schritt S56 wird an jeden der Experten eine Ende-Mitteilung zusammen mit der Abfolge von Biegungen geschickt, und jeder der Experten wird nach endgültigen detaillierten Informationen abgefragt, die benötigt werden, um den Plan der Abfolge von Biegungen zu vervollständigen. Danach erwartet der Planer für die Biegungsabfolge in Schritt S58 eine Antwort vom Werkzeugexperten. Sobald alle abschließenden Informationen vom Werkzeugexperten eingegangen sind, wird im Schritt S60 die Installation der Bearbeitungsstation zum Biegen gestartet. In der Zwischenzeit, während die Installation der Bearbeitungsstation durchgeführt wird, erwartet der Prozess in Schritt S62 eine Antwort vom Bewegungsexperten und vom Halteexperten. Sobald die vollständigen Pläne des Bewegungsexperten und des Halteexperten eingegangen sind, wird in Schritt S64 der endgültige Plan an den Zuordner des Systems weitergesandt.

[0227] Vorausgesetzt, dass n_i in Schritt S46 nicht als der Zielknoten ermittelt wurde, wird der Prozess mit Schritt S50 in [Fig. 22C](#) ganz oben fortgesetzt. In diesem Schritt wird Knoten n_i fortentwickelt, um seine Folgeknoten n_j zu erhalten. Zu den Folgeknoten werden Biegungs-Zwillingsknoten für jede Biegung (d. h., jeder Biegung entsprechen zwei Knoten) und ein zusätzlicher Knoten für eine Repo minus alle eventuellen Knoten gehören, die auf der gegenwärtigen Ebene der Suche als Folgeknoten verworfen werden.

[0228] Sobald die Folgeknoten in Schritt S50 generiert worden sind, findet in Schritt S52 ein Prozess der Teilplanung und Kostenzuweisung statt. Danach wird in Schritt S54 jeder einzelne Nachfolger n_j auf die Liste OPEN gesetzt, und die jedem Knoten entsprechenden Teilplaninformationen sowie Kosteninformationen werden mit jedem Knoten in der Liste OPEN verbunden (z. B. mit Hilfe von Zeigern). Der Prozess kehrt dann zu Schritt S40 zurück, wo festgestellt wird, ob die Liste OPEN leer ist. Wenn die Liste OPEN leer ist, endet der Prozess mit einer Fehleranzeige in Schritt S42; andernfalls läuft der Prozess weiter, und die Schritte S44, S46, S48, S50, S52 und S54 werden erneut ausgeführt.

[0229] Die [Fig. 23A–Fig. 23D](#) stellen den Prozess der Teilplanung und Kostenzuweisung dar, der dem Schritt S52 bei dem in den [Fig. 22A–Fig. 22D](#) dargestellten Planungsprozess für die Abfolge von Biegungen entspricht. Der Prozess der Teilplanung und Kostenzuweisung formuliert einen Teilplan und ermittelt zusätzliche Kosten, die zu einem jeden der fortentwickelten Knoten/Folgeknoten n_j gehören, der auf der gegenwärtigen Ebene der Suche nicht infolge von Beschränkungen als realisierbarer Knoten eliminiert worden ist. Für jeden derartigen fortentwickelten Knoten/Folgeknoten wird der in den [Fig. 23A–Fig. 23D](#) dargestellte Prozess durchgeführt. In einem ersten Schritt S66 wird ein Test zur Vertauschbarkeit von Knoten n_j hinsichtlich des Teilplans und der Kosten des Halteexperten vorgenommen. Genauer gesagt, es wird ein Test durchgeführt, um festzustellen, ob der Teilplan und die Kosten, die der Halteexperte festlegen wird, die gleichen sein werden wie die bereits für einen anderen „äquivalenten“ Knoten festgelegten. Wenn dies der Fall ist, werden Teilplan und Kosten mit jenem „äquivalenten“ Knoten identisch sein, und es ist nicht nötig, den Halteexperten noch einmal nach solchen Informationen abzufragen, was nur zu unnötigem Zeitaufwand führen würde. Wenn in Schritt S68 festgestellt wird, dass ein äquivalenter Knoten gefunden wurde, dann geht der Prozess zu Schritt S70 über, wo der Teilplan und die Kosten kopiert und mit jenem Folgeknoten n_j verbunden werden. Wenn jedoch in Schritt S68 kein äquivalenter Knoten gefunden wurde, wird der Prozess mit Schritt S72 fortgesetzt, wo der Planer für die Biegungsabfolge den Halteexperten nach einem vorgeschlagenen Teilplan, dem zusätzlichen Kostenanteil k und dem zusätzlichen Kostenanteil h abfragen wird. Bei Ausführung von Schritt S72 wird, sobald von dem Halteexperten ein Kostenanteil mit unendlich bewertet worden ist, der vorliegende Folgeknoten n_j verworfen. Der Folgeknoten n_j wird somit auf der gegenwärtigen Ebene der Suche verworfen, und der Prozess der Teilplanung und Kostenzuweisung startet erneut mit dem nächsten verfügbaren Folgeknoten n_j .

[0230] Sobald entweder in Schritt S70 oder in Schritt S72 der Teilplan und die Kosten erhalten wurden, geht der Prozess zu Schritt S76 über (in [Fig. 23B](#) ganz oben), wo ein weiterer Test auf Vertauschbarkeit in bezug auf den Teilplan und die Kosten, die vom Werkzeugexperten stammen, vorgenommen wird. Wenn in Schritt S78 festgestellt wird, dass ein äquivalenter Knoten gefunden wurde, kopiert der Planer für die Biegungsabfolge

den Teilplan und die Kosten, die dem äquivalenten Knoten entsprechen, und verbindet sie mit dem vorliegenden Folgeknoten n_j . Im anderen Fall, wenn kein äquivalenter Knoten gefunden wurde, geht der Prozess zu Schritt S82 über, wo der Werkzeugexperte nach einem vorgeschlagenen Teilplan, einem Kostenanteil k und einem Kostenanteil h abgefragt wird. Wenn ein Kostenanteil mit unendlich bewertet wird, wird der vorliegende Folgeknoten in Schritt S84 verworfen. Sobald der vorgeschlagene Teilplan und die Kosten bestimmt worden sind, geht der Prozess zu Schritt S86 über, wo der Planer für die Biegungsabfolge auf die Ergebnisse vom Halteexperten und vom Werkzeugexperten wartet. Der Prozess wird auf die Ergebnisse der Abfragen an den Halteexperten und den Werkzeugexperten warten, da diese Informationen vom Bewegungsexperten benötigt werden, um seine Berechnungen zur Teilplanung und Kostenzuweisung vornehmen zu können.

[0231] In Schritt S88 wird ein Test auf Vertauschbarkeit in bezug auf den Teilplan und die Kosten, die vom Bewegungsexperten stammen, vorgenommen. Das heißt, es wird ein Test durchgeführt, um festzustellen, ob der Teilplan und die Kosten, die vom Bewegungsexperten zugewiesen würden, mit denen identisch sind, die bereits einem anderen Knoten zugewiesen worden sind, wonach der andere Knoten als „äquivalenter“ Knoten zu dem vorliegenden Folgeknoten n_j angesehen würde, der gerade bewertet wird. Wenn in Schritt S90 festgestellt wird, dass ein äquivalenter Knoten gefunden worden ist, geht der Prozess zu Schritt S92 über, wo der Teilplan und die Kosten des äquivalenten Knotens kopiert und dadurch mit dem vorliegenden Folgeknoten n_j verbunden werden. Wenn jedoch kein äquivalenter Knoten gefunden worden ist, wird der Prozess mit Schritt S94 fortgesetzt, wo der Bewegungsexperte nach einem vorgeschlagenen Teilplan, einem Kostenanteil k und einem Kostenanteil h abgefragt wird. Wenn irgendeiner der Kostenanteile unendlich ist, wird der vorliegende Folgeknoten verworfen, wonach zu einem nächsten Folgeknoten übergegangen und erneut mit der Teilplanung und Kostenzuweisung für den nächsten Folgeknoten begonnen wird. Vorausgesetzt, dass der vorgeschlagene Teilplan und die Kosten erhalten worden sind, dann geht der Prozess zu Schritt S98 über, wo auf die Ergebnisse vom Bewegungsexperten gewartet wird. Eine zusätzliche Verarbeitung kann durchgeführt werden, um einen Teilplan und Kosten zu verschiedenen Aspekten des Systems zu erhalten, die mit der Ausführung der vom Planer für die Biegungsabfolge vorgeschlagenen Gesamtabfolge von Biegungen zusammenhängen. In diesem Zusammenhang können zusätzliche Experten bereitgestellt werden, wie durch die Bezugsnummer S100 angedeutet wird. Zu Beispiel zeigt [Fig. 5A](#) einen Sensorexperten. Der Prozess der Teilplanung und Kostenzuweisung könnte in geeigneter Weise modifiziert werden, so dass er Schritte aufwies wie Testen auf Vertauschbarkeit, Abfragen des zusätzlichen Experten (z. B. des Sensorexperten) nach einem vorgeschlagenen Teilplan und nach Kosten sowie, an einer geeigneten Stelle im Prozess, Abwarten der Ergebnisse vom zusätzlichen Experten.

[0232] Sobald im Schritt S98 festgestellt wurde, dass die Ergebnisse von den Bewegungsexperten eingegangen sind, geht der Prozess zu Schritt S102 über, der in [Fig. 23D](#) oben dargestellt ist. In Schritt S102 wird der Wert f für Knoten n_j nach der Gleichung $f_{n_j} = (k' + h)_{HE} + (k' + h)_{TE} + (k' + h)_{ME}$ berechnet. Dann wird in Schritt S104 der Wert f auf der Grundlage eventueller Heuristiken angepaßt, die auf den Folgeknoten n_j zutreffen. Dabei wird, falls es sich um einen erwünschten Knoten handelt, d. h., wenn er vorteilhafte oder erwünschte Heuristiken hat, die besagen, dass dieser Knoten anderen Knoten vorzuziehen ist, zu dem Wert f ein Wert addiert. Wenn jedoch der Knoten unerwünscht ist, wird vom Wert f ein Wert subtrahiert.

[0233] [Fig. 24](#) zeigt das Beispiel eines ebenen Werkstücks **16** und mehrere Knoten, die während der Durchführung einer Zustands-Raum-Suche durch den hier erläuterten Planer für die Biegungsabfolge fortentwickelt wurden. Es werden verschiedene Kosten gezeigt, die den Knoten im gesamten Verlauf des Suchprozesses zugewiesen werden. Wie zu sehen ist, hat das ebene Werkstück **16** zwei Abschnitte a und b , die zu Flanschen umgebogen werden sollen. Der erste Flansch a liegt zwischen zwei Nasen c und d . Der erste Flansch a soll an Biegelinie 1 entlang umgebogen werden, und der zweite Flansch b soll an Biegelinie 2 entlang umgebogen werden. Der erste Knoten n_0 des Suchbaums, d. h. der Wurzelknoten, entspricht dem ebenen Werkstück **16**. Folgeknoten von Knoten n_0 sind die Knoten n_1 bzw. n_2 , die den Biegelinien 1 bzw. 2 entsprechen. In dem dargestellten Beispiel wird angenommen, dass eine Biegung längs Biegelinie lausgeführt würde, indem Flansch a in den Gesenkraum der Biegepresse eingelegt wird, und dass eine Biegung längs Biegelinie 2 ausgeführt würde, indem Flansch b in den Gesenkraum eingelegt wird. Daher sind keine Biegungszwillinge im Baum von [Fig. 24](#) dargestellt. Es gibt nur einen Knoten pro Biegelinie.

[0234] Für den Fall, dass der Planer für die Biegungsabfolge so beschaffen ist, dass er jeder Biegung Biegungszwillingsknoten zuordnet, würde im vorliegenden Beispiel der jeweils andere Knoten wahrscheinlich unterdrückt werden. Beispielsweise wäre es wahrscheinlich nicht möglich, eine Biegung an Biegelinie 1 entlang auszuführen, indem Flansch b in die Biegepresse eingelegt würde, da Flansch a sehr kurz ist und daher während der Ausführung der Biegung nicht von einem Robotergreifer erfaßt werden kann.

[0235] Auf der ersten Suchebene werden zwei Folgeknoten n_1 und n_2 als Folgeknoten generiert. Bei der Bildung dieser beiden Knoten kann der Planer für die Biegungsabfolge den Halteexperten, den Werkzeugexperten und den Bewegungsexperten nach den dem jeweiligen Knoten entsprechenden zusätzlichen Kosten (d. h., den Kostenanteilen h und k) abfragen. Zum Beispiel werden die Kosten, die dem Knoten n_1 zugewiesen werden, in [Fig. 24](#) in dem dazugehörigen Kasten dargestellt. Ein Halteexperte hat einen Kostenanteil k (d. h. den Kostenanteil, der auf dem Weg vom Ausgangsknoten n_0 zum vorliegenden Knoten entsteht) von 0 zugewiesen. Das bedeutet, dass ohne weiteres eine Griff-steile an Werkstück **16** gefunden werden kann und dass eine Notwendigkeit zur Repositionierung des Haltegriffs des Roboters am Werkstück vor Ausführung der Biegung 1 als erster Biegung in der Abfolge von Biegungen besteht. Der Halteexperte hat ferner einen Kostenanteil h von 30 zugewiesen. Die Zahl 30 stellt die ungefähre Zeitdauer (30 Sekunden) dar, die benötigt werden wird, um den Haltegriff des Greifers am Werkstück **16** zu repositionieren (d. h., eine Repo vorzunehmen). Dieser Wert zeigt an, dass der Halteexperte vorhergesagt hat, dass eine Repo erforderlich sein wird, um die Abfolge von Biegungen im Zusammenhang mit Werkstück **16** zu vollenden. Der Kostenanteil h ist ein vorhergesagter Kostenanteil für die Vollendung der Abfolge von Biegungen vom vorliegenden Knoten bis zum endgültigen Zielknoten.

[0236] Die vom Werkzeugexperten zugewiesenen Kosten bestehen aus einem Kostenanteil k von 600 und einem Kostenanteil h von 600. Der Kostenanteil k ist der mit der Ausführung der Biegung dieses Knotens verbundene zusätzliche Zeitbedarf (aufgrund der Bereitstellung von Werkzeug). In diesem Falle muß, um die Biegung an Biegelinie 1 auszuführen, eine erste Bühne auf die Gesenkschiene der Bearbeitungsstation zum Biegen gebracht werden. Der annähernde Zeitbedarf für die Installation der ersten Bühne beträgt 600. Demgemäß beläuft sich der zusätzliche Kostenanteil k (für die Bereitstellung von Werkzeug) von n_0 zu n_1 auf 600 Sekunden. Die vorhergesagten weiteren Kosten von Knoten n_1 zum Zielknoten (d. h. der Kostenanteil h für die Bereitstellung von Werkzeug) werden als die Zeit berechnet, die für die Installation einer weiteren Bühne benötigt wird, und betragen somit 600 Sekunden.

[0237] Zu den vom Bewegungsexperten zugewiesenen Kosten gehört ein zusätzlicher Kostenanteil k von 5 (geschätzte 5 Sekunden), was einer angenäherten Fahrzeit des Roboters für die Bewegung von n_0 zu Knoten n_1 entspricht. Weiterhin gehört zu den vom Bewegungsexperten zugewiesenen Kosten ein vorhergesagter zukünftiger Kostenanteil h von 15 Sekunden, das ist gleich einem aktuellen Durchschnitt aller bisher (seit n_0) bestimmten Kostenanteile k , multipliziert mit einer Summe aus der Anzahl verbleibender Biegungen und zweimal der Anzahl vorhergesagter Repos: $h = k_{AVE} [\text{Anzahl verbleibender Biegungen} + (\text{Anzahl vorhergesagter Repos}) (2)]$.

[0238] Die Anzahl der vorhergesagten Repos wird mit 2 multipliziert, da pro Repositionierung zwei Bewegungen erforderlich sind. Eine Bewegung ist notwendig, um den Roboter von der gegenwärtigen Bühne zum Repo-Greifer zu bringen, und eine zweite Bewegung muß ausgeführt werden, um den Haltegriff des Robotergreifers am Bauteil zu repositionieren. Der Wert k für den nächsten Knoten wird auf der Basis der Zeitdauer berechnet, die benötigt wird, um die Bewegung vom Repo-Greifer zur entsprechenden Bühne für die nächste Biegung auszuführen.

[0239] Der andere Knoten auf der ersten Suchebene ist Knoten n_2 . Dieser Knoten entspricht der Biegelinie 2. Die zusätzlichen Kosten umfassen die vom Halteexperten zugewiesenen Kostenanteile k und h , die vom Werkzeugexperten zugewiesenen Kostenanteile k und h und die vom Bewegungsexperten zugewiesenen Kostenanteile k und h . Die vom Halteexperten zugewiesenen Kostenanteile k bzw. h betragen 0 bzw. 30. Der Halteexperte weist einen Kostenanteil k von 0 zu, weil keine Repositionierung erforderlich ist, um von Knoten n_0 zu Knoten n_2 zu gehen. Dagegen wird ein Kostenanteil h fürs Halten von 30 zugewiesen, weil eine Repo als notwendig vorhergesagt wird, um alle Biegungen der Abfolge von Biegungen auszuführen, d. h., um zum Zielknoten zu gelangen. Das wird klar, wenn man Werkstück **16** betrachtet. Je nachdem, welche Biegung zuerst ausgeführt wird, wird es nötig sein, da sich die Biegungen auf entgegengesetzten Seiten des Werkstücks **16** befinden, den Haltegriff des Roboters am Werkstück zu repositionieren, um zur anderen Seite des Werkstücks **16** zu kommen und die andere Biegung auszuführen. Da das Werkstück außerdem ziemlich schmal ist, wäre es nicht möglich, den Robotergreifer an der linken oder der rechten Seite des Werkstücks **16** anzusetzen, so dass das Werkstück für beide Biegungen an derselben Stelle erfaßt werden könnte. Wenn der Robotergreifer an einer der Seiten von Werkstück **16** positioniert würde, stieße er wahrscheinlich mit der Werkzeugbestückung (dem Stempelwerkzeug) der Biegepresse zusammen, wenn das Gesenk hochgefahren wird, um die Biegung auszuführen.

[0240] Der vom Werkzeugexperten zugewiesene Kostenanteil k beträgt wieder 600, da die Biegung, die als erste Biegung in der Suche auftaucht, wenigstens eine Bühne erfordern wird. 600 Sekunden sind ein näherungsweise ermittelter Zeitbedarf für die Installation einer Bühne und werden daher als zusätzlicher Kostenan-

teil k zugewiesen, um von Knoten n_0 zu Knoten n_2 zu kommen. Der vom Werkzeugexperten zugewiesene Kostenanteil h beträgt 600, da eine vorhergesagte zusätzliche Bühne benötigt werden wird, um von Knoten n_2 zum Zielknoten zu kommen. Der Bewegungsexperte weist einen Kostenanteil k von 4 und einen geschätzten (zukünftigen) Kostenanteil h für die Bewegung von 12 zu. Der vom Bewegungsexperten für Knoten n_2 zugewiesene Kostenanteil k ist niedriger als der für Knoten n_1 zugewiesene Kostenanteil k . Das liegt daran, dass Biegelinie 2 länger ist als Biegelinie 1 und somit eine größere Bühne erforderlich macht. Bei einer typischen Bearbeitungsstation zum Biegen, wie der in [Fig. 1](#) gezeigten Bearbeitungsstation Amada BM100, wird es vorgezogen, längere Bühnen in der Mitte der Gesenkschiene unterzubringen und kürzere Bühnen an die Seiten zu verschieben. Von einer Ausgangsposition, bevor überhaupt Biegungen ausgeführt werden (bei Knoten n_0), zu einer Bühne in der Mitte zu gehen, würde daher eine geringere Bewegung des Roboters erfordern, als zu einer Bühne zu gehen, die an der Seite der Gesenkschiene angebracht ist. Demzufolge wird die berechnete Fahrzeit des Roboters von der Beschickungs- und Entnahmeverrichtung (L/UL) zur Mittelbühne bei der Ausführung von Biegung 2, ohne Berücksichtigung der Kollisionen, mit 4 Sekunden und damit weniger veranschlagt, als benötigt würde, um zu einer Bühne zu gelangen, die an der linken Seite der Gesenkschiene positioniert ist, denn dort wäre die kleinere Bühne auf der Gesenkschiene angebracht. Da der Kostenanteil h als Funktion des derzeitigen aktuellen Durchschnitts der bisher berechneten Kostenanteile k berechnet wird, hat der Kostenanteil h ebenfalls einen niedrigeren Wert von 12 Sekunden.

[0241] Auf der ersten Ebene der Suche belaufen sich die gesamten zusätzlichen Kosten für die Ausführung der Biegungen 1 bzw. 2 auf 1250 bzw. 1246. Somit hat Knoten n_1 einen gesamten zusätzlichen Kostenanteil von 1250, und Knoten n_2 hat einen gesamten zusätzlichen Kostenanteil von 1246, das sind die gesamten Kosten, die von jedem der Experten zugewiesen wurden, die vom Planer für die Biegungsabfolge abgefragt wurden.

[0242] Es ist zu bemerken, dass die einzigen zwei Knoten auf der ersten Suche Ebene ein Knoten für die Ausführung von Biegung 1 und ein Knoten für die Ausführung von Biegung 2 waren (Knoten n_1 und n_2). Die erste Ebene enthielt keinen Knoten für die Durchführung einer Repo. Das kommt daher, dass die Suche einer Beschränkung dergestalt unterliegt, dass die erste Biegung, die auf der ersten Ebene nach dem Wurzelknoten auszuführen ist, keine Repo aufweist. Es wäre unnötig, als ersten Schritt in der Abfolge von Biegungen eine Repo vorzunehmen, da der Robotergreifer beim Start für jede beliebige Biegung an jede beliebige Stelle gebracht werden kann. Auf der nächsten Ebene der Suche ist jedoch zusätzlich zu einer oder mehreren Biegungen, die den Rest der Biegungen ausmachen, die zum Zielknoten führen, eine Repo als möglicher Knoten enthalten. Demgemäß weist die nächste Ebene der Suche den Knoten n_3 , der Biegung 1 entspricht, und den Knoten n_4 auf, der einer Repo vor Ausführung der nächsten Biegung in der Abfolge von Biegungen entspricht. Bei Knoten n_3 weist der Halteexperte, nachdem er vom Planer für die Biegungsabfolge dazu aufgefordert worden ist, unendliche Kosten zu, da es keine verfügbaren Griffbereiche gibt, die bei der Ausführung von Biegung 2 benutzt wurden und die auch zur Ausführung von Biegung 1 benutzt werden können. Wenn es einen Griffbereich gäbe, der bei der Ausführung von Biegung 2 benutzt wurde und der auch zur Ausführung von Biegung 1 benutzt werden könnte, dann könnte der Robotergreifer in diesem sich überschneidenden Bereich angesetzt werden, und die Repositionierung des Greifers beim Übergang von der vollendeten Biegung 2 zur Biegung 1 (d. h. von Knoten n_2 zu Knoten n_3) wäre nicht nötig. Im vorliegenden Fall jedoch hat der Halteexperte festgestellt, dass es keine derartige Überschneidung von Griffbereichen gibt, und daher ist der zusätzliche Kostenanteil k fürs Halten unendlich. Der vorhergesagte Kostenanteil h ist nicht einmal relevant, dasselbe gilt auch für alle anderen Kosten, die von den anderen Experten, wie dem Werkzeugexperten und dem Bewegungsexperten, zugewiesen werden könnten, da Biegung 1 am gegenwärtigen Punkt in der Abfolge von Biegungen nicht ausgeführt werden kann, ohne dass zuerst eine Repo vorgenommen wird. Daher wird Knoten n_3 nicht weiter in Betracht gezogen, und der Planer für die Biegungsabfolge geht zum Repoknoten n_4 über und fragt die jeweiligen Experten nach ihren zugewiesenen Kosten in Verbindung mit diesem Knoten ab.

[0243] Nach Repoknoten n_4 weist der Halteexperte einen Kostenanteil k von 30 zu, was bedeutet, dass es am vorliegenden Punkt in der Abfolge von Biegungen etwa 30 Sekunden dauern wird, eine Repo auszuführen. Ein vorhergesagter Kostenanteil h von 0 wird vom Halteexperten zugewiesen, da vorhergesagt wird, dass zwischen dem vorliegenden Knoten n_4 und dem Zielknoten keine weiteren Repos nötig sein werden. Nach der Kostenzuweisung durch den Halteexperten weist der Werkzeugexperte nach Abfrage durch den Planer für die Biegungsabfolge einen Kostenanteil k von 600 zu, was gleich dem annähernden Zeitbedarf (600 Sekunden) für die Installation einer weiteren Bühne ist, die benötigt wird, um Biegung 1 (an Biegelinie 1) auszuführen, da die Bühne, die zur Ausführung von Biegung 2 verwendet wurde (und deren Länge gleich der Länge von Biegelinie 2 ist), nicht zur Ausführung von Biegung 1 benutzt werden kann, weil eine solche Bühne nicht zwischen die Nasenabschnitte c und d des Werkstücks **16** paßt. Der Werkzeugexperte erwartet keine weiteren vorhergesagten Bühnen oder Werkzeugwechsel; und daher weist der Werkzeugexperte dem Knoten n_4 einen Kos-

tenanteil h von 0 zu. Zu bemerken ist, dass es sein kann, dass der Werkzeugexperte anfänglich, entweder zu einem frühen Punkt in der Suche vor Durchführung der Suche, einen gesamten anfänglichen Kostenanteil h auf der Grundlage der Gesamtanzahl vorhergesagter Bühnen ermittelt, die benötigt werden, um die vollständige Abfolge von Biegungen auszuführen. Im vorliegenden Beispiel wird ein anfänglicher Gesamtkostenanteil h von 1200 berechnet, da vorhergesagt wurde, dass zwei vorhergesagte Bühnen erforderlich sind, um an Werkstück **16** die Biegungen 1 und 2 auszuführen. Während der gesamten Suche beträgt der Kostenanteil k entweder 0 (wenn keine zusätzlichen Bühnen gebraucht werden) oder 600 (wenn für die dem vorliegenden Knoten entsprechende Biegung eine zusätzliche Bühne benötigt wird). Der Kostenanteil h für einen gegebenen Knoten ist gleich dem gesamten anfänglichen Kostenanteil h abzüglich aller vorhergehenden und gegenwärtigen Kostenanteile k , die bis zu dem gegebenen Knoten und bei diesem selbst anfallen. Demgemäß beträgt der Kostenanteil h für Knoten n_4 , da die vorhergehenden Kostenanteile k bis zu Knoten n_4 600 betragen und der gegenwärtige Kostenanteil k für Knoten n_4 600 beträgt, $1200 - 600 - 600 = 0$.

[0244] Die vom Bewegungsexperten dem Knoten n_4 zugewiesenen Kosten bestehen aus einem Kostenanteil k von 8 und einem Kostenanteil h von 4. Der Kostenanteil k wird auf das Doppelte des durchschnittlichen vorhergehenden Kostenanteils k veranschlagt, da zwei Bewegungen erforderlich sind, um eine Repo durchzuführen. Eine Bewegung ist nötig, um das Werkstück von einer Bühne, auf der es nach einer vorangegangenen Biegung verblieben ist, zum Repo-Greifer zu bringen, und die zweite Bewegung bringt den Robotergreifer zu der repositionierten Stelle, während der Repogreifer das Werkstück **16** hält. Der vom Bewegungsexperten einem Repoknoten zugewiesene vorhergesagte Kostenanteil h ist gleich den vorhergesagten zusätzlichen Kosten für die Ausführung aller zukünftigen Bewegungen in der Abfolge von Biegungen. In diesem Fall wird h als der Wert h veranschlagt, der für einen vorhergehenden Knoten n_2 berechnet wurde, abzüglich des gegenwärtigen Kostenanteils k , und somit wird für Knoten n_4 ein Wert von 4 Sekunden ermittelt. Die gesamten Zuwachskosten werden dann zum Gesamtwert aller früheren Kostenanteile k , die vor diesem Knoten (in diesem Falle Repoknoten n_4) angefallen sind, addiert. Also werden alle mit Knoten n_4 verbundenen Zuwachskosten zu den gesamten vorherigen Kostenanteilen k von 604 addiert, die vorher in Verbindung mit Knoten n_2 berechnet wurden, so dass für die Gesamtkosten ein Wert von 1246 erhalten wird.

[0245] Der Planer für die Biegungsabfolge wird bei der Ausführung seiner Zustands-Raum-Suche daher n_4 als den besten Knoten auswählen und darangehen, diesen Knoten fortzuentwickeln, um seine Folgeknoten zu bilden. Zu den Folgeknoten von Repoknoten n_4 gehört Knoten n_5 . In diesem Fall ist Knoten n_5 der Zielknoten, da in seinem Ergebnis das Werkstück **16** mit all seinen vollständigen Biegungen als dreidimensionales Bauteil vorliegt. Die von den jeweiligen Experten bestimmten Kosten umfassen einen angenommenen Kostenanteil k fürs Halten von 0, einen berechneten Kostenanteil k für die Bereitstellung des Werkzeugs von 600 und einen berechneten Kostenanteil k für Bewegungen von 4. Da bekannt ist, dass der vorliegende Knoten n_5 der Zielknoten ist, werden keine Kosten h berechnet. Die vorhergehenden Gesamtkosten k betragen 642 Sekunden. Daher wird 642 zu dem Kostenanteil k für die Bereitstellung des Werkzeugs von 600 und dem Kostenanteil k für die Bewegung von 4 addiert, was einen Gesamtwert f von 1246 ergibt. Ein derartiger Wert f ist der billigste f -Wert unter den noch auf OPEN verbliebenen Knoten. Dementsprechend wird dieser Knoten daraufhin geprüft, ob er ein Zielknoten ist, und wenn er ein Zielknoten ist, wird der Lösungsweg generiert, der (in dieser Reihenfolge) Biegung 2, die Knoten n_2 entspricht, eine Repo, die Knoten n_4 entspricht, und Biegung 1, die Knoten n_5 entspricht, umfasst.

(d) Bestimmung der Vertauschbarkeit

[0246] Wie oben in Verbindung mit den [Fig. 23A–Fig. 23D](#) beschrieben, wird vor einer Anfrage an einen Experten zu den mit einem bestimmten Knoten verbundenen Kosten für jeden einzelnen Experten ein Test auf Vertauschbarkeit dieses Knotens hinsichtlich des Teilplans und der Kosten vorgenommen. Zum Beispiel wird in Schritt S66, der in [Fig. 23A](#) ganz oben dargestellt ist, ein Test auf die Vertauschbarkeit eines bestimmten Folgeknotens n_j durchgeführt, um festzustellen, ob er lediglich eine Vertauschung eines anderen Knotens ist und somit einen äquivalenten Satz von Teilplan und Kosten besitzt. Wenn dies der Fall ist, wäre es sinnloser Aufwand, den Halteexperten noch einmal wegen eines vorgeschlagenen Teilplans und zugehöriger Kostenanteile k und h abzufragen, da diese Parameter bereits bekannt sind und durch bloßes Zurückgreifen auf die anderen äquivalenten Knoten erhalten werden können. [Fig. 28](#) zeigt einen Graphen mit der vergleichenden Entwicklungsgeschichte der Knoten $b6'$ und $b6$, die vom Planer für die Biegungsabfolge bei der Durchführung seiner Zustands-Raum-Suche generiert wurden. Nimmt man an, dass der Prozess der Teilplanung und Kostenzuweisung des Planungsalgorithmus für die Abfolge von Biegungen an einem bestimmten Knoten $b6$ ausgeführt wurde, dann wird bei jedem der Schritte S66 ([Fig. 23A](#)), S76 ([Fig. 23B](#)) und S88 ([Fig. 23C](#)) ein Test auf Vertauschbarkeit dieses Knotens mit eventuellen anderen Knoten im Suchbaum hinsichtlich des Teilplans und der Kosten vom Halteexperten, des Teilplans und der Kosten vom Werkzeugexperten bzw. des Teilplans und

der Kosten vom Bewegungsexperten vorgenommen. Bei der Prüfung, ob ein Knoten lediglich eine Vertauschung eines anderen Knotens im Suchbaum ist oder nicht, wird ein Knoten wie der in [Fig. 28](#) gezeigte Knoten b6 mit einem anderen Knoten im Suchbaum verglichen, wie zum Beispiel mit Knoten b6', ebenfalls in [Fig. 28](#) gezeigt. Wenn der Vergleich angestellt wird, wird die Entwicklungsgeschichte von Knoten b6, die die Knoten b2, r1, b4, b3, r2 und b5 umfasst, mit der Entwicklungsgeschichte von Knoten b6' verglichen, die die Knoten b2'; r1'; b3', b4', r2' und b5' umfasst.

[0247] In Abhängigkeit von der jeweiligen Implementierung des Planers für die Biegungsabfolge und den von jedem einzelnen Experten vorgenommenen jeweiligen Berechnungen wird die Methode variieren, mit deren Hilfe festgestellt wird, ob ein Knoten eine Vertauschung eines anderen ist. Es kann jedoch eine Analyse der verschiedenen Vertauschungen von Knoten und der verschiedenen Teilpläne und Kosten durchgeführt werden, die auf verschiedenen Ebene der Suche mit jedem Knoten verbunden werden können, um zu ermitteln, unter welchen Bedingungen ein Knoten eine bloße Vertauschung eines anderen Knotens in der Suche ist. Auf der Grundlage der Ergebnisse der Analyse läßt sich eine geeignete Methode entwickeln, mit der festgestellt werden kann, ob ein Knoten in bezug auf den Teilplan und die Kosten, die dem Knoten zugeordnet werden, eine Vertauschung eines anderen Knotens ist. Während also die oben beschriebenen Beispiele in bezug auf die Ermittlung der Vertauschbarkeit eines Knotens hinsichtlich des Teilplans und der Kosten angeführt wurden, die vom Halteexperten bzw. Bewegungsexperten zugewiesen werden, können in Abhängigkeit von bestimmten Variationen und Implementierungen des Planers für die Biegungsabfolge und der Experten eines Systems auch andere Methoden angewandt werden. Eine ähnliche Methode läßt sich entwickeln, um zu ermitteln, ob ein Knoten in bezug auf den Teilplan und die Kosten, die von einem Bewegungsexperten zugewiesen werden, mit einem anderen Knoten vertauscht werden kann oder nicht. Daher wird hier kein spezifisches Ausführungsbeispiel für diese Ermittlung im Einzelnen beschrieben.

3. Expertenmoduln, Teilplanung und Dialog zwischen Moduln

[0248] Die [Fig. 29–Fig. 31](#) enthalten Tafeln, die den Dialog zwischen dem Planer für die Biegungsabfolge und dem Halteexperten, Werkzeugexperten bzw. Bewegungsexperten des in [Fig. 5A](#) gezeigten Ausführungsbeispiels eines Planungssystems 71 darstellen. In [Fig. 29](#), die den Dialog zwischen dem Planer für die Biegungsabfolge 72 und dem Halteexperten 82 verdeutlicht, sind mehrere Abfragepfeile Q1, Q2, Q3, Q4 und Q5 zu sehen, die jeweils eine vom Planer für die Biegungsabfolge 72 an den Halteexperten 82 gesandte Abfrage darstellen. Außerdem werden mehrere Antwortpfeile R1, R2, R3, R4 und R5 gezeigt, die jeweils eine Antwort vom Halteexperten 82 an den Planer für die Biegungsabfolge 72 darstellen. Wenn auch die Abfragen und Antworten in [Fig. 29](#) mit aufeinanderfolgenden Zahlen von 1 bis 5 bezeichnet werden, soll das nicht bedeuten, dass es keine weiteren Abfragen und Antworten zwischen, vor oder nach den in [Fig. 29](#) gezeigten Abfragen und Antworten geben könnte. Vielmehr werden diese Zahlen lediglich verwendet, um die Beschreibung des Dialogs zwischen den Moduln, wie er in [Fig. 29](#) dargestellt ist, zu erleichtern.

[0249] An einem Punkt vor Beginn seiner Suche (z. B. in Schritt S30, wie in [Fig. 22A](#) gezeigt) richtet der Planer für die Biegungsabfolge 72 eine erste Abfrage Q1 an den Halteexperten 82, die unter anderem einen Startbefehl und einen Dateinamen für das zu fertigende Bauteil umfasst. Diese Abfrage Q1 würde mit Hilfe eines Verbs „plan...“ (das verwendet wird, um einen Modul zur Planung eines Bauteils zu initialisieren) abgesandt. Nach Eingang der Abfrage Q1 führt dann der Halteexperte einen Eingabevorgang aus, bezeichnet mit 11, der das Einlesen einer geeigneten Datei umfasst, die Informationen zu geometrischen, topologischen und anderen Merkmalen sowie andere Informationen über die zu fertigenden Bauteile enthält. Nach dem Einlesen des Teils werden erste Planungsschritte, wie in Block P1 angegeben, ausgeführt. Genauer gesagt, wird Halteexperte 82 eine Greiferauswahl vornehmen, wozu die Wahl eines Robotergreifers und auch die eines vorläufigen Repogreifers gehören. Außerdem wird Halteexperte 82 die Mindestanzahl von Repos vorhersagen, die zur vollständigen Abarbeitung der gesamten Abfolge von Biegungen erforderlich sind. Nach Ausführung der ersten Planungsschritte in P1 sendet Halteexperte 82 dann die resultierenden Informationen als Antwort R1 an den Planer für die Biegungsabfolge 72 zurück. Die Antwort enthält eine Speicherliste, zu der eine Liste mit Namen von Attributen gehört, die von dem Planer für die Biegungsabfolge 72 zu speichern sind. Die Speicherliste enthält weiterhin zusammen mit jedem Attributnamen die Parameter und Werte, die zu jedem vom Planer für die Biegungsabfolge 72 zu speichernden Attribut gehören. Die an diesem Punkt vom Planer für die Biegungsabfolge 72 zu speichernden Attribute umfassen den ausgewählten Robotergreifer, den vorläufig ausgewählten Repogreifer und die Werte, die die vorhergesagte Mindestanzahl von Repos angeben, welche erforderlich sein werden, um alle Biegungen der Biegungsabfolge vollständig auszuführen.

[0250] Nach Antwort R1 (z. B. in Schritt S38 des in [Fig. 22B](#) dargestellten Planungsprozesses für die Abfolge von Biegungen) wird die Suche gestartet. Nach Beginn der Suche wird eine Abfrage Q2 an den Halteexperten

82 gesandt (z. B. in Schritt S72 des in [Fig. 23A](#) dargestellten Planungsprozesses für die Abfolge von Biegungen). Die Abfrage Q2 enthält Informationen zur Abfolge von Biegungen und eine Anforderung eines vorgeschlagenen Teilplans, eines Kostenanteils k und eines Kostenanteils h , die mit diesem bestimmten Knoten verbunden sind. In diesem Zusammenhang kann ein Befehl „get“ in FEL benutzt werden, um diese Abfrage vorzunehmen. Nach Eingang von Abfrage Q2 wird Halteexperte **82** dann die in Block P2 angezeigten Planungsschritte ausführen, dazu gehören die Vorhersage der Anzahl von Repos, die nach Ausführung des soeben vorgeschlagenen biegungsbezogenen Arbeitsgangs notwendig sein werden, die Festlegung der Griffstelle (d. h. der Stelle, an der der Roboter ein Werkstück ergreifen soll, um die soeben vorgeschlagene Biegung auszuführen) und potentieller Repostellen (für den Haltegriff des Repogreifers am Werkstück), und er wird auch die Kostenanteile k und h ermitteln, die mit dem bestimmten vorgeschlagenen biegungsbezogenen Arbeitsgang (der entweder eine Biegung oder eine Repo sein könnte) verbunden sind. Sobald alle Planungsschritte in Block P2 ausgeführt sind, wird Halteexperte **82** dann mit einer Antwort R2 an den Planer für die Biegungsabfolge **72** reagieren, die die Kostenanteile k und h , einen Teilplan und verschiedene Attribute enthält, die vom Planer für die Biegungsabfolge **72** gespeichert werden, wie es in einer vom Halteexperten an den Planer für die Biegungsabfolge **72** gesandten Speicherliste festgelegt ist. Wenn der gegenwärtig vorgeschlagene Knoten kein Repoknoten ist, wird k entweder gleich 0 oder unendlich sein, wobei 0 anzeigt, dass beim gegenwärtigen Knoten keine Repo erforderlich ist, und unendlich bedeutet, dass es keine verfügbaren Stellen gibt, an denen der Roboter das Werkstück ergreifen kann, ohne dass zuerst eine Repo durchgeführt wird. Der Wert h wird gleich 30 (ein Schätzwert für die Zeit, die zur Durchführung einer Repo benötigt wird) multipliziert mit der vorhergesagten Anzahl von Repos vom gegenwärtigen Knoten bis zu den Zielknoten sein. Wenn der gegenwärtige Knoten ein Repoknoten ist, wird k gleich 30 sein, falls die Repo möglich ist, oder unendlich, wenn eine Repo auf der gegenwärtigen Ebene der Suche für den gegenwärtigen Knoten nicht ausgeführt werden kann. Der Kostenanteil h wird das Dreißigfache der vorhergesagten Anzahl von Repos betragen, die nach Ausführung des biegungsbezogenen Arbeitsgangs des gegenwärtigen Knotens noch durchgeführt werden müssen.

[0251] Nach den Bearbeitungsvorgängen in Verbindung mit Abfrage Q2 und Antwort R2 wird der Planer für die Biegungsabfolge **72** verschiedene andere Experten einschließlich des Werkzeugexperten **80** und des Bewegungsexperten **84** befragen, um deren jeweilige Teilpläne und Kosten zu erhalten, und er wird wiederholt einen jeden der Experten in Verbindung mit jedem einzelnen während der Suche erzeugten Knoten befragen, um einen vollständigen Plan der Abfolge von Biegungen zu erzeugen, der Knoten vom Startknoten bis zum Zielknoten enthält. Sobald die Suche beendet ist und eine Lösung erhalten wurde, wird der Planer für die Biegungsabfolge **72** eine weitere Abfrage Q3 an den Halteexperten **82** senden, die eine Anforderung des Saugnapfplans enthält, wobei wieder das Verb „get“ in FEL verwendet wird. Als Reaktion auf Abfrage Q3 wird Halteexperte **82**, wie in Block P3 angegeben, die Planung der Saugnäpfe vornehmen. Bei der Planung der Saugnäpfe wird festgestellt, an welchen Stellen am Werkstück die Beschickungs- und Entnahmeverrichtung während der Beschickung und Entleerung der Bearbeitungsstation ihre Saugnäpfe ansetzen kann. Sobald die Planung der Saugnäpfe abgeschlossen ist, wird Halteexperte **82** eine Antwort R3 an den Planer für die Biegungsabfolge **72** senden. Der Planer für die Biegungsabfolge **72** wird anschließend wieder mit Abfrage Q4 beim Halteexperten **82** den endgültigen Repogreifer, der verwendet werden wird, und für verschiedene Stufen der Abfolge von Biegungen die Angriffsstelle des Repogreifers am Werkstück anfordern. Für diese Anforderung kann das Verb „get“ aus FEL verwendet werden. Nach Eingang von Anforderung Q4 wird Halteexperte **82** die in Block P4 angegebene Planung ausführen, die die Repoplanung umfasst, die nach der Suche vorzunehmen ist. Bei der Durchführung der Repoplanung nach der Suche wählt Halteexperte **82** einen gültigen Repogreifer aus, der bei Abarbeitung des resultierenden Plans der Abfolge von Biegungen zu verwenden ist, und legt die Repo-Position auf der Grundlage des gewählten Repogreifers endgültig fest. Nach Fertigstellung des Repoplan nach der Suche sendet Halteexperte **82** eine Antwort R4 an den Planer für die Biegungsabfolge **72**. Danach wird der Planer für die Biegungsabfolge **72** in Anforderung Q5 vom Halteexperten **82** weiterhin einen Rückanschlagplan anfordern. Demzufolge wird Halteexperte **82**, wie in Block P5 gezeigt, die Rückanschlagplanung vornehmen und in Antwort R5 dem Planer für die Biegungsabfolge **72** den geeigneten Rückanschlagplan zusenden.

[0252] Sobald Halteexperte **82** die gesamte Planung einschließlich der endgültigen Planung nach der Suche durchgeführt hat, wird der Planer für die Biegungsabfolge **72** beim Bewegungsexperten **84** dessen endgültige Planungsinformationen angefordert haben und vor Abarbeitung des Plans auf die Ergebnisse des endgültigen Bewegungsplans vom Bewegungsexperten **84** warten. Nach Erhalt des endgültigen Bewegungsplans vom Bewegungsexperten **84** wird der Planer für die Biegungsabfolge **72** dann den endgültigen Plan an Zuordner **76** senden.

[0253] In dem in [Fig. 30](#) dargestellten Dialog zwischen dem Planer für die Biegungsabfolge **72** und dem Werkzeugexperten **80** sind mehrere Abfragen vom Planer für die Biegungsabfolge **72** dargestellt, angedeutet

durch Fragelinien Q11, Q12 und Q13, und mehrere Antworten werden durch die Antwortlinien R11, R12 und R13 verkörpert. Die erste Fragelinie Q11 zeigt, dass der Planer für die Biegungsabfolge **72** zu einem Zeitpunkt vor Beginn seiner Suche (z. B. in Schritt S32 in dem in [Fig. 22A](#) dargestellten Planungsprozess für die Abfolge von Biegungen) den Werkzeugexperten **80** anweisen wird, mit seiner Bearbeitung zu beginnen, und dass er den Namen des zu produzierenden Bauteils mit Hilfe eines Verbs „plan“ in FEL übersenden wird. Nach Eingang von Anweisung Q11, wie durch Eingabelinie **12** angegeben, liest Werkzeugexperte **80** dann eine entsprechende Bauteildatei ein. Anschließend wird Werkzeugexperte **80** verschiedene Planungsschritte ausführen, wie durch die Blöcke P11, P12 und P13 angegeben. Zu diesen Planungsschritten gehören die Auswahl eines Werkzeugprofils, die Zusammenstellung von Segmenten (bin-packing) und eine Berechnung eines anfänglichen Werts h (der der gesamten Anzahl vorhergesagter Bühnen entspricht, die benötigt werden, um alle Biegungen der Biegungsabfolge auszuführen). Der Algorithmus für die Zusammenstellung von Segmenten umfasst die Auswahl von Werkzeugsegmenten, die zusammen die geeignete Bühnenlänge für jede einzelne Bühne ergeben, die von der Bearbeitungsstation zum Biegen bei Ausführung der Biegungen in der Biegungsabfolge verwendet werden soll. Sobald alle einschlägigen Planinformationen in den Planungsblöcken P11, P12 und P13 erfasst worden sind, wird der Werkzeugexperte **80** dem Planer für die Biegungsabfolge **72** antworten, wie durch Antwortlinie R11 angedeutet, und wird dem Planer für die Biegungsabfolge **72** mittels einer Speicherliste verschiedene zu speichernde Attribute übermitteln. Anschließend (z. B. in Schritt S38 in [Fig. 226](#)) wird der Planer für die Biegungsabfolge **72** seine Suche starten. Sobald die Suche begonnen hat, und nachdem die Informationen vom Halteexperten **82** eingegangen sind, schickt der Planer für die Biegungsabfolge **72** eine Abfrage Q12 an den Werkzeugexperten **80**, die die Abfolge von Biegungen zu diesem Punkt in der Suche und eine Anforderung des Teilplans und der zugehörigen Kostenanteile k und h enthält. Für diese Abfrage wird das Verb „get“ in FEL verwendet. Werkzeugexperte **80** führt dann Planungsschritte aus, wie von Planungsblock P14 angegeben, zu denen die Wahl der einer Biegung entsprechenden Bühnenlänge und einer Stelle an dieser Bühne, an der die Biegung ausgeführt werden soll, die Anordnung der Bühnen, die Berechnung der Kostenanteile k und h sowie die Planung der Feinbewegung gehören. Dann antwortet Werkzeugexperte **80** dem Planer für die Biegungsabfolge **72** mit R12 und schickt die Kostenanteile k und h und die zugehörigen Teilplaninformationen an den Planer für die Biegungsabfolge **72**. Antwort R12 enthält auch eine Speicherliste, die Informationen und Attribute aufweist, die vom Planer gespeichert werden sollen. Weitere Abfragen und Antworten können während der gesamten Suche mit dem Werkzeugexperten **80** und den anderen Experten **82** und **84** ausgetauscht werden, bevor die Suche abgeschlossen wird. Sobald die Suche endet und eine Lösung gefunden worden ist (z. B. in Schritt S56 des Planungsprozesses für die Abfolge von Biegungen in [Fig. 22D](#)), wird eine Abfrage Q13 an den Werkzeugexperten **80** geschickt, in der der Werkzeugexperte angewiesen wird, den Vorgang zu beenden. Werkzeugexperte **80** wird dann seine zweckmäßige Endbearbeitung vornehmen und mit Antwort R13 alle etwaigen endgültigen Informationen an den Planer für die Biegungsabfolge **72** schicken. Anschließend fordert der Planer für die Biegungsabfolge **72** den Bewegungsexperten **84** auf, endgültige Informationen zu erarbeiten und letzte Bearbeitungen vorzunehmen, und wartet die Ergebnisse ab. Sobald die endgültigen Ergebnisse der Bewegungsplanung vom Bewegungsexperten **84** eingegangen sind, stellt der Planer für die Biegungsabfolge **72** alle Informationen zu einem endgültigen Plan zusammen und schickt diesen an Zuordner **76**.

