



(19)
Bundesrepublik Deutschland
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 699 29 481 T2** 2006.09.28

(12) **Übersetzung der europäischen Patentschrift**

(97) **EP 1 433 431 B1**

(21) Deutsches Aktenzeichen: **699 29 481.9**

(96) Europäisches Aktenzeichen: **04 075 931.8**

(96) Europäischer Anmeldetag: **22.11.1999**

(97) Erstveröffentlichung durch das EPA: **30.06.2004**

(97) Veröffentlichungstag

der Patenterteilung beim EPA: **18.01.2006**

(47) Veröffentlichungstag im Patentblatt: **28.09.2006**

(51) Int Cl.⁸: **A61B 19/00** (2006.01)
B25J 9/10 (2006.01)

(30) Unionspriorität:

109608 P **23.11.1998** **US**

(73) Patentinhaber:

Microdexterity Systems Inc., Memphis, Tenn., US

(74) Vertreter:

derzeit kein Vertreter bestellt

(84) Benannte Vertragsstaaten:

DE, FR

(72) Erfinder:

Charles, Steve T., Germantown, TN 38138, US;
Stuart, Michael J., Corrales, NM 87048, US;
Stoughton, Robert, Albuquerque, NM 87120, US;
Bronisz, Larry, Los Alamos, NM 87544, US

(54) Bezeichnung: **Chirurgischer Manipulator**

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] Diese Erfindung betrifft eine Handhabungsvorrichtung und insbesondere eine Handhabungsvorrichtung, die zur Verwendung bei medizinischen Vorgängen einschließlich minimalinvasiver chirurgischer Operationen geeignet ist.

2. Beschreibung des technischen Zusammenhangs

[0002] Bei der herkömmlichen offenen Chirurgie im Inneren des menschlichen Körpers muss der Chirurg einen hinreichend großen Einschnitt durchführen, um den Zugriff auf den interessierenden Bereich vornehmen zu können und um eine direkte Sichtlinie auf den Bereich zu ermöglichen. Einhergehend mit der Entwicklung von Endoskopen, chirurgischen Werkzeugen, die von außerhalb des Körpers des Patienten her gehandhabt werden können, und verschiedener Abbildungstechniken wie z.B. Ultraschallabbildung, Computertomographie und Magnetresonanzzabbildung, ist es jedoch möglich geworden, chirurgische Eingriffe durch sehr kleine Einschnitte oder Körperöffnungen hindurch auszuführen, deren Größe für die traditionelle offene Chirurgie ungeeignet wäre. Derartige chirurgische Eingriffe werden generell als minimalinvasive Chirurgie bezeichnet. Vorrichtungen, die bei dieser Art von Chirurgie verwendet werden können, sind beschrieben in FR-A-2734749 und EP-A-0595291.

[0003] Eine typische chirurgische Vorrichtung zur Verwendung bei der minimalinvasiven Chirurgie weist ein längliches Rohr mit einem ersten Ende, das über einen Einschnitt oder eine Öffnung in den Körper des Patienten einführbar ist, und mit einem zweiten Ende auf, das sich aus dem Körper des Patienten heraus erstreckt und das vom Chirurgen ergriffen wird. Das erste Ende ist mit einem chirurgischen Werkzeug bestückt, z.B. einer Klammerungsvorrichtung, einem Forceps, einer Schere, einem Nadelhalter oder einem Skalpell, während das zweite Ende mit einem Griff oder einem anderen Teil versehen ist, der vom Chirurgen ergriffen wird und der durch die Mitte des Rohrs mechanisch mit dem Werkzeug verbunden ist. Der Chirurg kann durch Handhaben des Griffs das Werkzeug betätigen, und er kann die Position des Werkzeugs verändern, indem er die Ausrichtung des Rohrs relativ zum Körper des Patienten verändert.