[0254] Wie in [Fig. 31](#) dargestellt, kommuniziert der Planer für die Biegungsabfolge **72** mit dem Bewegungsexperten **84** vor, während und nach Durchführung einer Suche in Form von Abfragen und Antworten, zu denen die Abfragen gehören können, die von den Fragelinien Q21, Q22 und Q23 angedeutet werden; Entsprechendes gilt für die Antwortlinien R21, R22 und R23. Zuerst (z. B. wie in [Fig. 22A](#) bei Schritt S34 gezeigt) kann eine erste Abfrage Q21 an den Bewegungsexperten **84** gerichtet werden, die einen Startbefehl und den Namen des zu produzierenden Teils enthält. Nach Erhalt der Abfrage Q21 wird Bewegungsexperte **84** dann die entsprechende Bauteildatei und eine Kanaldatei eingeben, die alle freien Raumkanäle enthält, durch die das Bauteil und der Roboter bei Ausführung der verschiedenen Biegungen und Arbeitsgänge der Biegungsabfolge gesteuert werden können. Diese Eingabe wird durch 13 angedeutet. Danach schickt Bewegungsexperte **84** eine Antwort R21 an den Planer für die Biegungsabfolge **72**, die im wesentlichen besagt, dass die Informationen eingesehen wurden, und bestätigt, dass der Experte für die nächste Abfrage vom Planer für die Biegungsabfolge **72** bereit ist. Irgendwann danach (z. B. bei Schritt S38 in [Fig. 22B](#)) wird die Zustands-Raum-Suche des Planers für die Biegungsabfolge **72** beginnen. Der Planer für die Biegungsabfolge **72** wird dann den Halteexperten **82** während der Abarbeitung der ersten Ebene der Suche nach verschiedenen Informationen abfragen, dann wird er den Werkzeugexperten **80** abfragen, und danach wird er eine Abfrage Q22 an den Bewegungsexperten **84** senden. Abfrage Q22 enthält Informationen über die Abfolge von Biegungen, die Greiferstelle und die Biegungsstellen auf den Bühnen (in Form einer Biegungskarte). Diese Abfrage kann unter Benutzung eines Verbs „get“ in FEL an den Bewegungsexperten **84** geschickt werden. Nach Eingang von Abfrage Q22 führt Bewegungsexperte **84** die Arbeiten in Bearbeitungsblock P21 aus und entwickelt also einen Teilplan und bestimmt die Kostenanteile k und h für die Ausführung der vom Planer für die Biegungsabfolge **72** vorgeschlagenen Bie-

gung an diesem speziellen Punkt in der Abfolge von Biegungen. Die resultierenden Kostenanteile k und h und der Teilplan werden in Antwort R22 an den Planer für die Biegungsabfolge gesandt. Danach können von den anderen Experten **80**, **82** und vom Bewegungsexperten **84** weitere Bearbeitungsschritte unternommen werden, um die Suche zum Ende zu bringen.

[0255] Sobald die Suche beendet ist und die Lösung vorliegt, schickt der Planer für die Biegungsabfolge **72** eine weitere Aufforderung Q23, die einen Abschlußbefehl enthält. Mit Aufforderung Q23 schickt der Planer für die Biegungsabfolge **72** Informationen an den Bewegungsexperten **84**, so dass der Bewegungsexperte **84** alle abschließenden Planungsarbeiten durchführen kann. Zu diesen übermittelten Informationen gehören die Abfolge von Biegungen, die Greiferpositionen für jede einzelne Biegung in der Abfolge, die Repostellen für jede einzelne vorzunehmende Repo, die den Biegungen der Biegungsabfolge entsprechenden Biegungskarten und alle Plane der Feinbewegung, die vom Werkzeugexperten **80** erarbeitet worden sind, um das Werkstück bei der Ausführung einer jeden Biegung in der Biegungsabfolge in den Gesenkraum hinein und aus ihm heraus zu bringen. Bewegungsexperte **84** verwendet diese Informationen, um die in Bearbeitungsblock P22 angegebenen Bearbeitungsschritte auszuführen. Genauer gesagt, wird Bewegungsexperte **84** die verschiedenen Start- und Endpunkte ermitteln, um einen Plan der Grobbewegung zu erarbeiten. Dann wird ein Suchalgorithmus abgearbeitet, um Wege zwischen den Start- und Endstellen der Grobbewegungen zu erzeugen. Danach werden die erhaltenen Wege der Grobbewegung mit den Wegen der Feinbewegung verbunden, so dass ein vollständiges Bewegungsschema entsteht, beginnend mit der Übernahme des Werkstücks von der Beschickungs- und Entnahmevorrichtung während der Beschickung der Bearbeitungsstation, über den Transport des Werkstücks zu jeder Biegungsstelle, und endend mit dem Transport des fertiggestellten Werkstücks zur Beschickungs- und Entnahmevorrichtung zwecks Abführung aus der Bearbeitungsstation.

[0256] Der vollständige Bewegungsplan wird dann mit Antwort R23 an den Planer für die Biegungsabfolge **72** zurückgeschickt. Sobald der Planer für die Biegungsabfolge **72** den vollständigen Bewegungsplan erhalten hat, kann der Planer für die Biegungsabfolge **72** den vollständigen Plan zusammenstellen und ihn zur Abarbeitung an Zuordner **76** senden.

[0257] [Fig. 32](#) zeigt das Flussdiagramm eines Prozessbeispiels für die Auswahl des RobotergrEIFERS. Dieser Prozess läuft zum Beispiel in Planungsblock P1 in [Fig. 29](#) ab. In einem ersten Schritt S128 wird eine Greiferbibliothek eingelesen. Dann schließt der Prozess in Schritt S130 offensichtlich unzweckmäßige Greifer aus, z. B. wenn sie bestimmte Abmessungen haben, die für die von der Bearbeitungsstation zum Biegen durchgeführte Art von Arbeiten ungeeignet sind. In Schritt S132 wird eine Mindestanzahl von Repos für jeden Greifer vorhergesagt. Danach werden in Schritt S134 der oder die Greifer mit der niedrigsten vorhergesagten Anzahl von Repos ausgewählt. Dann werden in Schritt S136 aus den ausgewählten Greifern alle diejenigen Greifer ausgewählt, die die größte Breite haben. Aus den verbleibenden Greifern werden diejenigen mit der geringsten Länge vom Mittelpunkt des Werkzeugs zur vorderen Spitze des Greifers ausgewählt. Aus diesen ausgewählten Greifern werden die Greifer mit der geringsten Gelenkhöhe ausgewählt. Falls es unter den ausgewählten Greifern nur einen Greifer mit der größten Breite gibt, dann wird dieser Greifer gewählt, und es machen sich keine weiteren Ermittlungen hinsichtlich der Greiferlänge oder der Gelenkhöhe des Greifers erforderlich. Desgleichen wird, falls unter den ausgewählten Greifern mehrere Greifer die größte Breite aufweisen, aber nur einer die geringste Länge hat, dieser Greifer gewählt, und weitere Bestimmungen der Gelenkhöhe von Greifern sind unnötig. Falls mehrere Greifer übrigbleiben, die gemäß Feststellung in Schritt S136 alle die gleiche geringste Gelenkhöhe aufweisen, dann kann irgendein beliebiger von diesen Greifern gewählt werden. Danach wird in Schritt S138 der gewählte Greifer an den Halteexperten zurückgeschickt.

[0258] Wie in [Fig. 32](#) zu sehen ist, muß in Schritt **132** eine Vorhersage zur Mindestanzahl von Repos getroffen werden, die für jeden Greifer erforderlich sein werden. Eine solche Vorhersage der Mindestanzahl von Repos vor der Suche kann mit Hilfe des in [Fig. 34A](#) als Beispiel dargestellten Prozesses getroffen werden. Das Ziel des in [Fig. 34A](#) gezeigten Prozesses besteht darin, für einen gegebenen RobotergrEIFER und ein gegebenes Bauteil die Mindestanzahl von Repos vorherzusagen, die zur Erzeugung des kompletten dreidimensionalen Teils erforderlich sein werden. Zu den Informationen, die benötigt und verwendet werden, um die Vorhersage treffen zu können, gehören sowohl Informationen über das zweidimensionale Teil als auch solche über das dreidimensionale Teil (das vollständige ausgebildete gebogene Bauteil). In einem ersten Schritt werden entlang einer randnahen Umfangslinie eines Teils einer zweidimensionalen Darstellung des Bauteils diskrete Punkte erzeugt. Solche diskreten Punkte, die sich in einem bestimmten Abstand vom Rand des Teils befinden, werden in [Fig. 33A](#) gezeigt. Die in [Fig. 33A](#) gezeigte Granularität (Maschenweite) dient lediglich dem Zweck, den Algorithmus zu erläutern, und gibt nicht zwangsläufig eine vorzuziehende Granularität wieder. Die Granularität der diskreten Punkte kann variiert werden, um eine optimale Genauigkeit zu erzielen, ohne die Geschwindigkeit des Suchprozesses zu beeinträchtigen.

[0259] Unter Annahme einer Position des Haltegriffs am ersten diskreten Punkt wird in Schritt S142 eine Biegunsmenge bestimmt, die alle möglichen Biegungen für diese Position des Haltegriffs des Roboters enthält, wobei vorausgesetzt wird, dass das Teil noch eben (zweidimensional) ist und dass es sich in der Beschi ckungs- und Entnahmevorrichtung befindet. Dies wird für jeden diskreten Punkt rund um die randnahe Umfangslinie des zweidimensionalen Teils **16a** (wie z. B. in [Fig. 33A](#) gezeigt) wiederholt, und alle Biegunsmengen für jeden entsprechenden Punkt des Haltegriffs des Roboters werden bestimmt.

[0260] Danach wird in Schritt S144 die Mindestanzahl von Vereinigungen der in Schritt 142 ermittelten Biegunsmengen bestimmt, die eine vollständige Menge von Biegungen (d. h. alle Biegungen der Abfolge von Biegungen) bilden. Diese Mindestanzahl von Vereinigungen wird als eine zweidimensionale Mindestanzahl von Repos R2 bezeichnet. Danach werden in Schritt S146 die diskreten Punkte rund um die randnahe Umfangslinie eines dreidimensionalen Teils **16b** (wie z. B. in [Fig. 33B](#) gezeigt) erzeugt. Zu bemerken ist, dass die in [Fig. 33B](#) gezeigte Granularität nur als Beispiel dient und nicht zwangsläufig die vorzuziehende Granularität für die Abarbeitung des vorliegenden Algorithmus darstellt. Die geeignete Granularität zur Erzeugung von Punkten rund um die äußere Randlinie des Bauteils kann in Übereinstimmung mit der gewünschten Genauigkeit und Geschwindigkeit des Algorithmus modifiziert werden. Für jeden einzelnen Punkt, der rund um die Randlinie des dreidimensionalen Teils **16b** erzeugt wurde, wird die entsprechende Biegunsmenge (d. h. alle möglichen Biegungen, die ausgeführt werden können, wenn der Roboter das Teil an dieser Stelle erfaßt) bestimmt, so dass alle Biegunsmengen für alle diskreten Punkte rund um eine Randlinie des dreidimensionalen Teils **16b** bestimmt werden. Dann wird in Schritt S150 (in [Fig. 34B](#)) die Mindestanzahl von Vereinigungen bestimmt, die benötigt werden, um eine vollständige Menge von Biegungen (d. h. alle Biegungen der Abfolge von Biegungen) zu erhalten; sie wird R3 genannt und stellt die Mindestanzahl dreidimensionaler Repos dar. Bei Ausführung von Schritt S148 werden alle mögliche Biegunsmengen beim Ergreifen an den jeweiligen diskretisierten X-Positionen am dreidimensionalen Teil **16b** unter Annahme eines bestimmten Greifers gebildet, wobei weiter angenommen wird, dass sich das dreidimensionale Teil an der Repostation befindet. In Schritt S152 werden die Werte R2 und R3 an den Algorithmus für die Auswahl des Robotergreifers (wie z. B. in [Fig. 32](#) gezeigt) und zum Halteexperten zurückgeschickt. Der Wert R3 stellt eine obere Schranke für die Anzahl vorhergesagter Repos dar, da es schwieriger ist, das Werkstück zu halten, wenn es vollständig gebogen, d. h. ein dreidimensionales Teil ist, als das Werkstück bei der Ausführung von Biegungen zu halten, wenn es ein ebenes Teil ist. Der Wert R2 stellt eine untere Schranke für die Anzahl vorhergesagter Repos dar. Sowohl der Algorithmus für die Auswahl des Robotergreifers als auch der Halteexperte können bei der Ausführung ihrer Berechnungen und Ermittlungen jeweils entweder den unteren Wert R2, den oberen Wert R3 oder auch eine Kombination beider benutzen. Zum Beispiel kann zum Zwecke der Auswahl eines Robotergreifers (in Schritt S134 in [Fig. 32](#)) zuerst die untere Anzahl R2 berücksichtigt werden. Wenn es mehr als einen Greifer mit der gleichen niedrigsten vorhergesagten Anzahl R2 von Repos, aber mit unterschiedlichen Werten R3 gibt, dann können die Greifer mit dem niedrigsten Wert R3 gewählt werden. Diese ausgewählten Greifer, falls es mehr als einer sind, würden dann gemäß Schritt S136, wie in dem Flussdiagramm in [Fig. 32](#) gezeigt, weiter bewertet.

[0261] [Fig. 35A](#) zeigt einen Prozess für die Vorhersage der Mindestanzahl von Repos, der während der Suche genutzt werden kann. Um Zeit zu sparen, umfasste der Algorithmus für die Vorhersage der Mindestanzahl von Repos, der vor der Suche benutzt wurde, keine Bewertung von Bauteilen in Form von Zwischenprodukten. Um während der gesamten Suche eine höhere Genauigkeit zu erzielen, berücksichtigt der in [Fig. 35A](#) dargestellte Algorithmus auch ein gebildetes Zwischenprodukt-Teil und die Veränderungen des Teils, während es die verschiedenen Biegunsvorgänge durchläuft.

[0262] In einem ersten Schritt S154 wird ein Zwischenprodukt erzeugt, indem eine geeignete Funktion in einer Bibliothek für geometrische Modellierung aufgerufen wird. Das Zwischenprodukt weist alle bisherigen Biegungen in der Abfolge von Biegungen bis zum vorliegenden Knoten der Suche auf. Danach werden in Schritt S156 diskrete Punkte rund um die Randlinie des Zwischenprodukts in analoger Weise zu dem Verfahren erzeugt, wie es in dem Prozess in den [Fig. 34A–Fig. 34B](#) beschrieben wird, und in analoger Weise dazu, wie es in den [Fig. 33A–Fig. 33B](#) dargestellt ist. Sobald die diskreten Punkte erzeugt worden sind, wird in Schritt S158 für jeden Punkt der Haltegriffstelle eine Biegunsmenge ermittelt. Mit anderen Worten, es werden alle möglichen Biegungen ermittelt, die ausgeführt werden können, während der Robotergreifer das Bauteil an jedem einzelnen diskreditierten Punkt hält. In Schritt S160 wird die Mindestanzahl von Vereinigungen der in Schritt S158 erzeugten Biegunsmengen bestimmt, die erforderlich ist, um eine vollständige Menge von Biegungen (d. h. alle Biegungen der Biegungsabfolge) zu bilden. Diese Anzahl wird Ri genannt. Sobald der Wert Ri ermittelt ist, werden in Schritt S162 diskrete Punkte rund um die Randlinie des dreidimensionalen Teils erzeugt. Ein Biegunsmenge (d. h. die möglichen Biegungen, die für jede Greiferposition an den diskreditierten Punkten entlang ausgeführt werden können) wird dann in Schritt S164 bestimmt (siehe [Fig. 35B](#)). Dann wird die Mindestanzahl von Vereinigungen der Biegunsmengen ermittelt, die nötig wäre, um eine vollständige Menge von

Biegungen (d. h. alle Biegungen in der Abfolge von Biegungen) zu bilden. Diese Mindestanzahl von Vereinigungen wird R3 genannt. Dann werden in Schritt S168 ein niedriger Kostenanteil $h_{Ri(c)}$ und ein hoher Kostenanteil $h_{R3(c)}$ zugewiesen und an den Planer zurückgeschickt. Die Kostenwerte $Ri(c)$ bzw. $R3(c)$ sind Schätzwerte für die Zeitdauer, die benötigt wird, um eine Repo auszuführen, multipliziert mit der Mindestanzahl der Repos (Ri bzw. $R3$). Anstatt, wie in Schritt S168 angegeben, den niedrigen Kostenanteil h und den hohen Kostenanteil h an den Halteexperten zu senden, kann der Prozess für die Vorhersage der Mindestanzahl von Repos während der Suche die Werte Ri und $R3$ selbst senden.

[0263] [Fig. 36A](#) zeigt das Beispiel eines Prozesses zur Bestimmung der Stellen für den Haltegriff des Roboters, wie er vom Halteexperten **82** in Planungsblock P2 in der in [Fig. 29](#) gezeigten Tafel ausgeführt wird. In einem ersten Schritt S170 wird ein Zwischenprodukt-Teil (das die Biegungen aufweist, die dem vorliegenden Knoten der Zustands-Raum-Suche des Planers für die Biegungsabfolge entsprechen) konstruiert. Danach werden in Schritt S172 alle Kanten ausgesondert, die sich nicht zum Ergreifen eignen. Zum Beispiel kann eine Kante ausgesondert werden, wenn es sich nicht um eine Fläche handelt, die parallel zur XY-Ebene des Roboters liegt. Weiterhin kann eine Kante verworfen werden, wenn sie beim Einbringen des Teils in den Gesenkraum dem Robotergreifer nicht zugänglich ist. Die Kante kann auch verworfen werden, wenn sie dem Gesenk zu nahe ist, so dass der Roboter vor und/oder während des Biegevorgangs mit dem Werkzeug kollidieren würde. Die Kante kann auch verworfen werden, wenn das Ergreifen des Werkstücks an solch einer Kante dazu führen würde, dass sich der Roboter aus seinem Arbeitsbereich hinaus begeben müsste.

[0264] Für jede nicht verworfene Kante werden die auf Schritt S172 folgenden Schritte (in [Fig. 36A](#) gezeigt) ausgeführt. In Schritt S174 wird für jede einzelne nicht verworfene Kante jede Ecke von Plattenkoordinaten in Kantenkoordinaten transformiert. In diesem Zusammenhang wird als erläuterndes Beispiel in [Fig. 37](#) eine Skizze gezeigt, um an einem Werkstück **16** mit den Biegelinien 1, 2, 3 und 4 eine Beispielmenge von Plattenkoordinaten X_s und Y_s zu definieren, die in Kantenkoordinaten X_e und Y_e umgewandelt werden können, welche der Kante von Werkstück **16** entsprechen, die der Biegelinie 1 am nächsten liegt.

[0265] In Form von Kantenkoordinaten wird in Schritt S176 jede Kante in Verbindungspunkte längs der X-Achse diskretisiert. Danach werden in Schritt S178 für jeden diskretisierten Verbindungspunkt X_p Haltegrifflinien erzeugt, die sich längs der Y-Achse erstrecken. Um die Grifflinien entlang der Y-Achse zu erzeugen, werden mehrere Prozessschritte ausgeführt. Zum Beispiel wird, siehe [Fig. 38](#), für einen diskretisierten Punkt X_p eine (unterbrochene) Grifflinie **306** längs der Y-Achse gebildet. Für den diskretisierten Verbindungspunkt X wird ein erster Y-Wert Y_s vorgeschlagen, der in einem Abstand (z. B. 3 mm) von der Kante festgelegt wird. Es wird angenommen, dass der Greifer senkrecht zur X-Achse in Kantenkoordinaten ausgerichtet ist. Es wird dann eine Feststellung getroffen, ob der Punkt Y_s außerhalb des Arbeitsbereichs des Roboters liegt, während sich das Werkstück an der Beschickungseinrichtung, der Repostation oder an einer der Bühnen befindet, oder ob dies nicht der Fall ist. Wenn das der Fall ist, dann wird an einer Linie, die dem diskretisierten Verbindungspunkt X_p entspricht und die senkrecht zur Kante ausgerichtet ist, ein neuer Punkt gefunden, der innerhalb des Arbeitsbereichs liegt. Für den ersten gültigen Y_p wird festgestellt, ob Y_p außerhalb der maximalen Reichweite des Greifers liegt. Wenn das der Fall ist, wird Y_p verworfen. Außerdem wird ermittelt, ob der Greifer guten Backenkontakt mit dem Bauteil machen kann, wenn sich der Greifer an der Position Y_p befindet, oder nicht. Falls kein guter Backenkontakt hergestellt werden kann, wird die Position Y_p verworfen. Neue Werte für Y_p werden vorgeschlagen, bis Linie **306** eine erste maximale Position erreicht, an der der Roboter das Bauteil ergreifen kann. Diese erste maximale Position ist Y_f . Dieser Abstand wird durch den Umstand definiert, dass die Backen wegen Löchern oder wegen eines Rands an dem Bauteil keinen guten Kontakt mehr haben können. Zum Beispiel wird in dem in [Fig. 38](#) gezeigten Werkstück **16** eine maximale Position Y_f direkt vor einem ersten Loch **307** gefunden. Das nächste praktikable oder potentielle Y_p wird dann an der Linie gefunden, die senkrecht zur Kante verläuft, und wird als neue Ausgangs- oder Startposition Y_s' definiert. Dann werden Y-Werte Y_p vorgeschlagen und geprüft, bis infolge von Behinderungen eine weitere Endposition Y_f gefunden wird, weil die Backen keinen guten Kontakt haben können oder wegen des Umstands, dass das Teil an dieser Stelle einen Rand hat. Somit wird, wie an dem Werkstück in [Fig. 38](#) gezeigt, Y_f direkt vor dem zweiten Loch **308** ermittelt. Dieser Vorgang wird wiederholt, bis das Ende der Linie **306** die maximale Reichweite des Greifers oder den Rand an der gegenüberliegenden Seite des Werkstücks **16** erreicht. Damit wird ein weiterer Linienabschnitt generiert, der sich von Y_s'' bis Y_f'' erstreckt.

[0266] Sobald die Grifflinien für jeden diskretisierten Punkt X_p erzeugt worden sind, wird später in Schritt S180 (siehe [Fig. 36B](#)) eine gemeinsame Griffzone für die vorliegende Biegung in der Suche definiert, und zwar durch Überschneidung der gegenwärtigen Grifflinien mit den Grifflinien, die für vorhergehende Biegungen seit der letzten gewählten Repo in der Suche bestimmt wurden. Wenn die Überschneidung nicht gleich 0 ist, wird ein Kostenanteil k von 0 zugewiesen, und ein unendlicher Kostenanteil k wird zugewiesen, wenn die Über-

schneidung gleich 0 ist. Dies bedeutet, dass die vorliegende Biegung nicht ausgeführt werden kann, da die Griffzonen, die zur Ausführung der Biegung benötigt werden, nicht mit der vorhergehenden Biegung übereinstimmen. Danach wird in Schritt S182 eine vorläufige Griffstelle innerhalb einer definierten gemeinsamen Zone ausgewählt.

[0267] Immer dann, wenn festgestellt wird, dass es keine Überschneidung von Griffregionen gibt und somit eine Repo erforderlich ist, werden endgültige Griffstellen für die der Repo vorausgehenden Biegungen gewählt, da dann bekannt ist, dass sich für diese Biegungsmenge die Griffstelle nicht mehr ändern wird. Eine endgültige Griffstelle wird so gewählt, dass eine große Repozone erzeugt wird.

[0268] [Fig. 39](#) verdeutlicht die Entwicklung der gemeinsamen Griffzone, die im Gesamtverlauf einer Suche bestimmt wird, wie sie mit Hilfe eines Verfahrens zur Bestimmung der Haltegriffstellen von Robotern berechnet wird, wie z. B. in den [Fig. 36A–Fig. 36B](#) dargestellt. Die Griffzone für Biegung 1 wird zuerst so bestimmt, wie in Ansicht A gezeigt. Dann, wenn Biegung 1 bereits ausgeführt und der entsprechende Flansch umgebogen ist (angedeutet durch die schräge Schraffur in Ansicht B), werden die potentiellen Griffregionen bestimmt, die zur Ausführung von Biegung 2 genutzt werden können, wie in Ansicht B dargestellt. Die Überschneidung der Regionen in Ansicht A und Ansicht B wird dann ermittelt, wie in Ansicht C gezeigt. Danach wird Biegung 2 ausgeführt (angedeutet durch die schräge Schraffur in Ansicht D), und die gesamten verfügbaren Griffregionen, die zur Ausführung von Biegung 3 genutzt werden können, werden bestimmt, wie in Ansicht D gezeigt. Um von Biegung 2 zu Biegung 3 überzugehen, wird eine Überschneidung der Regionen in den Ansichten C und D vorgenommen, wie in Ansicht E gezeigt wird. Dies zeigt an, dass es keine weiteren sich überschneidenden Regionen gibt und dass eine Repo durchgeführt werden muß, bevor Biegung 3 ausgeführt werden kann (die durch die schräge Schraffur in Ansicht F angedeutet wird). Die Repo wird dann vorgenommen, und Biegung 3 wird ausgeführt. Vor der Ausführung von Biegung 4 werden die potentiellen Griffregionen des Roboters für diese Biegung bestimmt, wie es in Ansicht F gezeigt wird. Um die exakte Griffposition für die Ausführung von Biegung 4 zu ermitteln, wird eine Überschneidung der Regionen in den Ansichten D und F vorgenommen, wie in Ansicht G angedeutet wird. Dies ist die Region für die Griffstelle des Roboters, die zur Ausführung von sowohl Biegung 3 als auch Biegung 4 genutzt werden kann.

[0269] Jede Biegung, die bereits ausgeführt worden ist, wird dadurch gekennzeichnet, dass der gebogene Flansch eine schräge Schraffur aufweist. Die Griffregionen werden durch eine voll ausgezogene schwarze Linie angezeigt.

[0270] [Fig. 40](#) zeigt eine erste bzw. eine zweite Ansicht eines Werkstücks **16**, wobei die Ansichten die Regionen der Grifflinien zeigen, die vor Ausführung einer ersten Biegung bzw. einer zweiten Biegung bestimmt wurden. Wie in [Fig. 40](#) zu sehen ist, umfasst die Region der Grifflinien **309** eine bestimmte große Fläche des Werkstücks **16**. Die untere Ansicht zeigt die Überschneidung der in der oberen Ansicht gezeigten Region der Grifflinien (d. h. der Griffzone), die genutzt werden kann, um die erste Biegung auszuführen, mit einer Region der Grifflinien (nicht gezeigt), die genutzt werden kann, um die zweite Biegung auszuführen. Die Region der Grifflinien **310** ist also eine kleine Teilmenge der Region der Grifflinien **309** und kann als Griffstelle zur Ausführung sowohl der ersten wie auch der zweiten Biegung genutzt werden.

[0271] [Fig. 41](#) illustriert ein Ausführungsbeispiel eines Prozesses zur Bestimmung der Griffstellen für den Repogreifer, die während der Repoplanung nach der Suche, wie in Planungsblock P4 in [Fig. 29](#) angezeigt, vorgenommen wird. In einem ersten Schritt S184 wird ein Zwischenprodukt-Teil konstruiert entworfen. Die nicht geeigneten Kanten werden danach in Schritt S186 verworfen. Zum Beispiel kann der Prozess eine Kante verworfen, wenn sie nicht einer Fläche entspricht, die parallel zur X-Y-Ebene des Roboters liegt. Für jede nicht verworfene Kante werden die auf Schritt S186 folgenden Schritte ausgeführt. In Schritt S188 erfolgt für das Zwischenprodukt eine Transformation von Plattenkoordinaten in Kantenkoordinaten. Danach wird in Schritt S190 die betreffende Kante längs der X-Achse mit angemessener Granularität diskretisiert (analog zu der in den [Fig. 33A](#) und [Fig. 33B](#) gezeigten Weise). Dann werden in Schritt S192 Grifflinien längs der Y-Achse erzeugt, indem Punkte längs der Y-Achse von einem ersten Punkt Y_s (z. B. 3 mm) bis zur maximalen Reichweite des Greifers entlang der Linie, die auf dem diskreten X-Punkt liegt, erzeugt werden. Für jeden Punkt an dieser Linie gilt, dass diese Y-Position verworfen wird, falls der Repogreifer eine vorhergehende Griffstelle des Robotergreifers behindert. Außerdem gilt für jede Y-Position, dass sie verworfen wird, wenn der Repogreifer irgendeinen Bereich des Bauteils behindert. Ferner wird die betreffende Y-Position verworfen, wenn es keinen guten Backenkontakt zwischen dem Repogreifer und dem Bauteil gibt. Es wird somit, wie in [Fig. 38](#) gezeigt, eine Linie von einer Ausgangsposition Y_s zu einer Endposition Y_f gezogen, bei der es sich um eine erste maximale Position handelt, an der der Repogreifer das Bauteil ergreifen kann, bevor er auf einen Randabschnitt stößt (z. B. ein Loch im Bauteil). Weitere Mengen von Ausgangs- und Endpositionen Y_s und Y_f werden gebil-

det, bis der Repogreifer seine maximale Reichweite (z. B. bei Yf, wie in [Fig. 38](#) gezeigt) erreicht, analog zu der Art und Weise, wie in dem Verfahren zur Bestimmung der Haltegriffstellen des Roboters vorgegangen wurde, das in Verbindung mit den [Fig. 36A](#) und [Fig. 36B](#) erläutert wird.

[0272] Eine endgültige Reposteile wird (unter Berücksichtigung früherer und gegenwärtiger Griffstellen des Robotergreifers) festgelegt, wenn die Suche das Ziel erreicht oder eine weitere Repo nötig wird.

[0273] [Fig. 42](#) stellt ein Ausführungsbeispiel des Prozesses zur Auswahl des Repogreifers vor der Suche dar. Es kann sein, dass dies nicht wirklich umgesetzt wird. In einem ersten Schritt S198 wird eine Greiferbibliothek eingelesen, und in einem zweiten Schritt S200 wird ein konservativer Repogreifer ausgewählt. Ein konservativer Repogreifer wird als ein Greifer definiert, der schmal und kurz ist und das Teil halten kann (in entweder dreidimensionaler oder zweidimensionaler Form). Der gewählte Repogreifer ist eine vorläufige Lösung, da die Auswahl eines endgültigen Repogreifers vorgenommen wird, nachdem die Suche abgeschlossen ist. Die Auswahl des Repogreifers nach der Suche wird in den [Fig. 43A–Fig. 43B](#) gezeigt. In einem ersten Schritt S202 werden die Geometrien aller Zwischenprodukte für die verschiedenen Biegungen im Vertauf der gesamten Abfolge von Biegungen konstruiert. Mit anderen Worten, in Übereinstimmung mit der in der Suche festgelegten Reihenfolge der Biegungen werden die Geometrien der geeigneten Zwischenprodukte konstruiert, die jeder einzelnen Biegung in der Abfolge von Biegungen entsprechen. Dann werden in Schritt S204 Greifer ausgesondert, die aus offenkundigen Gründen als ungeeignet angesehen werden (z. B., wenn sie infolge unzureichender Abmessungen ein Teil nicht ergreifen können). Danach werden in Schritt S206 verfügbare Repogreifer bestimmt, und zwar auf der Grundlage zweier Griffstellen des Roboters, nämlich einer anfänglichen Roboter-Griffstelle vor der Repo und einer repositionierten Roboter-Griffstelle. Jede dieser Positionen ist bereits im Suchprozess bestimmt worden. Wenn die vorher bestimmte vorläufige Repoposition, die während der Suche ermittelt wurde, hinsichtlich der als verfügbar bestimmten Repogreifer verbessert werden könnte, dann wird die Position korrigiert. In Schritt S208 werden, falls es (nach dem Aussondern) mehr als einen verfügbaren Repogreifer gibt, die Repogreifer mit der größten Breite gewählt. Wenn es mehr als einen Repogreifer mit der größten Breite gibt, dann werden die mit der geringsten Länge gewählt. Wenn es mehr als einen Repogreifer mit der geringsten Länge gibt, dann wird der mit der geringsten Gelenkhöhe gewählt. Wenn es mehrere Repogreifer mit der gleichen geringsten Gelenkhöhe gibt, wird irgendein beliebiger von diesen gewählt. Üblicherweise wird ein Repogreifer so ausgewählt, dass er die Wahl eines größeren Robotergreifers ermöglicht und eine erfolgreiche Generierung von Griffstellen für den Repogreifer garantiert. Die Breite eines Repogreifers wird von der Größe der möglichen Griffzone des dreidimensionalen Teils bestimmt. Die Gelenkhöhe eines Repogreifers wird so festgelegt, dass sie größer ist als die minimale Flanschhöhe des dreidimensionalen Teils.

[0274] Wie in [Fig. 30](#) in einem Planungsblock P12 gezeigt, wird ein Algorithmus für die Zusammenstellung von Segmenten abgearbeitet, bevor die Suche begonnen wird. Während der Abarbeitung des Algorithmus für die Zusammenstellung von Segmenten wird ein Plan aufgestellt, der festlegt, wie die Segmente zu jeder einzelnen Bühne in einer Liste von Bühnen zusammengesetzt werden sollen, aus der dann auszuwählen ist. [Fig. 44](#) stellt einen Algorithmus für die Zusammenstellung von Segmenten dar. In einem ersten Schritt S210 stellt der Prozess eine Liste mit Längen von Biegelinien auf und erstellt eine Liste von Bühnenlängen, die Bühnenlängen aufweist, die gleich den Längen der an dem Werkstück zu bildenden Biegelinien sind. Weiterhin erstellt der Prozess eine Liste verfügbarer Segmentlängen (oder liest sie ein), aus der ausgewählt werden kann, um die Bühnen in der Liste der Bühnenlängen zu bilden. Dann werden für jede einzelne unterschiedliche Länge von Biegelinien (d. h. für jede einzelne Bühnenlänge) die Schritte S212 und S214 ausgeführt. In Schritt S212 wird eine A*-Suche durchgeführt, um eine Kombination von Segmenten zu ermitteln, die zur Bildung der betreffenden Bühne verwendet werden könnte. In Schritt S214 schickt dann der Prozess eine Lösungsmenge von Werkzeug/Gesenksegmenten an den Werkzeugexperten zurück.

[0275] Bei der Durchführung der A*-Suche wird der Ausgangsknoten n_0 zu einer Anzahl von Knoten auf der ersten Ebene der Suche fortentwickelt, wobei jeder der fortentwickelten/nachfolgenden Knoten auf der ersten Ebene einer der verfügbaren Segmentlängen (d. h. Längen eines Stempelwerkzeugs und entsprechender Gesenksegmente) entspricht. Wenn zum Beispiel die Längen der verfügbaren Werkzeugsegmente 10 mm, 15 mm, 22 mm, 40 mm, 80 mm, und 160 mm betragen, dann würden die Knoten auf der ersten Ebene jeder einzelnen dieser Segmentlängen entsprechen. Der jedem Folgeknoten zugewiesene Kostenanteil k ist gleich der Länge des dem jeweiligen Knoten entsprechenden Segments, und der Kostenanteil h wird mit der Länge des verbleibenden Teils der Bühne angesetzt, der noch mit Hilfe der Segmente zu bilden ist (d. h., wie weit der Suchprozess vom Ziel entfernt ist).

[0276] Die [Fig. 45–Fig. 46](#) zeigen, wie der Kostenanteil h , der im gesamten Verlauf der Suche vom Werkzeugexperten zugeordnet und an den Planer für die Biegungsabfolge **72** weitergegeben wird (in Antwort R12,

wie in [Fig. 30](#) gezeigt), berechnet wird. Der Kostenanteil h für die Bereitstellung von Werkzeug wird als Funktion der gesamten Anzahl vorhergesagter Bühnen ermittelt, die erforderlich sein werden, um alle Biegungen in der Abfolge von Biegungen auszuführen.

[0277] Genauer ausgedrückt, h_{TE} für n_j , Ausgangs- h ist ein anfänglicher Kostenanteil h ; er ist gleich der gesamten Anzahl vorhergesagter Bühnen, die erforderlich sein werden, um alle Biegungen in der Abfolge von Biegungen auszuführen, multipliziert mit einem angenäherten Zeitbedarf (z. B. 600 Sekunden) für die Installation einer jeden Bühne; und k'_{TE} für n_j stellt die summierten Werkzeugkosten k von Knoten n_0 bis zu Knoten n_j dar. Um den Ausgangsanteil h ($h_{initial}$) (die gesamte vorhergesagte Anzahl von Bühnen) zu ermitteln, wird vor der Suche ein Prozess ausgeführt (in Planungsblock P13 in [Fig. 30](#)), wie er in den [Fig. 45](#) und [Fig. 46](#) dargestellt ist. Im oberen Teil von [Fig. 45](#) wird ein erstes Beispiel eines Werkstücks gezeigt, und im unteren Teil von [Fig. 45](#) ist ein zweites Beispiel eines Werkstücks zu sehen. Beim ersten Werkstückbeispiel sind insgesamt vier Biegungen auszuführen, und das Werkstück soll nach Ausführung der Biegungen insgesamt fünf Flächen aufweisen. Beim zweiten Beispiel sind insgesamt vier Biegungen auszuführen, und das Werkstück wird nach Ausführung der Biegungen insgesamt fünf Flächen aufweisen. Zur Unterstützung bei der Vorhersage der Gesamtanzahl von Bühnen, die erforderlich sein werden, um die Biegungen auszuführen, wird ein Biegungs-"Teststreifen" **370** über jede Biegelinie der zweidimensionalen Darstellung des Werkstücks gelegt. Bei beiden in [Fig. 45](#) gezeigten Beispielen wurde solch ein Biegungs-"Teststreifen" **370** über die dunkel dargestellte Biegelinie gelegt.

[0278] [Fig. 46](#) zeigt das Beispiel eines Flussdiagramms der Schritte, die ausgeführt werden können, um den Ausgangsanteil h der Werkzeugkosten ($h_{initial}$) zu bestimmen, welcher gleich der gesamten Anzahl vorhergesagter Bühnen ist, die erforderlich sind, um alle Biegungen an dem Werkstück auszuführen. In einem ersten Schritt S216 wird eine erste Bühnenlänge, die gleich der Länge der längsten Biegelinie ist, in die Menge zugewiesener Bühnen eingebracht. Danach wird für jede Biegelinie ein Test durchgeführt, indem für jede Biegung Schritt S218 und die auf Schritt S218 folgenden Schritte abgearbeitet werden. In Schritt S218 wird eine Entscheidung getroffen, ob eine zusätzliche Bühne benötigt wird oder nicht. Dies wird erreicht, indem in der Weise, wie es in [Fig. 45](#) anhand der gezeigten Beispiele dargestellt ist, ein schmaler "Teststreifen" über die Biegelinie gelegt wird. Falls ein Differenzwert, der gleich der Gesamtanzahl von Flächen nach dem Auflegen des Teststreifens über die Biegelinie minus die Gesamtanzahl von Flächen vor dem Auflegen des Teststreifens ist, niedriger als oder gleich 3 ist, wird keine zusätzliche Bühne benötigt. Andernfalls wird eine zusätzliche Bühne gebraucht. In einem nächsten Schritt S220 wird, falls eine zusätzliche Bühne benötigt (d. h. vorhergesagt) wird, die längste Bühne (aus der Bühnenliste) zugewiesen, die verwendet werden kann, um die Biegung, die getestet wird, auszuführen, d. h., sie wird in die Menge der zugewiesenen Bühnen eingefügt. Danach wird in Schritt S222 festgestellt, ob die neu zugewiesene Bühne gleich einer Bühne ist, die sich bereits in der Menge der zugewiesenen Bühnen befindet. Wenn die neu zugewiesene Bühne bereits in der Menge der neu zugewiesenen Bühnen vorhanden ist, dann wird die neu zugewiesene Bühne der Menge nicht hinzugefügt, wie in Schritt S226 angegeben. Wenn sie jedoch noch nicht in der Menge der zugewiesenen Bühnen vorhanden ist, dann wird die neu zugewiesene Bühne der Menge der zugewiesenen Bühnen in Schritt S224 hinzugefügt. Anschließend kehrt der Prozess entweder von Schritt S224 oder von S226 zu Schritt S218 zurück, sofern es weitere Biegelinien gibt, die bewertet werden müssen. Sobald alle Biegelinien durch den Prozess bewertet worden sind, geht der Prozess zu Schritt S228 weiter, wo der anfängliche Anteil h der Werkzeugkosten als das Produkt aus 600 und der vorhergesagten Anzahl von Bühnen (die die Gesamtanzahl von Bühnen ist, die in den Satz zugewiesener Bühnen gebracht worden sind) festgesetzt wird.

[0279] Werden die in [Fig. 46](#) gezeigten Prozessschritte anhand des Beispiels 1 in [Fig. 45](#) ausgeführt, dann ist die Anzahl der Flächen nach Auflegen des Teststreifens auf die Biegelinie gleich 8, und die Anzahl der Flächen vor Auflegen des Teststreifens auf die Biegelinie ist gleich 5. Damit ist $8 - 5 = 3$, und es wird keine zusätzliche Bühne vorhergesagt. In Beispiel 2 aus [Fig. 45](#) beträgt die Anzahl der Flächen nach Auflegen des Teststreifens auf die Biegelinie 10. $10 - 5 = 5$, was größer ist als 3. Dementsprechend wird für Beispiel 2 eine zusätzliche Bühne vorhergesagt.

[0280] [Fig. 47A](#) zeigt einen Überblick über einen Prozess zur Werkzeugauswahl, der einen Bestandteil des Planungsblocks P11 zur Auswahl des Werkzeugprofils in [Fig. 30](#) bildet. Der Prozess beginnt beim Planer für die Biegungsabfolge in Schritt S471 und schreitet zum Werkzeugexperten (Werkzeugmodul) fort, der in Schritt S472 arbeitet. Als Antwort auf den Eingang eines Befehls „PLAN“ in FEL vom Planer für die Biegungsabfolge schickt der Werkzeugexperte das geometrische Modell des Bauteils, Daten zu Biegungsgraphen und eine Werkzeugbibliothek zu einem Modul Werkzeugfilter. In Schritt S473 ermittelt der Modul Werkzeugfilter ein ausgewähltes Gesenk, Gesenkhalter, Gesenkschiene und eine Liste einsetzbarer Stempel. Bei der Erarbeitung dieser Informationen führt der Modul Werkzeugfilter für jede Biegung, die am Werkstück auszuführen ist, wie

von den Daten der Biegungsgraphen angegeben wird, mehrere Schritte aus. Der Modul Werkzeugfilter liest notwendige Daten für die Biegung ein und wählt das Gesenk, den Gesenkhalter und die Gesenkschiene auf der Grundlage von Anforderungen an Leistung (in Tonnen), V-Breite, Winkel und Innenradius aus. Der Modul Werkzeugfilter streicht dann die Liste der Stempel (um eine Liste einsetzbarer Stempel zu erhalten) auf der Grundlage von Nebenbedingungen in bezug auf Leistung (in Tonnen), Kopfabrundung und Kopfwinkel zusammen.

[0281] Der Prozess kehrt dann zum Modul Werkzeugmodul in Schritt S473 zurück, der dann das geometrische Modell des Bauteils, die Daten seines Biegungsgraphen und eine Liste einsetzbarer Stempel an einen Modul Profilauswahl sendet. Dann wählt der Modul Profilauswahl in Schritt S474 den in der Biegevorrichtung zu verwendenden Stempel und Stempelhalter aus. Bei der Durchführung der Profilauswahl für jede Biegung wählt der Modul Profilauswahl nur diejenigen Stempel aus der Liste einsetzbarer Stempel aus, deren Profil zur Geometrie des Bauteils paßt. Stempel mit passenden Profilen werden während des Biegevorgangs nicht mit dem Bauteil kollidieren. Der Modul Profilauswahl wählt dann in entsprechender Weise den besten Stempel und Stempelhalter aus. Der ausgewählte geeignete Stempel und ausgewählte geeignete Stempelhalter werden dann an den Werkzeugmodul zurückgeschickt, der seine Arbeit in Schritt S475 fortsetzt.

[0282] Der vom Modul Werkzeugfilter abgearbeitete Algorithmus wird jetzt eingehender erläutert. In einem ersten Schritt liest der Modul Werkzeugfilter die folgenden Daten ein: den gewünschten Innenradius (IR) jeder Biegung; die Werkstoffdicke (T) des Bauteils; die Zugfestigkeit des Bauteilwerkstoffs; die Mindestlänge des Nachbarflanschs (die Mindest/bevorzugte Mindestlänge (-höhe) des kürzeren Flanschs, der an der Biegelinie der jeweils betrachteten Biegung liegt); die Biegungslänge und den Biegewinkel; sowie eine Werkzeugbibliothek (Die Werkzeugbibliothek enthält umgekehrte Profile der Stempel, die verwendet werden können).

[0283] In einem zweiten Schritt führt der Modul Werkzeugfilter für jede Biegung die folgenden Schritte aus:

- (a) Eine Liste FEASIBLE_DIES (einsetzbare Gesenke) wird geleert.
- (b) Die Liste verfügbarer Gesenke in der Bibliothek wird durchsucht, und für jedes Gesenk gilt: wenn seine v-Breite innerhalb einer bestimmten Toleranz den gewünschten IR erzeugen kann und sein v-Winkel dem Biegewinkel gut angepaßt ist, und wenn die für diese v-Breite und T erforderliche Leistung (in Tonnen) pro Meter (berechnet mit Hilfe einer Biegekrafttafel und von Leistungsgleichungen) im Rahmen des Leistungsvermögens dieses Gesenks liegt, dann füge dieses Gesenk zur Liste FEASIBLE_DIES hinzu.
Es ist zu bemerken, dass die Anforderung an Leistung pro Meter für die v-Breite und T mit Hilfe einer Krafttafel und von Leistungsgleichungen berechnet werden kann, die von der Firma Amada in ihren Katalogen mit Werkzeugausrüstungen von Abkantpressen zur Verfügung gestellt werden. Außerdem oder als Alternative kann der Wert für Leistung (in Tonnen) pro Meter mit Hilfe der Biegetafel und von Leistungsgleichungen berechnet werden, die in der Arbeit mit dem Titel „New Know-how an Sheet-Metal Fabrication Gending Technique“ der Amada Sheet Metal Working Research Association, Machinists Publishing Company, Ltd., erste Auflage (15. Mai 1981), zur Verfügung gestellt werden.
- (c) Aus FEASIBLE_DIES wird das Gesenk ausgewählt, das am besten die Anforderungen an den IR, Biegewinkel, Minimalflansch und Gesamtleistung (in Tonnen) erfüllt. Wenn die Nebenbedingung der Mindestflanschlänge noch nicht erfüllt wird, dann wird eine Warnung erteilt. Der geeignete Gesenkhalter und die geeignete Gesenkschiene für das gewählte Gesenk werden dann ausgewählt.
- (d) Die Liste verfügbarer Stempel in der Bibliothek wird dann durchsucht, und für jeden Stempel gilt: wenn der Kopfwinkel kleiner als der v-Winkel des gewählten Gesenks ist, ihm aber nahekommt, und wenn die Kopfabrundung kleiner ist als der IR und ihm nahekommt, und wenn die für diese Biegung erforderliche Leistung pro Meter im Rahmen des Leistungsvermögens dieses Stempels liegt, dann wird dieser Stempel zur Liste FEASIBLE_PUNCHES (einsetzbare Stempel) für diese Biegung hinzugefügt.

[0284] Die vom Modul Profilauswahl ausgeführten Schritte werden jetzt detaillierter erläutert.

[0285] In einem ersten Schritt, den der Modul Profilauswahl ausführt, wird für jede Biegung das endgültige (fertige) dreidimensionale Modell des Teils in Bezug auf die geeignete Werkzeugausrüstung in einer Position angeordnet, in der es sich nach abgeschlossener Ausführung der zu bewertenden Biegung in der Biegepresse befindet. Danach wird für jede Biegung

- (a) die Liste FEASIBLE_PUNCHES hinsichtlich dieser Biegung durchsucht, und für einen jeden Stempel gilt: falls das dreidimensionale geometrische Modell des Stempels nicht das dreidimensionale geometrische Modell des Bauteils am Ende dieser Biegung durchdringt, dann ist dieser Stempel für diese Biegung

ein FEASIBLE_PUNCH. Das dreidimensionale Bauteilmodell ist eine hinreichende Bedingung, kann aber zu sehr einschränken und wird vielleicht zu einem späteren Zeitpunkt modifiziert. Zum Beispiel könnten Modelle von Zwischenprodukten, die die tatsächliche Gestalt des Teils bei jeder Biegung in der Abfolge darstellen, verwendet werden, während die Profilauswahl im Verlauf des gesamten vom Planer für die Biegungsabfolge ausgeführten Suchprozesses durchgeführt wird.

(b) derjenige Stempel aus den FEASIBLE_PUNCHES ausgewählt, der am besten die Anforderungen an den IR, Biegewinkel und Gesamtleistung in Tonnen erfüllt. Wenn möglich, wird der als "Roboterwerkzeug" geltende Standardstempel gewählt. Es ist darauf hinzuweisen, dass es sein kann, dass der ausgewählte Stempel mit seinem umgekehrten Profil benutzt werden muß (d. h. in Y-Richtung umgekehrt/um 180° um die Z-Achse gedreht), um dem Durchdringungstest des Moduls Profilauswahl in Schritt (a) oben zu genügen.

[0286] Es ist zu bemerken, dass von den Berechnungen des Moduls Werkzeugfilter und des Moduls Profilauswahl eine oder beide entweder vor, während oder nach der vom Planer für die Biegungsabfolge durchgeführten Suche ausgeführt werden können.

[0287] Die [Fig. 47B–Fig. 47C](#) stellen einen Prozess der Bühnenplanung dar, der eine Bühne und eine Stelle an der Bühne aussucht, an der das Werkstück bei Ausführung einer bestimmten Biegung in der Abfolge von Biegungen zugeführt wird; diese Planung wird in Block P14 in dem Dialogdiagramm in [Fig. 30](#) angedeutet. In einem ersten Schritt S230 wird das Modell eines Zwischenprodukts des Teils erzeugt (wobei das Teil die Biegungen bis zur derzeitigen Biegung in der Abfolge von Biegungen aufweist).