[0004] Die minimalinvasive Chirurgie ist in den Fällen, in denen sie anwendbar ist, gegenüber dem Patienten sehr vorteilhaft, da sie ein geringeres Trauma verursacht als die offene Chirurgie. Oft führt sie auch zu einer Senkung der Behandlungskosten und zu einer Verkürzung der Krankenhausaufenthalte. Die herkömmlichen minimalinvasiven chirurgischen Vorrichtungen sind jedoch mit mehreren Nachteilen behaftet. Ein Nachteil besteht in einer leichten Ermüd-

barkeit des Chirurgen aufgrund des Erfordernisses, die minimalinvasive chirurgische Vorrichtung während ihrer Verwendung manuell zu halten. Ein weiterer Nachteil besteht darin, dass die minimalinvasiven chirurgischen Vorrichtungen dem Chirurgen abverlangen, seine Hände in einer sehr unbequemen Position zu halten. Zudem können herkömmliche minimalinvasive chirurgische Vorrichtungen eine winklige Vergrößerung von Fehlbewegungen verursachen. Folglich kann der Chirurg eine Operation bei Verwendung minimalinvasiver chirurgischer Vorrichtungen nur mit beträchtlich weniger Handhabungspräzision und Präzision durchführen als bei Durchführung einer Operation mittels herkömmlicher Techniken, bei denen der Chirurg das Werkzeug direkt erfasst. Deshalb findet die minimalinvasive Chirurgie nur bei denjenigen chirurgischen Eingriffen Anwendung, die ein geringes Maß an Handhabungspräzision vom Chirurgen verlangen.

Überblick über die Erfindung

[0005] Die vorliegende Erfindung, die in Anspruch 1 definiert ist, schafft eine Handhabungsvorrichtung, die für die Chirurgie und insbesondere für die minimalinvasive Chirurgie geeignet ist.

[0006] Die vorliegende Erfindung schafft ferner eine Handhabungsvorrichtung, die für diagnostische oder therapeutische medizinische Vorgänge verwendet werden kann.

[0007] Die vorliegende Erfindung schafft ferner eine Handhabungsvorrichtung, bei der die Ermüdbarkeit des Chirurgen während einer chirurgischen Operation reduziert werden kann, während seine Handhabungspräzision und Präzision verbessert sind.

[0008] Die vorliegende Erfindung schafft ferner eine Handhabungsvorrichtung mit hoher mechanischer Bandbreite.

[0009] Die vorliegende Erfindung schafft zudem eine Handhabungsvorrichtung, die einen kleinen Durchmesser hat, so dass sie in einen kleinen Einschnitt oder eine kleine Körperöffnung des Patienten eingeführt werden kann.

[0010] Mit der vorliegenden Erfindung wird ferner ein Verfahren erstellt, mit dem verschiedene medizinische Vorgänge einschließlich chirurgischer, diagnostischer und therapeutischer Vorgänge unter Verwendung eines derartigen Manipulators durchgeführt werden können.

[0011] Gemäß einer Ausgestaltung der vorliegenden Erfindung weist eine Handhabungsvorrichtung erste und zweite unabhängig bewegbare Arme und ein medizinisches Werkzeug auf, das schwenkbar von beiden Armen gehalten ist. Die Arme sind derart

bewegbar, dass sie das Werkzeug mit mindestens drei Freiheitsgraden gehandhabt werden können. Beispielsweise können gemäß einer bevorzugten Ausführungsform die Arme das Werkzeug mit fünf Freiheitsgraden handhaben.

[0012] Die Arme handhaben das Werkzeug mittels verschiedener Typen von Bewegungen der Arme, wie z.B. durch Drehung der Arme als Ganzes um entsprechende Achsen, oder durch Translation oder Schwenkung von Teilen jedes Arms relativ zu jedem anderen Teil, um ein Ausfahren oder Einfahren der Arme oder eine Veränderung der Form der Arme zu bewirken.

[0013] Die Handhabungsvorrichtung kann ein Gelenk aufweisen, das in der Lage ist, das Werkzeug relativ zu den Armen zu handhaben, um das Werkzeug mit zusätzlichen Freiheitsgraden zu versehen. Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform sind das Gelenk und das Werkzeug von den anderen Teilen der Handhabungsvorrichtung abnehmbar, um ein leichtes Sterilisieren und Ersetzen des Werkzeugs zu erlauben.

[0014] Eine Handhabungsvorrichtung gemäß der vorliegenden Erfindung kann in verschiedenen Modi betätigt werden, einschließlich eines Master-Slave-Modus, in dem ihre Bewegungen von einem Master-Controller gesteuert werden, eines robotischen Modus, oder eines halbrobotischen Modus, in dem einige Operationen robotisch erfolgen und andere Operationen von einem Master-Controller gesteuert werden.