[0288] In Schritt S232 wird die größte nicht bewertete Bühne aus der Bühnenliste (von verfügbaren Bühnen) gewählt. Dann wird in Schritt S234 die derzeitige Biegung in der Suche simuliert, wobei durch den Werkzeugexperten (TE) eine Kollisionsprüfung vorgenommen wird; dabei wird das Teil der Werkzeugbühne in mittlerer Position, auf die Bühne bezogen, zugeführt. Dann wird in Schritt S236 eine Feststellung getroffen, ob während der Simulation der Biegung eine Kollision stattgefunden hat oder nicht. Wenn es eine Kollision gegeben hat, geht der Prozess zu Schritt S238 weiter, in dem die derzeit in der Suche bewertete Biegung simuliert wird, wobei durch den Werkzeugexperten eine Kollisionsprüfung vorgenommen wird; dabei wird das Teil auf der linken Seite der Werkzeugbühne zugeführt, so dass das linke Ende der Biegelinie genau links an der linken Seite der Werkzeugbühne liegt. Wenn dann in Schritt S242 eine Kollision festgestellt wird, geht der Prozess zu Schritt S246 weiter.

[0289] Wenn jedoch in Schritt S236 festgestellt wird, dass keine Kollision stattgefunden hat, wird in Schritt S240 die mittlere Position als die Position festgesetzt, in der das Werkstück auf die Bühne gebracht wird, und der Prozess geht (über Verbindungspunkt B) zu Schritt S254 über, der in [Fig. 47C](#) gezeigt wird.

[0290] Wenn in Schritt S242 nach Simulation der Biegung mit dem auf der linken Seite der Bühne positionierten Bauteil keine Kollision festgestellt wird, geht der Prozess von Schritt S242 zu S244 über, wo die linke Position als die Position für das Aufbringen des Werkstücks auf die Bühne festgesetzt wird. Dann geht der Prozess direkt (über Verbindungspunkt B) zu Schritt S254 weiter.

[0291] In Schritt S246 wird die Biegung simuliert, wobei durch den Werkzeugexperten eine Kollisionsprüfung vorgenommen wird; dabei wird das Bauteil auf der rechten Seite der Werkzeugbühne positioniert (wie z. B. in [Fig. 48B](#) gezeigt), indem das Teil so auf eine Werkzeugbühne gelegt wird, dass das rechte Ende der Biegelinie unmittelbar rechts an der Werkzeugbühne liegt, während die Biegung ausgeführt wird. Wenn festgestellt wird, dass während dieser Simulation eine Kollision erfolgt ist, geht der Prozess zu Schritt S252 weiter. Wenn laut Feststellung in Schritt S248 während dieser Simulation keine Kollision stattgefunden hat, geht der Prozess von Schritt S248 zu Schritt S250 über, wo die rechte Position als Beschickungsposition festgesetzt wird, bevor der Prozess mit Schritt S254 fortgesetzt wird. Wenn laut Feststellung in Schritt S248 eine Kollision stattgefunden hat, geht der Prozess mit Schritt S252 weiter, in dem die gewählte Bühne (gewählt in Schritt 242) verworfen wird, und der Prozess geht dann (über Verbindungspunkt C) zu Schritt S232 oben in [Fig. 47B](#) weiter. Es ist zu bemerken, dass an diesem Punkt in Schritt S232 die nächste nicht bewertete größte Bühne aus der Bühnenliste gewählt wird. Der Prozess der Bühnenplanung kann jedoch auch so gestaltet werden, dass er von einer „durchgefallenen“ größten Bühne direkt zu einer Bühne mit einer Länge übergeht, die annähernd gleich der Länge der Biegelinie der betreffenden Biegung ist, die gerade bewertet wird.

[0292] In Schritt S254 wird die bewertete Bühne zur Lösung der Bühnensuche erklärt. Danach werden in Schritt S256 die Bühnen entlang der Gesenkschiene angeordnet, und in Schritt S258 werden die notwendigen Abstände (links und rechts) für die Anordnung der Bühnen nebeneinander berechnet.

[0293] Der oben im Zusammenhang mit den Schritten S234, S238 und S246 erwähnte Prozess der Kollisionsprüfung durch den Werkzeugexperten (TE) kann wie folgt ablaufen:

Die Kollisionsprüfung durch den Werkzeugexperten besteht hauptsächlich aus einer Ermittlung einer Durchdringung. Das Zwischenprodukt, das der jeweiligen Biegung entspricht, die in der Suche bewertet wird, wird gebildet und weiter in eine B-rep (Randdarstellung) umgewandelt, die mit dem geometrischen Modellierer NOODLES kompatibel ist. Dann wird unter Verwendung der zutreffenden NOODLES-Funktion eine Durchdringung vorgenommen. Zuerst wird die Anzahl der Flächen des Teils kontrolliert, während es im gesamten Verlauf der Ausführung der Biegung seine Gestalt verändert. Für jede einzelne aus einer Vielzahl diskretisierter Formen des Teils während der gesamten Ausführung der Biegung wird jede dieser Formen mit den entsprechenden Werkzeugen der Bearbeitungsstation zum Biegen während der Ausführung der Biegung zur Durchdringung gebracht. Die sich ergebende Anzahl von Flächen des Teils für jede Form wird dann ermittelt. Falls die sich ergebende Anzahl von Flächen, durchdrungen von den Werkzeugen, größer als die erwartete Anzahl für diese Form ist, dann hat eine Kollision stattgefunden.

[0294] Die oben beschriebenen Schritte definieren einen vorzuziehenden Algorithmus für die Durchführung eines Verfahrens der Kollisionsprüfung durch den Werkzeugexperten. Als Alternative kann das Zwischenprodukt vor und nach der Biegung durch einen Begrenzungsquader modelliert werden, und die von NOODLES bereitgestellte grundlegende Funktion der Durchdringung von Körpern kann benutzt werden, um festzustellen, ob sich die Werkzeuge und die Darstellung des Werkstücks als Begrenzungsquader für die betreffende während der Suche gerade bewertete Biegung gegenseitig durchdringen.

[0295] Jetzt wird ein Prozess zur Ermittlung der notwendigen linken und rechten Abstände für die Anordnung der Bühnen nebeneinander an der Gesenkschiene beschrieben, wie sie in Schritt S256 des in den [Fig. 47A–Fig. 47B](#) dargestellten Prozesses berechnet werden. Die seitlichen Begrenzungen des Teils bei der betreffenden Biegung, die gerade bewertet wird, werden auf der Grundlage des Betrags berechnet, um den sich das Werkstück über eine Seitenkante der als Lösung gefundenen Werkzeugbühne hinaus erstreckt, und eine größte seitliche Begrenzung für jede Seite der Bühne wird ermittelt. Die neben der vorliegenden „Lösungsbühne“ angeordneten Bühnen werden dann in geeignetem Abstand angeordnet, so dass eine Lücke zwischen den benachbarten Seitenkanten vorhanden ist, die größer als die größere der ermittelten größten seitlichen Begrenzungen der benachbarten Seitenkanten oder ihr gleich ist.

[0296] Bei der Anordnung der Bühnen wird in Schritt S258 des in den [Fig. 47B–Fig. 47C](#) gezeigten Prozesses der Bühnenplanung die derzeitige Lösungsbühne (die zur derzeit bewerteten Biegung gehört) in die Mitte der Gesenkschiene gesetzt, wenn es die längste Lösungsbühne ist, die bisher in der Suche bewertet worden ist. Andererseits, wenn es die kürzeste Bühne ist, die zum gegenwärtigen Zeitpunkt in der Suche festgelegt worden ist, dann wird sie an der ersten oder linken Position an der Gesenkschiene untergebracht. Alle Abstufungen dazwischen, von der zweitgrößten abwärts, werden entsprechend von der dritten bis zur letzten Position an der Gesenkschiene positioniert, wobei die dritte Position direkt rechts von der mittleren Position liegt und die letzte Position die Position ist, die am weitesten rechts liegt.

[0297] Weitere Überlegungen müssen vom Planer für die Biegungsabfolge bei der Anordnung der Bühnen berücksichtigt werden, wenn kollineare Biegungen bei Ausführung der Abfolge von Arbeitsgängen gleichzeitig in auszuführen sind. Es gibt Punkte, die in Betracht gezogen werden müssen, wie z. B. der Abstand des Teils in bezug auf die Bühnen, wenn die kollineare Biegung ausgeführt wird, und die Abmessungen, Anordnung und Anzahl der Bühnen, die erforderlich sind, um die kollineare Biegung zu ermöglichen, während gleichzeitig die verfügbaren Ressourcen bestmöglich genutzt werden. Eine besonders wichtige Ressource, mit der sorgsam umgegangen werden muß, ist der Platz entlang der Gesenkschiene, der zur Verfügung steht, um die Bühnen zu installieren. Anzahl, Abmessungen und Abstände der Bühnen können wegen Beschränkungen des Platzes an den Gesenkschienen begrenzt sein.

[0298] Beim Planen der Bühnen für die Ausführung einer bestimmten kollinearen Biegung sollte eine Entscheidung getroffen werden, ob die kollinearen Biegungen mit nur einer einzigen Bühne ausgeführt werden können, oder ob zwei im Abstand voneinander angeordnete Bühnen erforderlich sind, um einen Zwischenraum zwischen ihnen zu gewährleisten. Demgemäß sollte der Werkzeugexperte erwägen, ob die kollinearen Biegungen unterbrochen (wie es in [Fig. 20E](#) der Fall ist) oder nicht unterbrochen sind (was bedeutet, dass eine einzige Bühne für beide Biegungen verwendet werden kann, wie es in [Fig. 20D](#) der Fall ist).

[0299] Ein Suchalgorithmus wie A* könnte benutzt werden, um eine geeignete Bühnenanordnung zu entwerfen, die kollineare Biegungen ermöglichen kann, während gleichzeitig die Anzahl der Bühnen und die Abstände zwischen den notwendigen Bühnen minimiert werden. Bedeutende Kostenfaktoren, die ein derartiger Suchal-

gorithmus berücksichtigen muß, sind die Gesamtlänge der Gesenkschiene, die Größe des Platzes an der Gesenkschiene, den eine bestimmte Bühnenlösung beanspruchen wird, und die Größe des Piatees an der Gesenkschiene, der an der derzeitigen Stelle der Abfolge von Biegungen (die vom Planer für die Biegungsabfolge generiert wird) noch verbleibt.

[0300] Die [Fig. 48A–Fig. 48C](#) zeigen verschiedene Darstellungen des Zwischenprodukts eines Werkstücks, das in seinem Verhältnis zur Werkzeugausrüstung während der Ausführung einer Biegung modelliert wurde. In [Fig. 48B](#) befindet sich das Werkstück in einer rechten Position an der Bühne. Sowohl in [Fig. 48A](#) als auch in [Fig. 48B](#) ist die Biegelinie kürzer als die Länge der Werkzeugbühne. In [Fig. 48C](#) ist das Werkstück auf der Werkzeugbühne zentriert, wobei die Biegelinie geringfügig länger ist als die Länge der Werkzeugbühne.

[0301] In jeder der in den [Fig. 48A–Fig. 48C](#) gezeigten graphischen Darstellungen werden die verschiedenen Komponenten der Biegepresse einschließlich des Stempelwerkzeugs und des Gesenks zusammen mit der Darstellung eines Zwischenprodukts des Werkstücks modelliert.

[0302] [Fig. 49](#) verdeutlicht einen Prozess der Feinbewegungsplanung, der in Planungsblock P14 der in [Fig. 30](#) gezeigten Dialogtafel ausgeführt werden kann. In einem ersten Schritt S260 des in [Fig. 49](#) dargestellten Prozesses werden Parameter festgesetzt und Initialisierungsschritte ausgeführt. In diesem Zusammenhang werden die dreidimensionalen Modelle der Werkzeugausrüstung und des Bauteils eingelesen und verschiedene Initialisierungsfunktionen ausgeführt. Die Zielparameter werden auf der Grundlage der Werkzeug- und Teilgeometrie sowie der erwünschten Zwischenräume aufgestellt. Außerdem wird der Abschnitt des Bauteils, der sich auf der Innenseite der Biegelinie befindet, schnell analysiert, und ein Begrenzungsquader, der das Teil umgibt, wird berechnet.

[0303] In Schritt S262 wird eine Entscheidung getroffen, ob ein einfacher Lösungsweg ohne weiteres verfügbar ist oder nicht, indem geprüft wird, ob der Oberteil des Bauteils an der Unterkante des Werkzeugstempels vorbeikommen kann und ob bestimmte Merkmale des Bauteils Nebenbedingungen genügen, die von der Werkzeuggeometrie und der Gesenköffnung auferlegt werden. Wenn ein derartiger einfacher Lösungsweg ohne weiteres gangbar ist, geht der Prozess zu Schritt S264 über, wo schnell ein Plan der Feinbewegungen entwickelt wird. Der Prozess wird dann weiter zu Schritt 270 geführt, wo er den Feinbewegungsplan und die Feinbewegungskosten, die gleich der Zeitdauer sind, die für die Entnahme des Bauteils aus der Biegepresse benötigt wird, an den Werkzeugexperten zurückschickt.

[0304] Wenn in Schritt S262 festgestellt wird, dass eine einfache Lösung nicht zur Verfügung steht, geht der Prozess zu Schritt S266 weiter, in welchem eine modifizierte A*-Suche durchgeführt wird. Bei der Durchführung der Suche wird eine Anzahl von praktikablen VC-Raumknoten (VC: virtuelle Konfiguration) generiert und mit ihren jeweiligen Kosten auf die Liste OPEN gesetzt. Die erste Ebene der Suche umfasst mehrere generierte praktikable intelligent gerichtete VC-Raumknoten, die zur Liste OPEN hinzugefügt wurden. Wenn ein Knoten von der Liste OPEN fortentwickelt wird, dann wird er so fort entwickelt, dass er mehrere Nachbarschaftsknoten enthält, die für Stellen in der allgemeinen Nachbarschaft des Ausgangsknotens charakteristisch sind. Jeder fortentwickelte Knoten wird mit Hilfe eines geometrischen Durchdringungstests auf Realisierbarkeit geprüft. Wenn der Test positiv ist (d. h., es gibt keine Kollision durch Anwendung einer negativen Durchdringungsfunktion), wird der fortentwickelte Knoten zusammen mit seinen Kosten zur Liste OPEN hinzugefügt. Bei den Kosten handelt es sich um einen Kostenanteil h , der der euklidischen Entfernung vom fortentwickelten Knoten zum Ziel gleichgesetzt wird. Die Knoten auf der Liste OPEN werden ständig zu niedrigeren Ebenen im Suchbaum fortentwickelt, bis das Ziel erreicht oder die Liste OPEN leer ist.

[0305] Bei Schritt S268 wird eine Entscheidung getroffen, ob das Ziel erreicht wurde oder nicht. Wenn das Ziel erreicht wurde, schickt der Prozess der Planung der Feinbewegung in Schritt S270 die Kosten der Feinbewegung und den Plan der Feinbewegung an den Werkzeugexperten zurück. Wenn das Ziel nicht erreicht wurde, geht der Prozess zu Schritt S272 über, wo die Kosten der Feinbewegung auf unendlich gesetzt und an den Werkzeugexperten geschickt werden.

[0306] [Fig. 50](#) zeigt das Beispiel eines Prozesses für die Ermittlung der Kostenanteile k und h des Bewegungsexperten, wie in Planungsblock P21 der in [Fig. 31](#) gezeigten Dialogtafel angegeben. In einem ersten Schritt S274 wird der Kostenanteil k berechnet, der gleich einer berechneten Fahrzeit des Roboters ist, die er braucht, um das Teil von einer Position auf einer Bühne einer unmittelbar vorangegangenen Biegung zu der Bühnenposition zu bringen, die der gegenwärtig bewerteten Biegung in der Suche entspricht, ohne dass Kollisionen berücksichtigt werden. Dann wird in Schritt S276 der Kostenanteil h berechnet, der gleich dem Produkt aus dem aktuellen Durchschnitt der Werte der Kostenanteile k für die vorhergehenden Biegungen sowie für die

derzeit bewertete Biegung und der Summe aus der Anzahl verbleibender Biegungen und zweimal der Anzahl verbleibender vorhergesagter Repos ist, die durchgeführt werden müssen, bevor alle Biegungen in der Abfolge von Biegungen vollständig ausgeführt worden sind.

[0307] Bei der Erarbeitung des Schemas der Grobbewegungen und der Grobbewegungswege nach Durchführung der Suche, wie in Planungsblock P22 der in [Fig. 31](#) gezeigten Dialogtafel angezeigt, kann ein Algorithmus für die Zustands-Raum-Suche, insbesondere ein A*-Algorithmus, abgearbeitet werden, um jeden der Schritte entlang des Weges von einem Punkt zu einem weiteren zu bilden, um das Werkstück über seine sämtlichen verschiedenen Bühnen in der Abfolge von Biegungen zu bringen. Wenn ein Weg von einer anfänglichen Startposition zu einer Zielposition generiert wird, kann für einen bestimmten Arbeitsgang der Abfolge von Biegungen vor der Entscheidung, dass der Weg der endgültige zu benutzende Weg sein wird, eine Kollisionsprüfung durchgeführt werden. Um diese Kollisionsprüfung durchzuführen, können sowohl das Werkstück als auch der Roboter und die Biegepresse modelliert werden, und mit Hilfe der geeigneten NOODLES-Funktionen können Durchdringungstests vorgenommen werden. [Fig. 51](#) zeigt ein geometrisches Modell einer Abkantpresse **304**, eines Werkstück-Begrenzungsquaders **300** und eines Roboters **302**. Bei der Durchführung der Kollisionsprüfung in Verbindung mit der Planung der Grobbewegung wird das Werkstück durch einen Begrenzungsquader **300** modelliert. In [Fig. 51](#) wird die Stellung des Roboters **302** und des modellierten Teils **300** in drei Positionen gezeigt, von einer Bühne, die für die letzte Biegung in der Abfolge von Biegungen verwendet wird, bis zu einer Position ganz rechts im Bild, die einer Position entspricht, in der das Werkstück bereit zur Entnahme durch die Zuführ- und Entnahmevorrichtung ist.

4. Geometrische Modellierung

[0308] Jedes Modul des Planungssystems **71** nutzt Funktionen der geometrischen Modellierung, um die physikalischen Beziehungen zwischen verschiedenen Komponenten der Bearbeitungsstation zum Biegen und dem Werkstück zu analysieren, während es bewegt und bearbeitet wird. Zu solchen Funktionen der geometrischen Modellierung können die Darstellung von Ausgangs-, Zwischenprodukt- und fertigen Teilen, die Prüfung auf Behinderungen während der Bewegungsplanung und die Unterstützung bei der Auswahl von Griffpositionen des Roboters gehören. Außerdem können benötigte geometrische Informationen bereitgestellt werden, um die Teilpläne bei der Auswahl der Stempelgeometrie, der Festlegung der Werkzeuganordnung und der Positionierung der Saugnäpfe **31** der Beschickungs- und Entnahmevorrichtung sowie bei der Interpretation von Sensorsignalen zu unterstützen. Vereinfachte geometrische Darstellungen können für schnelle Berechnungen zur Verfügung gestellt werden (z. B. Begrenzungsquader, konvexe Hüllen und zweidimensionale Querschnitte), die sich erforderlich machen können, um auf Geometrie beruhende Methoden der Beweisführung anzuwenden (z. B. Suchbaum-Darstellungen und Konfigurationsräume). Eine geometrische Datenbasis physikalischer Komponenten, die sowohl symbolische Beschreibungen (z. B. markierte Merkmale) als auch tatsächliche geometrische Daten physikalischer Komponenten enthält, kann bereitgestellt werden. Auch andere Funktionen der geometrischen Modellierung können bereitgestellt werden, werden aber hier nicht besonders aufgeführt.

[0309] In einem speziellen Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung wird NOODLES verwendet, um viele der erwähnten Modellierungsfunktionen zu verrichten. Es lassen sich mehrere Gründe für die Verwendung von NOODLES zur Implementierung der Funktionen der geometrischen Modellierung anführen. NOODLES enthält ein großes Paket geometrischer Routinen und ist dem Quellcode C/C+/C++ zugänglich. Außerdem kann NOODLES eine nicht durch Mannigfaltigkeit beschriebene Geometrie (z. B. 0D, 1D, 2D, 3D usw.) mit den gleichen Routinen behandeln und hat eine hierarchische Struktur, die genutzt werden kann, um Geometriebibliotheken aufzubauen und verschiedene Arten von Informationen zu Merkmalen von Bauteilen zu speichern.

[0310] Ein Modellierungsmechanismus (nicht gezeigt) kann zur Modellierung sowohl der oberen als auch der unteren Oberfläche (d. h. der Dicke) jedes einzelnen Werkstücks aus Metallblech im Gesamtverlauf einer oder mehrerer der Konstruktions-, Planungs- und Ausführungsphase des Biegeprozesses bereitgestellt werden. Es kann sich für bestimmte Aspekte im System als nützlich erweisen, eine derartige vollständige Dickendarstellung des Werkstücks zu haben. Zum Beispiel kann Halteexperte **82** von dem zusätzlichen Wissen profitieren, sowohl die obere als auch die untere Oberfläche des Werkstücks zu kennen, und Bewegungsexperte **84** kann evtl. die Feinbewegung des Werkstücks besser planen und steuern, wenn es sich vor und nach einem Biegevorgang dicht am Gesenk und am Stempelwerkzeug befindet.

[0311] In [Fig. 10](#) wird veranschaulicht, wie ein Mechanismus (nicht gezeigt) zur Modellierung der oberen/unteren Oberfläche eine Dickentransformation zwischen einer ebenen Darstellung **114** und einer Darstellung mit

Dicke **116**, in der [Fig. 10](#) rechts zu sehen, durchführt. Die Darstellung mit Dicke **116** besteht im Wesentlichen aus zwei ebenen Darstellungen, von denen eine über der anderen angeordnet ist.

[0312] [Fig. 11](#) zeigt einen überlappten Flansch **118**, modelliert als ebene Darstellung **114**, in [Fig. 11](#) links, und transformiert zu einer Darstellung mit Dicke (d. h. zu einem Körpermodell). Es wird gezeigt, dass Körpermodell **116** gleich einer Darstellung der oberen Oberfläche **120** zusammen mit einer Darstellung der unteren Oberfläche **122** ist. Die Darstellung der oberen Oberfläche **120** wird in voll ausgezogenen Linien, die Darstellung der unteren Oberfläche **122** wird in gestrichelten Linien gezeigt.

[0313] [Fig. 12](#) zeigt eine beispielhafte Baumstruktur, die verwendet werden kann, um die Entwurfsdarstellung eines Werkstücks **16** aus Blech zu modellieren. Auf einer ersten Ebene wird eine Anzahl von Formen **126** angegeben, die dem Werkstück **16** entsprechen. Für jede Form **126** werden mehrere Flächen **128** definiert, und für jede Fläche werden mehrere Kanten **130** definiert. Für jede Kante wird eine Anzahl von Ecken **132** angegeben. Für jede Ecke kann eine zweidimensionale (d. h. Ausgangsteil) Darstellung **134** beibehalten werden, zusammen mit einer dreidimensionalen (d. h. fertiges Teil) Darstellung **136** und der Darstellung eines Zwischenprodukts **138**.

[0314] Wie durch Pfeil **140** angedeutet, kann eine Dickentransformation vorgenommen werden, die zu Darstellungen der oberen und unteren Oberfläche **142** und **144** führt, die jeweils eine ähnliche Baumstruktur aufweisen, wie sie in [Fig. 12](#) oberhalb der Linie dargestellt ist.

[0315] Die [Fig. 17A–Fig. 17B](#) und [Fig. 18A–Fig. 18B](#) zeigen mehrere unterschiedliche Arten von Geometriebibliotheken, die zur Unterstützung bei der geometrischen Modellierung des Systems bereitgestellt werden können.

[0316] Hinsichtlich weiterer Informationen zum Modellierungssystem NOODLES und zur geometrischen Modellierung im allgemeinen wird auf das Reference Manual für die Noodles-Bibliothek von E. Levant Gursoz, EDRC, Camegie Mellon University, Pittsburgh, Pennsylvania und auf ein Buch von Michael E. Mortenson mit dem Titel „Geometric Modeling“ hingewiesen.

5. Die Abfragesprache zur Kommunikation zwischen Moduln (FEL)

[0317] Um die Schnittstellen zwischen allen einzelnen Moduln des Planungssystems zu formalisieren, kann eine auf Abfrage basierende Sprache namens FEL verwendet werden. FEL wurde ursprünglich 1988 von David Bourne entwickelt und ist seitdem weiter verbessert worden. Zu näheren Informationen in bezug auf FEL im allgemeinen soll auf mehrere Nutzerhandbücher verwiesen werden, die vom Robotics Institute der Camegie Mellon University zu beziehen sind, und zwar: „Feature Exchange Language Programmer's Guide“, David Alan Bourne, Duane T. Williams (14. Januar 1994); „Using the Feature Exchange Language in the next Generation Controller“, David Alan Bourne, Duane T. Williams, CMU-RI-TR-90-19 und „The Operational Feature Exchange Language“, David Alan Bourne, Jeff Baird, Paul Erion und Duane T. Williams, CMU-RI-TR-90-06.

[0318] [Fig. 19](#) zeigt das Beispiel einer Planungsmeldung **145** in FEL, die vom Planer für die Biegungsabfolge **72** (wie in Ausdruck **146** angegeben) an den Bewegungsexperten **84** geschickt wird (wie in Ausdruck **148** angegeben). Die Planungsmeldung in FEL **145** umfasst einen Abfragebefehl, der vom Planer für die Biegungsabfolge **72** an den Bewegungsexperten **84** geschickt wird und dem Bewegungsexperten **84** einleitende Informationen liefert, damit er die Abfrage beantworten kann. Ein Abschnitt Einstellung Anfangsparameter **150** von Meldung **145** steht unmittelbar nach einem Hauptverb/befehl „get“ **152** (beschaffen und enthält die Ausdrücke „type message“ **147** (Typ Mitteilung), „from planning“ **146** (von Planung), „to moving“ **148** (an Bewegung) und „State request“ **149** (Zustandsanforderung). Der Ausdruck „type cost“ steht unmittelbar nach Abschnitt Einstellung **150** und besagt, dass eine Anforderung an den Bewegungsexperten gestellt wird, dem Planer mitzuteilen, wie viel ein bestimmter Arbeitsgang kosten wird. Der nächste Ausdruck „bends...“ **156** fragt an, wie teuer es sein wird, Biegung Nummer 3 auszuführen, nachdem Biegung Nummer 6 erledigt worden ist. Die Zahlen 7 bzw. 1 stellen jeweils eine Fläche des Werkstücks dar, die für die Biegungen 6 bzw. 3 in den Gesenkraum der Bearbeitungsstation zum Biegen eingelegt wird.

[0319] Ein nächster Ausdruck „average_cost 2.321“ **158** informiert den Bewegungsexperten, dass dies die durchschnittlichen Kosten (Kostenanteil k) für die Bewegung pro Biegung für diejenigen Biegungen sind, die vorher ausgeführt worden sind, berechnet auf der Basis von Kostenwerten, die vorher vom Bewegungsexperten zugewiesen wurden. Im vorliegenden Fall betragen die durchschnittlichen Kosten 2,321 Sekunden pro vorher ausgeführte Biegung. Ein nächster Ausdruck „flange_before_bend“ **160** (Flansch vor Biegung) gibt die

Höhe (in Millimetern) des höchsten interessierenden Flanschs an (in [Fig. 19](#) mit 11 mm angegeben), die vom Bewegungsexperten benutzt werden kann, um Zwischenräume zu bestimmen. Analog dazu gibt Ausdruck „flange_after_bend“ **162** (Flansch nach Biegung) die Höhe (in Millimeter) des höchsten interessierenden Flanschs an, der nach der Ausführung der Biegung vorhanden sein wird (in [Fig. 19](#) mit 17,5 mm angegeben). Der nächste Ausdruck „robot_loc“ **164** informiert den Bewegungsexperten, wo sich das Teil befindet, indem er den Standort des Roboters (an dem er nach Fertigstellung der vorhergehenden Biegung zurückgelassen wurde) angibt. Ein letzter Ausdruck in der Planungsmeldung **145**, „bendmap“ **166**, gibt die jeweiligen Werkzeugbühnen für die vorhergehende Biegung und die gerade vorgeschlagene Biegung an und informiert, wo in bezug auf die Bühne sich das Werkstück für jede Biegung befinden soll. Der erste Wert **168** besagt, dass die Standortinformation für Biegung Nummer 6 gegeben wird, und ein zweiter Wert **170** gibt die Bühne an, auf der Biegung Nummer 6 ausgeführt wurde, was in diesem Fall Bühne Nummer 1 ist. Rechts von dem ersten und dem zweiten Wert, **168** und **170**, sind mehrere Koordinaten aufgeführt. Der erste Koordinatenwert „257.“ stellt die Position der linken Kante des Teils in bezug auf die linke Kante der Bühne dar, und der zweite Koordinatenwert „-257“ stellt die Position der rechten Kante des Teils in bezug auf die Bühne dar. Der Wert „350.7“ stellt die Position der rechten Kante des Teils in bezug auf die Bühne dar. Der letzte Wert „320“ gibt die Position der Bühne an der Gesenkschiene in bezug auf die linke Kante der Gesenkschiene an.

[0320] Allgemein gesagt, gibt die Planungsmeldung **145** alle die Informationen weiter, die der Bewegungsexperte benötigen wird, um einen Teilplan für die Bewegung des Werkstücks von einer Ausgangsposition (an der es nach Ausführung einer vorhergehenden Biegung zurückgelassen wurde) zu einer Position zu erstellen, an der es für eine vorgeschlagene nächste Biegung bereitsteht.

[0321] Ein wichtiges Merkmal der Struktur der auf Abfrage basierenden Schnittstelle zwischen dem Planer und seinen verschiedenen Teilplanern (Experten) ist die Eigenheit, dass der Planer, wenn er eine Abfrage an einen Experten schickt, den Experten mit allen Hintergrundinformationen versorgt, die der Experte benötigen wird, um die Abfrage zu beantworten. Daher braucht der Experte keine Informationen zu speichern, sondern kann dem Planer für die Biegungsabfolge einfach antworten und alle einschlägigen Informationen an den Planer für die Biegungsabfolge zurücksenden, damit dieser sie speichert.

(a) Konfiguration des auf FEL basierenden Prozessplaners

[0322] Beim Konfigurieren des in [Fig. 5A](#) gezeigten Prozessplaners **71** wird jedem Modul einschließlich des Planers für die Biegungsabfolge **72** und der Experten **80**, **82** und **84** ein Befehl geschickt, seine Startkonfigurationsdatei einzulesen. Ein Beispiel eines solchen Befehls könnte folgendermaßen aussehen:

```
(read((type file(name „config.s 2.fel"))))
((type message)(from planning) (to tooling)(name „config"))
```

[0323] Nachdem jeder Modul seine Startkonfigurationsdatei eingelesen hat, wird das System so eingestellt, dass der Planer für die Biegungsabfolge **72** eine beliebige benannte Anzahl von Experten nutzen kann, z. B. mit Hilfe eines Befehls wie folgt:

```
(set((type experts)(experts(tooling grasping moving))))
```

[0324] Nachdem die vom Planer für die Biegungsabfolge **72** zu nutzenden Experten benannt worden sind, kann dann die Konstruktion des Bauteils aus dem CAD-System **74** je nach Erfordernis in jeden Modul eingelesen werden, und der Planer für die Biegungsabfolge **72** kann mit dem Planungsprozess beginnen.

(b) Befehle in FEL

[0325] In der folgenden Tabelle sind mehrere Befehle aufgelistet, die vom Planer für die Biegungsabfolge **72** bei Teilnahme an einem Dialog mit den anderen Modulen des Systems, einschließlich der Experten, angegeben werden können.

| BEFEHLE IN FEL FÜR MODUL-DIALOG | |
|---------------------------------|---|
| | SUCHBEFEHLE |
| Finalize | – hole von jedem Modul Endplaninformationen ein |
| Get | – beschaffe Kosteninformationen (und andere Daten) für eine Biegung |
| Plan | – initialisiere einen Modul für die Planung eines Bauteils |
| | NUTZERBEFEHLE |
| Quit | – Abschlußbehandlung und einen Modul beenden |
| Read | – lies Dateien für die Planung ein |
| Set | – stelle verschiedene Modulooptionen ein |
| Show | – zeige dem Nutzer verschiedene Moduldaten |

[0326] In der folgenden Tabelle sind mehrere Befehle aufgelistet, die vom Planer für die Biegungsabfolge **72** zur Ausführung durch den Zuordner **77** angeführt werden können.

| ZUORDNERBEFEHLE IN FEL | |
|------------------------|---|
| Print Messages | – drucke Mitteilungen für den Bediener der BM 100 zum Einrichten |
| Progams | – lade Programme herunter und übertrage sie zur Pressensteuereinrichtung NC9R und Rückanschlagsteuereinrichtung |
| Startup | – initialisiere Zustand von Presse und Roboter |
| Get | – lade Teil aus verschiedenen Schritten des Prozesses |
| Put | – lade Teil in verschiedene Schritte des Prozesses ein |
| Move | – bewege den Roboter durch eine Reihe von Punkten |
| Bend | – leite Abfolge von Biegungen ein (Rückanschlag und Biegen) |

[0327] Der Befehl „read“ kann benutzt werden, um einen Modul anzuweisen, bestimmte Dateien zu lesen, die zur Planung benötigt werden, da sie für die zu entwickelnde Konstruktion aussagekräftig sind, und sich selbst in Übereinstimmung mit der Konstruktion zu konfigurieren. Mit Hilfe des Befehls „set“ lassen sich verschiedene Modulfunktionen einstellen, z. B., wie Informationen darzustellen sind, wie an andere Moduln anzukoppeln ist usw. Der Nutzerbefehl „show“ kann verwendet werden, um dem Nutzer verschiedene Moduldaten zu zeigen, z. B. die verschiedenen Knoten des A*-Algorithmus, der die verschiedenen Kosten oder unterschiedlichen Biegungen innerhalb der vorgeschlagenen Abfolge von Biegungen darstellt.

6. Konstruktion und Modellierung von Bauteilen

[0328] In dem in [Fig. 5A](#) dargestellten Ausführungsbeispiel erledigt ein CAD-System **74** mehrere Aufgaben in Verbindung mit der Konstruktion und Modellierung von Bauteilen für Planungssystem **71**. CAD-System **74** ermöglicht es einem Nutzer, eine Konstruktion eines gegebenen Werkstücks zu entwickeln, indem er mit vereinfachten, primitiven Komponenten (entweder in zweidimensionaler oder in dreidimensionaler Form) an einer graphischen Schnittstelle arbeitet, wobei jede primitive Komponente bestimmte erwünschte Abmessungen aufweist, die vom Nutzer eingegeben werden können, um das Werkstück zu konstruieren. Der Nutzer kann dann eine Nutzerschnittstelle mit dem CAD-System **74** nutzen, um die primitiven Komponenten zu verbinden und außerdem einzelne Elemente, wie Löcher, Spalte und dergleichen, aus den verbundenen primitiven Komponenten zu entfernen. CAD-System **74** kann dann Funktionen der Markierung von Merkmalen erfüllen, dazu gehört die Markierung mehrerer geometrischer Merkmale des Werkstücks, da derartige Merkmale in Verbindung mit dem Biegen von Metallblech besondere Bedeutung haben. Das CAD-System **74** kann auch einen Biegungsgraphen erzeugen, der verschiedene Informationen im Zusammenhang mit Biegungen mit dem geometrischen Entwurf des Werkstücks verbindet. Auf diese Weise erzeugt das CAD-System **74** eine Ausgabedatei, die Informationen zu geometrischen, topologischen und biegungsbezogenen Merkmalen (einschließlich einer Liste markierter Merkmale und eines Biegungsgraphen) enthält. All diese Informationen werden dann in eine Datei der Ergebnisformen gebracht, die die Grundlage der Kommunikation mit anderen Moduln des Planungssystems **71** bilden wird. In diesem Zusammenhang kann ein Bauteilmodellierer bereitgestellt werden, um eine Schnittstelle zwischen der Datei der Ergebnisformen des Konstruktionssystems und den verschiedenen

Expertenmoduln **80**, **82** und **84** (und **85**) zusammen mit dem Planer für die Biegungsabfolge **72** zu bilden.

[0329] Es kann ein Bauteilmodellierer bereitgestellt werden, der verschiedene Umwandlungen mit den Daten vornimmt, die in der Datei der Ergebnisformen vorliegen, um entwickelte Strukturen von Bauteildaten zu erzeugen, die von jedem der Moduln des Planungssystems **71** zu Zwecken der geometrischen Modellierung verwendet werden können. Der Bauteilmodellierer kann in Form einer Bibliothek implementiert werden, die jedem der Moduln des Planungssystems **71** zugänglich ist und die genutzt werden kann, um die Informationen in den entwickelten Strukturen von Bauteildaten und/oder unentwickelten Datenstrukturen, die in der Datei der Ergebnisformen bereitgestellt werden, so zu handhaben, dass die verschiedenen Moduln die in diesen Strukturen enthaltenen Informationen nutzen können, um irgendeine zu einem bestimmten Zeitpunkt evtl. gestellte spezielle Aufgabe zu erfüllen.

[0330] [Fig. 13A](#) zeigt ein funktionelles Blockdiagramm eines Konstruktionssystems **311**, das bereitgestellt werden kann, um die Funktionen von CAD-System **74** des dargestellten Ausführungsbeispiels zu erfüllen. Konstruktionssystem **311** verrichtet mehrere mit der Konstruktion zusammenhängende Funktionen, die in Form von Funktionsmoduln implementiert werden können, wie in [Fig. 13A](#) gezeigt. Jeder Funktionsmodul kann durch eine besondere Funktion implementiert werden, die in einer vom Konstruktionssystem zusammengestellten Funktionsbibliothek bereitgestellt wird. Zu den in [Fig. 13A](#) gezeigten Funktionen gehören eine Nutzerschnittstelle **312**, Datei-Eingabe/Ausgabe **314**, Ansicht **316**, Simulation **318**, Formdefinition **320**, Lochdefinition **322**, Aufbereitung **324** und Merkmalsmarkierung **328**. Jede dieser Funktionen kann von einem Modul Steuerung des Konstruktionssystems **326** gesteuert werden. Um mehrere Funktionen der Merkmalsmarkierung ausführen zu können, sind sowohl der Modul Biegungsgraph **330** als auch der Modul Biegungsdeduktion **332** mit dem Modul Merkmalsmarkierung **328** verbunden.

[0331] Jede der Funktionen ist in [Fig. 13A](#) in Form eines Funktionsmoduls dargestellt. Es ist jedoch nicht notwendig, dass alle diese Funktionen auf diese besondere Weise, wie dargestellt, in getrennte Moduln aufgeteilt werden. Als Alternative kann ein Gesamtprogramm oder Hardwaresystem bereitgestellt werden, das es ermöglicht, jede dieser Funktionen auszuüben, ohne eine spezifische Schnittstelle mit anderen Funktionen des Konstruktionssystems zu haben. Zum Beispiel kann eine vollständige Routine innerhalb eines Prozessors eines Rechners bereitgestellt werden, die jede einzelne der Funktionen des Gesamtkonstruktionssystems implementiert, ohne dass mehrere der allgemeinen Vorteile beseitigt werden, die das hier beschriebene Konstruktionssystem bietet.

[0332] Der Modul Datei-Eingabe/Ausgabe **314** erledigt Funktionen wie Lesen, Schreiben, Drucken und die Durchführung des Datenaustauschs zwischen Moduln. Der Modul Ansichtsfunktion **316** erledigt Funktionen wie Vergrößern und Verkleinern (Zoom) und Schwenken während der optischen Darstellung des Teils an einer graphischen Schnittstelle. Der Formmodul **320** wird bereitgestellt, um einem Nutzer zu ermöglichen, besondere Formen vorzugeben, darunter rechtwinklige Formen, Winkel, ein Zet, einen Kasten, einen Hut und dergleichen, die zusammengesetzt werden können, um eine bestimmte Konstruktion eines Werkstücks zu bilden. Lochmodul **322** wird bereitgestellt, damit der Nutzer verschiedene Arten von Hohlräumen festlegen kann, die das Werkstück aufweisen soll, wie zum Beispiel Aussparungen, Löcher, Schlitze, Kerben usw., und um dem Nutzer weiterhin zu ermöglichen, das Werkstück in einer ähnlichen Art wie mit Hilfe von Formmodul **320** zu konstruieren. Modul Aufbereitung **324** soll den Nutzer in die Lage versetzen, verschiedene Funktionen der Aufbereitung wahrzunehmen, z. B. eine Funktion Auskehlen, eine Funktion Abfassung und die Veränderung der Werkstoffart und/oder -dicke des Werkstücks. Modul Simulation **318** wird bereitgestellt, damit der Nutzer an verschiedenen Biegungen am Werkstück das Biegen und Wiederaufbiegen simulieren kann, um so eine optische Darstellung solcher Biegungen an der graphischen Schnittstelle zu erhalten, die vom Konstruktionssystem genutzt werden kann.

[0333] Modul Merkmalsmarkierung **328** wird bereitgestellt, um automatisch Merkmalsmarkierungen zuzuordnen, die das Biegen von Metallblech betreffen und die daher für das hier dargestellte Planungssystem **71** beim Aufstellen oder Generieren eines Plans der Abfolge von Biegungen mit Hilfe solcher Merkmalsmarkierungen von Nutzen sind.

[0334] Modul Merkmalsmarkierung **328** kann merkmalsbezogene Informationen wie zum Beispiel Ecken, Rücksprünge, Formmerkmale (z. B. Einsenkungen, Schlitze), Löcher, Krümmungen mit großem Radius usw. generieren. Außerdem kann Modul Merkmalsmarkierung **328** so gestaltet werden, dass er einen Modul Biegungsgraph **330** anweist, einen Biegungsgraphen zu erzeugen, der Informationen enthält, die auf eine bestimmte Weise organisiert sind, so dass sie die geometrischen und topologischen Informationen mit den verschiedenen Biegungen in Verbindung bringen, die am zweidimensionalen Werkstück auszuführen sind, damit

das gewünschte dreidimensionale fertige Werkstück entsteht. Weiterhin kann Modul Merkmalsmarkierung **328** so gestaltet werden, dass er die Durchführung von Berechnungen zur Biegungsdeduktion durch einen Modul Biegungsdeduktion **332** anordnet. Die resultierenden Informationen zur Biegungsdeduktion können dann in eine Auflistung von Biegungsgraphen aufgenommen werden, die der Modul Biegungsgraph **330** bereitstellt.

[0335] Verschiedene Moduln, die im hier erläuterten Planungssystem **71** bereitgestellt werden, üben verschiedene Funktionen der geometrischen Modellierung aus, die die Modellierung eines Bauteils (d. h. eines Werkstücks) erforderlich machen. Dementsprechend sollte ein Bauteilmodellierer bereitgestellt werden, und dies kann in Form einer Bibliothek von Funktionen erfolgen, die den verschiedenen Moduln zugänglich ist, um eine Schnittstelle zwischen den Dateien der Ergebnisformen des Konstruktionssystems und den verschiedenen Moduln im Planungssystem **71** herzustellen. [Fig. 13B](#) zeigt ein System der Bauteilmodellierung **333** zur Ausübung dieser Funktion. Bauteilmodellierer **333** enthält zwei Hauptfunktionsmoduln: einen B-REP-Modul Neuordnung **336** und einen Modul Umwandlung von Zwischenformen **342**. Der B-REP-Modul Neuordnung **336** wandelt eine unentwickelte Struktur von Bauteildaten **334** in entweder eine der beiden folgenden Strukturen oder in beide um: entwickelte dreidimensionale Struktur von Bauteildaten (in B-REP) **338** und entwickelte zweidimensionale Struktur von Bauteildaten (in B-REP) **340**. Der Modul Umwandlung von Zwischenformen **342** wandelt die entwickelte zweidimensionale Struktur von Bauteildaten (in B-REP) **340** in eine entwickelte Struktur von Zwischenproduktdateien (in B-REP) **344** um.

[0336] Die unentwickelte Struktur von Bauteildaten **334** (die von dem in [Fig. 13A](#) gezeigten Konstruktionssystem **311** geliefert wird) definiert eine geometrische/topologische Datenstruktur, die keine Biegungsdeduktion berücksichtigt und die einen Teil der Datei der Ergebnisformen bildet, die vom CAD-System **74** erzeugt wird. Eine entwickelte Struktur von Bauteildaten, wie z. B. die entwickelte dreidimensionale Struktur von Bauteildaten **338** und die entwickelte zweidimensionale Struktur von Bauteildaten **340**, weist eine modifizierte Darstellung des Bauteils auf, bei der die Biegungsdeduktion berücksichtigt wird. Die erwähnten entwickelten Strukturen von Bauteildaten werden weiter umgewandelt, so dass sie die Form eines Modells der Randdarstellung (B-rep-Modells) annehmen.

[0337] Die in der vom CAD-System erzeugten Datei der Ergebnisformen vorliegende Datenstruktur kann so gestaltet werden, dass sie einen Kopfteil Formen besitzt, der Bauteilinformationen enthält und dem sich eine Vielzahl von Formen in einer verketteten Liste anschließt, wobei die verkettete Liste mit einer Null endet. Bei Jeder Form können topologische und geometrische Informationen sowohl für eine dreidimensionale als auch für eine zweidimensionale Darstellung des Bauteils bereitgestellt werden. Die Struktur der Form kann eine Liste von Informationen aufweisen, die die Art der Form, die Formenkennung, eine Flächenliste, eine Kantenliste, eine Liste dreidimensionaler Ecken und eine Liste zweidimensionaler Ecken enthält. Jede Fläche kann ihre eigene Struktur besitzen, zu der eine Liste von Informationen gehören kann, die eine Flächenkennung, die Anzahl der Ecken der Fläche, eine Eckenliste für die Ecken der Fläche und einen normalen Vektor zu der Fläche enthält. Für jede Kante kann eine Struktur bereitgestellt werden, die Informationen enthält wie z. B. die Kantenkennung, die Art der Kante, die Art der Biegelinie und die Eckindexzahl für diese bestimmte Kante. Für jede Ecke können Informationen geliefert werden, zu denen die Eckenkennung, Eckenkoordinaten, zweidimensionale Koordinaten, dreidimensionale Koordinaten und Zwischenproduktkoordinaten gehören. Weitere Informationen zu Details von Datenstrukturen und des erläuterten CAD-Systems im allgemeinen liefert Cheng-Hua Wang in einem ME-Report vom Mai 1992 mit dem Titel „A Parallel Design System for Sheet Metal Parts“, Mechanical Engineering Department, Camegie Mellon University, Pittsburgh, Pennsylvania.

[0338] Wie oben erwähnt, verwendet das CAD-System vorzugsweise eine gleichzeitige "parallele" Darstellung sowohl der dreidimensionalen als auch der zweidimensionalen Versionen des Bauteils, während es konstruiert wird, und diese Darstellungen werden zur Nutzung durch das Planungssystem **71** beibehalten, wenn das Teil endgültig konstruiert ist. Um einen der Vorteile anschaulich zu machen, der damit verbunden ist, dass Darstellungen dreidimensionaler und zweidimensionaler Daten gleichzeitig und parallel beibehalten werden, werden die [Fig. 13C](#) und [Fig. 13D](#) vorgelegt. Einer der Vorteile, ein gleichzeitiges und paralleles Konstruktionssystem zu besitzen, besteht darin, dass ein solches System Mehrdeutigkeiten beseitigt, die ansonsten im Konstruktionsprozess auftreten können. Zum Beispiel wird in [Fig. 13C](#) ein zweidimensionales Teil **346a** gezeigt, und in [Fig. 13D](#) ist ein dreidimensionales Teil **346b** zu sehen. Betrachtet man nur die dreidimensionale Darstellung von Teil **346b**, so bemerkt man vielleicht nicht, dass die innere Fahne **347** zu lang ist und keinesfalls aus einem einzigen verformbaren Stück Metallblech gebildet werden kann. Das wird nur eindeutig klar, wenn man die zweidimensionale Darstellung **346a** des Teils ansieht, die das Überlappen der inneren Fahne **347** verdeutlicht, indem sie zeigt, wie diese über einen inneren Kantenabschnitt **348** des Teils hinausragt. Auf diese Weise kann der Konstrukteur, wie den [Fig. 13C](#) und [Fig. 13D](#) zu entnehmen ist, indem ihm sowohl die zweidimensionale als auch gleichzeitig die dreidimensionale Darstellung in einer graphischen Form zur Verfü-

gung stehen, ohne weiteres Mehrdeutigkeiten beseitigen und Fehler in der Konstruktion erkennen, die ansonsten infolge von Mehrdeutigkeiten aufgrund des Betrachtens nur der zweidimensionalen oder nur der dreidimensionalen Darstellung während der Konstruktion nicht entdeckt würden. Ein weiterer Vorteil eines derartigen parallelen Vorgehens bei der Konstruktion, wie es oben beschrieben wird, besteht darin, dass es für eine spezielle Art von Veränderung, z. B. das Hinzufügen einer inneren Fahne zum Bauteil, leichter sein kann, die Veränderung an der einen Darstellung (z. B. der zweidimensionalen Darstellung) anstelle der anderen vorzunehmen.

[0339] Die [Fig. 14A–Fig. 14E](#) zeigen eine graphische Nutzerschnittstelle des Konstruktionssystems **348**, deren optische Darstellung sich im Verlaufe des Prozesses der Konstruktion eines bestimmten gewünschten Teils verändert. Zum Beispiel weist in [Fig. 14A](#) die graphische Nutzerschnittstelle **348** ein Tastenfeld **350**, ein Parameterfenster **352**, ein Fenster für eine dreidimensionale primitive Form **354**, ein Fenster für eine zweidimensionale primitive Form **356**, ein Fenster für eine dreidimensionale Modell **358** und ein Fenster für eine zweidimensionale Modell **360** auf. [Fig. 14A](#) zeigt die erste eingeführte primitive Form, die auf einer graphischen Schnittstelle **348** bereitgestellt wird, um das gewünschte, in [Fig. 14E](#) gezeigte Werkstück zu erzeugen. Die erste primitive Form ist ein Kasten. Die Parameter des Kastens können mit Hilfe des Tastenfelds **350** angegeben werden, und in Parameterfenster **352** wird gezeigt, dass die Grundfläche 100×100 beträgt (angezeigt von den Parameter P[1] und P[2]) und die Höhe gleich 20 ist (angezeigt von Parameter [3]). Die dreidimensionale Version der primitiven Form wird im Fenster für eine dreidimensionale primitive Form **354** gezeigt, und die zweidimensionale Darstellung der primitiven Form wird in Fenster für eine zweidimensionale primitive Form **356** gezeigt. Da dies die erste primitive Form ist, die für die Konstruktion des Bauteils bereitgestellt wird, ist das Fenster für ein dreidimensionales Modell **358** mit dem Fenster für eine dreidimensionale primitive Form **354** identisch, und das Fenster für ein zweidimensionales Modell **360** ist mit dem Fenster für eine zweidimensionale primitive Form **356** identisch.

[0340] [Fig. 14B](#) stellt die nächste hinzuzufügende Form dar, bei der es sich um ein Rechteck mit einer Länge von 100 (angezeigt von Parameter [1]) und einer Breite von 15 (angezeigt von Parameter [2]) handelt. Die nächste primitive Form, die hinzugefügt wird, um das Teil zu konstruieren, ist ein weiteres Rechteck mit den gleichen Parametern wie bei dem Rechteck in [Fig. 14B](#). Die nächsten primitiven Formen werden dem Werkstück hinzugefügt, wie in den [Fig. 14C](#), [Fig. 14D](#) und [Fig. 14E](#) gezeigt wird.

[0341] Es ist zu bemerken, dass bei jeder primitiven Form, die dem Werkstück hinzugefügt wird, eine gestrichelte Linie verwendet wird, um eine Biegelinie anzuzeigen. Parameter P[1] entspricht der X-Abmessung, Parameter P[2] entspricht der Y-Abmessung, und Parameter P[3] entspricht der Z-Abmessung der primitiven Form, die hinzugefügt wird.

[0342] Die [Fig. 15A–Fig. 15C](#) werden gezeigt, um die Biegungsdeduktion und die Art zu verdeutlichen, in der sie sich auf die dreidimensionalen und zweidimensionalen Dimensionen von Flanschen eines Werkstücks bezieht. Wenn ein Werkstück **362** eine Dicke t hat und gewünscht wird, dass die Flanschen des Werkstücks **362** die Längen a und b haben, dann ist eine Berechnung so durchzuführen, dass die ebene zweidimensionale Darstellung des Teils, wenn es an der entsprechenden Biegelinie entlang gebogen wird, tatsächlich die Flanschen mit den richtigen Abmessungen a und b bildet, wobei die Dicke t des Werkstoffs, die Werkstoffart und der innere Radius der Biegelinie (zur inneren Oberfläche des Metallblechs) berücksichtigt werden. Geht man von einer unentwickelten Darstellung **363** von Werkstück **362** aus, so kann die entwickelte zweidimensionale Darstellung **364** von Werkstück **362** berechnet werden, indem man den angemessenen Wert für die Biegungsdeduktion (BD) von der Gesamtabmessung $a + b$ subtrahiert. Verfahren zur Durchführung einer derartigen Berechnung sind bekannt. Daher werden hier keine spezifischen Einzelheiten in bezug auf die Gleichung mitgeteilt, die zur Bestimmung des Werts für die Biegungsdeduktion (BD) verwendet wird.

[0343] [Fig. 16](#) zeigt die graphische Darstellung eines Biegungsgraphen, wobei es sich um eine zweidimensionale Darstellung des Werkstücks handelt, das im Verlauf der in den [Fig. 14A–Fig. 14E](#) gezeigten Schritte konstruiert wurde. Die Biegelinien des konstruierten Werkstücks werden als Biegelinien B1, B2, ...B8 markiert, und jede Markierung weist einen Biegelinienindex auf. Jedem Biegelinienindex wird dann eine Nummer in der Abfolge von Biegungen zugeordnet, die einen Initialisierungswert enthält. Die Nummer in der Abfolge von Biegungen gibt die Stelle (Reihenfolge) in der Abfolge von Biegungen an, an der die Biegelinie gebogen werden soll, und wird jeder Biegelinie in Übereinstimmung mit dem Plan (d. h. der Abfolge von Biegungen) zugeordnet, der vom Planer für die Biegungsabfolge des dargestellten Planungssystems **71** aufgestellt wurde. Außer dem Biegelinienindex wird jeder Biegelinie ein Biegewinkel zugeordnet. Beispielsweise ist in dem Biegungsgraphen in [Fig. 16](#) ein Winkel von -90.0° für Biegung B2 angegeben, und für B1 ist ein Biegewinkel von 90.0° angegeben. Der Biegungsgraph enthält weiterhin eine Angabe der verschiedenen Flächen F1–F9, die an dem Werkstück entstehen, sobald die Biegungen ausgeführt werden.

[0344] Die Anhänge A bzw. B enthalten Auflistungen, die eine geometrisch/topologische Datenstruktur bzw. eine Auflistung von Biegungsgraphen für das in den [Fig. 13A](#)–13E konstruierte Bauteil enthalten. Zusätzlich zu dem oben angeführten Report für das Mechanical Engineering Department der Carnegie Mellon University kann noch auf einen Artikel von Cheng-Hua Wang und Robert H. Sturges mit dem Titel „Concurrent Product/Process Design with Multiple Representations of Parts“, IEEE (1993) 1050–4729/93 hingewiesen werden.

7. Zuordnung und Steuerung

[0345] [Fig. 52](#) enthält ein Blockdiagramm der verschiedenen Softwaremoduln und ihrer wichtigsten Schnittstellenkomponenten; zu diesen Moduln gehören Planer **72**, Aufgabe Zuordner **76**, Aufgabe Roboter **92**, Aufgabe Presse und Beschickung/Entnahme **94** und Aufgabe Rückanschlag **96**, Aufgabe Geschwindigkeitsregelung **102** und Aufgabe Kollisionserkennung **100**. Planer **72** enthält Schnittstellenkomponenten wie eine Ausgabewarteschlange **72a** und eine Eingabewarteschlange **72b**. Die Aufgabe Zuordner **76** enthält eine Eingabewarteschlange **76a**, eine Ausgabewarteschlange **76b**, eine Reaktionswarteschlange der Aufgaben **76c** und einen Abschnitt, der mehreren Methoden der Klasse Aufgabe entspricht, **76d**. Ausgabewarteschlange **72a** von Planer **72** ist mit Eingabewarteschlange **76a** von Aufgabe Zuordner **76** verbunden. Ausgabewarteschlange **76b** von Zuordner **76** ist mit Eingabewarteschlange **72b** von Planer **72** verbunden.

[0346] Der Aufgabe Roboter **92** enthält eine Eingabewarteschlange **92a**, eine Ausgabewarteschlange **92b** und einen Bereich, der Methoden der Aufgabe Roboter entspricht, **92c**. Aufgabe Presse und Beschickung/Entnahme **94** umfasst eine Eingabewarteschlange **94a**, eine Ausgabewarteschlange **94b** und einen Bereich, der Methoden der Aufgabe Presse und Methoden der Aufgabe Beschickung/Entnahme entspricht, **94c**. Aufgabe Rückanschlag **96** umfasst eine Eingabewarteschlange **96a**, eine Ausgabewarteschlange **96b** und einen Bereich, der Methoden der Aufgabe Rückanschlag entspricht, **96c**. Jede der Eingabewarteschlangen **92a**, **94a** und **96a** ist mit der Eingabewarteschlange **76a** von Aufgabe Zuordner **76** verbunden. Jede der Ausgabewarteschlangen **92b**, **94b** und **96b** ist mit Reaktionswarteschlange der Aufgaben **76c** von Aufgabe Zuordner **76** verbunden. Die in [Fig. 52](#) gezeigte Struktur der Steuerungssoftware stellt nur ein Beispiel der inneren Verbindungen zwischen Planer **72**, Aufgabe Zuordner **76** und Steuersystem **75**, der Struktur jeder dieser Aufgaben und der Art dar, wie sie miteinander verbunden sind. Variationen eines Steuersystems, die die gleichen wesentlichen Steuerfunktionen ausüben, ohne in der in [Fig. 52](#) dargestellten Art implementiert zu werden, gehören zum Umfang der hier beschriebenen Erfindung.

[0347] [Fig. 53](#) zeigt ein Beispiel des Ablaufs eines Prozesses, der von der Aufgabe Zuordner **76** ausgeführt wird, die in [Fig. 52](#) dargestellt ist. Nach dem Start des Zuordners erhält er in einem ersten Schritt S280 eine neue Mitteilung von der FEL-Auflistung in Eingabewarteschlange **76a**. In Schritt S282 parst der Zuordner den Satz in FEL, und in Schritt S284 erzeugt der Zuordner für jede einbezogene Aufgabe ein Datenobjekt. In Schritt S286 werden die entsprechenden Datenobjekte in ihre entsprechenden Warteschlangen der Aufgaben gestellt (z. B. in eine oder mehrere der Eingabewarteschlangen von Aufgabe Roboter **92**, Aufgabe Presse und Beschickung/Entnahme **94** und Aufgabe Rückanschlag **96**). In Schritt S288 prüft der Zuordner den Zustand aller einbezogenen Aufgaben. Danach wird in Schritt S290 eine Entscheidung getroffen, ob alle Aufgaben beendet sind. Falls nicht, geht der Zuordner zu Schritt S292 über. Wenn alle Aufgaben beendet sind, geht der Zuordner von Schritt S290 zu Schritt S294 über, wo die geeigneten Arbeiten der Abschlußbehandlung durchgeführt werden (z. B. Löschen von Datenobjekten und Setzen von Flags auf Anfangszustand).

[0348] Wenn in Schritt S290 festgestellt wurde, dass nicht alle Aufgaben beendet sind, wird im nächsten Schritt S292 entschieden, ob eine Pause überschritten worden ist oder nicht. Wenn nicht, kehrt der Prozess zu Schritt S288 zurück. Wenn die Pause überschritten worden ist, geht der Zuordner zu Schritt S293 weiter, wo die geeignete Bearbeitung zur Fehlerrückgewinnung durchgeführt wird. Nachdem in Schritt S294 die Arbeiten der Abschlußbehandlung durchgeführt wurden, wird in Schritt S296 eine Entscheidung getroffen, ob das Signal zur Beendigung der Aufgabe gesetzt worden ist. Wenn das Signal zur Beendigung der Aufgabe gesetzt worden ist, wird der Prozess beendet. Andernfalls kehrt der Prozess zu Schritt S280 zurück, wo eine neue Mitteilung von der FEL-Eingabewarteschlange erhalten wird.

[0349] [Fig. 54](#) ist ein Flussdiagramm des gesamten Biegeprozesses während der Ausführung einer einzelnen Biegung. Bei der Ausführung des Biegeprozesses legt in einem ersten Schritt S298 der Roboter das Teil in den Gesenkraum ein. Danach wird das Teil in X-, Y- und Drehrichtung ausgerichtet. Diese Ausrichtung ist Teil des Arbeitsgangs Rückanschlag. In Schritt S300 wird der Pressentisch bis zum Klemmpunkt angehoben, d. h., bis zu dem Punkt, an dem das Gesenk mit dem Werkstück in Kontakt kommt, das seinerseits wieder gegen das Stempelwerkzeug drückt, so dass das Werkstück sich in einem halb stabilen Zustand befindet, einge-

klemmt zwischen dem Gesenk und dem Stempelwerkzeug. In Schritt S302 wird die Biegung mit Biegungsbegleitung ausgeführt (d. h., indem der Robotergreifer das Werkstück während der Ausführung der Biegung ständig festhält). Danach wird in Schritt S304 die Abkantpresse geöffnet. Das Teil wird dann in Schritt S306 aus dem Gesenkraum entnommen. Sobald das Teil entnommen ist, ist der Biegungsvorgang abgeschlossen.

[0350] [Fig. 55](#) verdeutlicht die Aufgabe Roboter **92** und die verschiedenen Funktionen, die darin vorgesehen sein können, einschließlich allgemeiner Bewegungsfunktionen und von Bewegungsfunktionen auf Sensorbasis. Zu den allgemeinen Bewegungsfunktionen können eine Verbundraumbewegung, eine kartesische Bewegung und Drehung um einen Punkt gehören. Die Bewegungsfunktionen auf Sensorbasis können eine gesicherte Bewegung, Biegungsbegleitung, Biegung mit offener Wirkungskette, aktive Dämpfung, Kontaktsteuerung und Zuführung eines nachgiebigen Teils umfassen. Zuführung eines nachgiebigen Teils besteht darin, ein vibrierendes nachgebendes Teil zeitlich gesteuert so in den Gesenkraum einzubringen, dass das Teil in den Gesenkraum paßt und nicht mit der Bearbeitungsstation kollidiert.

[0351] [Fig. 56](#) zeigt die Aufgabe Presse und Beschickung/Entnahme **94** und die verschiedenen Funktionen, die in der Aufgabe vorgesehen sein können. Die Funktionen, die zur Steuerung der Presse vorgesehen sein können, können das Hochfahren der Presse, das Herunterfahren der Presse und das Biegen umfassen. Zu den Beschickungs- und Entnahmefunktionen können das Zuführen des Werkstücks, Loslassen des Werkstücks, Ergreifen des Erzeugnisses und Entnahme des Erzeugnisses gehören.

[0352] [Fig. 57](#) zeigt die Aufgabe Rückanschlag **96** und die verschiedenen Funktionen, die darin vorgesehen sein können. Die Aufgabe Rückanschlag **96** kann allgemeine Bewegungsfunktionen und Bewegungsfunktionen auf Sensorbasis umfassen. Eine allgemeine Bewegungsfunktion kann eine Funktion Bewegung min. Zu den Bewegungsfunktionen auf Sensorbasis können eine Funktion Auffinden der Teilkante und eine Funktion Gesicherte Bewegung gehören.

8. Lernen im Interesse von Geschwindigkeit und Qualität

[0353] Das hier beschriebene Biegunssystem kann mit einem oder mehreren Mechanismen ausgestattet werden, die es ermöglichen, aus den Ergebnisse von einem oder mehreren anfänglichen Durchläufen eines Plans zu lernen und den Plan entsprechend zu modifizieren, um die Geschwindigkeit der Arbeitsabläufe zu erhöhen und auch die Qualität des entstandenen Werkstücks zu verbessern. In diesem Zusammenhang kann ein Steuermechanismus auf Sensorbasis zur Durchführung eines Arbeitsgangs, wozu die Bewegung eines Werkstücks von einer Position zu einer anderen gehört, bereitgestellt werden. Die Biegevorrichtung kann ein Ausgangssignal eines Sensors verwenden, um die Bewegung des Werkstücks zu modifizieren, aber den Betrag messen, um den die Bewegung des Werkstücks aufgrund des Ausgangssignals des Sensors modifiziert wird. Dann kann durch „Erlernen“ des Betrags, um den die Bewegung des Werkstücks modifiziert wurde, der Arbeitsgang auf der Basis des Erlernenen so gesteuert werden, dass das Werkstück von einer Position zur anderen bewegt wird, ohne dass die Bewegung des Werkstücks mit Hilfe des Ausgangssignals eines Sensors modifiziert wird.

[0354] [Fig. 58](#) zeigt einen Beispielprozess zur Durchführung von Lernmessungen und zur Modifizierung der Bewegungssteuerung während mehrfacher Ausführung eines generierten Plans der Abfolge von Biegungen in einem Fall, bei dem die Bewegung des Werkstücks von einer Position zu einer anderen die Kompensation des Durchhängens und das Rückanschlagen in der X-Richtung umfasst. Das Ausgangssignal des Sensors liefert einen gemessenen Betrag der X-Versetzung und einen gemessenen Betrag der Durchhang-Versetzung des Werkstücks.

[0355] In einem ersten Schritt des dargestellten Prozesses, S308, wird das Teil zum Biegen mit Durchhangmessung eingelegt. Der Versetzungsbetrag des Teils, d. h. der Betrag, um den das Teil durchhängt, wird gemessen und an den Planer (z. B. den in den [Fig. 5A](#) und [Fig. 6](#) gezeigten Planer **72**) zurückgegeben. Dann wird das Teil in Schritt S312 seitenkalibriert (in der X-Richtung gemessen), um einen Wert für die X-Versetzung zu erhalten. Der für diese Biegung festgestellte Wert der X-Versetzung wird an den Planer (oder den Prozessmanager) zurückgegeben. Dann wird Rückanschlagen durchgeführt, um das Teil in der Y-Richtung auszurichten und es auch in geeigneter Weise zu drehen, so dass es sich in der richtigen Drehposition (um die Z-Achse) befindet. In Schritt S318 wird dann die Biegung ausgeführt.

[0356] In dem Schritt S320 wird eine Entscheidung dahingehend getroffen, ob in der gegenwärtigen Abfolge von Biegungen, die gerade ausgeführt wird, noch mehr Biegungen durchzuführen sind oder nicht. Wenn Ja, kehrt der Prozess zu Schritt S308 zurück, worauf die Schritte S308–S318 erneut durchlaufen werden, um Wer-

te zu erhalten, die dieser nächsten Biegung entsprechen. Wenn alle Biegungen beendet worden sind, geht der Prozess von Schritt S320 zu Schritt S322 über, bei dem das fertige Teil abgeführt und ein neues Werkstück mit der Beschickungs- und Entnahmeeinrichtung zugeführt wird. Dann wird das Teil in Schritt S324 zum Biegen anhand der gemessenen Werte für Durchhangversetzung und X-Versetzung zugeführt, die vorher ermittelt und an den Planer gesandt wurden. Mit Hilfe derartiger Werte kann die Biegevorrichtung das Werkstück positionieren, ohne Steuerung auf Sensorbasis durchzuführen (oder wenigstens nur mit einem vereinfachten Steuerverfahren auf Sensorbasis), während das Werkstück positioniert wird. Dies dürfte erheblich die Geschwindigkeit erhöhen, mit der das Werkstück in den Gesenkraum eingelegt wird, und verringern. Dann wird in Schritt S326 Rückanschlagen ausgeführt, um das Teil in der Y- und der Drehrichtung (Z-Achse) auszurichten. Die Biegung wird dann in Schritt S328 ausgeführt, und in Schritt S330 wird dann festgestellt, ob in der Abfolge von Biegungen noch weitere Biegungen ausgeführt werden müssen. Wenn alle Biegungen ausgeführt worden sind, geht der Prozess zu Schritt S332 weiter, bei dem festgestellt wird, ob noch mehr Teile herzustellen sind. Wenn weitere Teile hergestellt werden sollen, kehrt der Prozess zu Schritt S322 zurück.

[0357] Wegen der Wiederholgenauigkeit einer typischen Bearbeitungsstation zum Biegen, wie z. B. der Biegestation Amada BM100, brauchen die Versetzungswerte nur durch Ausführung eines oder einiger weniger Durchläufe des Systems bestimmt zu werden. Sobald die Versetzungswerte einmal ermittelt worden sind, können sie für zukünftige serienweise Durchläufe des Systems verwendet werden und dürften als zuverlässig für viele Durchläufe anzusehen sein. Dementsprechend wird in der Darstellung in [Fig. 58](#) gezeigt, dass der Prozess für jedes neue zu fertigende Werkstück von Schritt S332 zu Schritt S322 zurückkehrt, anstatt den ganzen Weg zurück zu Schritt S308 gehen, um neue Versetzungswerte zu erhalten.

9. Kostenermittlung, Zeitplanung, Teilkonstruktion und Zusammenbau

[0358] Die vorliegende Erfindung wird als eine Erfindung beschrieben, die Methoden und Untersysteme betrifft, die in einem intelligenten System für die Konstruktion, Planung und Fertigung zwecks Herstellung von Gütern, wie z. B. gebogenen Metallblechteilen, bereitgestellt werden. Die vorliegende Erfindung kann weiterhin zur Verrichtung solcher Funktionen wie Kostenermittlung (d. h. Feststellung, wie viel es kosten wird, bestimmte Arten von Teilen mit einer gegebenen Bearbeitungsstation zum Biegen für Metallblech zu erzeugen), Zeitplanung (d. h. Ermittlung, wie viel Zeit es kosten wird, verschiedene Teile mit einer gegebenen Bearbeitungsstation zum Biegen für Metallblech zu erzeugen) und Teilkonstruktion und Zusammenbau genutzt werden. Das Planungssystem **71** der vorliegenden Erfindung (wie es z. B. in [Fig. 5A](#) gezeigt wird) kann eine vollständige Abfolge von Biegungen und biegungsbezogenen Arbeitsgängen generieren, die notwendig sein werden, um ein bestimmtes Teil zu fertigen. Zu der generierten Abfolge von Arbeitsgängen kann ein vollständiger Plan bereitgestellt werden, der alle Schritte aufführt, die erforderlich sind, um die Abfolge von Biegungen mit Hilfe der Bearbeitungsstation zum Biegen für Metallblech in einer geeigneten Reihenfolge auszuführen. Bei der Entwicklung der Abfolge von Biegungen wird das Planungssystem **71** mit Hilfe von Experten/Teilplanern die Konsequenzen der Ausführung einer jeden Biegung und anderer zugehöriger Arbeitsgänge innerhalb der Abfolge von Biegungen ermitteln. Demzufolge wird Planungssystem **71**, ohne den resultierenden Plan, der von Planungssystem **71** entwickelt wurde, wirklich auszuführen, Informationen darüber zur Verfügung haben, wie viel Zeit wahrscheinlich benötigt wird, um alle erforderlichen Arbeitsgänge zur Herstellung des Teils mit der Bearbeitungsstation zum Biegen für Metallblech auszuführen. Außerdem wird das Planungssystem **71** noch bestätigen können, ob die Bearbeitungsstationen zum Biegen für Metallblech und die verfügbare Werkzeugausrüstung in der Lage sein werden, ein bestimmtes konstruiertes Teil zu fertigen oder nicht. Da Planungssystem **71** die Konsequenzen der Ausführung der verschiedenen Arbeitsgänge in einem bestimmten Plan kennt, kann es die resultierenden Kosten ermitteln, und diese Informationen lassen sich nutzen, um die Kosten der Herstellung eines bestimmten Satzes von Teilen zu bewerten, die zu einer gewünschten Baugruppe gehören.

[0359] Des weiteren wird das Planungssystem **71** in der Lage sein, mit seinen Informationen über die Zeit, die zur Ausführung verschiedener Arbeitsgänge des Plans benötigt wird, die Zeitplanung für den Fertigungsbetrieb vorzunehmen. Wenn die Beschränkungen bei der Herstellung eines bestimmten Teils, der Zeitbedarf für die Herstellung des Teils und die Kosten bekannt sind, wird es außerdem möglich sein, diese Informationen zur Erarbeitung alternativer Bauteilkonstruktionen zu nutzen, die zu geringeren Kosten und einem geringeren Zeitbedarf für die Herstellung des Teils führen können.

[0360] Wenn auch Planungssystem **71** ausdrücklich als ein System beschrieben worden ist, das eine Anzahl von Experten aufweist, wobei jeder Experte in Form eines Moduls implementiert ist, der vom Modul Planer für die Biegungsabfolge **72** getrennt vorliegt, kann Planungssystem **71** auch implementiert werden, ohne in Modulen aufgeteilt zu sein. Zum Beispiel kann Planungssystem **71** als ein einziger Modul zur Planung des gesamten Arbeitsablaufs implementiert werden. Außerdem kann bei der in [Fig. 5A](#) gezeigten Implementierung die

Sprache, die zur Kommunikation zwischen den jeweiligen Modulen verwendet wird, eine andere Sprache als FEL sein.

[0361] Die in [Fig. 5A](#) dargestellt modulare Struktur, bei der eine auf Abfrage beruhende Sprache verwendet wird, formalisiert die Schnittstelle zwischen den Modulen, was zu einer offenen Architektur führt, die ohne weiteres durch Hinzufügen weiterer Module und/oder durch Modifizierung der Module des Planungssystems erweitert werden kann. Andere Modifikationen im Rahmen des allgemeinen Charakters von Planungssystem **71** der Erfindung können vorgenommen werden. Um die Geschwindigkeit der Operationen zu erhöhen, die von Planungssystem **71** durchgeführt werden, wie es bei dem Ausführungsbeispiel in [Fig. 5A](#) dargestellt wird, kann jeder Modul (d. h. der Planer für die Biegungsabfolge **72** und die Teilplaner **80, 82, 84** und **85**) auf einem anderen Rechner/Prozessor implementiert werden.

[0362] Während die Erfindung in Bezug auf mehrere erläuternde Ausführungsbeispiele beschrieben worden ist, wird es verstanden, dass die Worte, die hierin verwendet worden sind, eher Worte der Beschreibung als Worte der Begrenzung sind. Obwohl die die Erfindung hierin in Bezug auf besondere Mittel, Materialien und Ausführungsbeispiele beschrieben worden ist, wird es verstanden, dass die Erfindung sich auf alle äquivalenten Strukturen, Verfahren und Verwendungen erstreckt, welche alle innerhalb des Umfangs der beigefügten Ansprüche sind.

Patentansprüche

1. Biegevorrichtung, aufweisend eine Einrichtung zum Ausführen von Auslegungsvorgängen in der Biegevorrichtung (**10**), so dass die Biegevorrichtung (**10**) verwendet werden kann, Biegevorgänge an Werkstücken (**16**) auszuführen, die Bleche aus verformbarem Material aufweisen, wobei die Biegevorrichtung (**10**) aufweist eine Werkzeugschiene (**22**), eine Werkzeugstempel-Haltevorrichtung (**20**) und einen Werkzeugstempel (**18**), gehalten durch die Stempel-Haltevorrichtung (**20**), gekennzeichnet durch eine oder mehrere Bearbeitungsstufen (**1, 2, 3**), jede aufweisend ein Werkzeug (**19**), montiert auf der Werkzeugschiene (**22**), wobei die Einrichtung aufweist:

eine Einrichtung zum Empfangen einer Information in Bezug auf den Ort jeder der einen oder mehreren Bearbeitungsstufen (**1, 2, 3**) entlang der Schiene (**22**); und eine Steuerungseinrichtung (**75**) zum Steuern einer Position eines bewegbaren Führungsteils entlang zumindest einer von Werkzeugschiene (**22**) und der Werkzeugstempel-Haltevorrichtung (**20**) auf der Grundlage der empfangenen Information, so dass zumindest eines von Werkzeug (**19**) und Werkzeugstempel (**18**) in Bezug auf das Führungsteil ausgerichtet werden kann, so dass die resultierende Bearbeitungsstufe (**1, 2, 3**) an einem gewünschten Ort entlang der Werkzeugschiene (**22**) sein wird.

2. Biegevorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Steuerungseinrichtung (**75**) eine Einrichtung zum Positionieren des Führungsteils aufweist, um an einer besonderen Position entlang der Werkzeugschiene (**22**) zu sein und innerhalb eines bestimmten Abstandes von der Werkzeugschiene (**22**) zu sein, wodurch ein Werkzeug (**19**) einer Bearbeitungsstufe (**1, 2, 3**), das ausgerichtet werden soll, gegen das Führungsteil anliegen kann, um die Bearbeitungsstufen (**1, 2, 3**) entlang der Werkzeugschiene (**22**) richtig zu positionieren.

3. Biegevorrichtung nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass das Führungsteil einen Rückseitenmessfinger (**88**) einer Vorrichtung zum Ausführen des Rückseitenmessens (**24**) aufweist, wenn ein Werkstück (**16**) in die Biegevorrichtung (**10**) beschickt wird.

4. Biegevorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, dass jede Bearbeitungsstufe (**1, 2**) eine Mehrzahl von Segmenten (**810a, 810b, 810c, 811a, 811b, 811c**) entlang der Werkzeugschiene (**22**) aufweist.

5. Biegevorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, dass die Vorrichtung vorgesehen ist, während des Anordnungsvorgangs einen Schritt des automatischen Positionierens der Rückseitenmessfinger (**88**) an einer besonderen Kante jeder Stufe (**1, 2**) entlang der Werkzeugschiene (**22**) auszuführen.

6. Biegevorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, dass die Vorrichtung vorgesehen ist, während des Anordnungsvorgangs einen Schritt des Positionierens des Rückseitenmessfingers (**88**) an der linken Kante eines Werkzeuges (**811**) auszuführen, worauf ein erstes Werkzeugsegment (**811a**) entlang der Werkzeugschiene (**22**) platziert wird und gegen den Rückseitenmessfinger (**88**) zum Ausrichten

anliegt, bevor die weiteren Segmente (**811b**, **811c**) auf der Werkzeugschiene (**22**) platziert und befestigt werden.

7. Biegevorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 6, dadurch gekennzeichnet, dass die Steuerungseinrichtung (**75**) mit einem Ausrichtungs-Steuerungsmodul (**87a**) versehen ist, das eine Vorrichtung enthält zum Anweisen einer Rückseitenmess-Servo-Steuerungseinrichtung (**87b**) zum Bewegen des Rückseitenmessfingers (**88**) zu einem oder mehreren besonderer Stufenpositionen.

8. Biegevorrichtung nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, dass die Steuerungseinrichtung (**75**) mit einer Schnittstelle (**77**) versehen ist, die die Rückseitenmess-Servo-Steuerungseinrichtung (**87b**) aufweist.

9. Biegevorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 8, dadurch gekennzeichnet, dass die Steuerungseinrichtung (**75**) mit einem Rückseitenmess-Aufgabenmodul versehen ist, das eine Werkzeugausrichtfunktion für den Rückseitenmessfinger aufweist, die in der Lage ist, eine Rückseitenmess-Servo-Steuerungseinrichtung durch den Gebrauch einer Rückseitenmessvorrichtung-Antriebseinrichtung (**206**) vom zweiten Niveau zu aktivieren und zu steuern, die ihrerseits in Wechselwirkung ist mit einer richtigen Niveau-Antriebsvorrichtung 1, wie z. B. einer I/O-Vorrichtung-Antriebseinrichtung (**220**) ist, die mit einer parallelen I/P-Karte, verbunden mit der Rückseitenmessvorrichtung (**24**) der Biegevorrichtung (**10**), in Wechselwirkung ist.

10. Biegevorrichtung nach einem der Ansprüche 4 und 5 bis 9, wenn abhängig zu Anspruch 4, gekennzeichnet durch Vorgesehen sein, um einen Schritt des Ausrichtens der Segmente des Werkzeugstempel (**18**) auszuführen, so dass sie richtig innerhalb jedes Stempel-Halters (**20**) und entsprechend zu den zugehörigen Werkzeugsegmenten platziert werden.

11. Biegevorrichtung nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, dass die Vorrichtung vorgesehen ist, während des Ausrichtschrittes der Werkzeugstempelsegmente der Biegevorrichtung (**10**) zu arbeiten, derart, dass die Werkzeugsegmente und die entsprechenden Werkzeugstempelsegmente mit einer vorbestimmten Kraft gegeneinander zusammengepresst werden.

12. Biegevorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 11, gekennzeichnet durch Vorgesehen sein, um einen Schritt des Einstellens der Beschickungseinrichtung/Entladungseinrichtung (**30**) auszuführen, so dass Saugköpfe (**31**) derselben in Bezug auf ein Werkstück (**16**) richtig positioniert werden.

13. Biegevorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 12, gekennzeichnet durch Schaffen einer Rückseitenmess-Anweisungseinrichtung (**96**), die allgemeine Bewegungsfunktionen und/der Sensor-basierte Bewegungsfunktionen, insbesondere einen Teilekantenfinder und eine geführte Bewegungsfunktion, aufweist.

14. Biegevorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 13, gekennzeichnet durch außerdem aufweisend ein CAD-System (**74**), eine Biegefolgeplanungseinrichtung (**72**), eine Mehrzahl von Experten und einem Schrittfolge-Zuordner (**76**), und durch Verbundensein mit Hardware und Sensoren (**76**) über eine Schnittstelle (**77**).

Es folgen 79 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

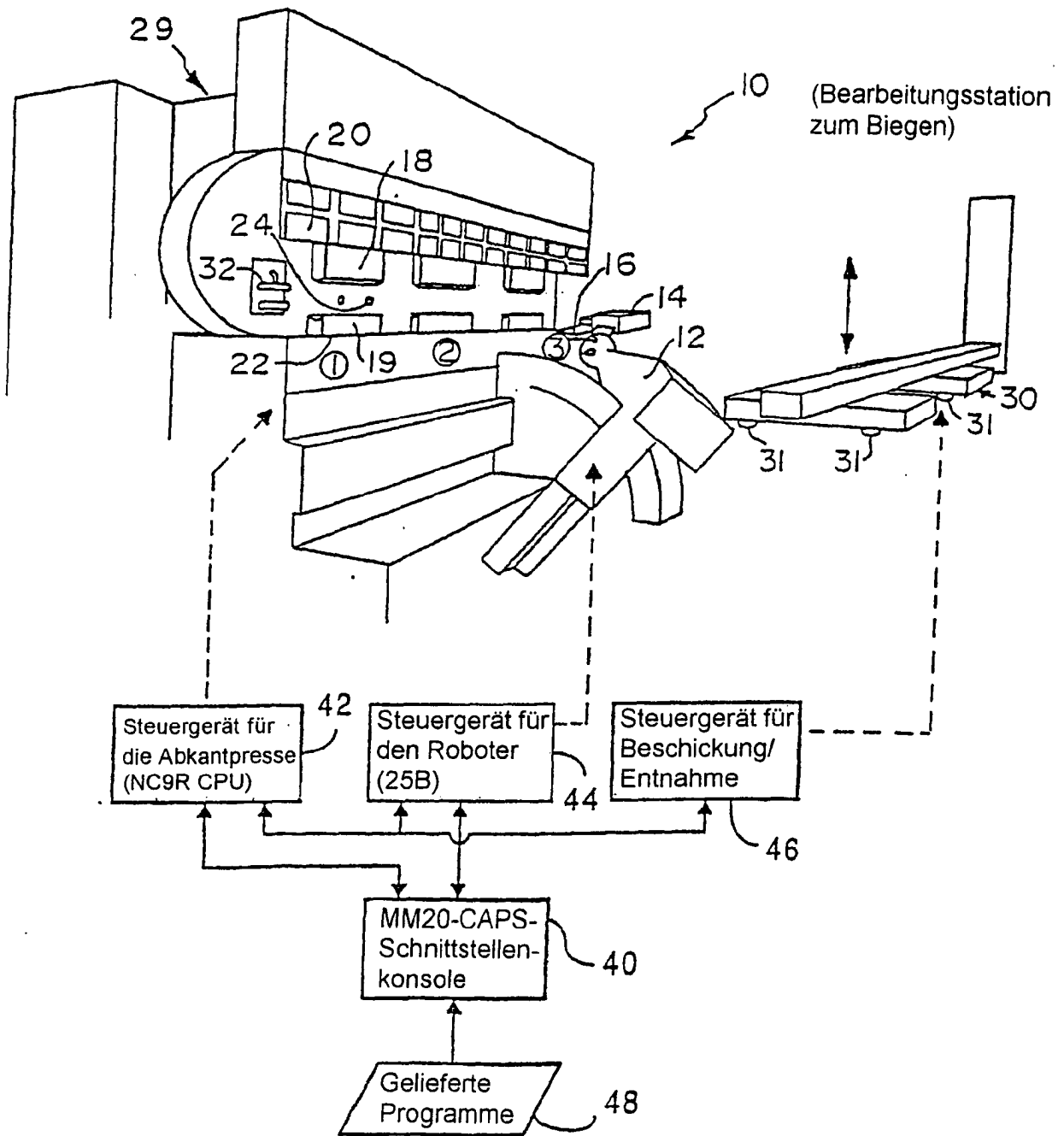


FIG. 1

Stand der Technik

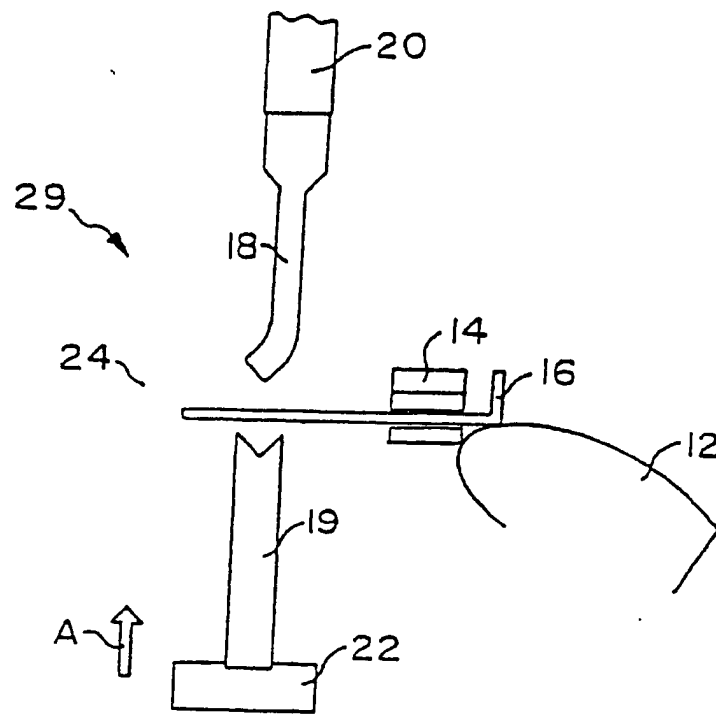


FIG. 2

Stand der Technik

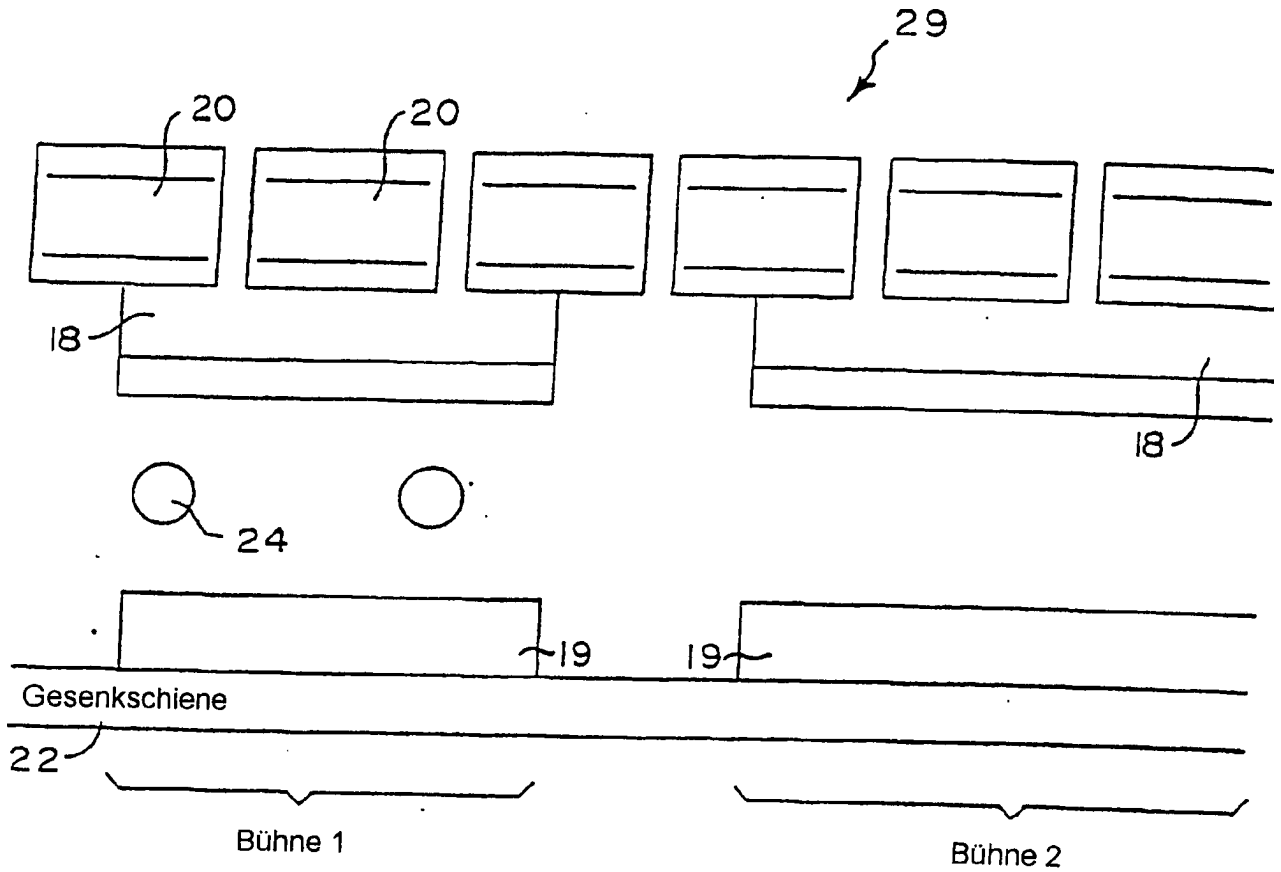


FIG. 3

Stand der Technik

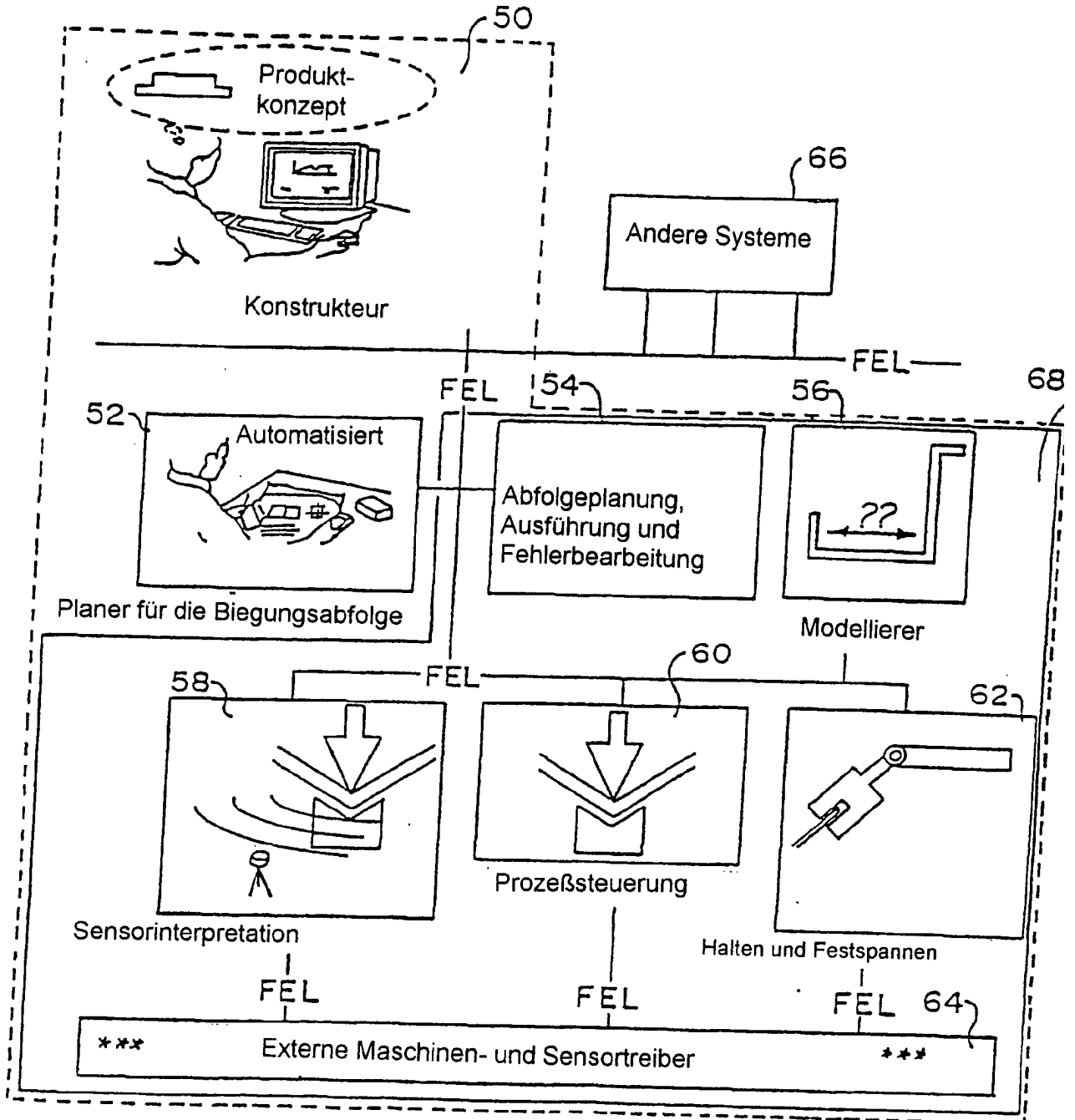
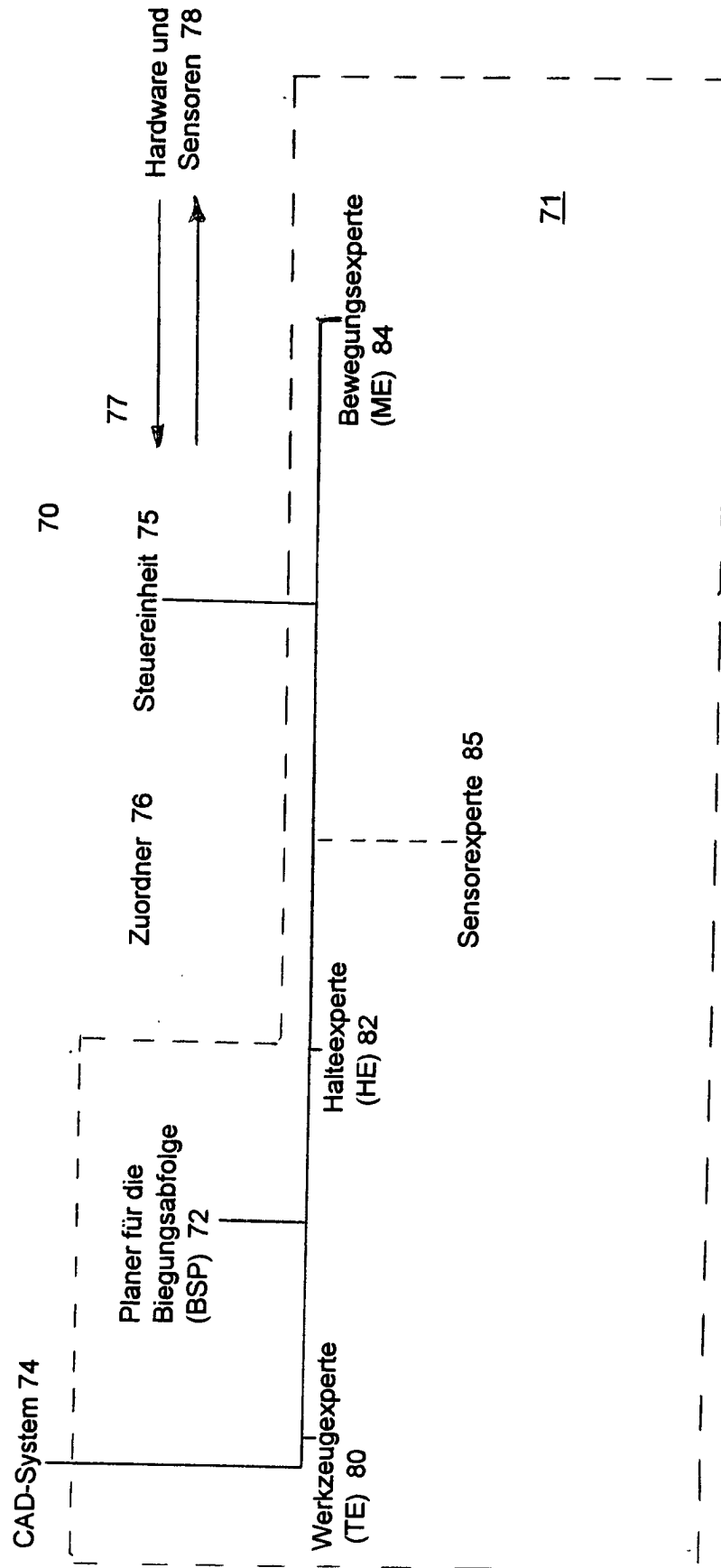