[0015] Eine Handhabungsvorrichtung gemäß der vorliegenden Erfindung bietet zahlreiche Vorteile gegenüber herkömmlichen minimalinvasiven chirurgischen Vorrichtungen. Erstens braucht der Chirurg während der mit der Handhabungsvorrichtung durchgeführten Operation keinen Teil der Handhabungsvorrichtung zu stützen, so dass die Handhabungsvorrichtung für den Chirurgen insbesondere während langer Operationen weniger ermüdend ist. Die Handhabungsvorrichtung kann ferner eine medizinische Vorrichtung in einer Stellung halten, die mit der Hand nur schwer zu erzielen wäre. Bei der herkömmlichen minimalinvasiven Chirurgie muss die Körperwandung, durch die hindurch ein minimalinvasives chirurgisches Werkzeug eingeführt wird, typischerweise im Wesentlichen eben ausgerichtet sein und nach oben weisen. Bei einer gemäß der vorliegenden Erfindung ausgebildeten Handhabungsvorrichtung hingegen unterliegt die Körperwandung, durch die hindurch ein minimalinvasiver chirurgischer Eingriff durchgeführt werden soll, keinerlei Restriktionen. Beispielsweise kann die Körperwandung vertikal angeordnet sein oder nach unten weisen, falls der Patient auf einem Tisch platziert werden kann, der mit einer Öffnung versehen ist, durch welche die Handhabungsvorrich-

tung zwecks Zugriffs auf die Körperwandung hindurchtreten kann. Somit kann ein Patient in einer Weise positioniert werden, die für den Patienten und den Chirurgen bequem und für die Sicherheit und die Genesung des Patienten vorteilhaft ist.

[0016] Ein weiterer signifikanter Vorteil der Handhabungsvorrichtung gemäß der vorliegenden Erfindung besteht darin, dass die Vorrichtung die Handhabungspräzision des Benutzers verbessern kann. Während eine herkömmliche minimalinvasive chirurgische Vorrichtung unvermeidbar die Handhabungspräzision des Chirurgen gegenüber seiner Handhabungspräzision bei einer manuell vorgenommenen Operation reduziert, kann eine gemäß der vorliegenden Erfindung ausgebildete Handhabungsvorrichtung dem Chirurgen eine Handhabungspräzision vermitteln, die der mit der ununterstützten Hand erreichbaren Handhabungspräzision vergleichbar oder sogar überlegen ist.

[0017] Eine Handhabungsvorrichtung gemäß der vorliegenden Erfindung ist besonders geeignet für minimalinvasive chirurgische Operationen oder andere medizinische Vorgänge, die durch kleine Einschnitte in der Körperwandung eines Patienten hindurch vorgenommen werden. Eine Handhabungsvorrichtung gemäß der vorliegenden Erfindung kann jedoch neben dem Einsatz in der minimalinvasiven Chirurgie auch für andere medizinische Vorgänge verwendet werden, wie z.B. für externe Chirurgie oder die traditionelle offene Chirurgie, bei der große Einschnitte in die Körperwandung erfolgen. Die Vorrichtung ist auch für nichtmedizinische Anwendungsfälle verwendbar. Beispielsweise ist sie geeignet als Mehrzweck-Handhabungsvorrichtung zur Verwendung bei der Herstellung, Reparatur, Installation oder Halterung verschiedener Objekte.

Kurzbeschreibung der Zeichnungen

[0018] [Fig. 1](#) zeigt eine schematische Seitenansicht zur Veranschaulichung des Konzepts einer chirurgischen Handhabungsvorrichtung.

[0019] [Fig. 2](#) zeigt eine schematische Seitenansicht des unteren Endes der Werkzeughaltewelle gemäß [Fig. 1](#) zur Darstellung der Weise, in der die Werkzeughaltewelle innerhalb eines Konuswinkels gehandhabt werden kann.

[0020] [Fig. 3](#) zeigt eine schematische Darstellung einer Form einer Handhabungsvorrichtung gemäß der vorliegenden Erfindung, bei der Dreh-Betätigungsteile in Kombination mit Linear-Betätigungsteilen verwendet werden.

[0021] [Fig. 4](#) zeigt eine schematische Darstellung einer Modifikation der Anordnung gemäß [Fig. 3](#).

[0022] [Fig. 5](#) zeigt eine schematische Darstellung einer weiteren Form einer Handhabungsvorrichtung gemäß der vorliegenden Erfindung, bei der nur Linear-Betätigungsteile verwendet werden.

[0023] [Fig. 6](#) und [Fig. 7](#) zeigt schematische Darstellungen zweier weiterer Formen einer Handhabungsvorrichtung gemäß der vorliegenden Erfindung, bei der Dreh-Betätigungsteile in Kombination mit Linear-Betätigungsteilen verwendet werden.

[0024] [Fig. 8](#) zeigt eine schematische Darstellung einer weiteren Form einer Handhabungsvorrichtung gemäß der vorliegenden Erfindung.

[0025] [Fig. 9](#) zeigt eine schematische Seitenansicht einer Ausführungsform einer Handhabungsvorrichtung gemäß der vorliegenden Erfindung, welche die Geometrie gemäß [Fig. 7](#) aufweist.

[0026] [Fig. 10](#) zeigt eine isometrische Ansicht einer weiteren Ausführungsform einer Handhabungsvorrichtung gemäß der vorliegenden Erfindung, welche die Geometrie gemäß [Fig. 5](#) aufweist.

[0027] [Fig. 11](#) zeigt eine schematische Seitenansicht der Ausführungsform gemäß [Fig. 10](#).

[0028] [Fig. 12](#) zeigt eine vergrößerte Ansicht der Linear-Betätigungsteile entsprechend der Ausführungsform gemäß [Fig. 10](#).

[0029] [Fig. 13](#) zeigt eine vergrößerte isometrische Ansicht des Welleneinführungs-Betätigungsteils entsprechend der Ausführungsform gemäß [Fig. 10](#).

[0030] [Fig. 14](#) zeigt eine isometrische Ansicht einer weiteren Ausführungsform einer Handhabungsvorrichtung gemäß der vorliegenden Erfindung, welche die Geometrie gemäß [Fig. 8](#) aufweist.

[0031] [Fig. 15](#) zeigt eine schematische geschnittene Seitenansicht einer Werkzeughaltewelle zur Verwendung bei einer Handhabungsvorrichtung gemäß der vorliegenden Erfindung.

[0032] [Fig. 16](#) zeigt eine Querschnittansicht der Werkzeughaltewelle gemäß [Fig. 15](#) in Blickrichtung abwärts auf den Handgelenkmechanismus, wobei das Werkzeug und die Werkzeugwälzbewegungs-Welle weggelassen sind.

[0033] [Fig. 17](#) zeigt eine schematische Querschnittansicht der Werkzeughaltewelle, wobei die für einen Handgelenkmechanismus angeordneten Konnektoren gezeigt sind.

[0034] [Fig. 18](#) zeigt eine schematische vertikale Schnittansicht eines weiteren Beispiels eines Handgelenkmechanismus zur Verwendung mit der vorlie-

genden Erfindung.

[0035] [Fig. 19](#) zeigt eine schematische Draufsicht auf drei Betätigungsteile zur Verwendung mit einer abnehmbaren Werkzeughaltewelle.

[0036] [Fig. 20](#) zeigt eine schematische Seitenansicht eines der Betätigungsteile gemäß [Fig. 19](#).

[0037] [Fig. 21](#) zeigt eine schematische Seitenansicht eines Betätigungsteils für eine Werkzeugrollwelle.

[0038] [Fig. 22](#) zeigt ein Blockschaltbild eines Steuersystems zur Verwendung mit einer Handhabungsvorrichtung gemäß der vorliegenden Erfindung.

[0039] [Fig. 23](#) zeigt eine isometrische Ansicht eines Teils der Ausführungsform gemäß [Fig. 9](#).

[0040] [Fig. 24](#) zeigt eine explodierte isometrische Ansicht eines der Verbindungselemente des Teils gemäß [Fig. 23](#).

[0041] [Fig. 25](#) zeigt eine aus einem anderen Winkel betrachtete explodierte isometrische Ansicht des Teils gemäß [Fig. 23](#).

[0042] [Fig. 26](#) zeigt eine Seitenansicht von hinten, wobei die Position der Spannungsmesser an dem Rahmen des Teils gemäß [Fig. 23](#) gezeigt sind.