FIG. 4

Stand der Technik



FIGUR 5 A

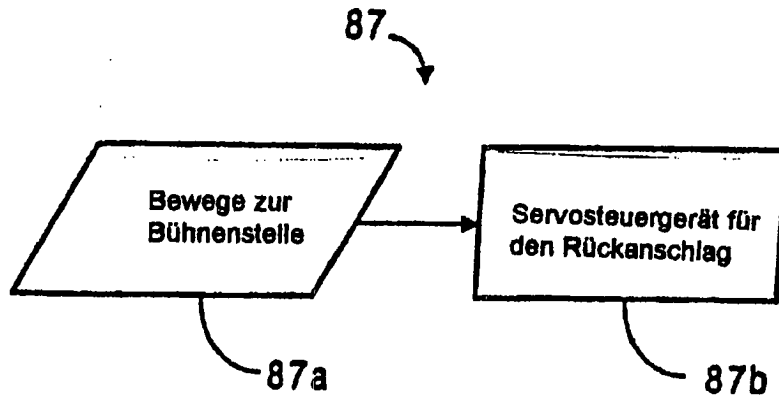


FIG. 5B

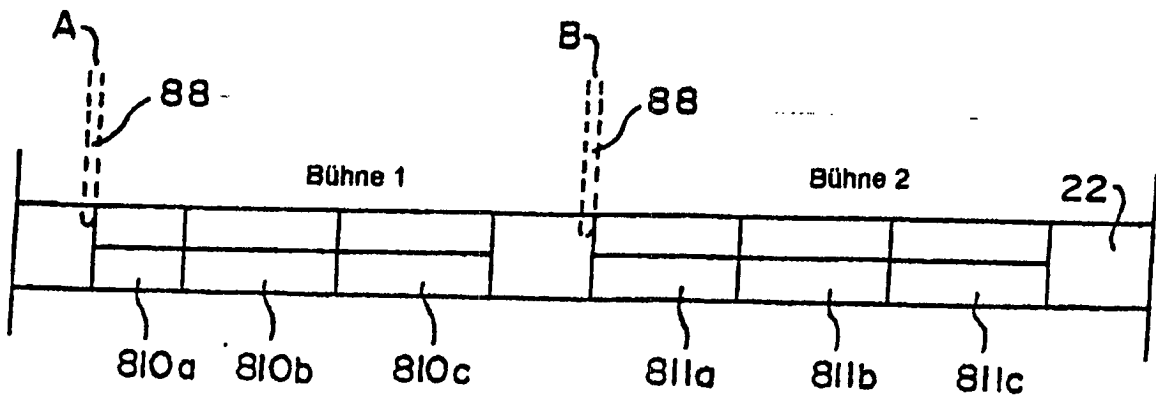
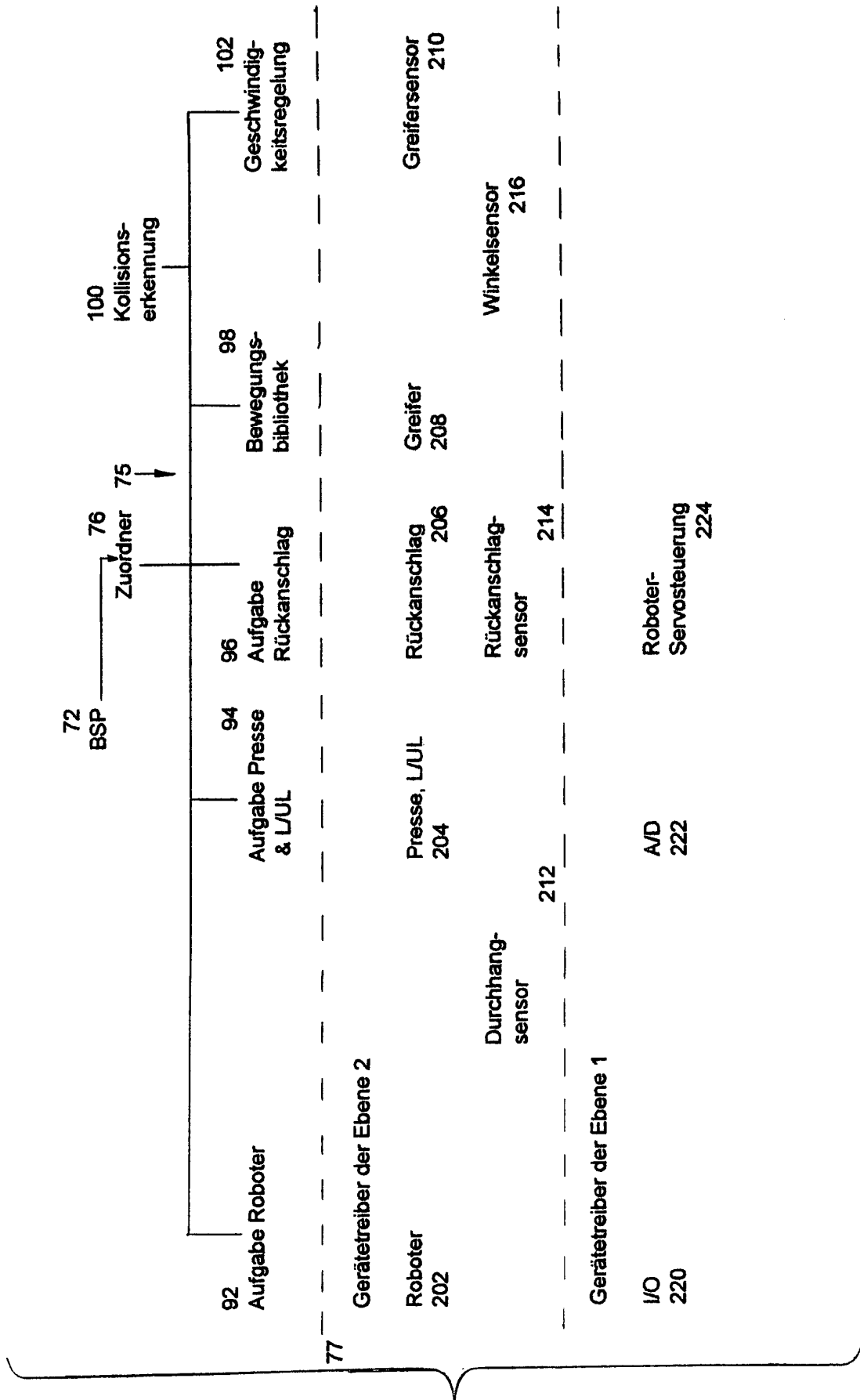


FIG. 5C



FIGUR 6

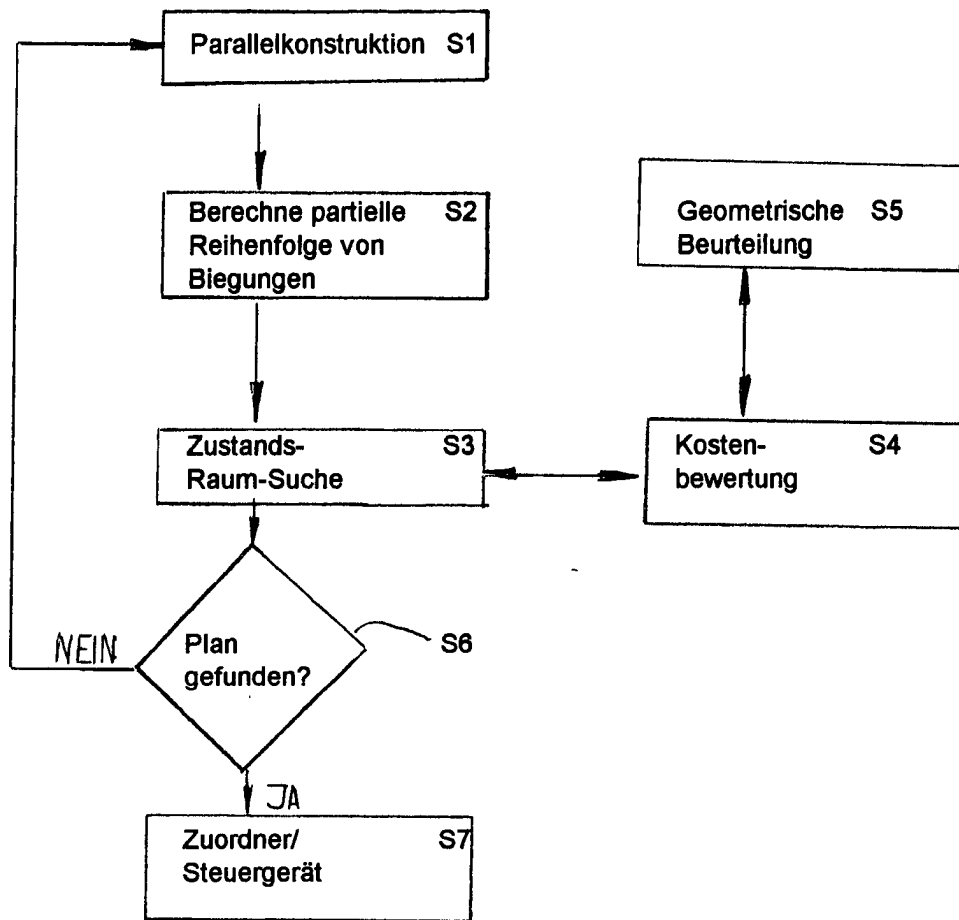


FIG. 7

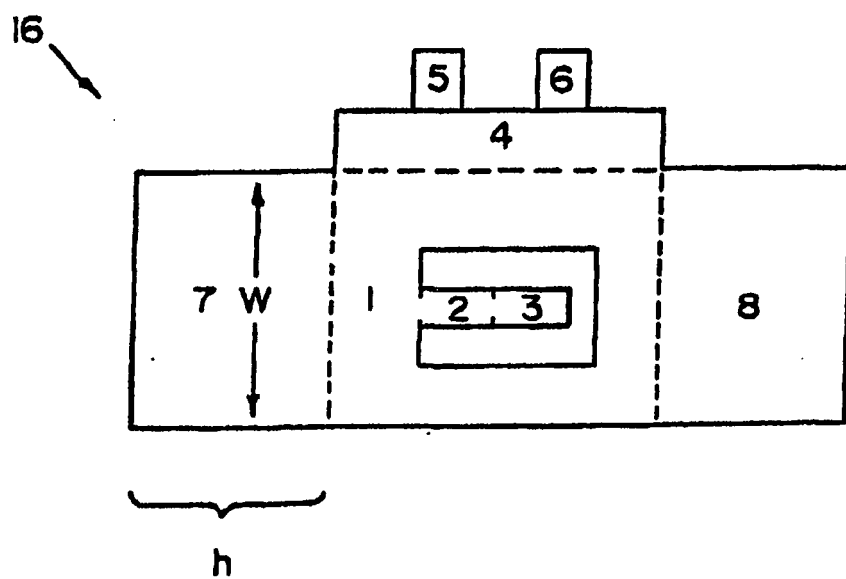
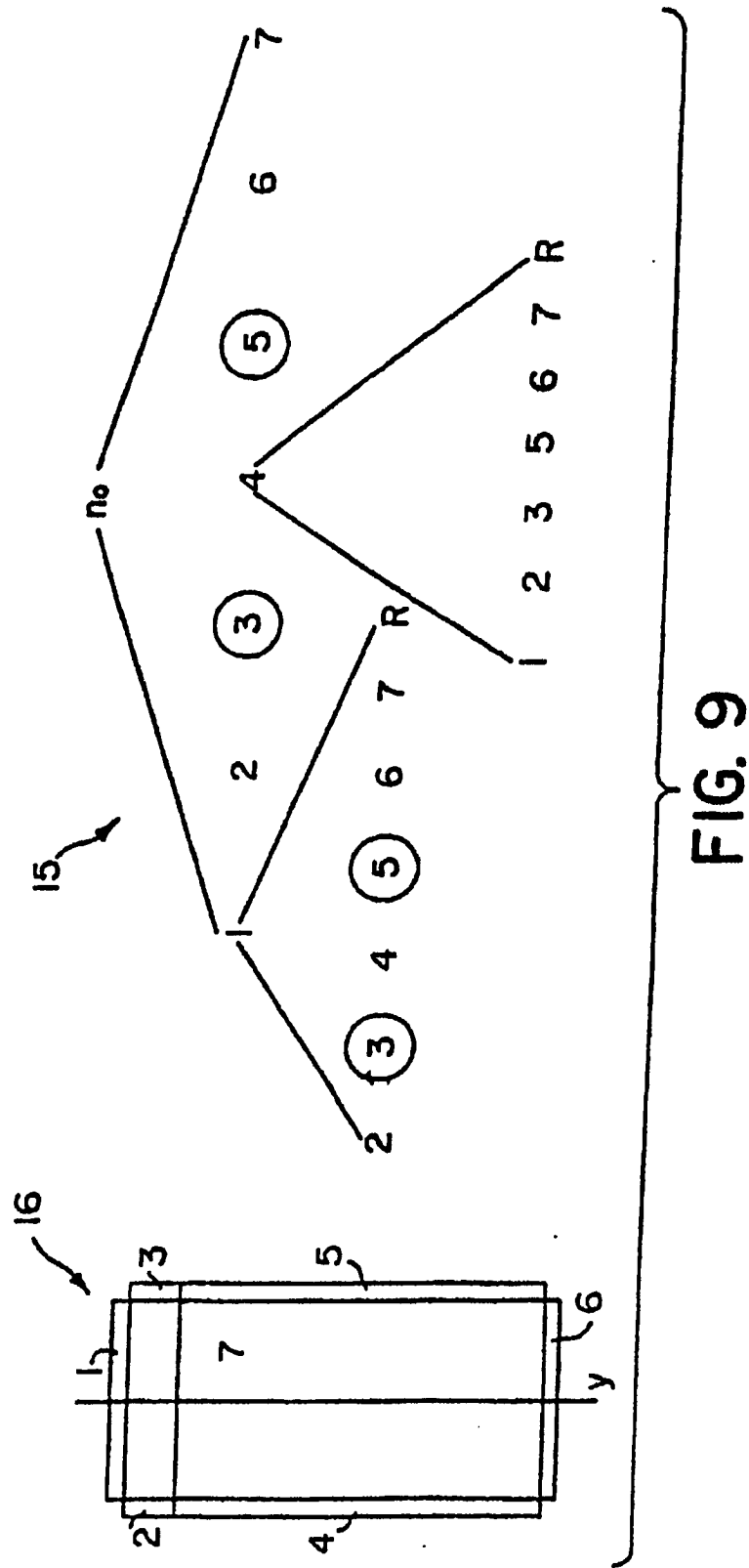


FIG. 8



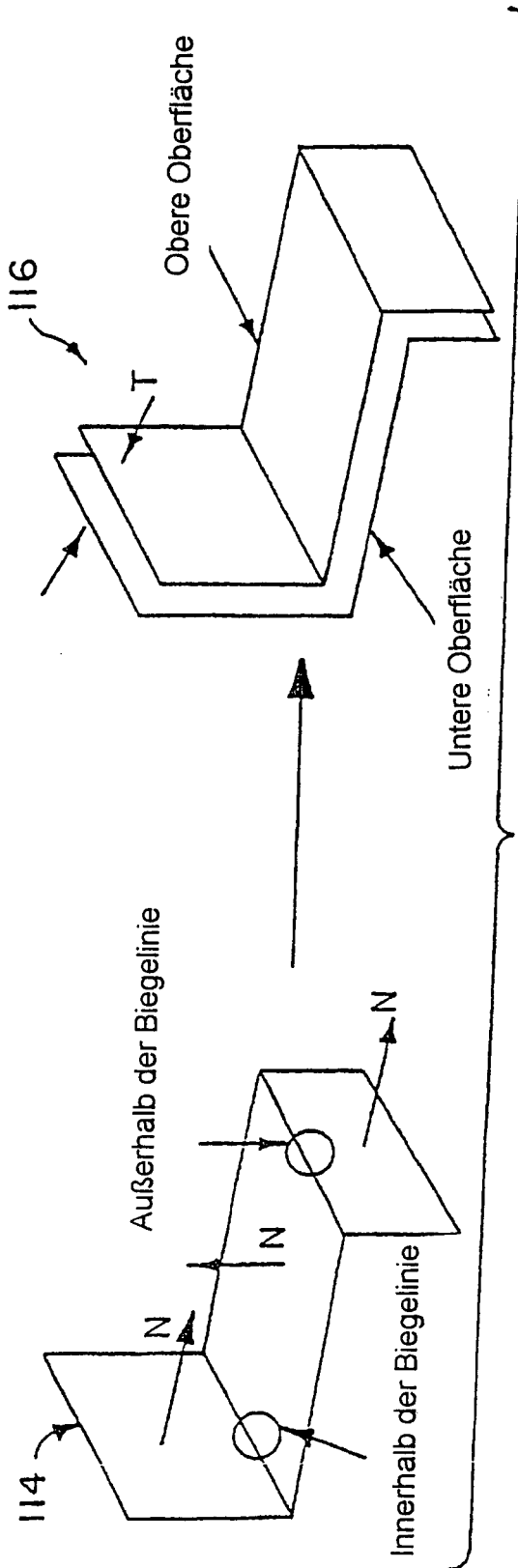


FIG. 10

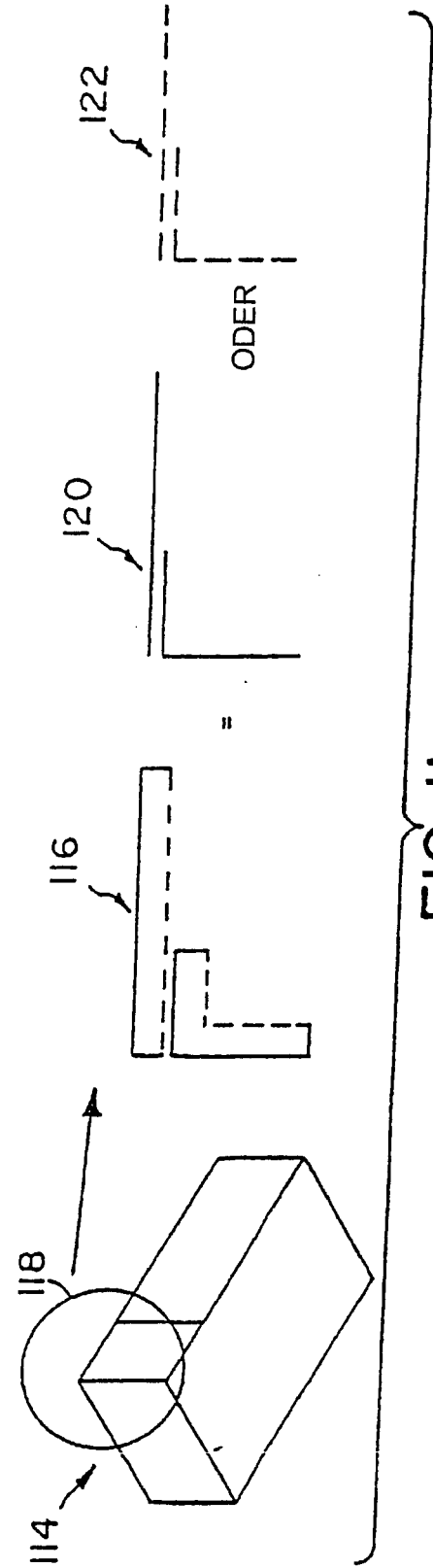
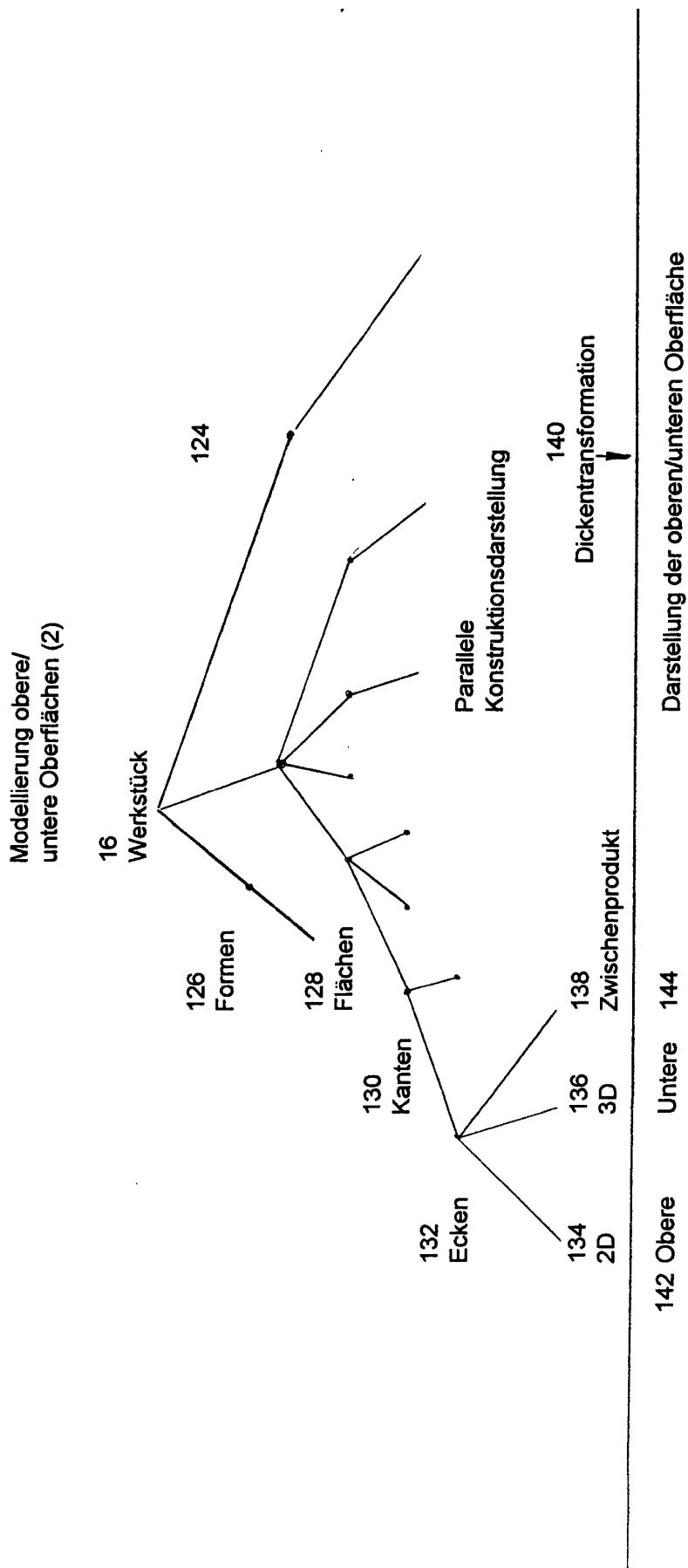


FIG. 11



FIGUR 12

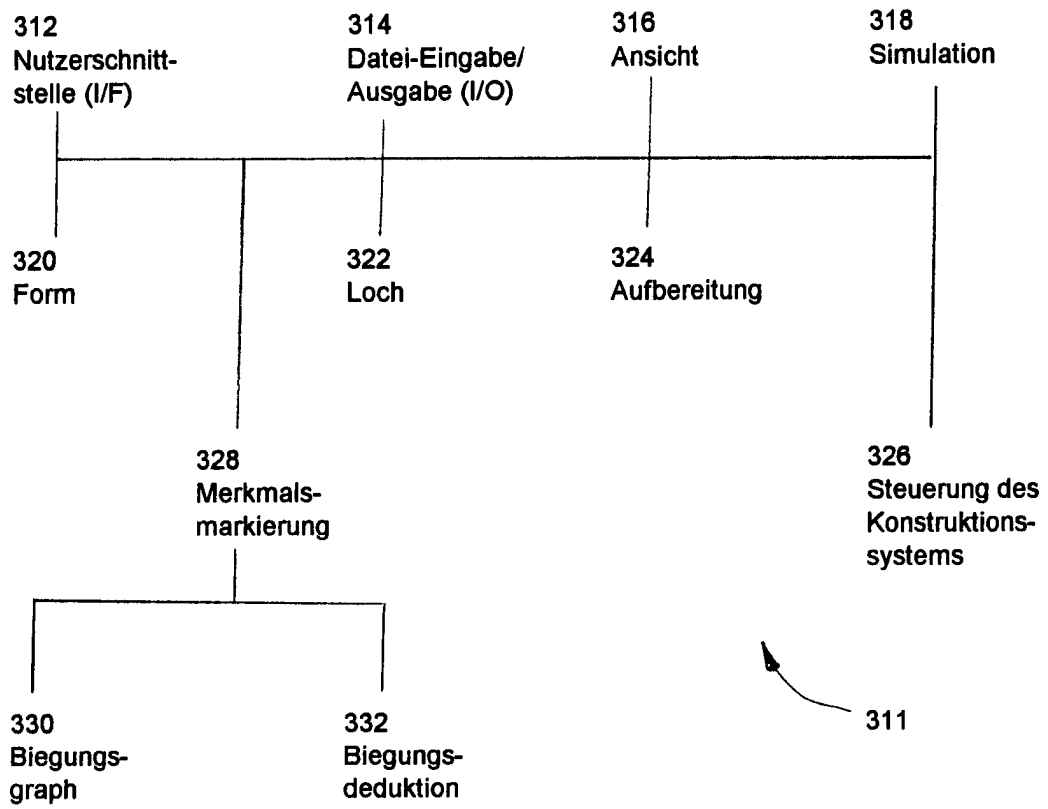


FIG. 13A

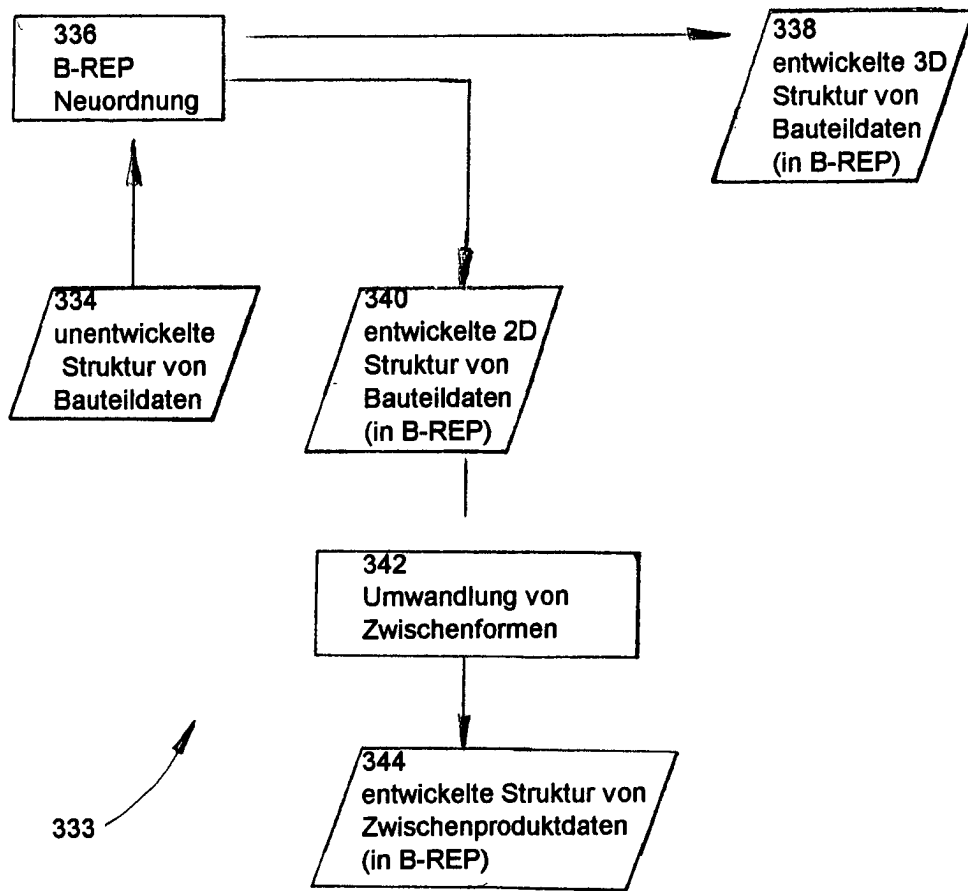


FIG. 13B

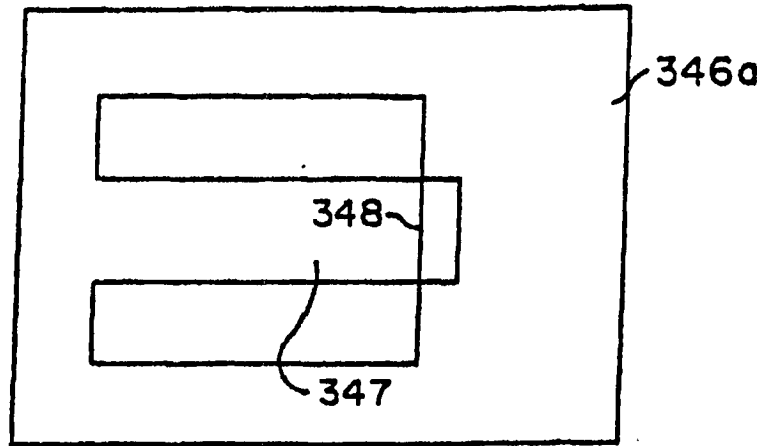


FIG. 13 C

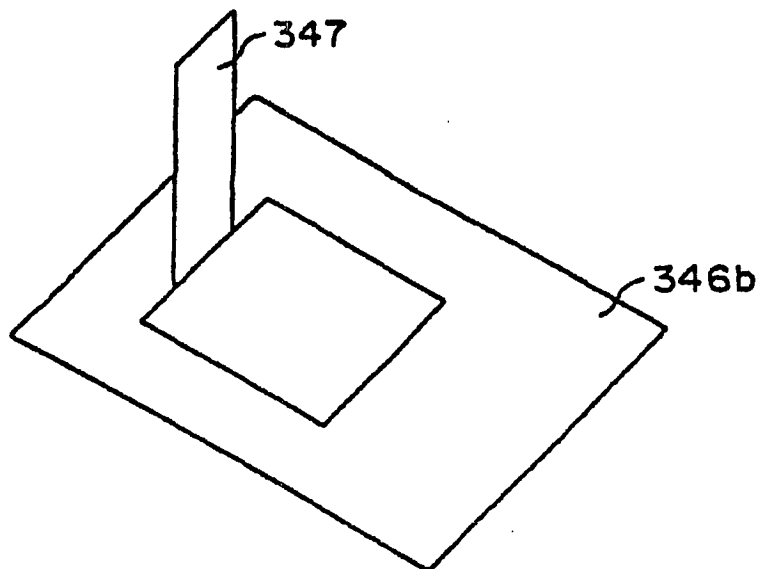


FIG. 13 D

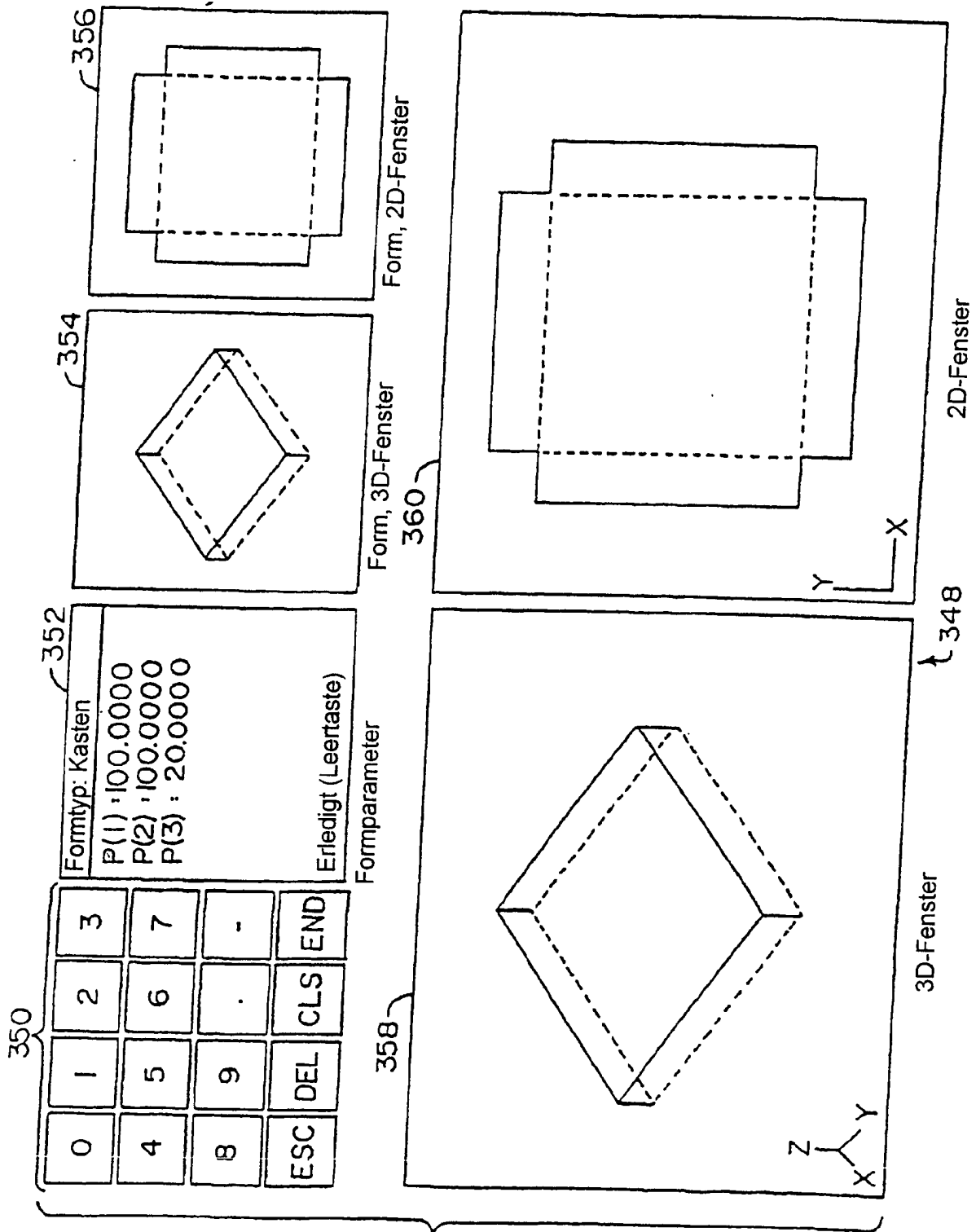


FIG. 14 Δ

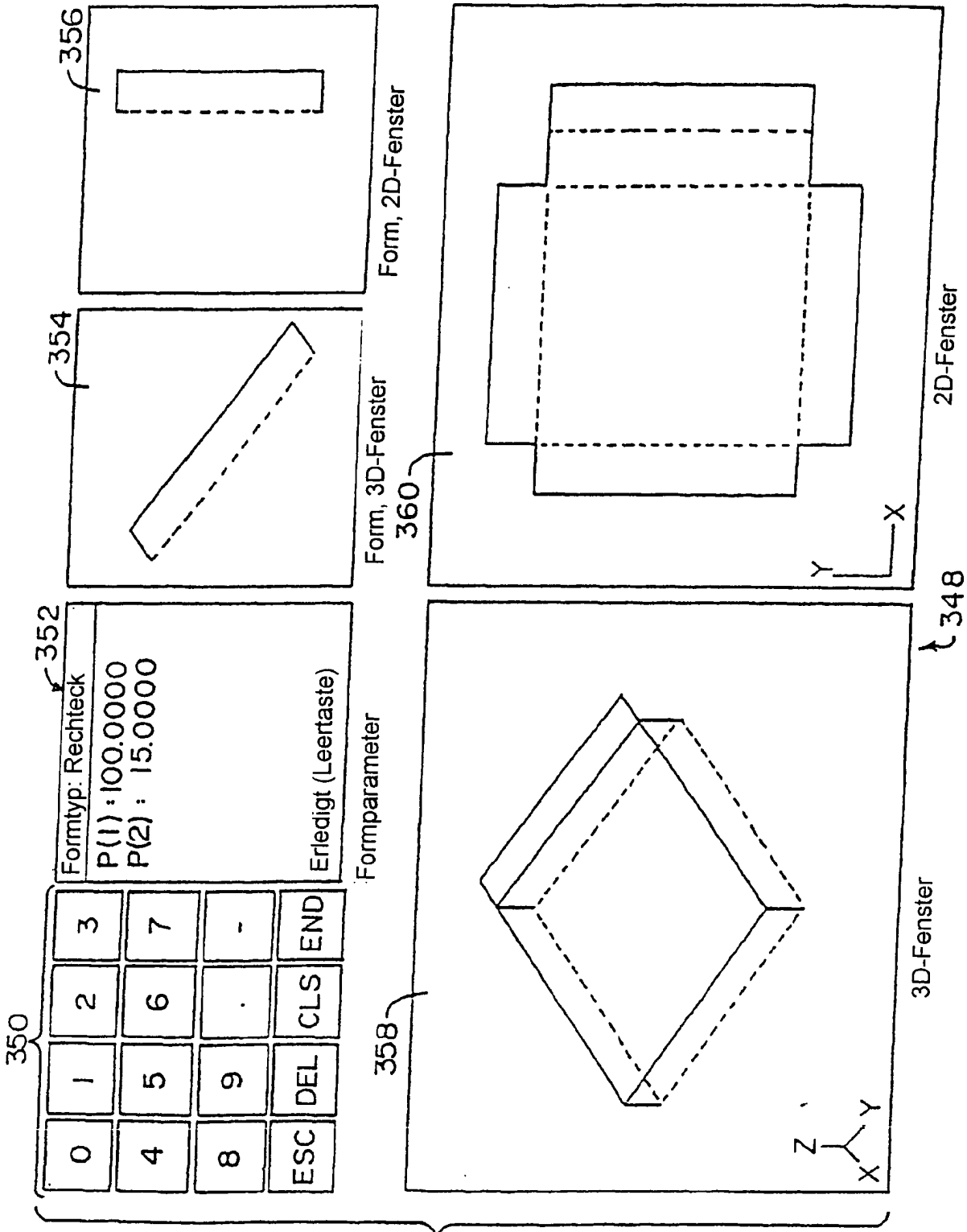


FIG. 14R

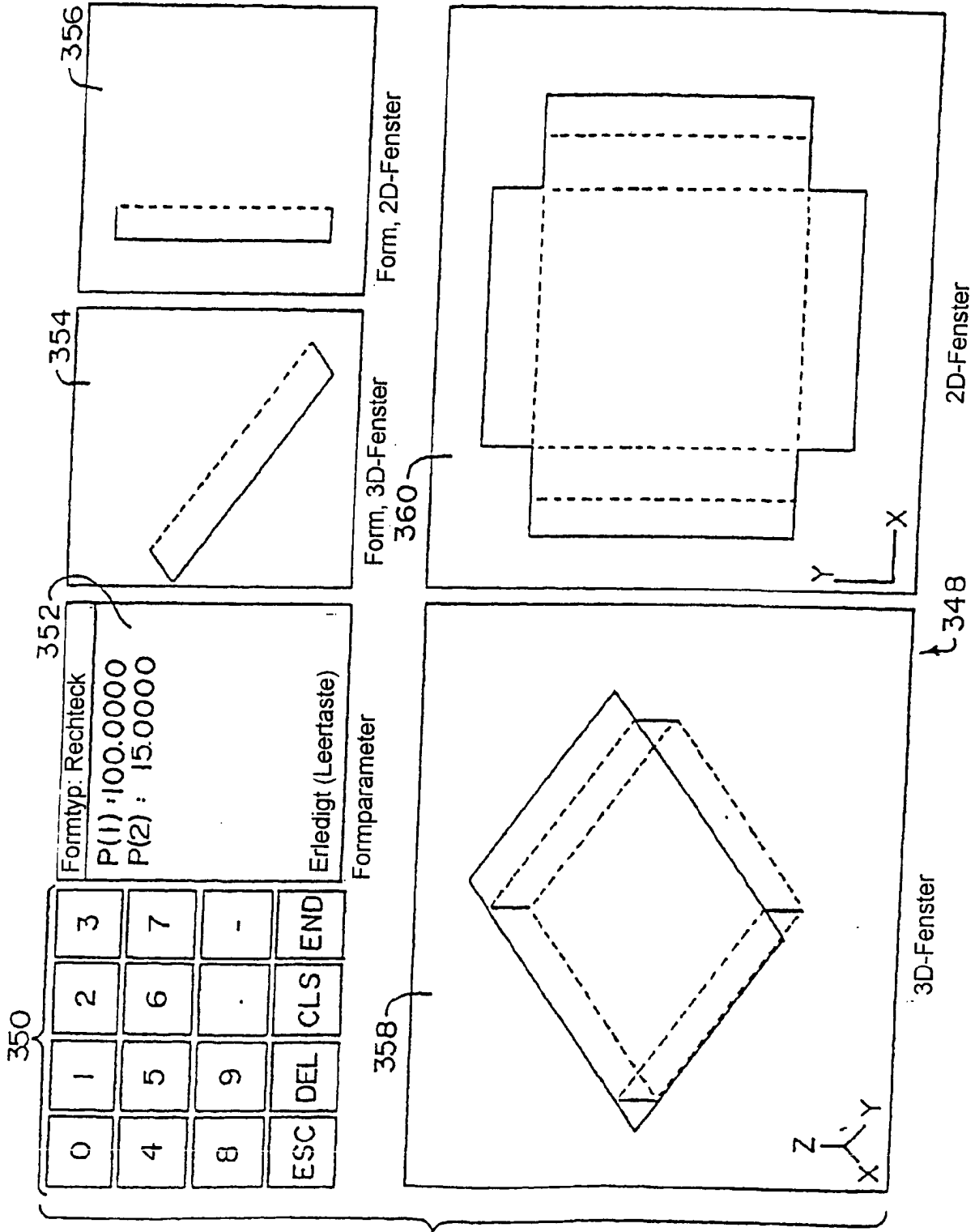


FIG. 14C

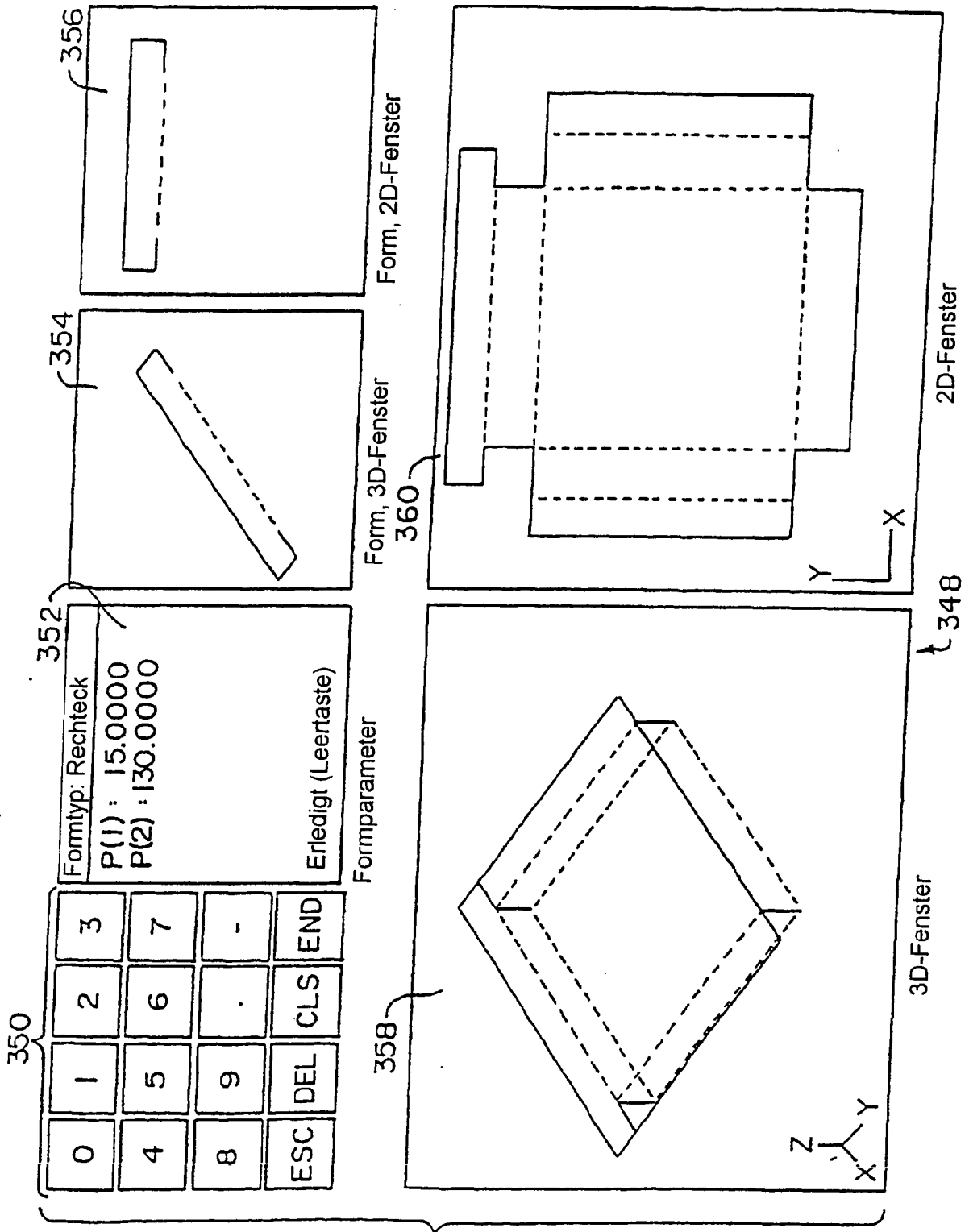


FIG. 14 D

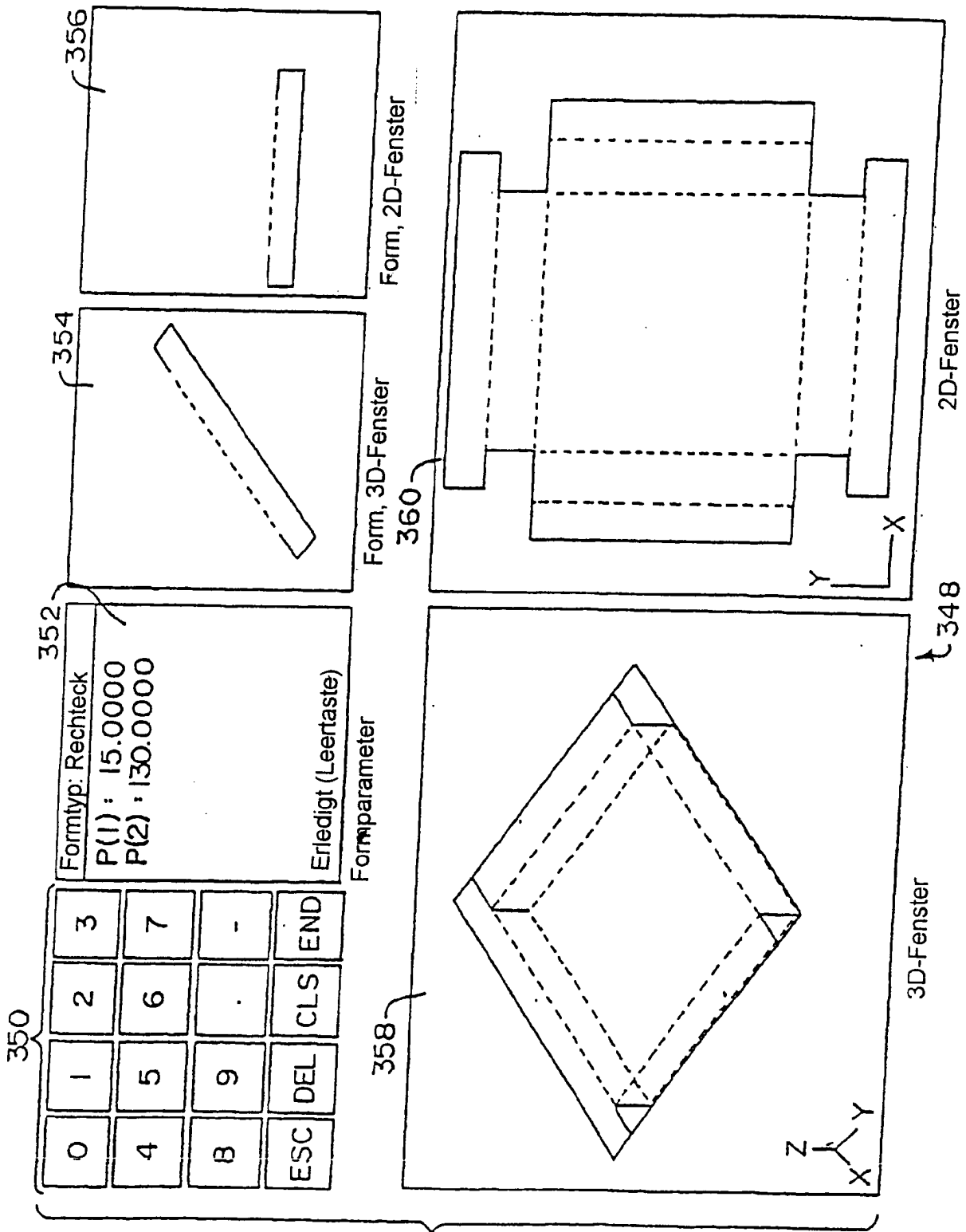
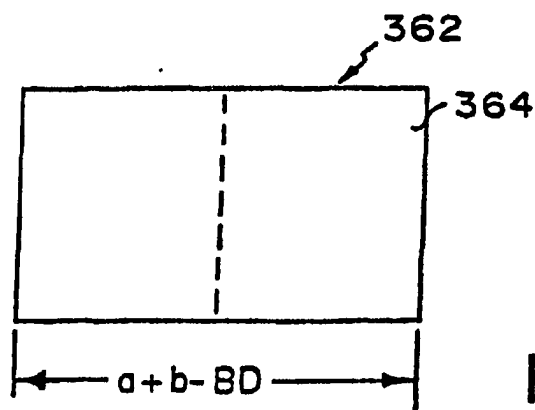
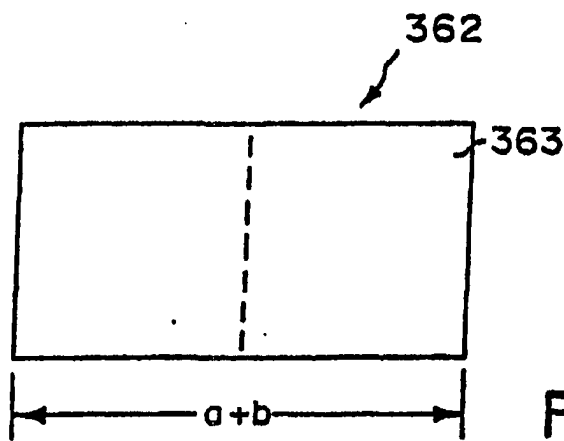
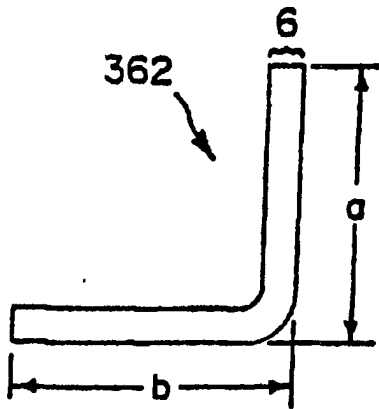


FIG 14 F



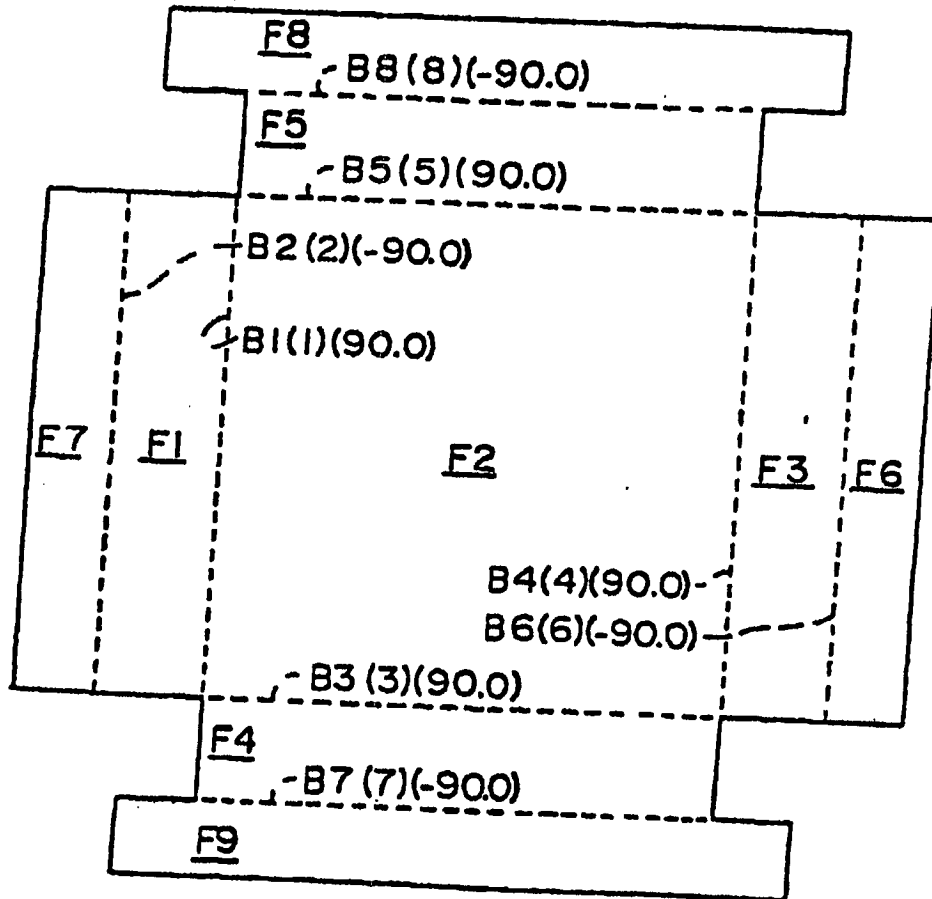


FIG. 16

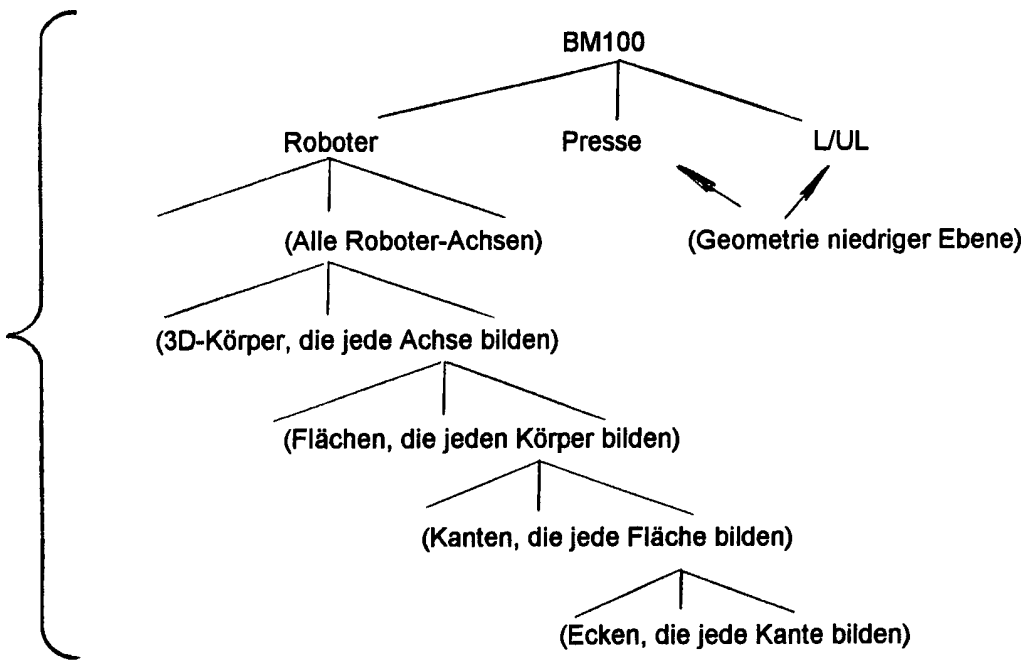


FIG. 17A

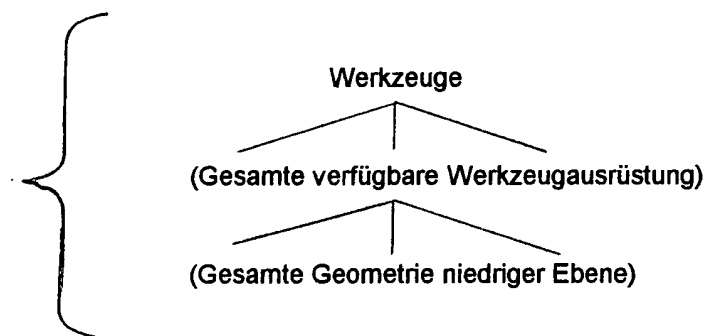


FIG. 17B

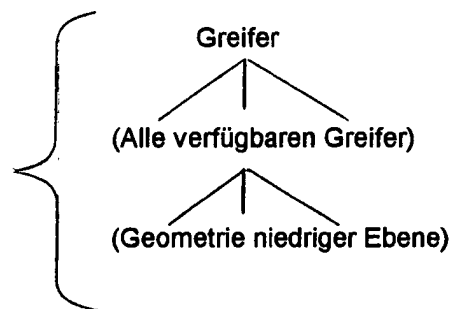


FIG. 18A

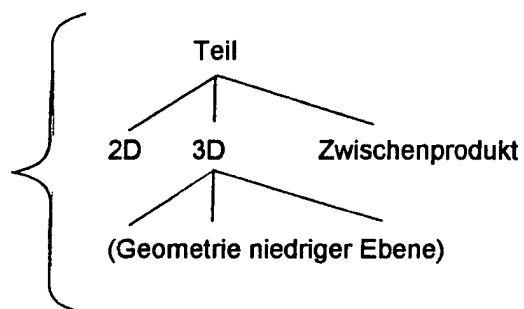


FIG. 18B

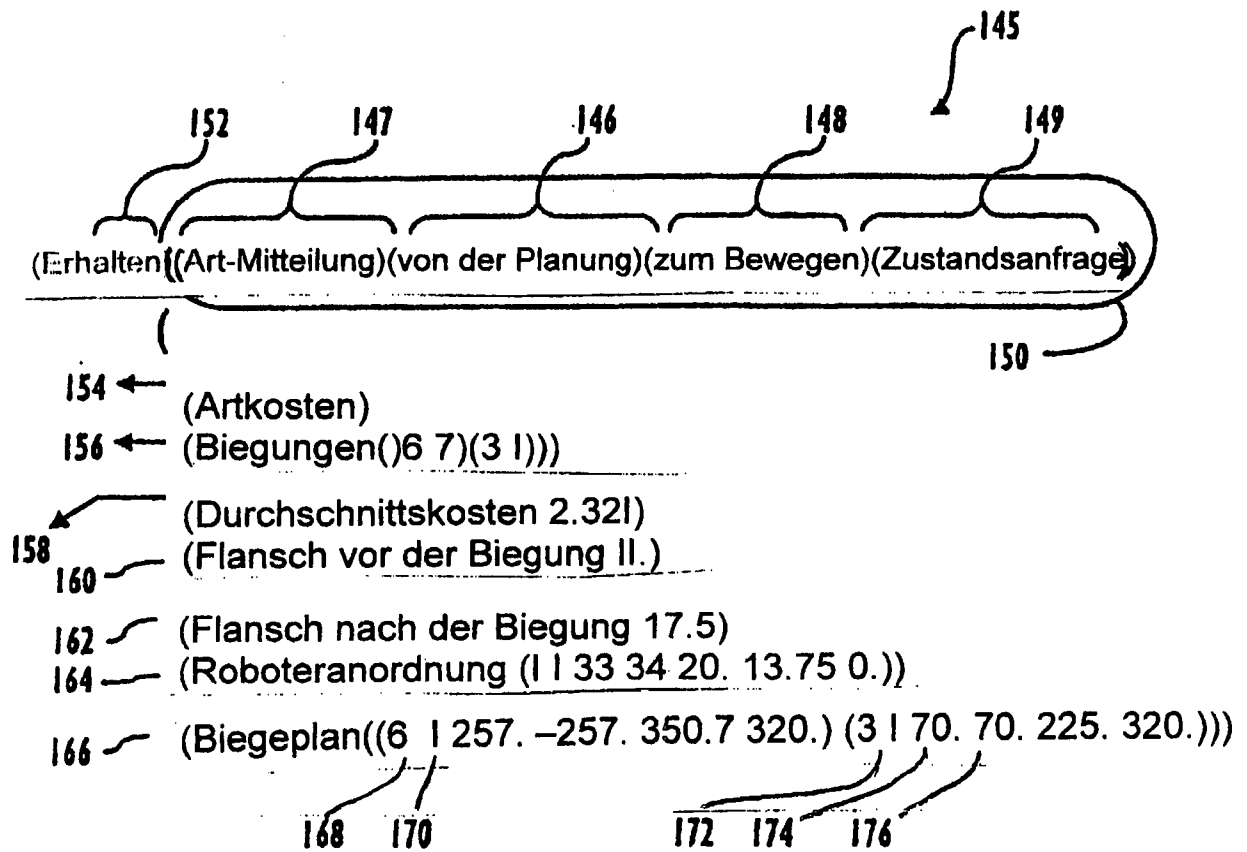


FIG. 19

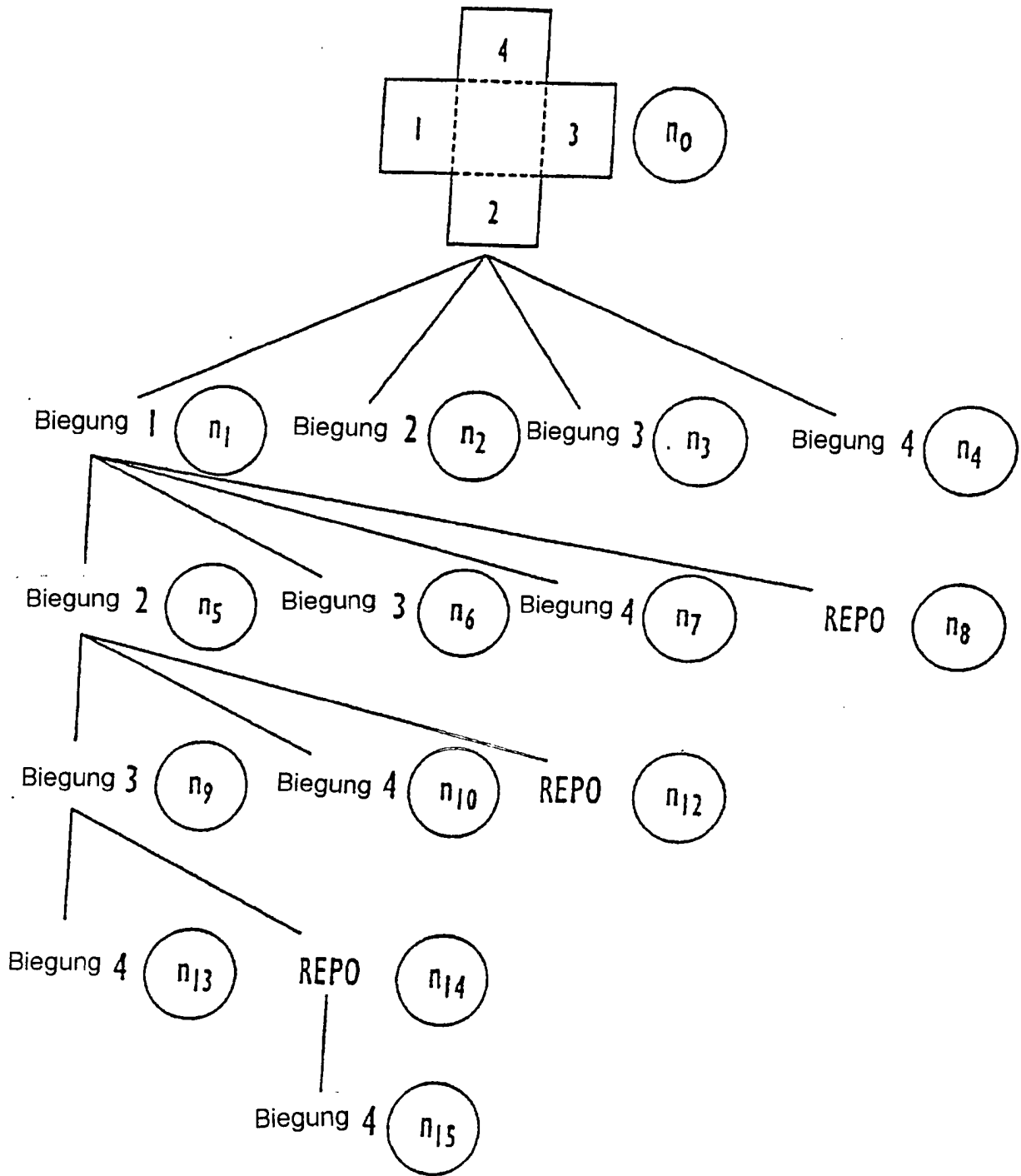


FIG. 20A

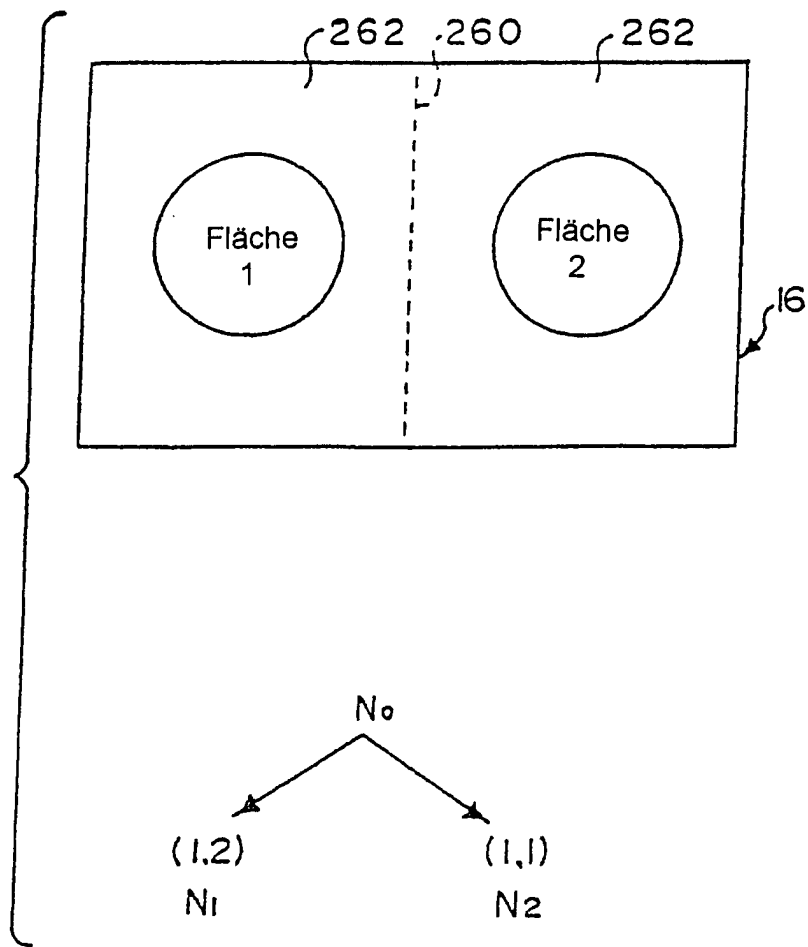


FIG. 20B

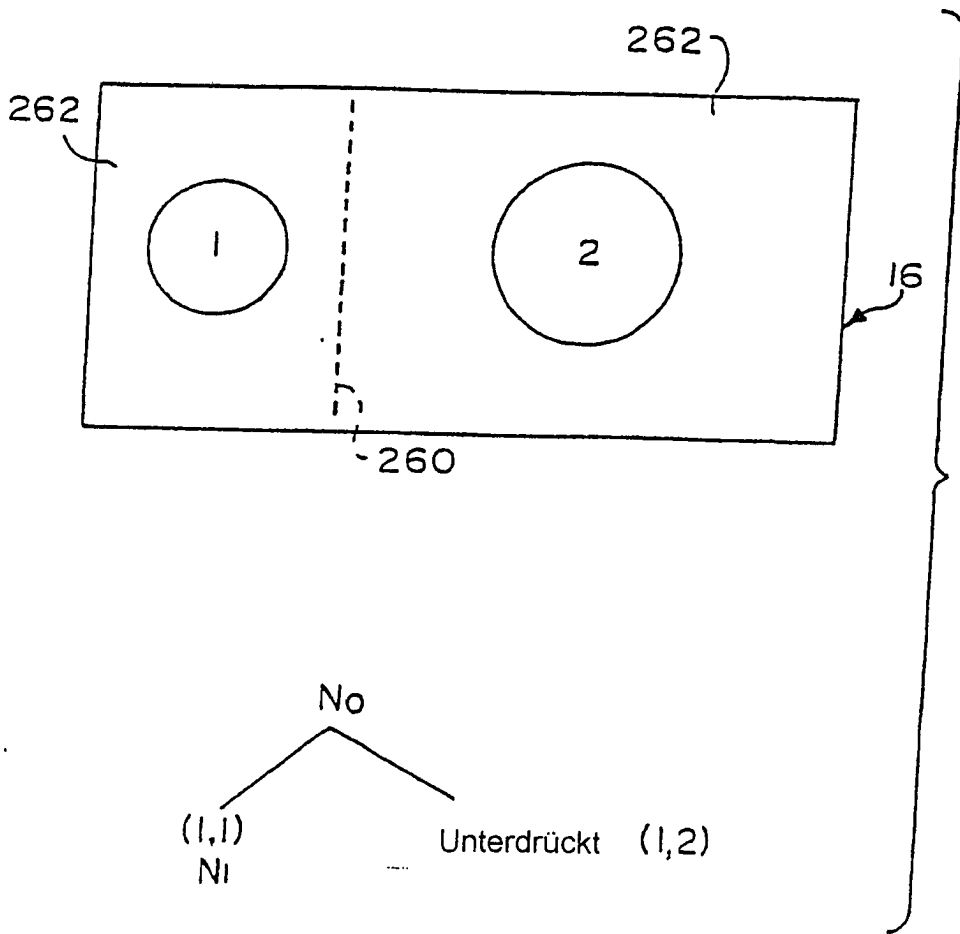


FIG. 20C

FIG.20D

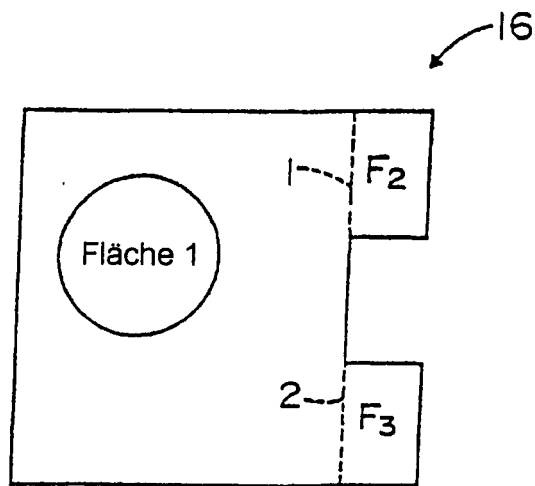
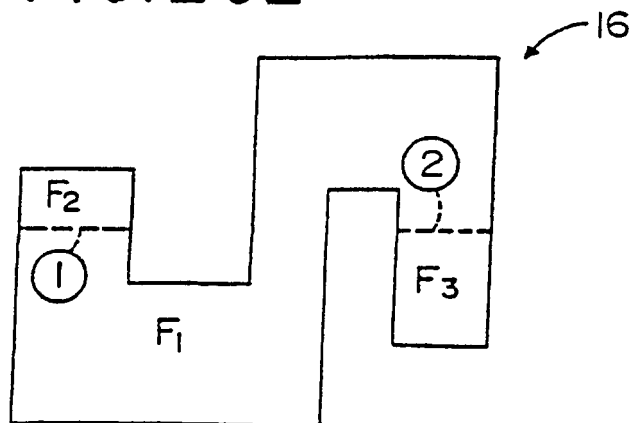


FIG.20E



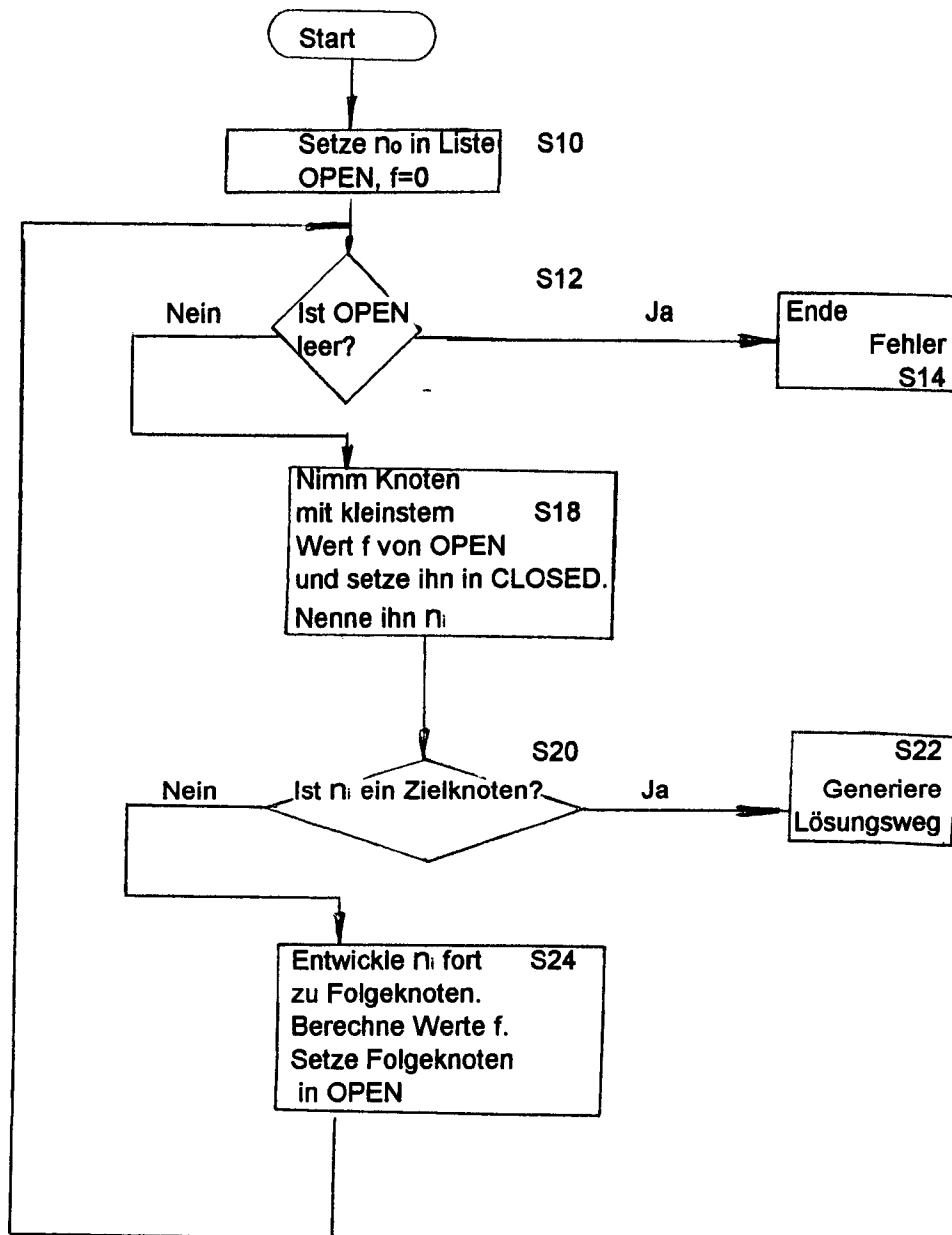


FIG. 21

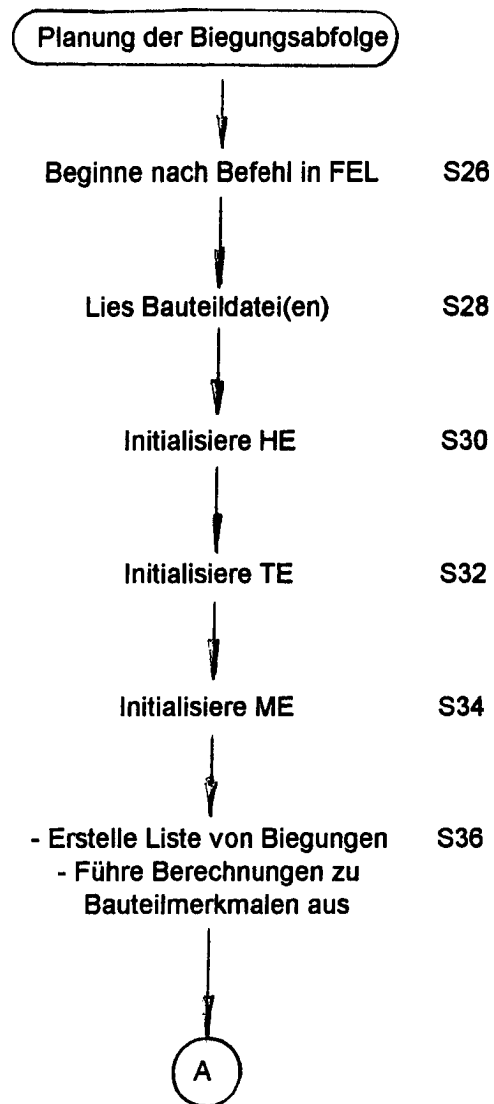


FIG. 22A

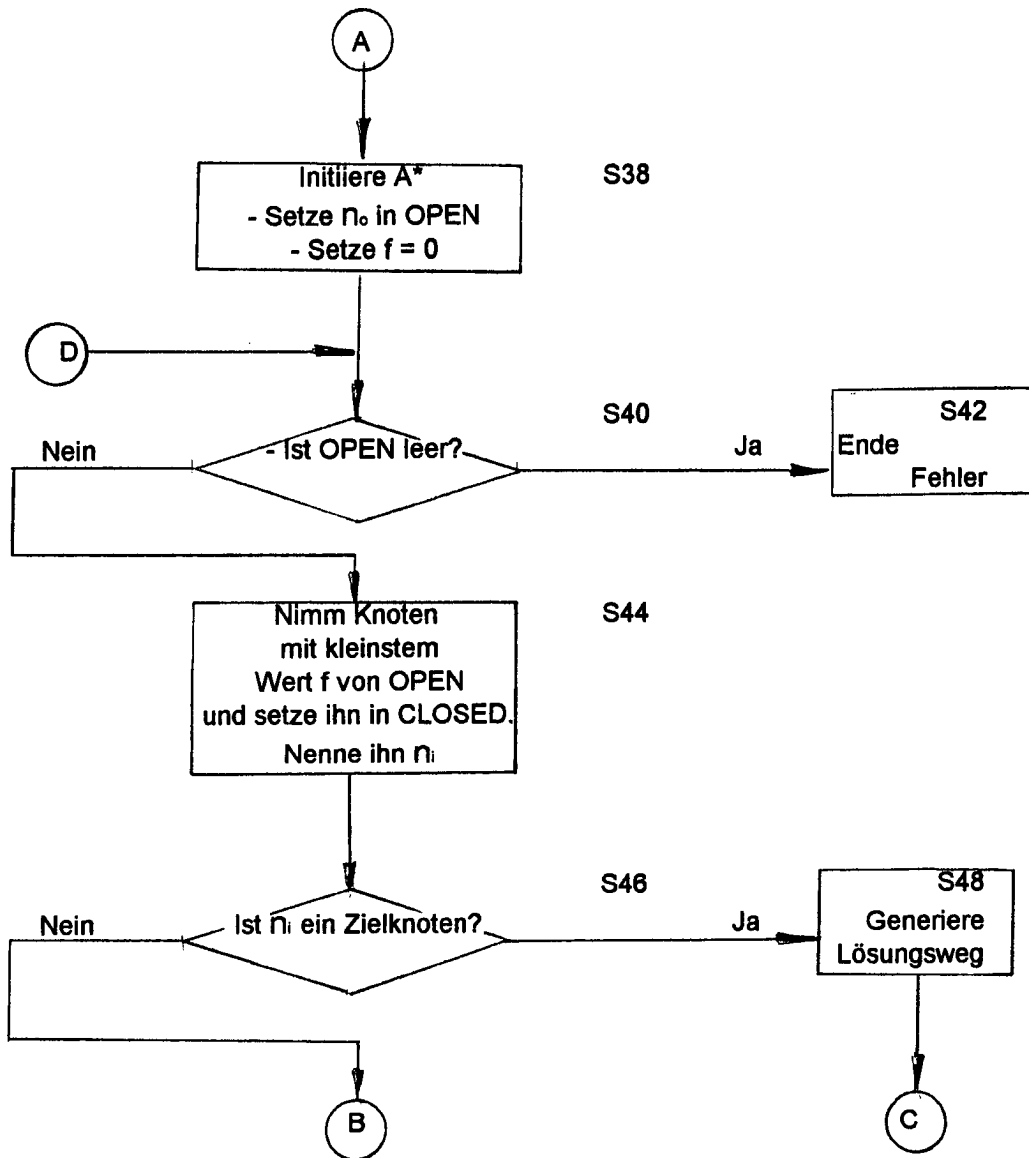


FIG. 22B

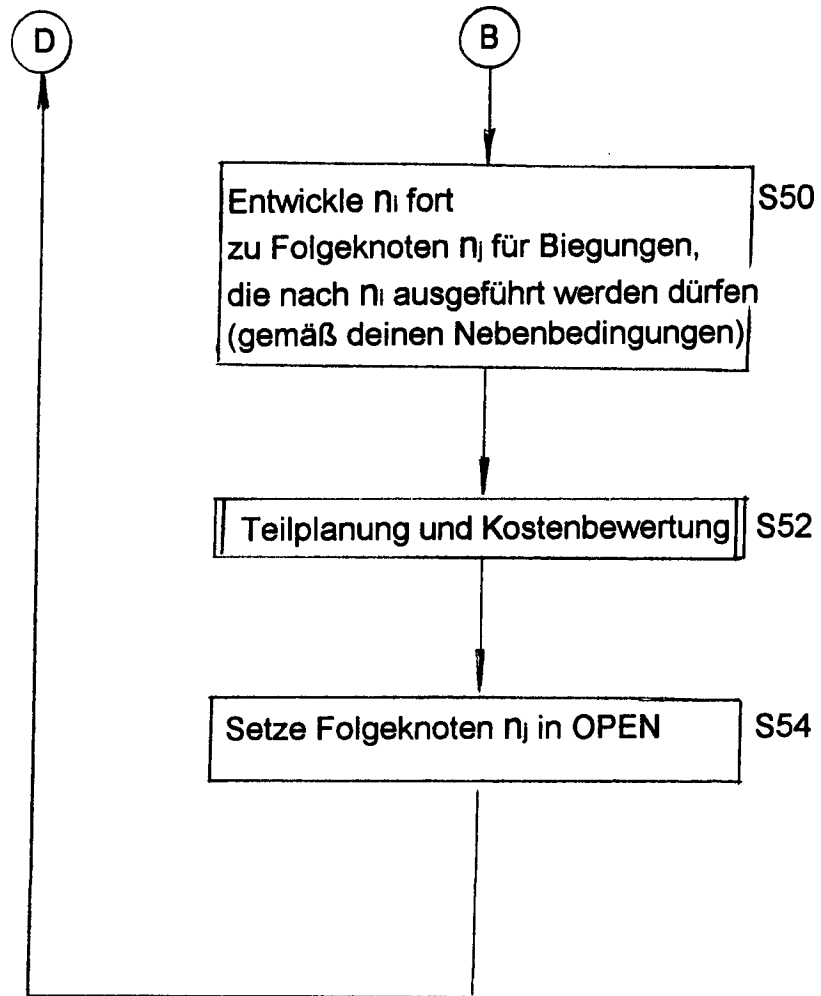


FIG. 22C

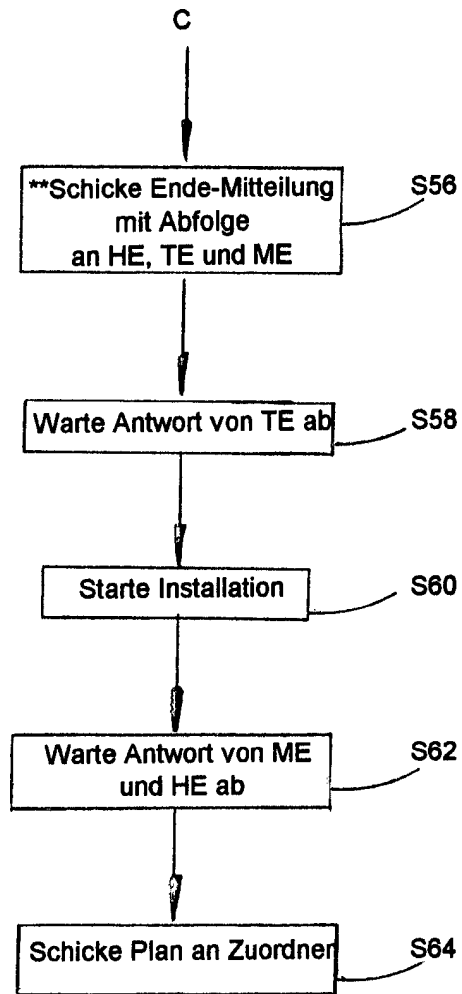


FIG. 22D

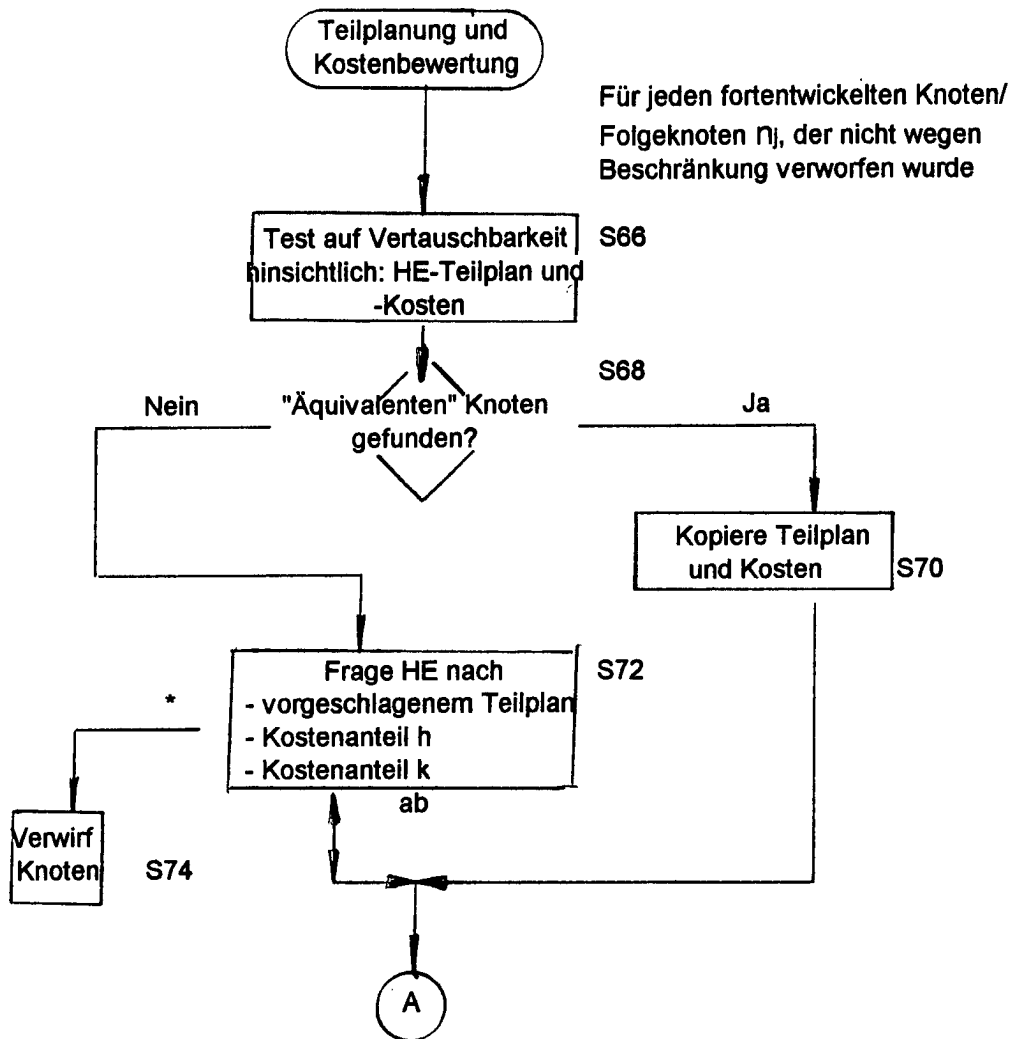


FIG. 23A

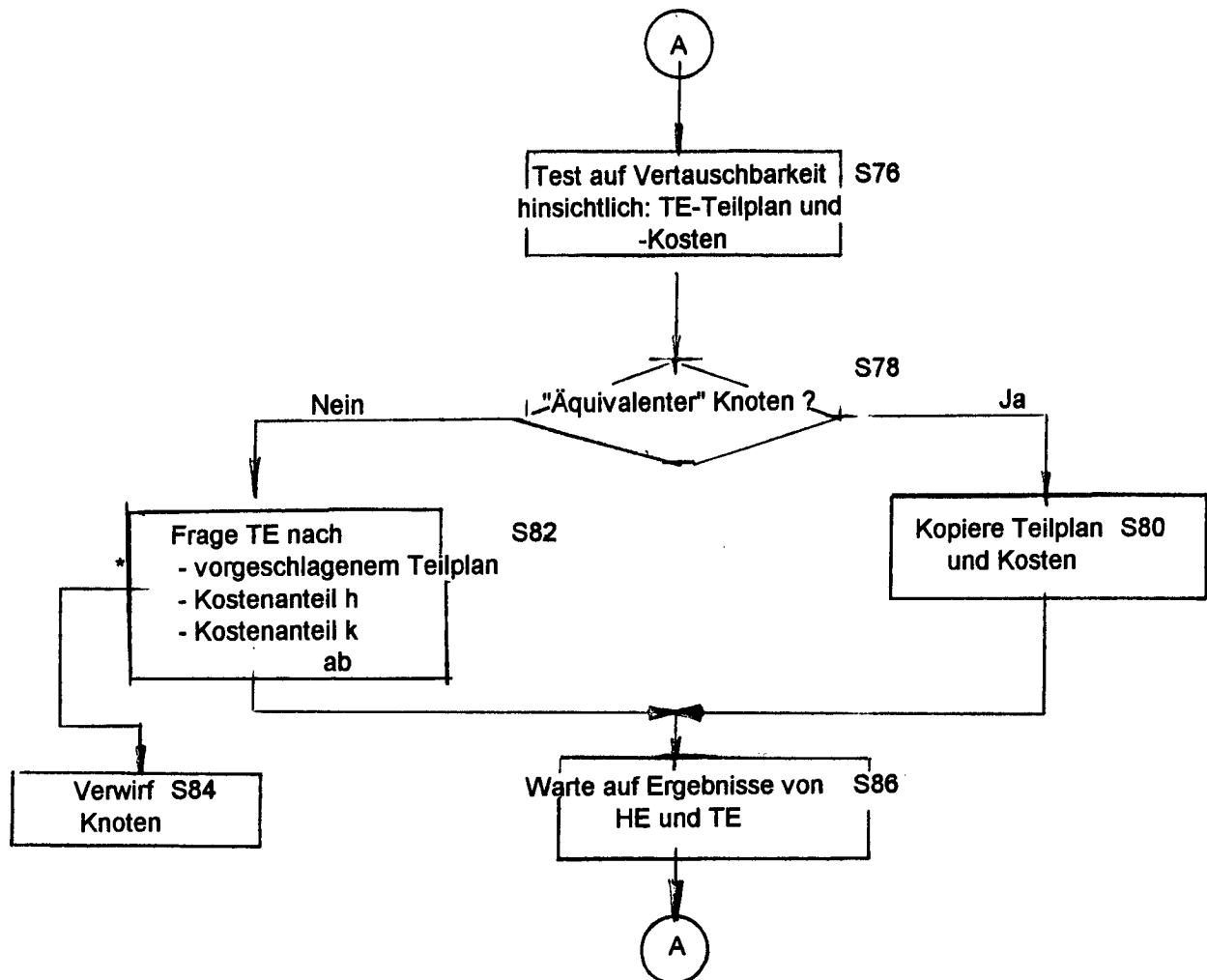


FIG. 23B

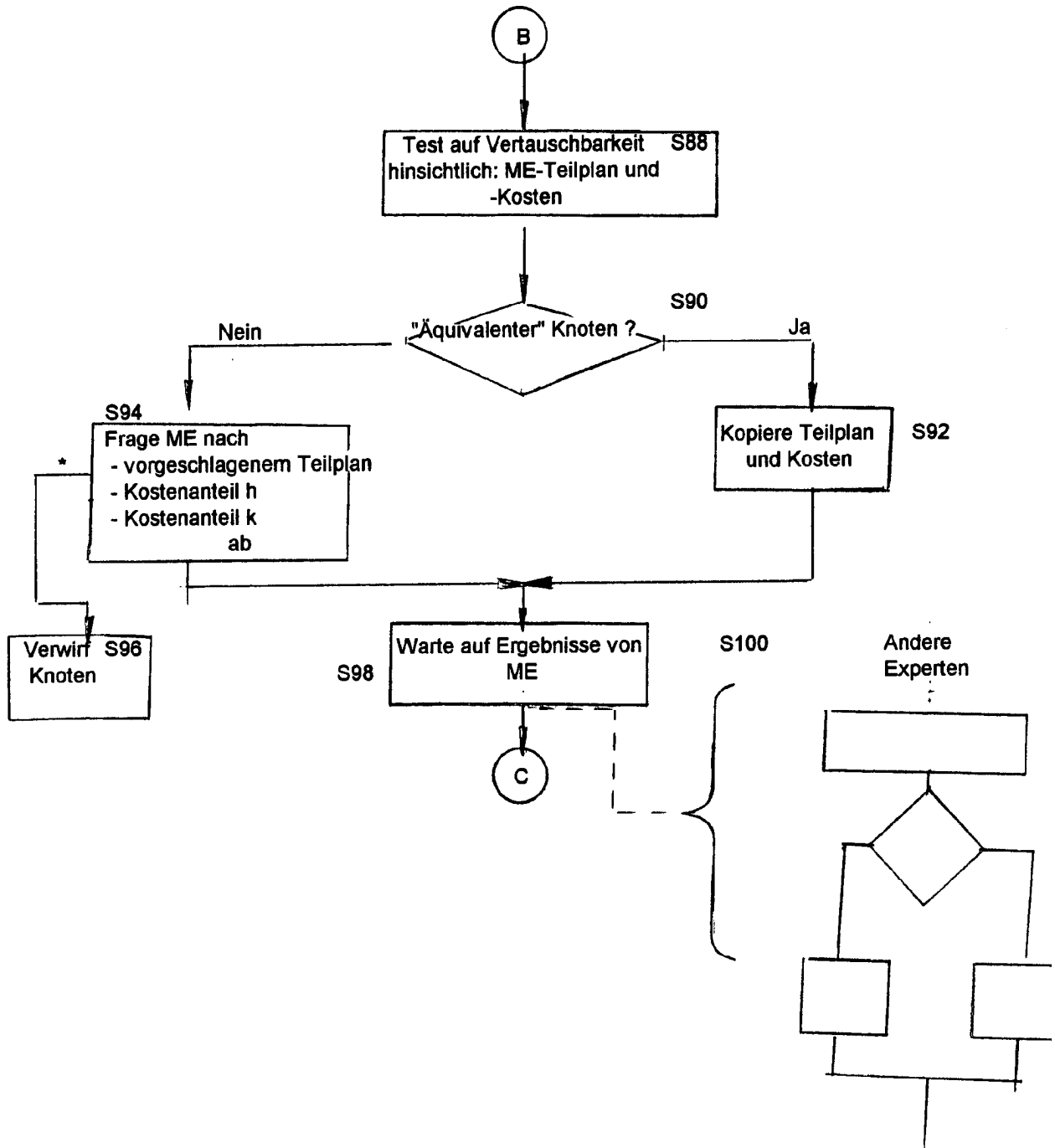


FIG. 23C

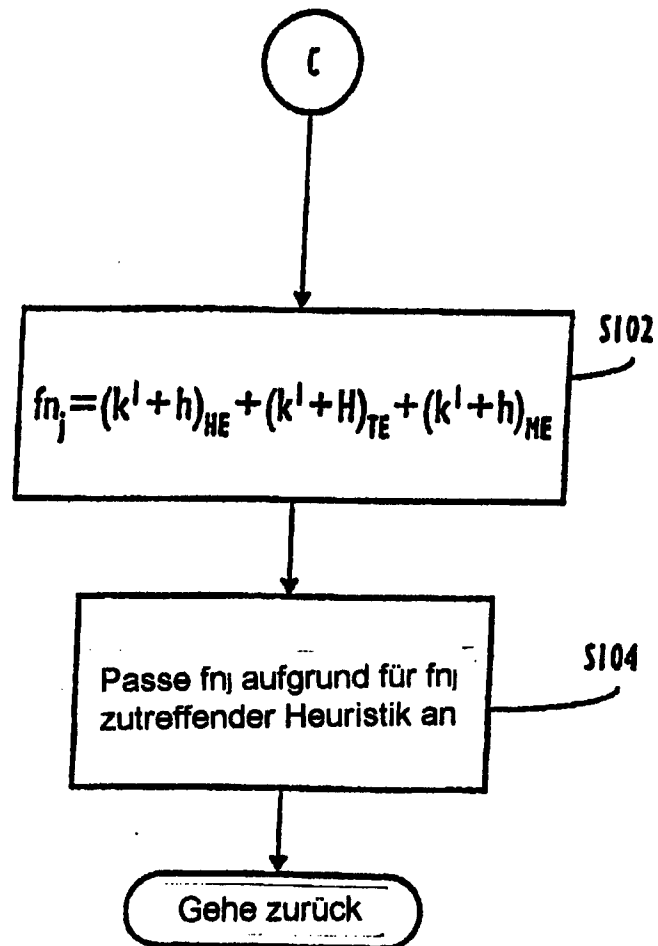


FIG. 23D

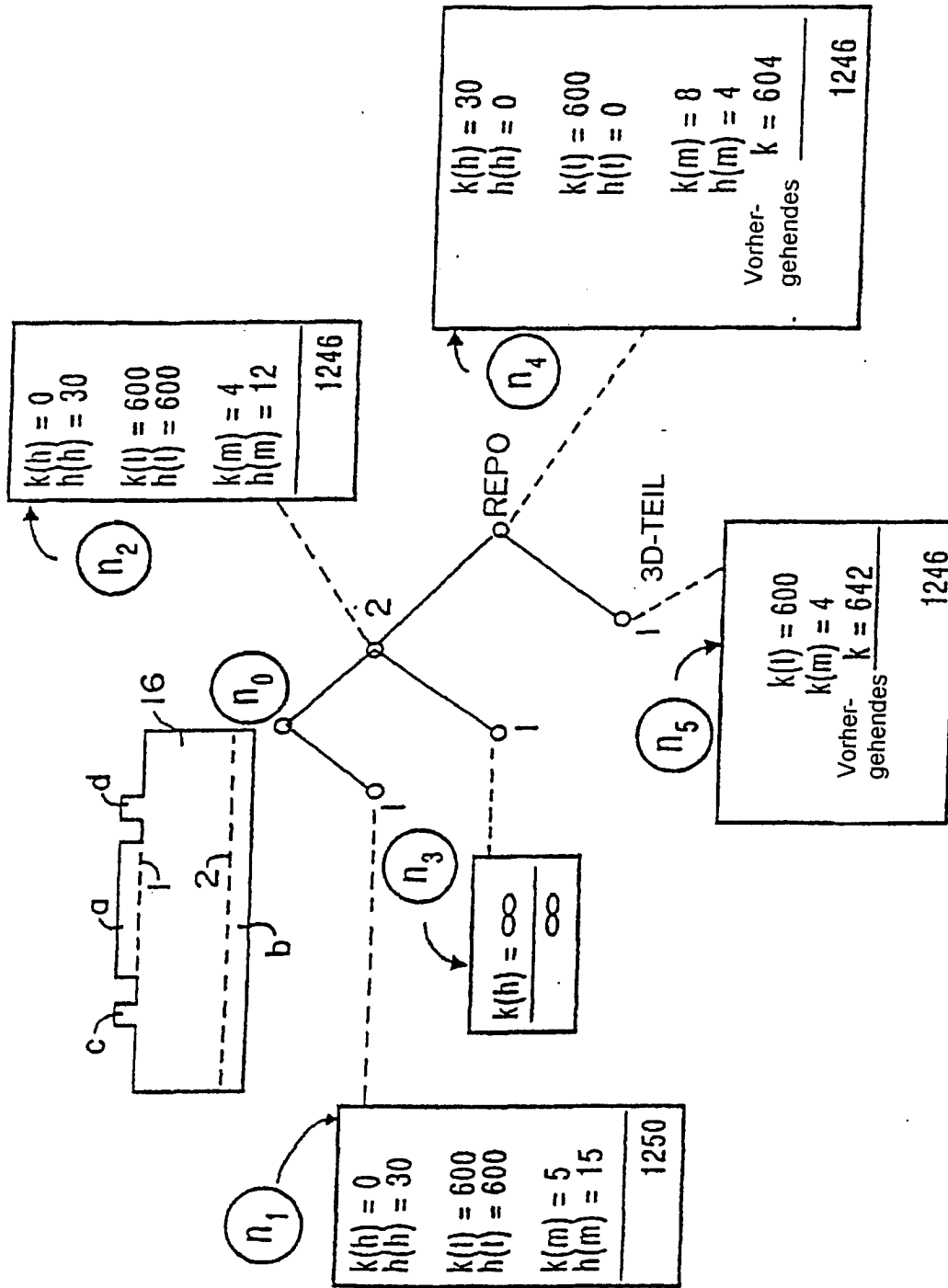


FIG. 24

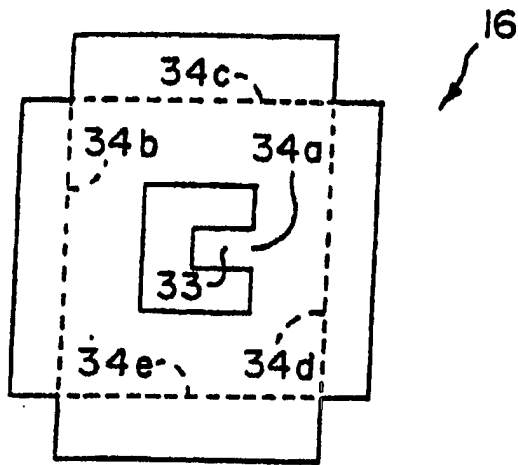


FIG. 25 A

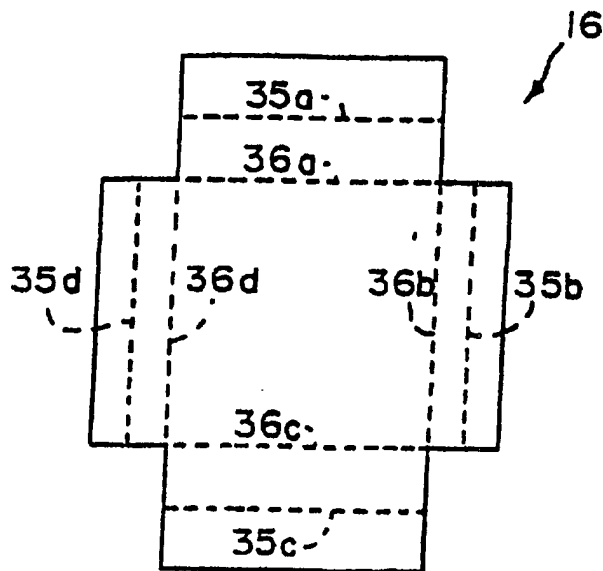


FIG. 25 B

FIG. 25C

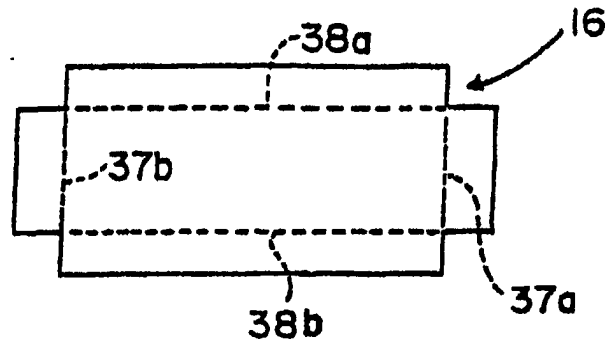


FIG. 25D

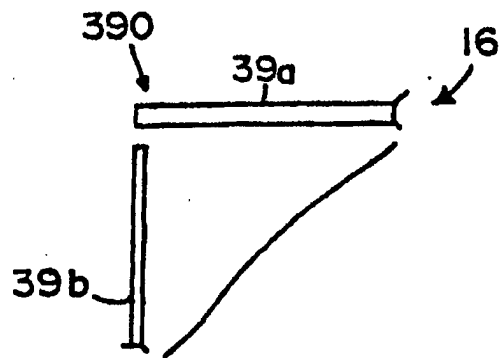


FIG. 25E

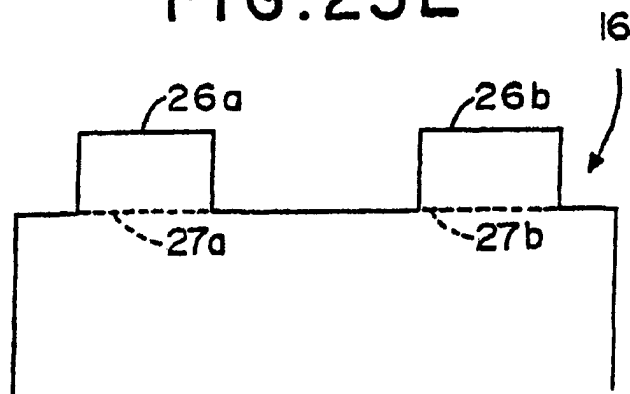


FIG. 26A

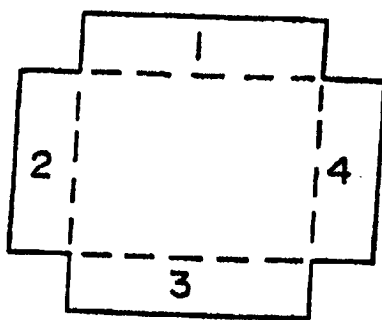
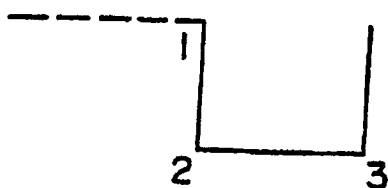