[0043] [Fig. 27](#) und [Fig. 28](#) zeigen Seitenansichten eines weiteren Beispiels eines Handge- und lenkmechanismus gemäß der vorliegenden Erfindung.

[0044] [Fig. 29](#) und [Fig. 30](#) zeigen Seitenansichten zweier weiterer Beispiele eines Handge- und lenkmechanismus gemäß der vorliegenden Erfindung.

[0045] [Fig. 31](#) zeigt eine explodierte Seitenansicht eines weiteren Beispiels eines Handgelenkmechanismus gemäß der vorliegenden Erfindung.

[0046] [Fig. 32](#) zeigt eine explodierte Seitenansicht weiteren Beispiels eines Handgelenkmechanismus gemäß der vorliegenden Erfindung.

[0047] [Fig. 33](#) und [Fig. 34](#) zeigen Seitenansichten des Handgelenkmechanismus gemäß und [Fig. 32](#), wobei sich das Halterohr in zwei verschiedenen Drehpositionen befindet.

Beschreibung bevorzugter Ausführungsformen

[0048] Im Folgenden werden mehrere bevorzugte Ausführungsformen einer Handhabungsvorrichtung gemäß der vorliegenden Erfindung im Zusammenhang mit den beigefügten Zeichnungen beschrieben. Die vorliegende Erfindung ist nicht auf die in den

Zeichnungen gezeigten Strukturen beschränkt, und Merkmale einer Ausführungsform können frei mit Merkmalen einer oder mehrerer weiterer Ausführungsformen kombiniert werden, so dass zahlreiche Anordnungen zusätzlich zu den gezeigten Anordnungen gebildet werden, die sämtlich unter den Umfang der vorliegenden Erfindung fallen.

[0049] **Fig. 1** zeigt eine schematische Seitenansicht zur konzeptionellen Darstellung der Gesamtstruktur einer Handhabungsvorrichtung **10**. Die Handhabungsvorrichtung **10** ist in der Situation gezeigt, in der sie zur Durchführung einer minimalinvasiven chirurgischen Operation an einem Humanpatienten **30** verwendet wird, jedoch erstreckt sich die Verwendbarkeit der Vorrichtung wie oben erwähnt über die minimalinvasive Chirurgie hinaus auch auf andere medizinische Vorgänge. Ferner ist die Vorrichtung nicht auf die Verwendung bei Humanpatienten beschränkt, sondern kann z.B. auch in der Veterinärmedizin verwendet werden.

[0050] Die gezeigte Handhabungsvorrichtung **10** weist eine Werkzeughaltewelle **11** auf, die an einem Ende (dem in der Figur unteren Ende) eine medizinische Vorrichtung **12** wie z.B. ein medizinisches Werkzeug trägt. In der folgenden Beschreibung wird die medizinische Vorrichtung **12** unabhängig von ihrer speziellen Ausgestaltung einfach als Werkzeug bezeichnet. Der Typs des Werkzeugs **12** unterliegt keinen Restriktionen. Bei dem Werkzeug **12** handelt es sich beispielsweise um eine Schneidvorrichtung, einen Nadelhalter, eine Klammervorrichtung, einen Forceps, eine Klemme, eine Sonde, eine Abbildungsvorrichtung, einen Laser, eine Nadel oder eine andere Biopsievorrichtung, eine Vorrichtung zum Zuführen von Medikamenten oder anderen Substanzen, oder eine andere Vorrichtung für chirurgische, therapeutische oder diagnostische Zwecke. Die Werkzeughaltewelle **11** ist gehalten und wird gehandhabt von einer Wellenhaltestruktur **20**, die zwei oder mehr unabhängig bewegbare Arme **21** und **22** aufweist, wobei jeder Arm die Werkzeughaltewelle **11** über ein oder mehrere Gelenke schwenkbar an einer unterschiedlichen Stelle hält. Bei diesem Beispiel ist der Arm **21** mit einem schwenkbaren Gelenk **23** versehen, und der Arm **22** ist mit einem anderen schwenkbaren Gelenk **24** versehen. Jeder Arm **21**, **22** kann das entsprechende Gelenk **23**, **24** im Raum bewegen, um die Werkzeughaltewelle **11** derart im Raum zu positionieren, dass sie eine gewünschte Position erreicht und/oder eine derartige Bewegung des unteren Endes der Werkzeughaltewelle **11** ausgeführt wird, dass das Werkzeug **12** in eine gewünschte Position relativ zum Patienten bewegt wird. Bei der vorliegenden Ausführungsform ermöglicht ein einziges Gelenk **23** oder **24** die gewünschte Anzahl von Dreh-Freiheitsgraden der Werkzeughaltewelle **11** in Bezug auf jeden Arm **21** oder **22**, jedoch kann ein einziges Gelenk, das mehrere Freiheitsgrade er-