FIG. 26 B



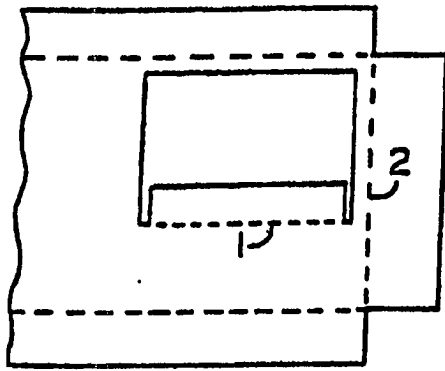


FIG. 27A

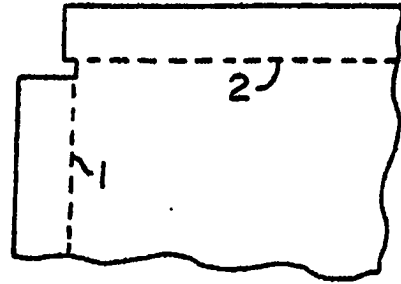


FIG. 27C

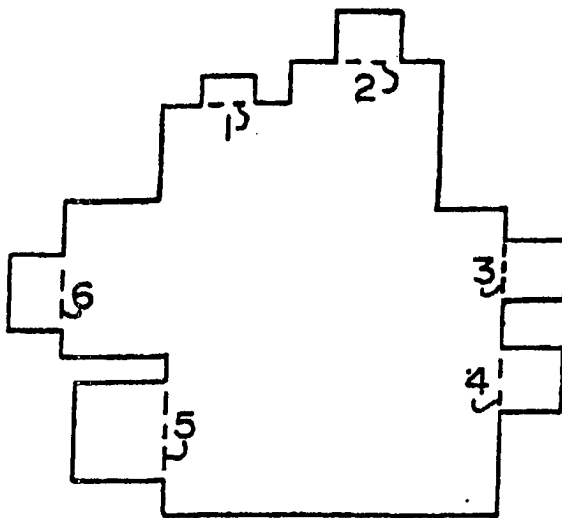


FIG. 27B

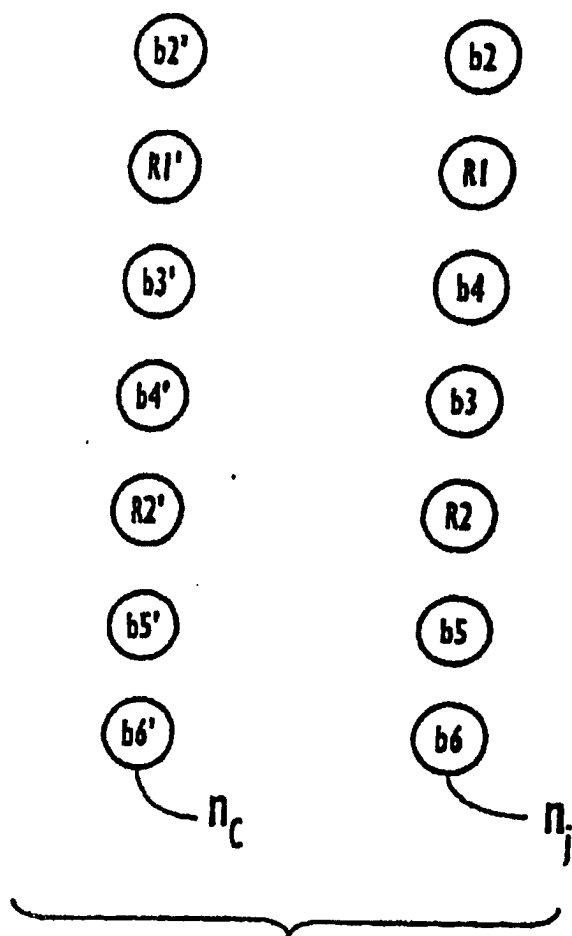


FIG. 28

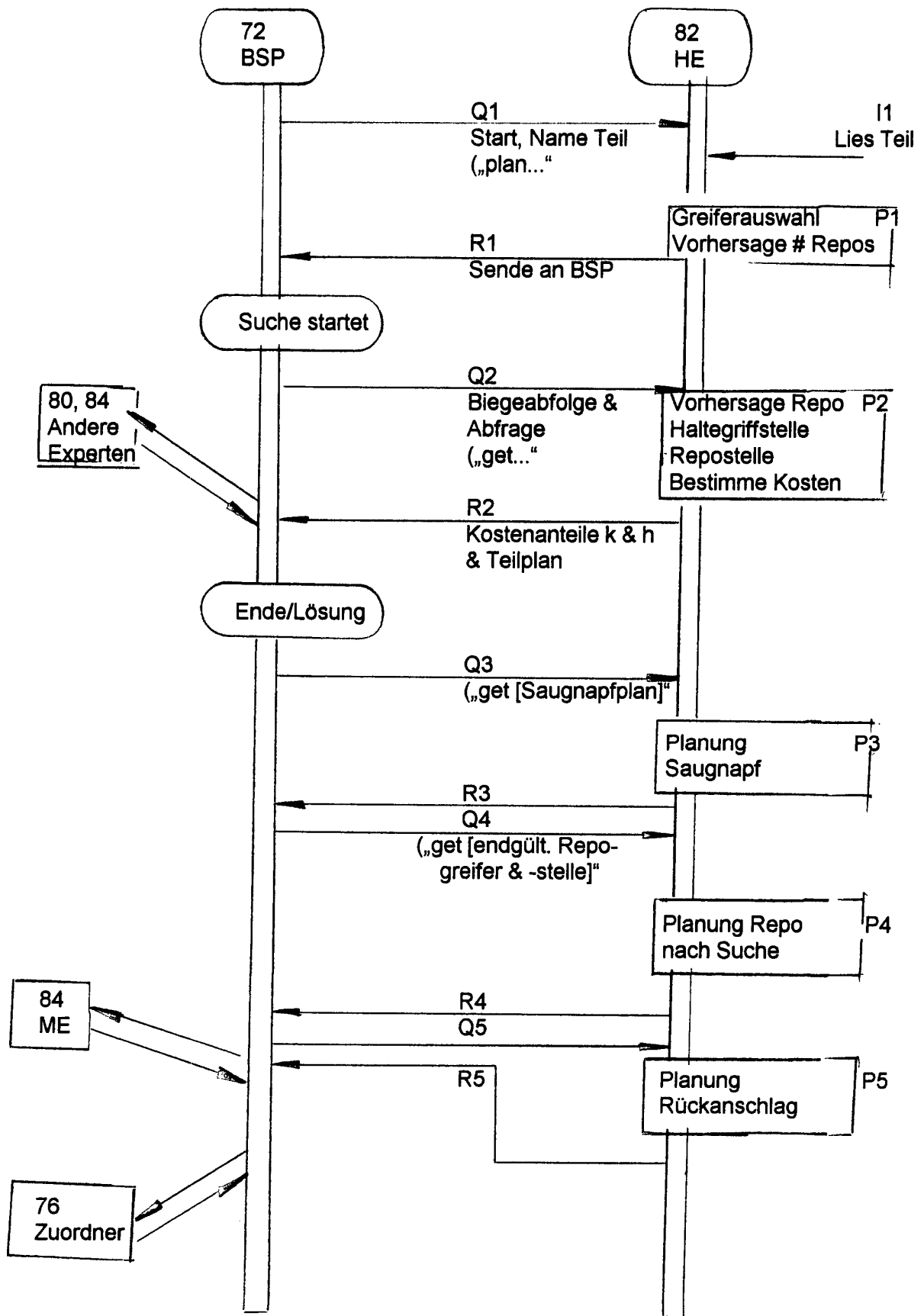


Fig. 29

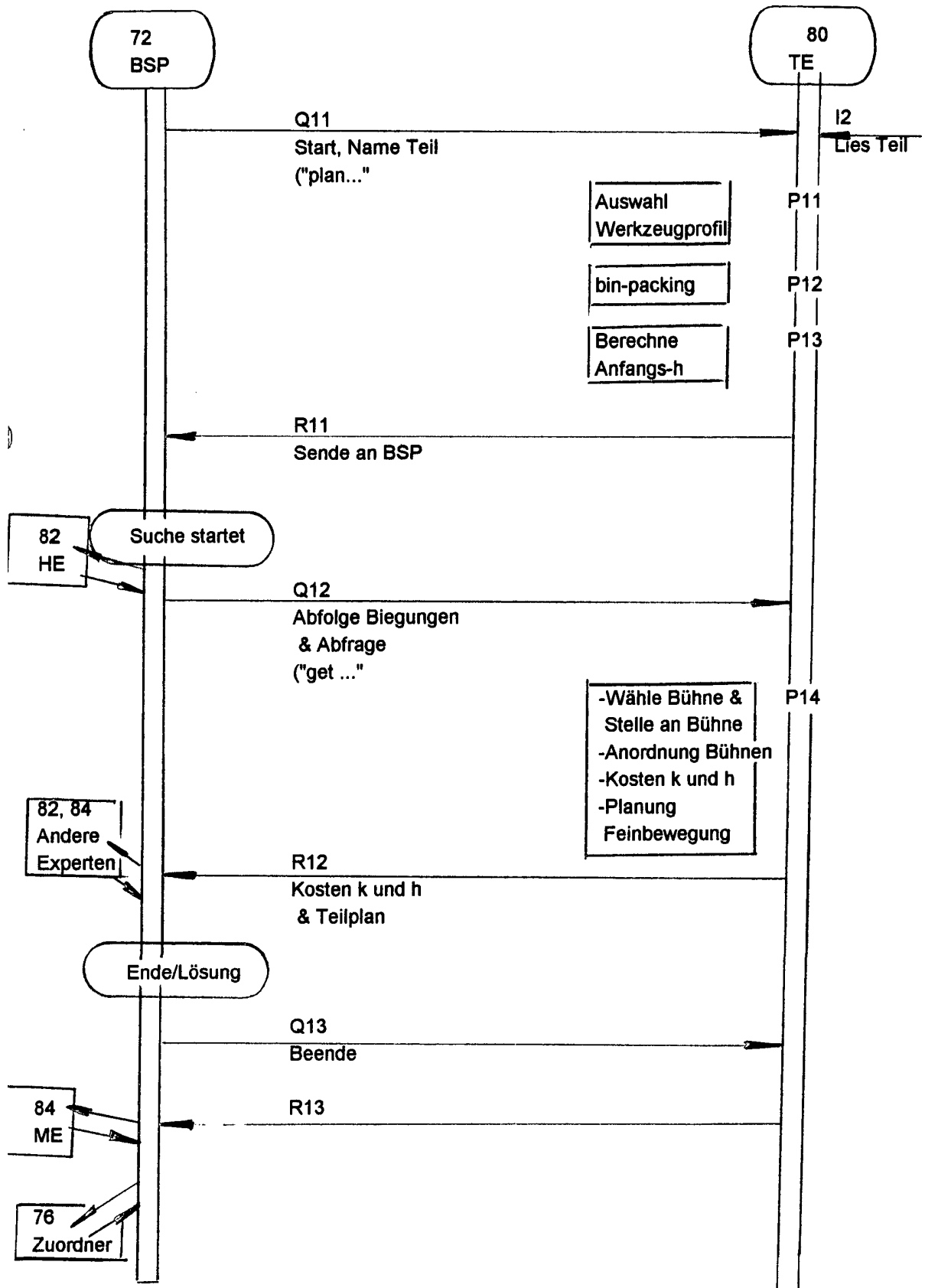


FIG. 30

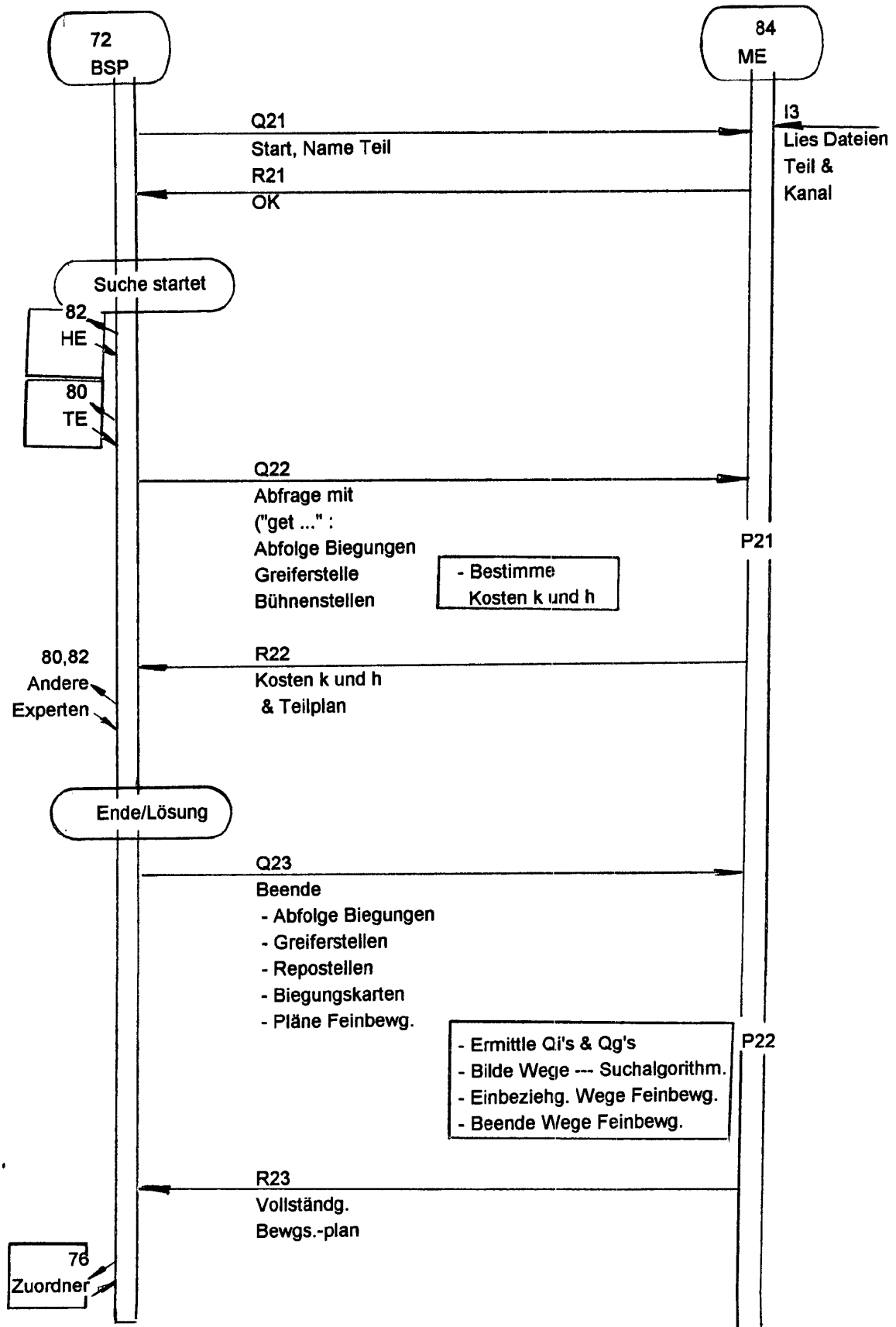


FIG. 31

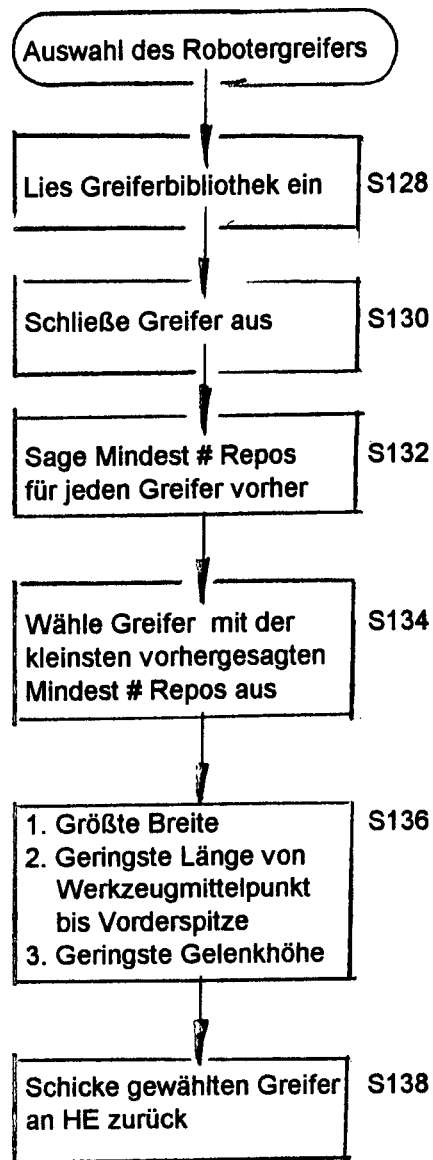


FIG.32

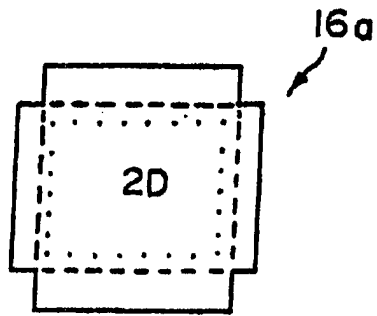


FIG. 33A

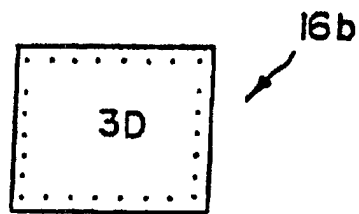


FIG. 33B

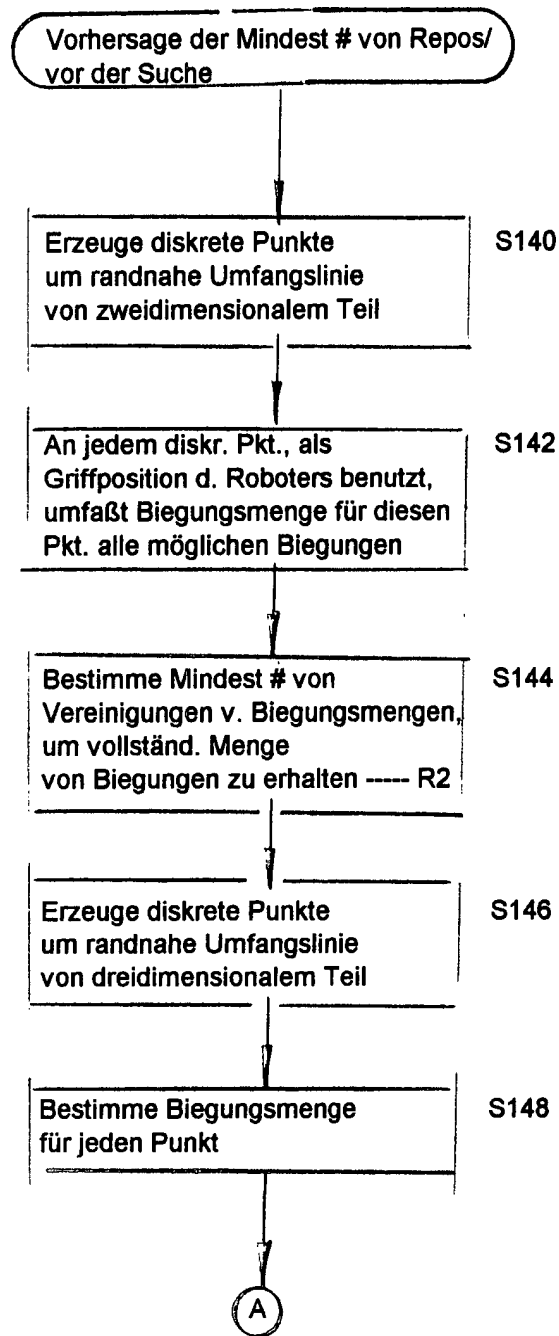


FIG.34A

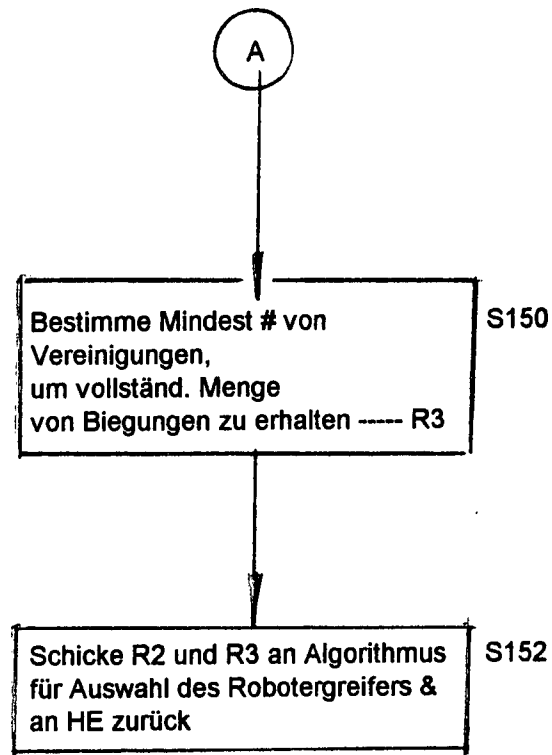


FIG.34B

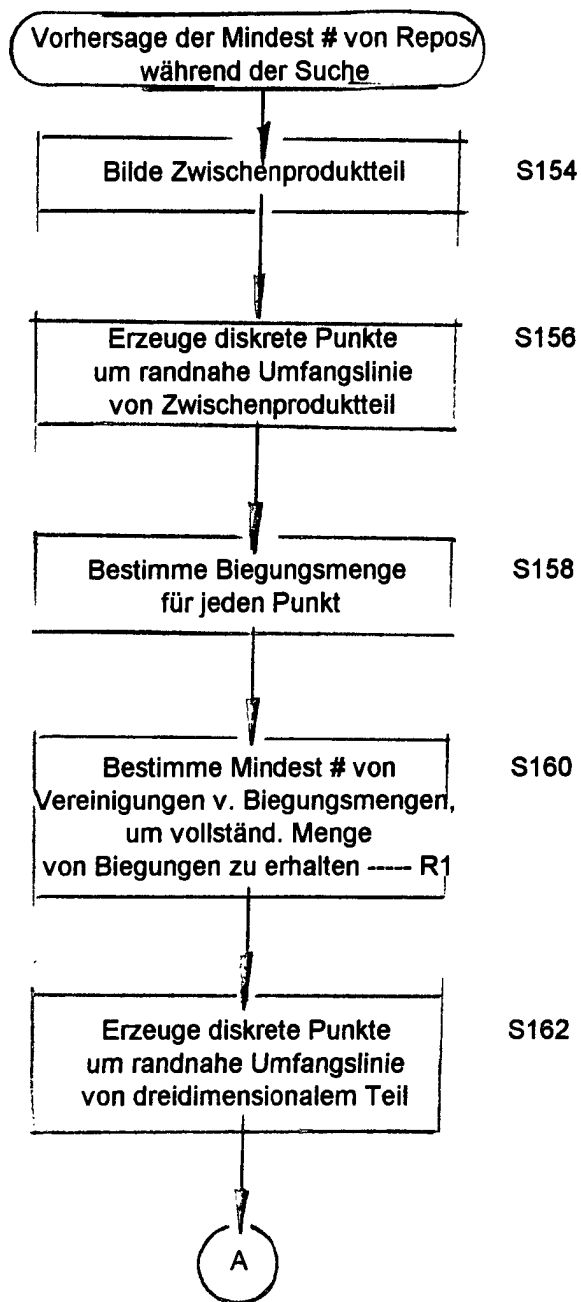


FIG. 35A

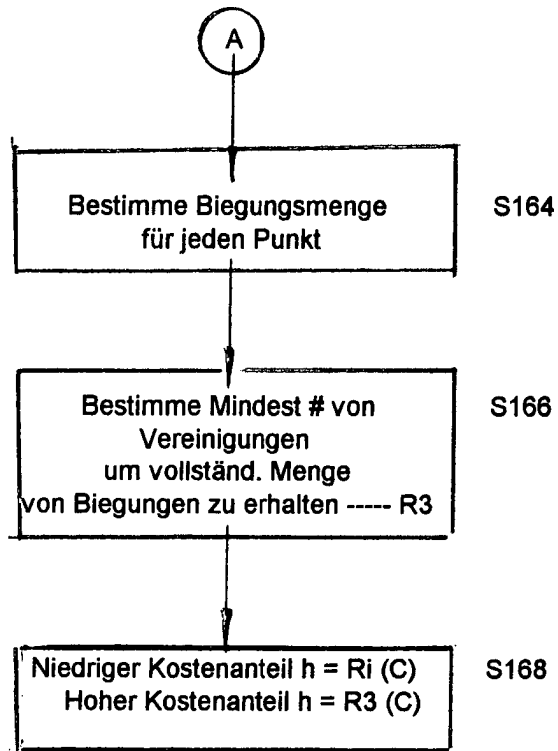


FIG. 35B

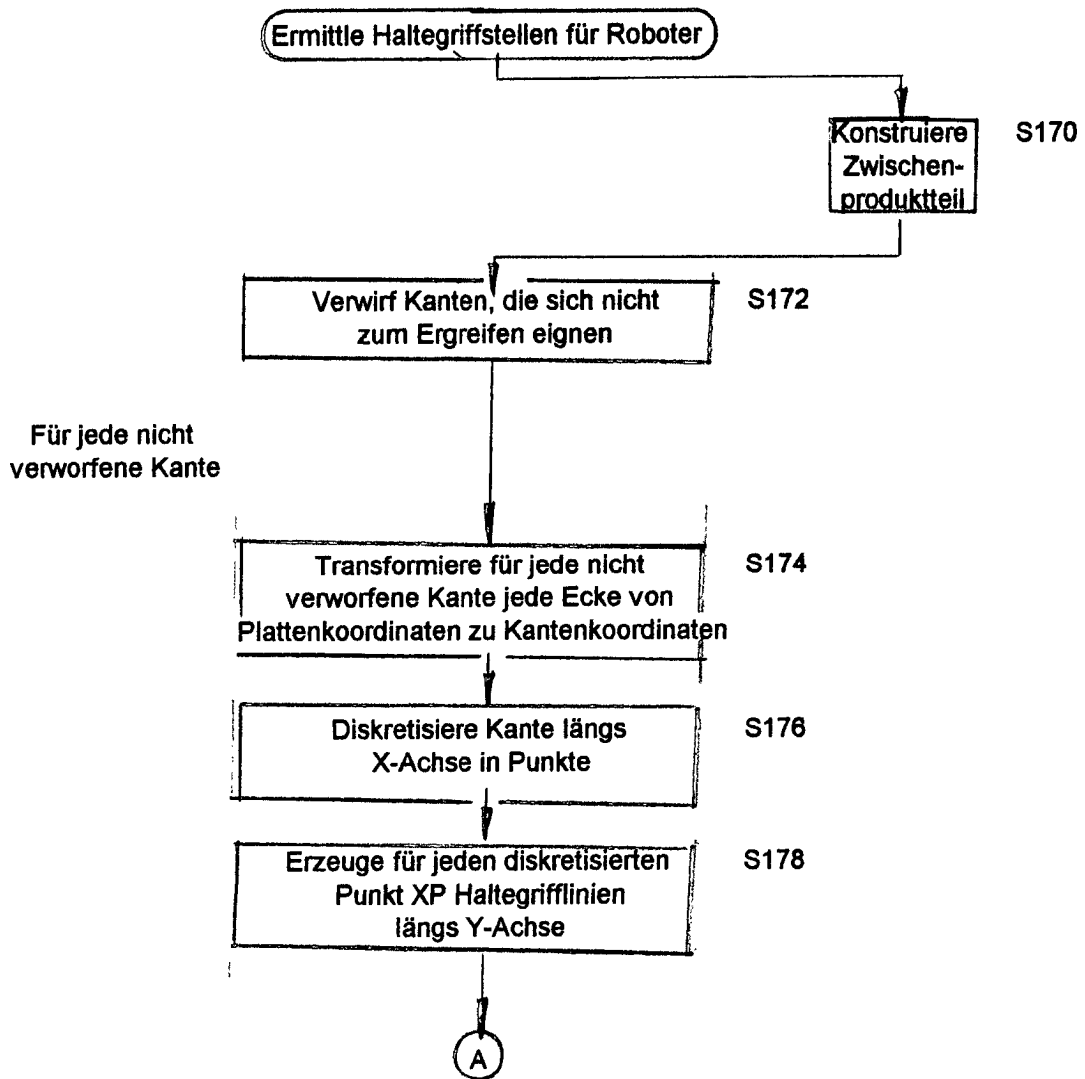


FIG. 36A

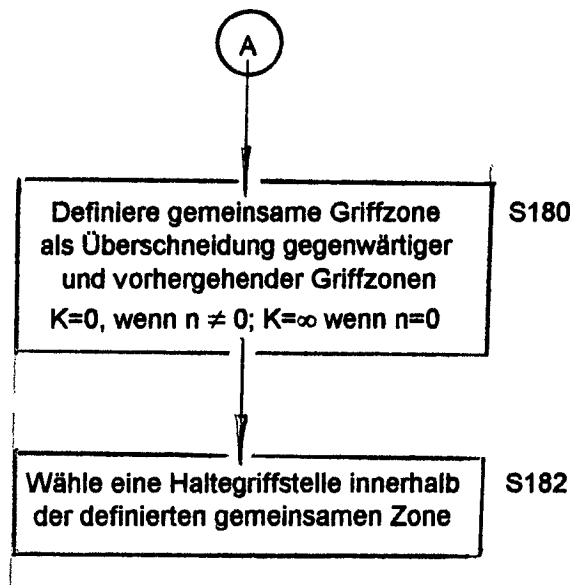


FIG.36B

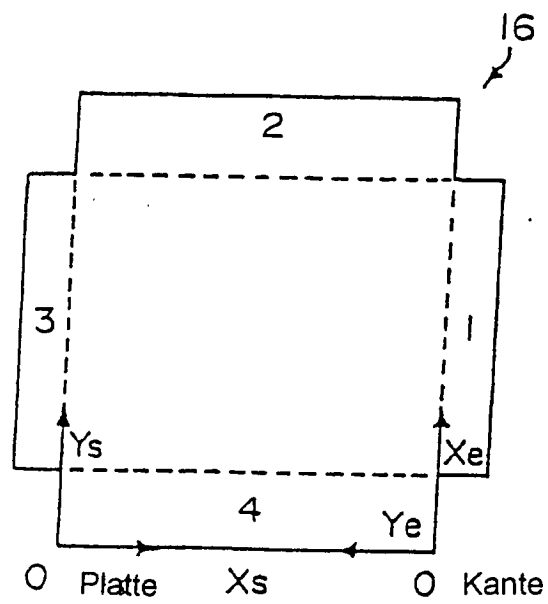


FIG. 37

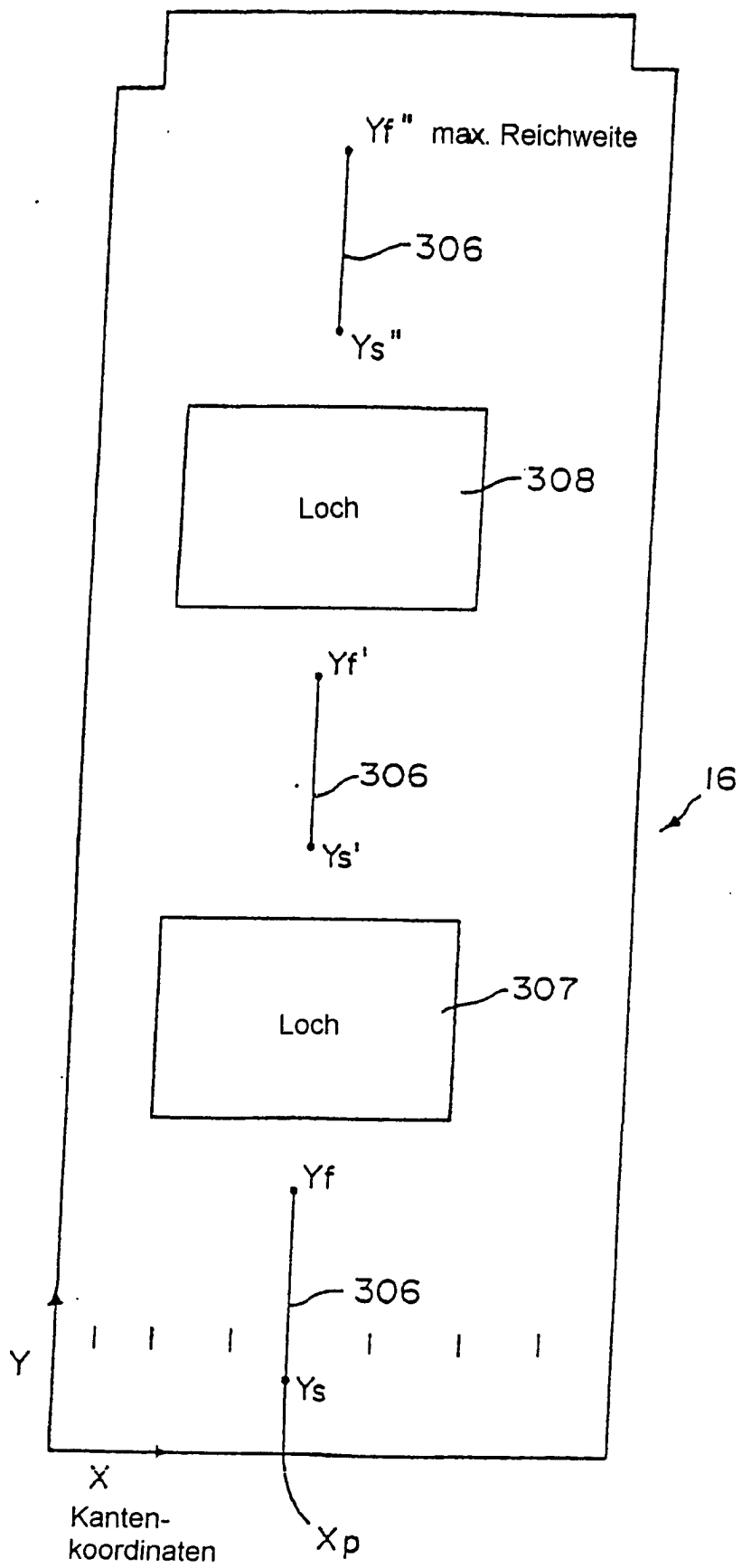


FIG. 38

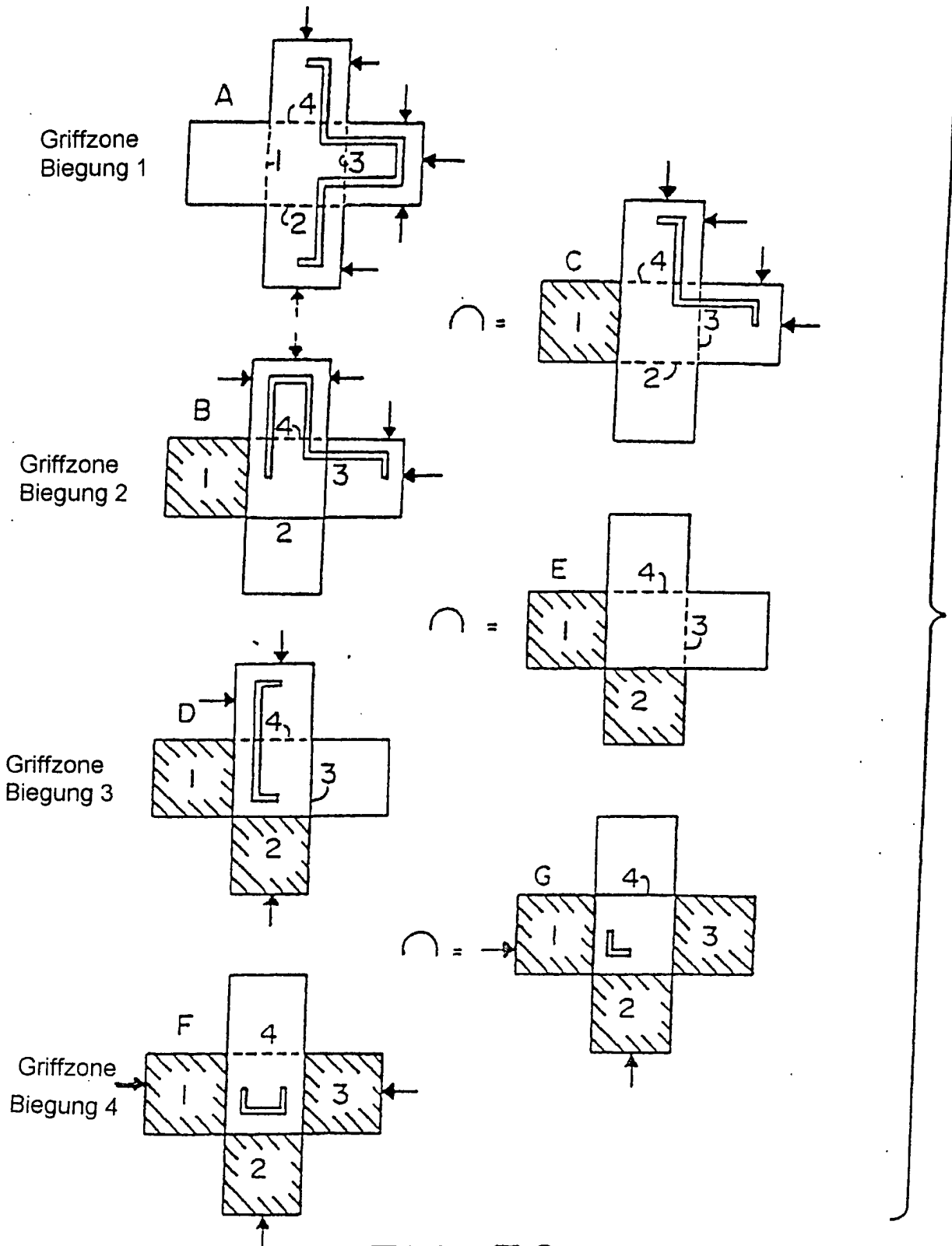


FIG. 39

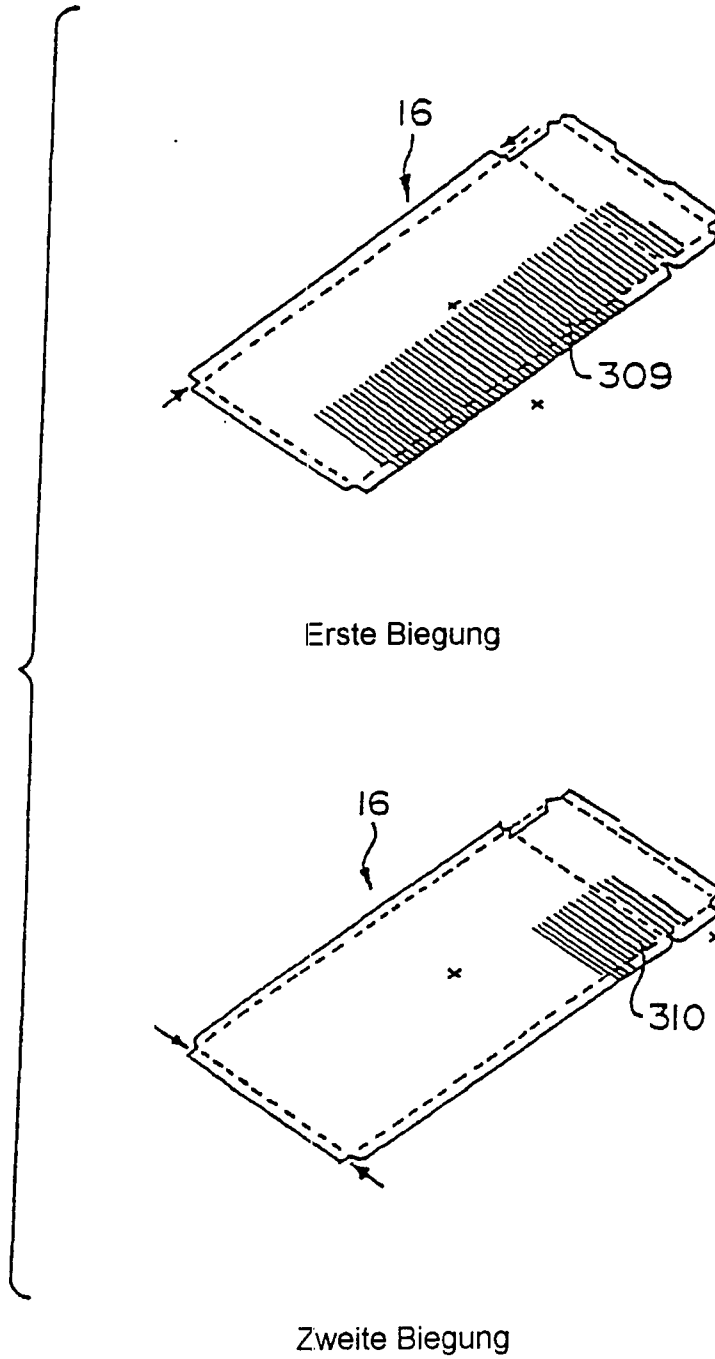


FIG. 40

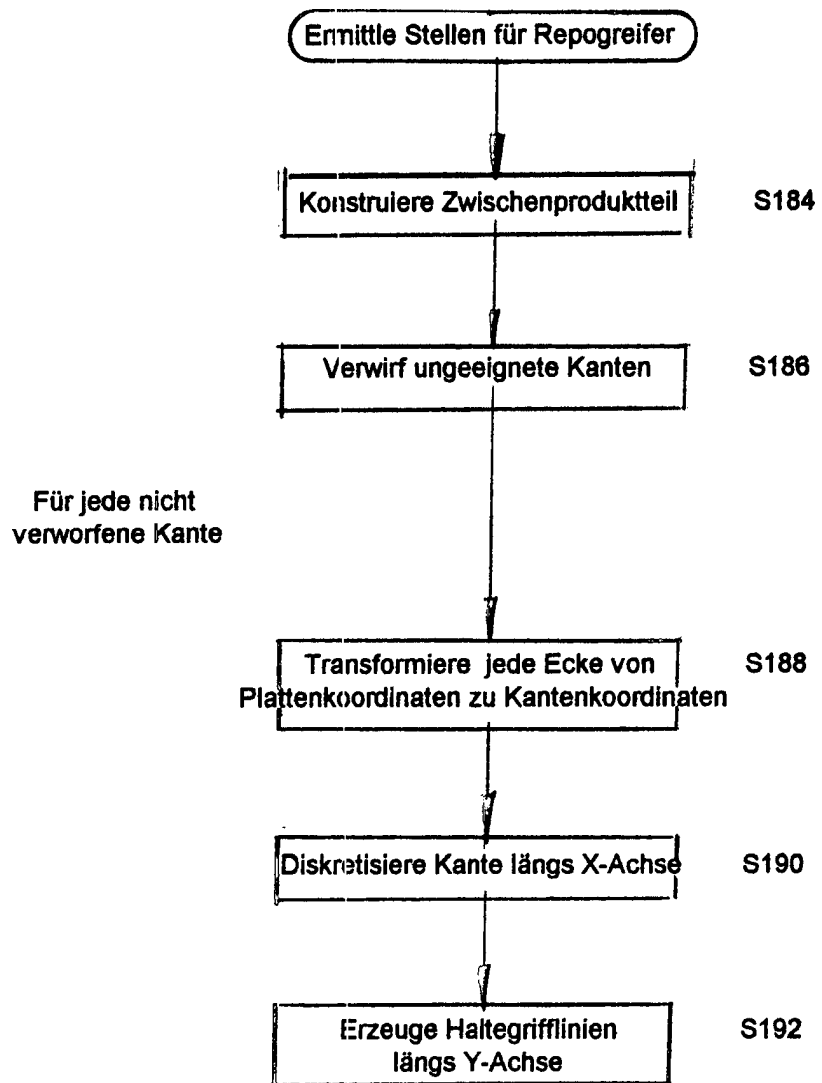


FIG. 41

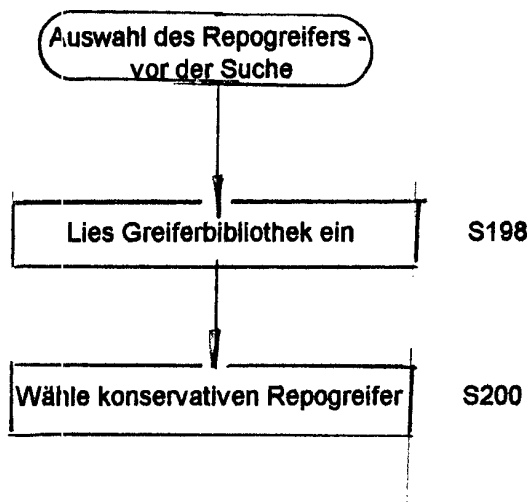


FIG. 42

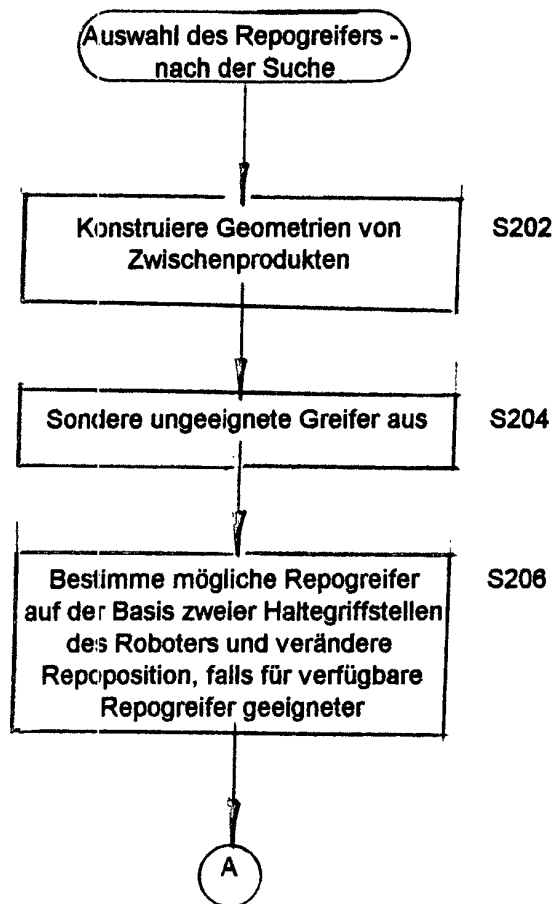


FIG. 43A

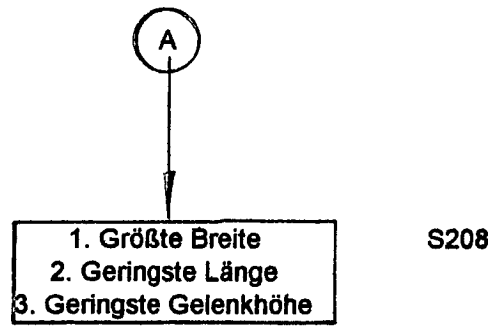


FIG. 43B

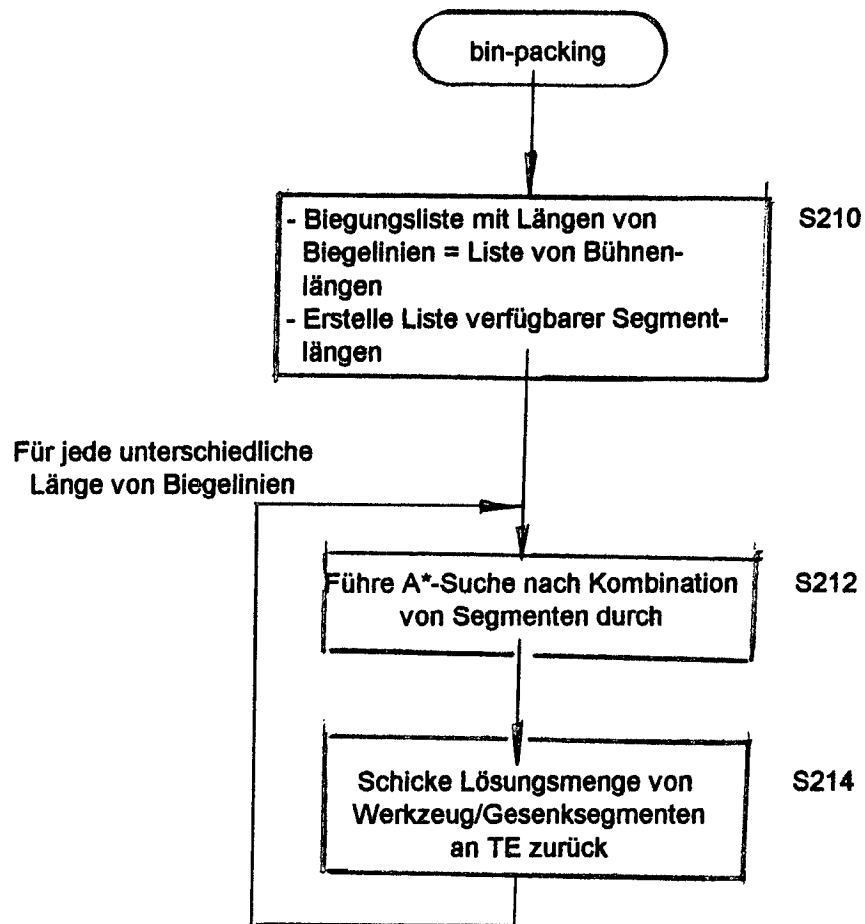


FIG. 44

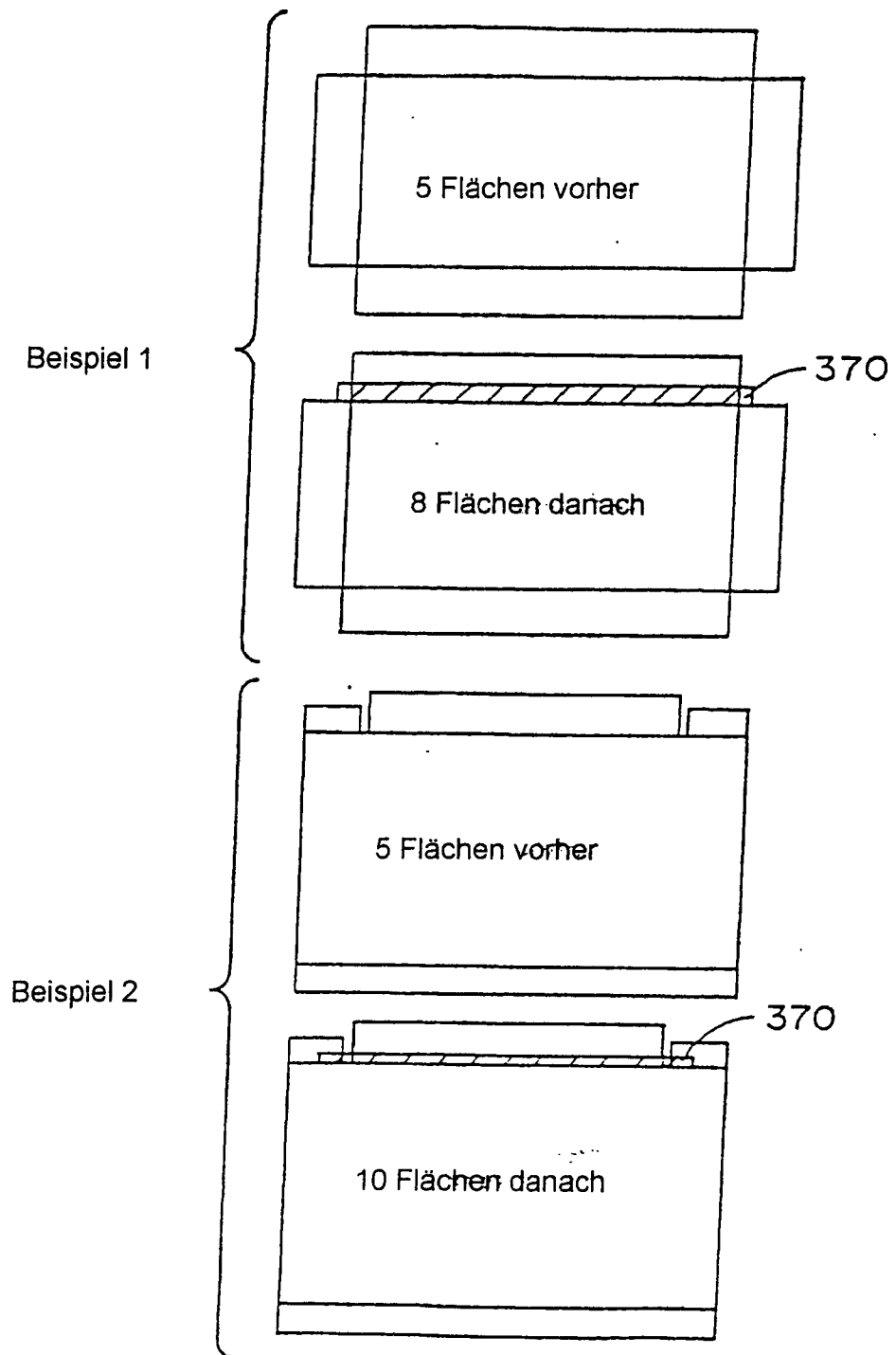


FIG. 45

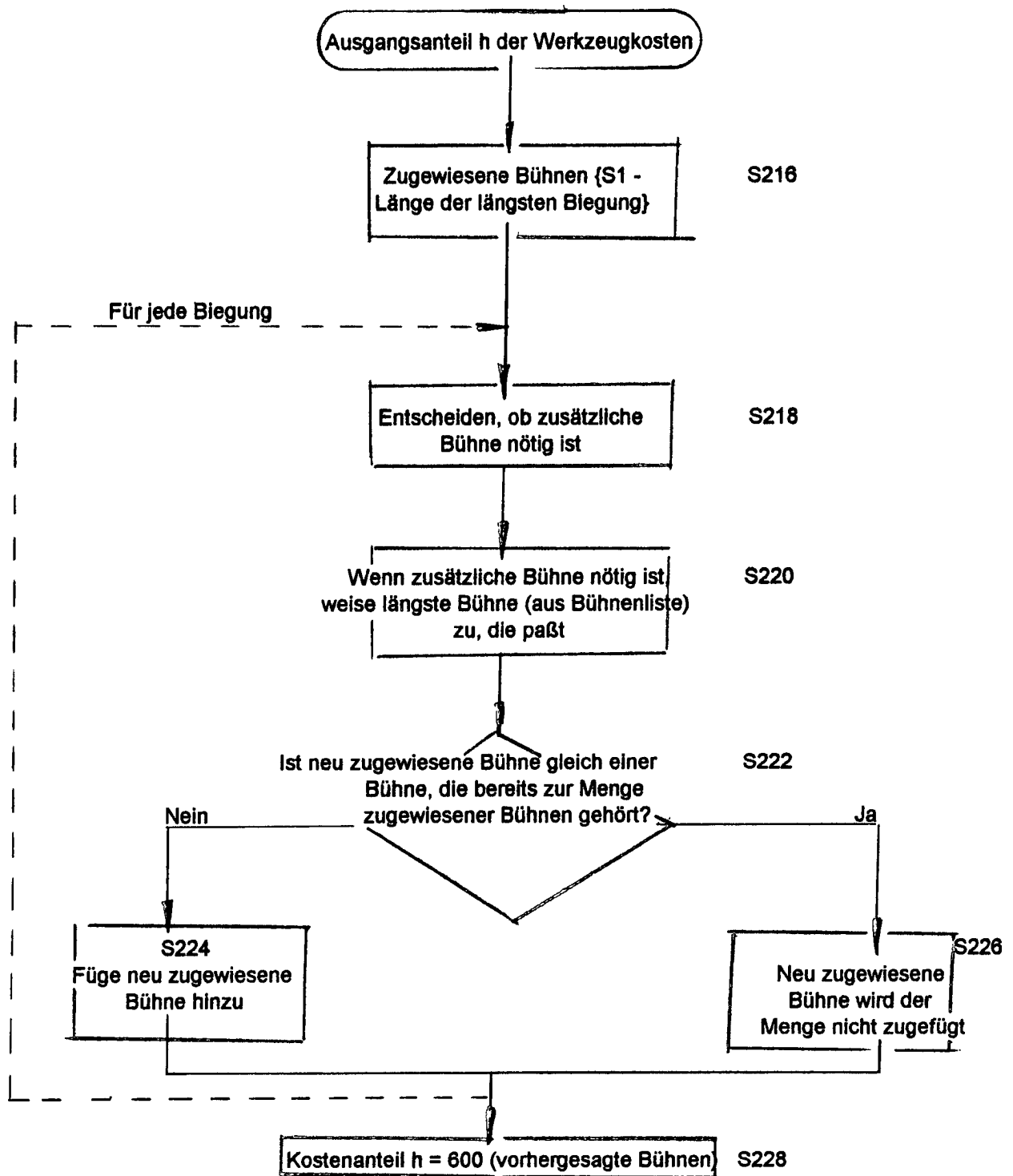


FIG. 46

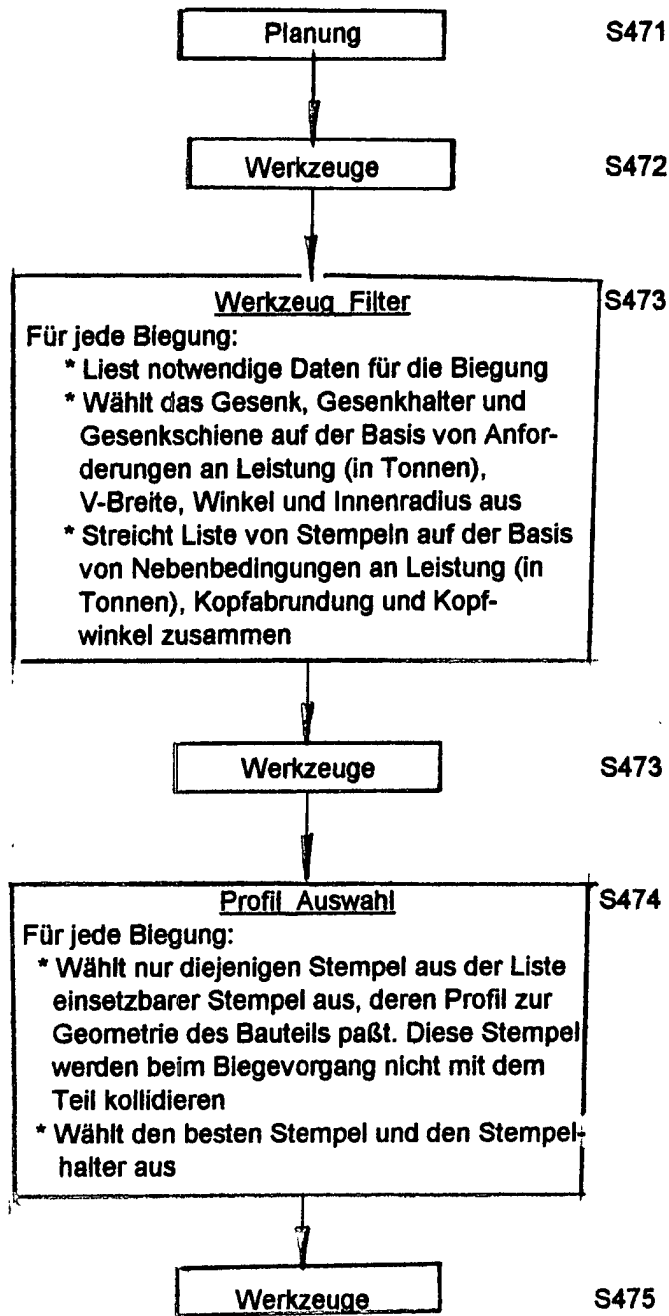


FIG. 47A

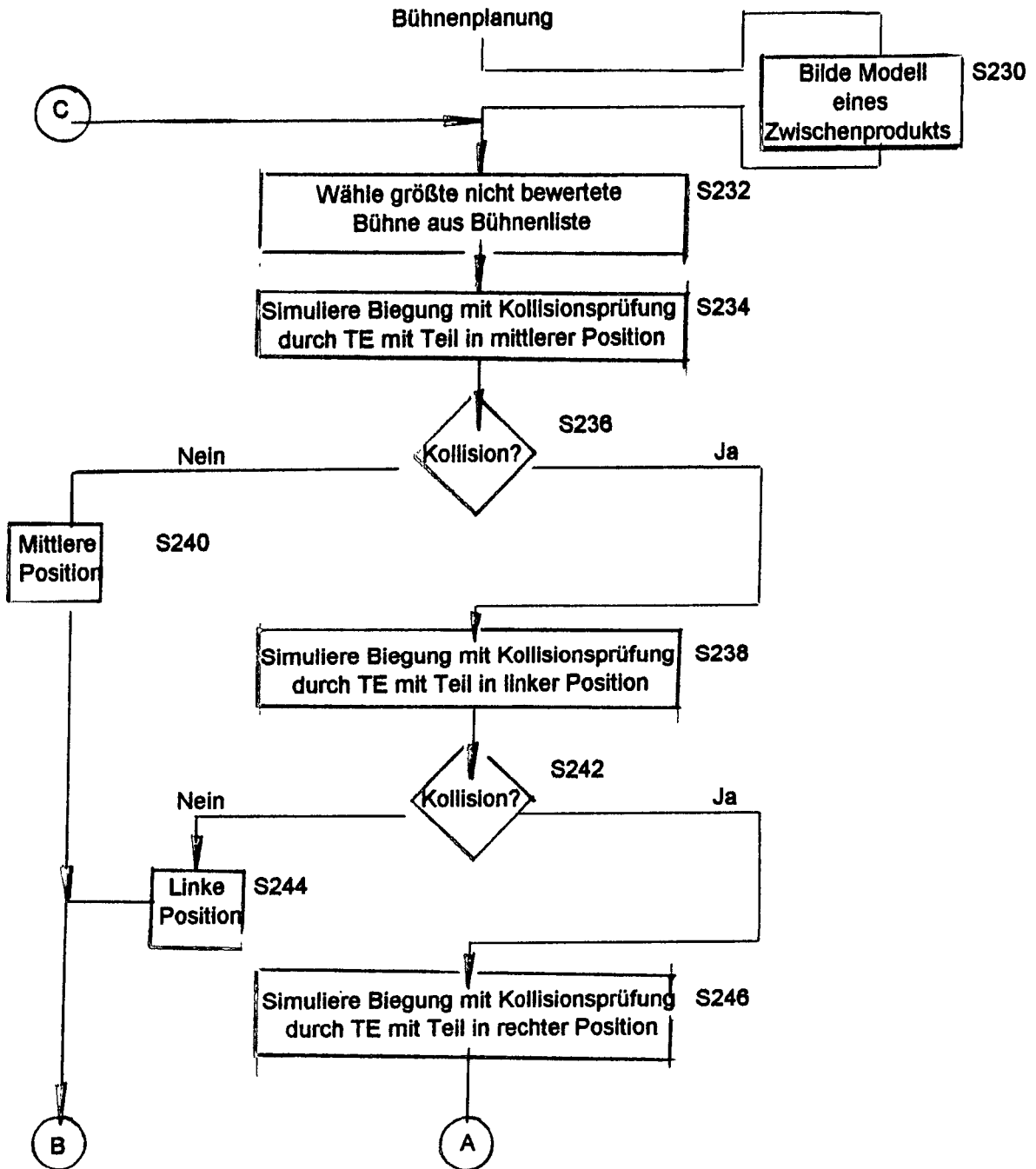


FIG. 47B

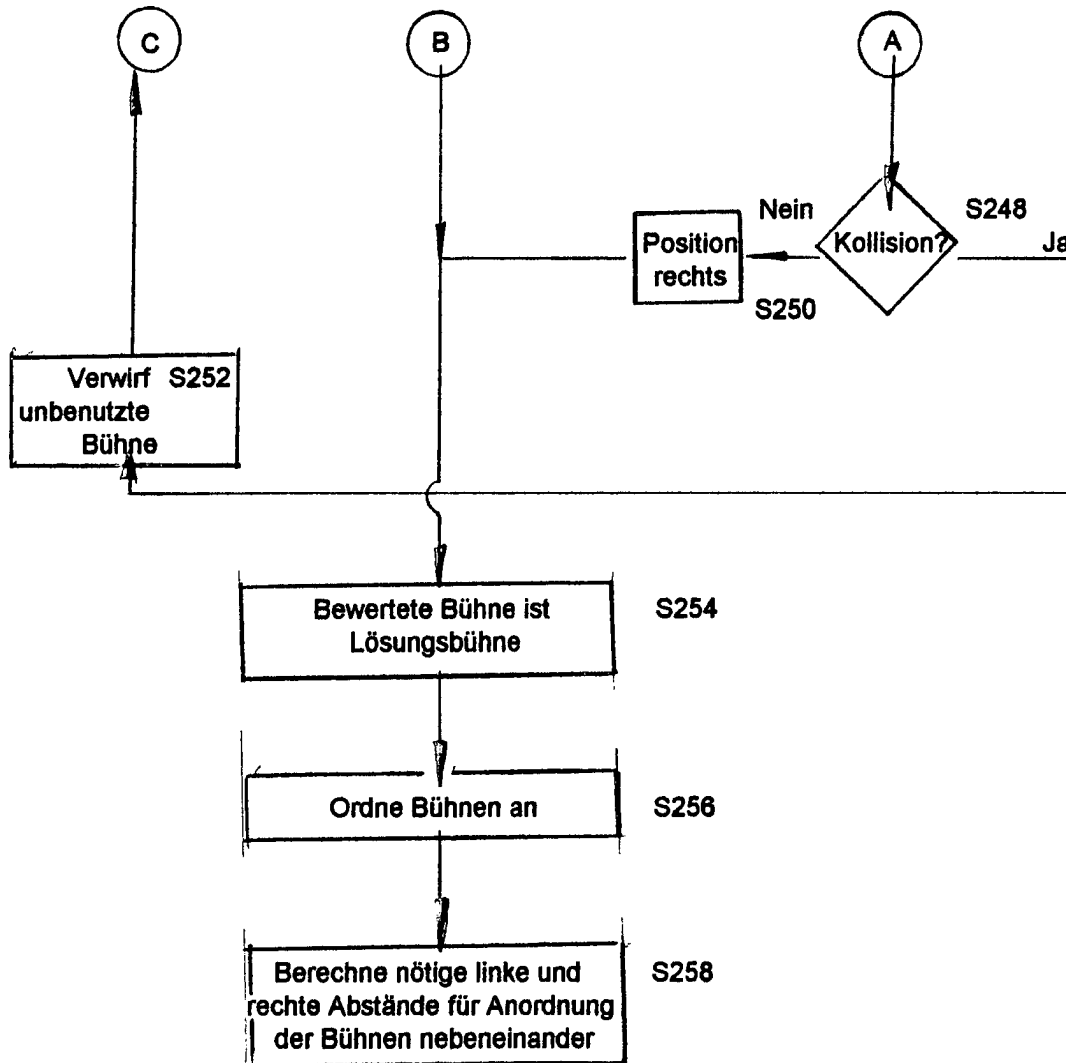


FIG. 47C

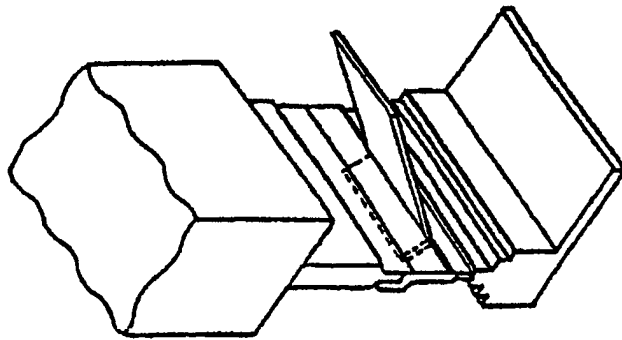


FIG. 48A

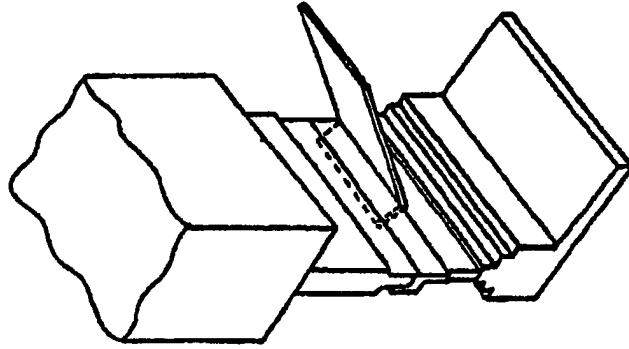


FIG. 48B

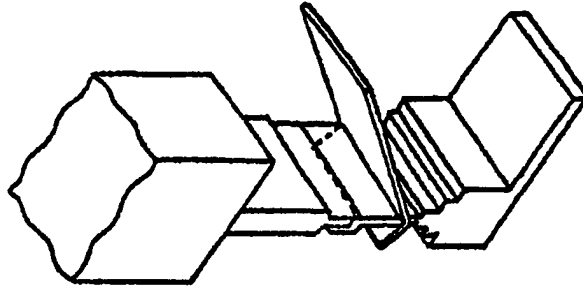


FIG. 48C

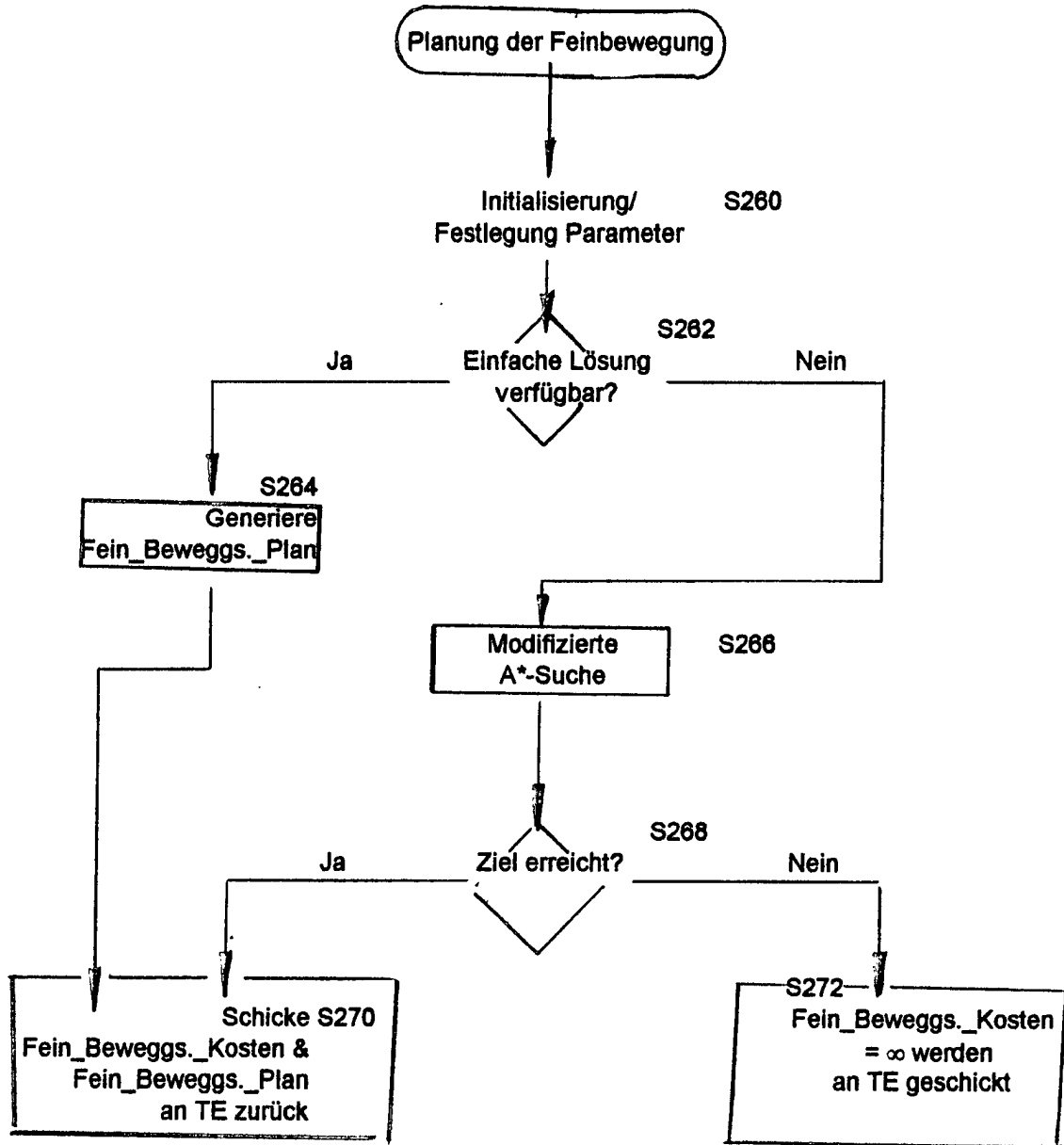


FIG. 49

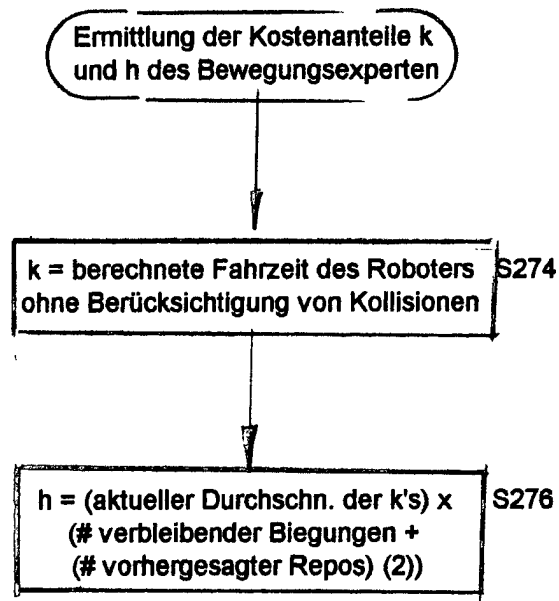


FIG. 50

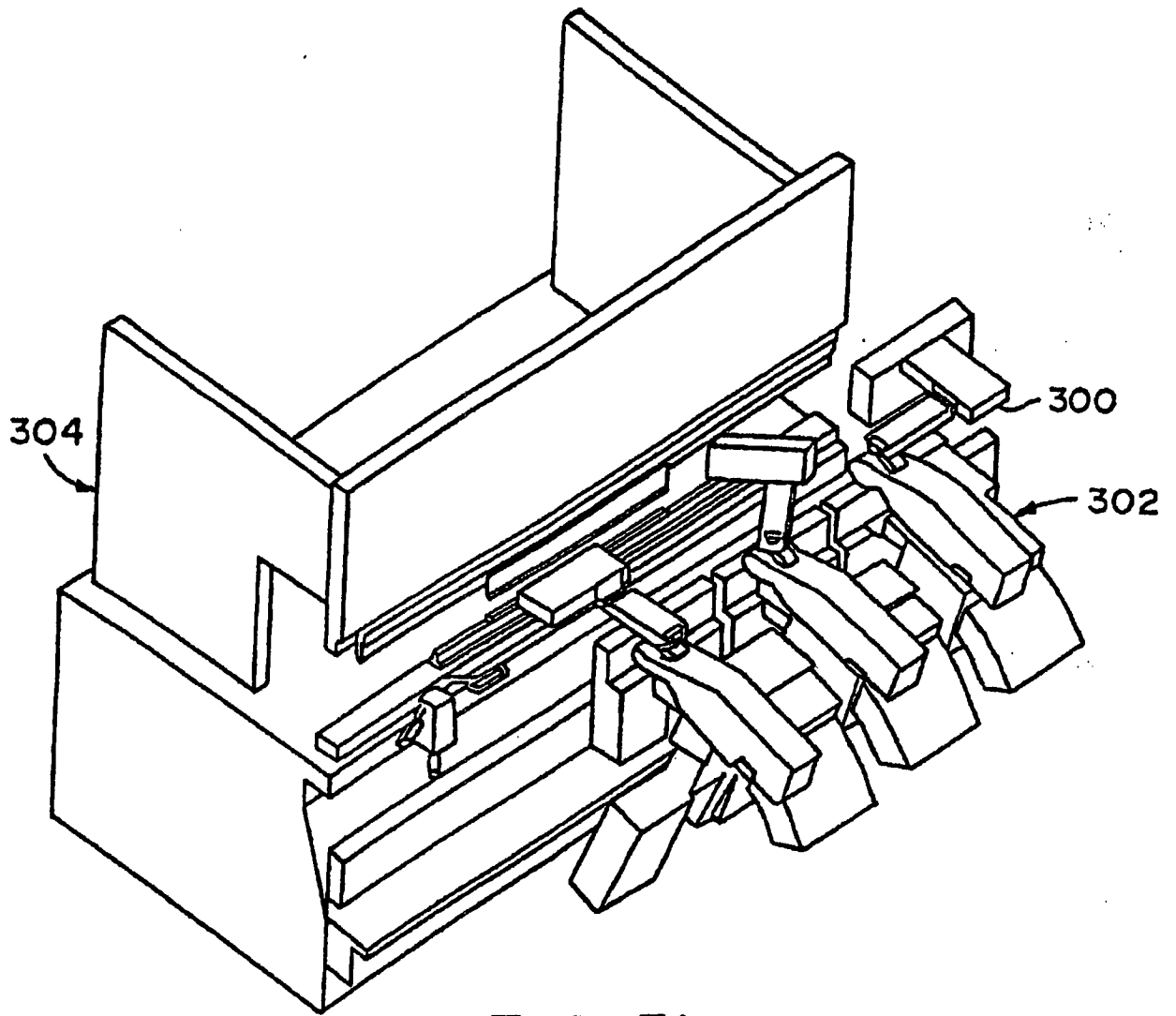


FIG. 51

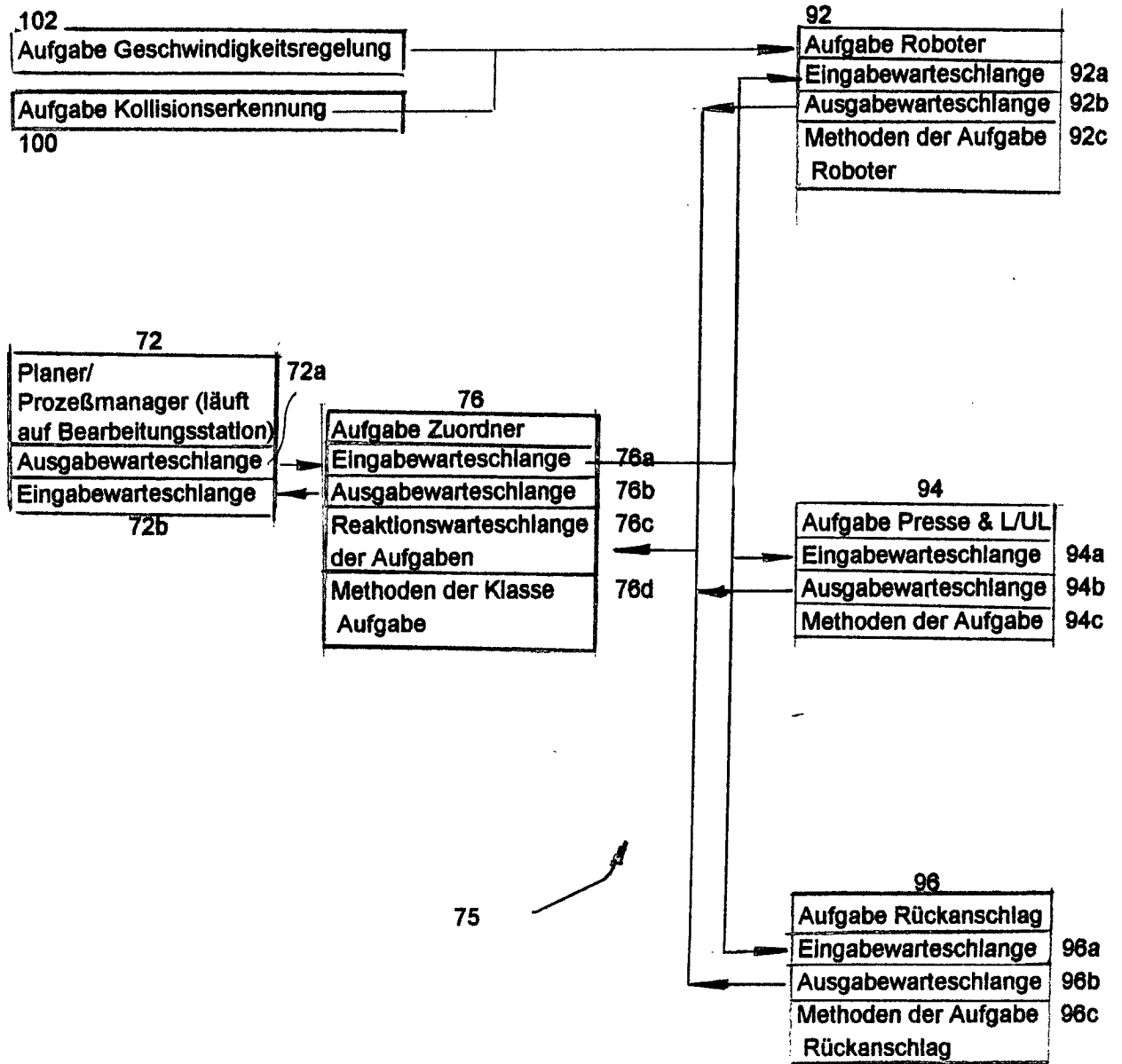


FIG. 52

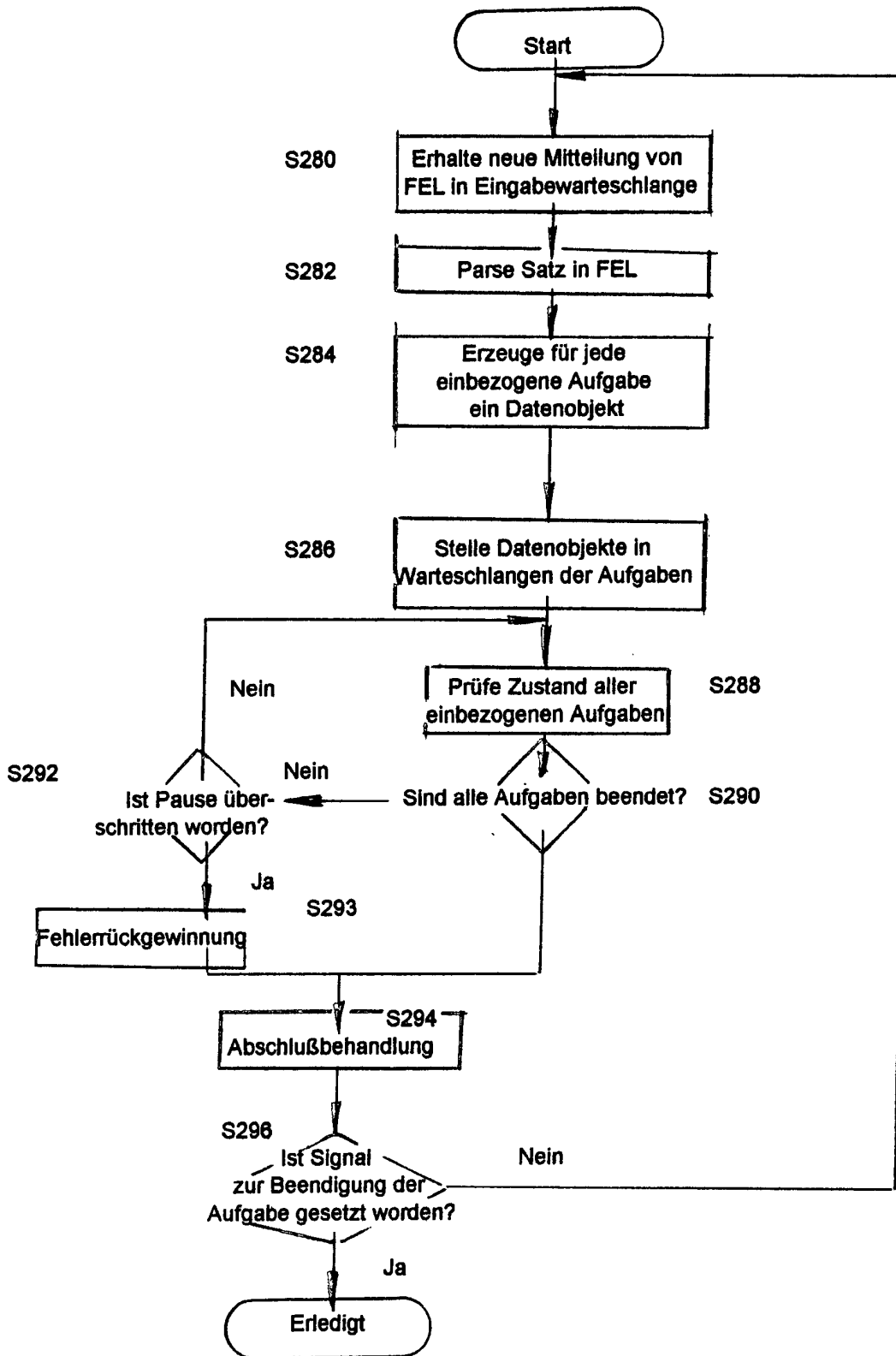


FIG. 53

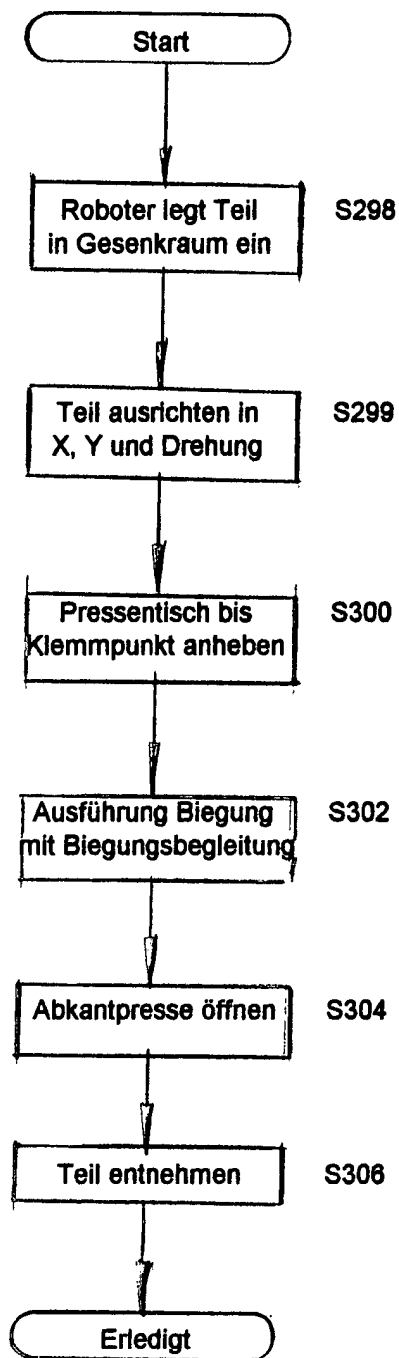


FIG. 54

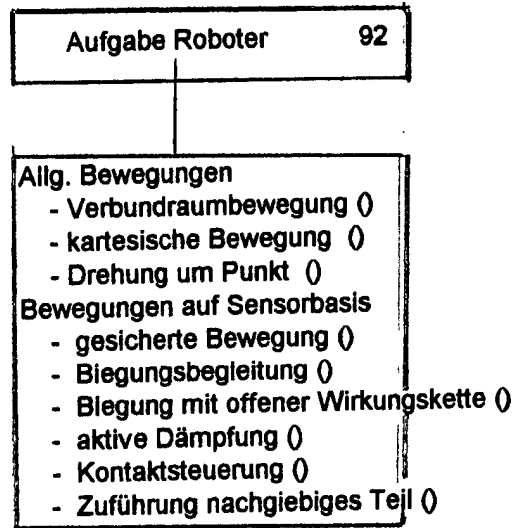


FIG. 55

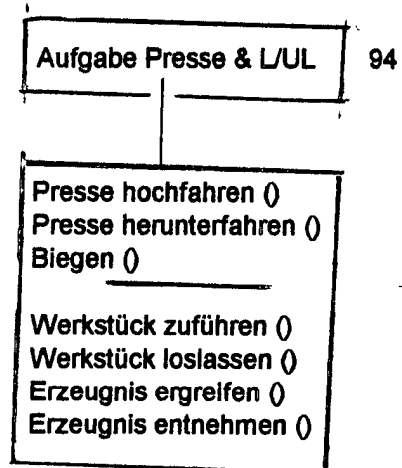


FIG. 56

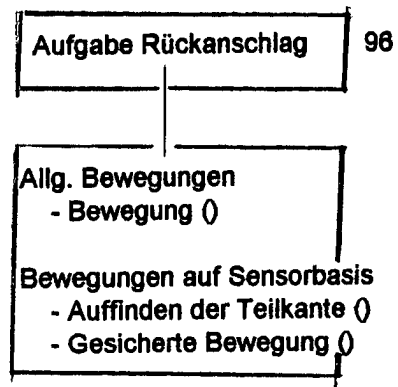


FIG. 57

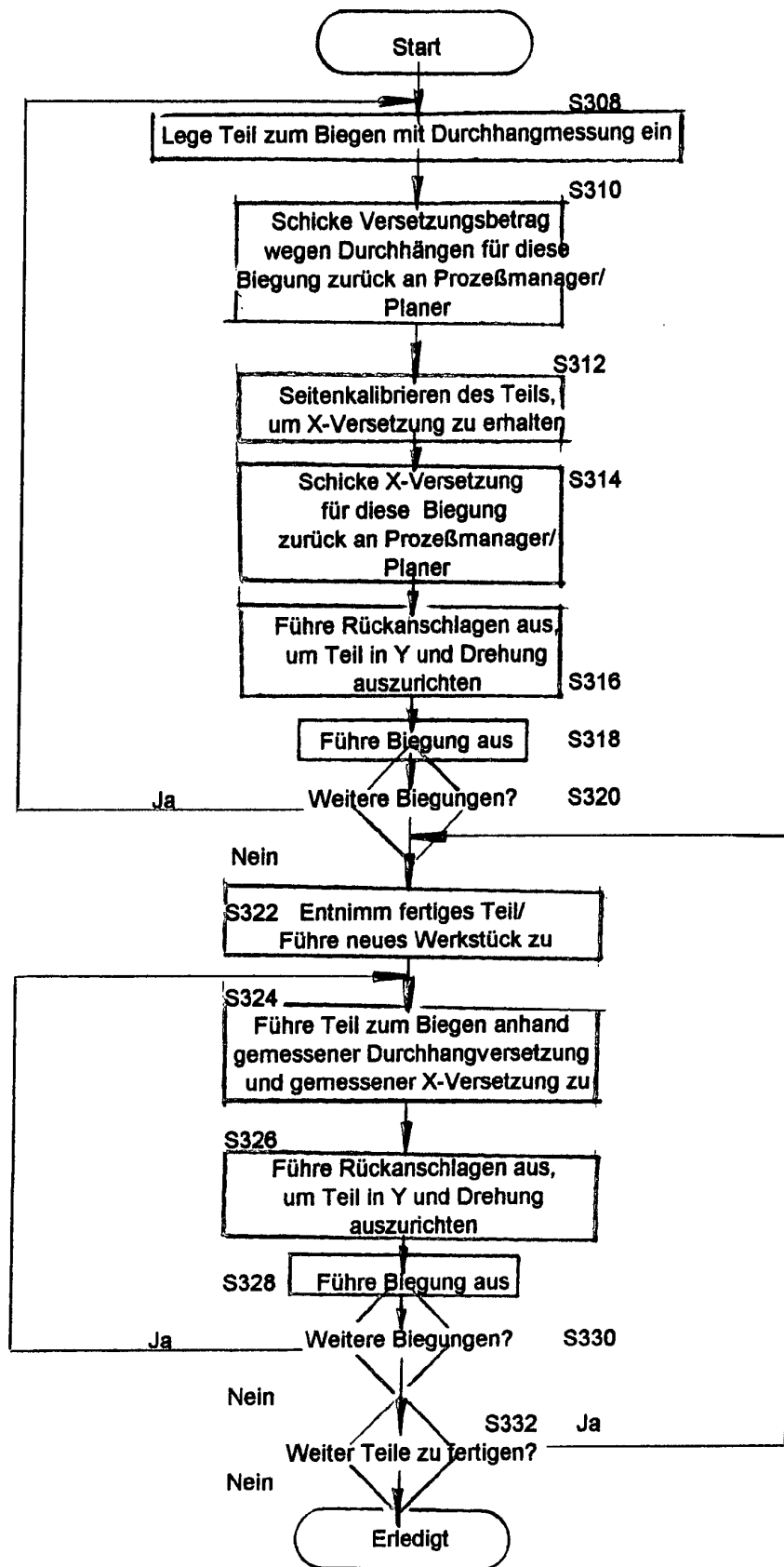


FIG. 58