möglicht, durch sein funktionales Äquivalent in Form mehrerer Gelenke ersetzt werden, von denen jedes weniger Freiheitsgrade ermöglicht als das einfache Gelenk, die jedoch zusammen die gleiche Anzahl an Freiheitsgraden ermöglichen wie das einzelne Gelenk. Die Gelenke **23**, **24** sind typischerweise passive Gelenke statt aktiver Gelenke, was bedeutet, dass eine Änderung der Ausrichtung der Werkzeughaltewelle **11** hinsichtlich der Arme **21** und **22** einfach durch Verändern der Position eines oder beider Gelenke **23**, **24** durchgeführt wird, statt durch mit den Gelenken **23**, **24** verbundene Betätigungsteile ein Drehmoment auf die Werkzeughaltewelle **11** auszuüben.

[0051] Die Wellenhaltestruktur **20** bildet einen parallelen Mechanismus, d.h. einen Mechanismus, bei dem das Gewicht der Werkzeughaltewelle **11** entlang mehrerer paralleler Wege, die durch die Arme **21** und **22** definiert sind, auf eine Basis oder ein anderes Halteglied übertragen wird, im Gegensatz zu einem seriellen Mechanismus, bei dem eine Last, die gehalten wird, entlang eines einzelnen Wegs auf eine Basis übertragen wird. Ein paralleler Weg ist inhärent fester, schneller, präziser und imstande zum Tragen einer höheren Last als ein serieller Mechanismus, wobei diese Merkmale besonders für eine chirurgische Handhabungsvorrichtung vorteilhaft sind.

[0052] Die Arme **21** und **22** können die Gelenke **23** und **24** mittels zahlreicher unterschiedlicher Typen von Aktionen bewegen, wie z.B. Ausfahren oder Zusammenfahren der Arme, oder durch Translation oder Schwenkung der gesamten Arme oder von Teilen der Arme.

[0053] Die Werkzeughaltewelle **11** ist nicht auf irgendeine bestimmte Form beschränkt. Oftmals ist ihr unteres Ende geradlinig, um das Einführen in den Körper des Patienten zu erleichtern, und zwecks leichter Herstellung kann es zweckdienlich sein, dass die Werkzeughaltewelle **11** entlang ihrer gesamten Länge geradlinig ist. Die Werkzeughaltewelle kann jedoch eine große Vielfalt anderer Formen aufweisen, z.B. eine winklige oder gekrümmte Form. Die Werkzeughaltewelle weist in ihrer gezeigten Ausgestaltung über ihre gesamte Länge eine konstante Querschnittsform auf, jedoch ist diese Querschnittsform ebenfalls nicht kritisch und kann über die Länge der Welle variieren. Die gezeigte Werkzeughaltewelle **11** ist ein längliches Teil, dessen Länge im Vergleich zu seinem Durchmesser groß ist; jedoch ist das Verhältnis zwischen der Länge der Werkzeughaltewelle **11** und ihrem Durchmesser nicht wichtig. Somit kann die Werkzeughaltewelle **11** in Form eines jeden beliebigen Teils vorgesehen sein, dass geeignet ist, das Werkzeug **12** zu halten und in gewünschter Weise gehandhabt zu werden.

[0054] Das Gewicht der Werkzeughaltewelle **11**

kann auf beliebige Weise zwischen den Gelenken **23**, **24** verteilt werden. Bei einigen Ausrichtungen der Werkzeughaltewelle **11** kann ihr Gewicht primär oder vollständig von nur einem der Gelenke **23** gehalten werden, während bei anderen Ausrichtungen das Gewicht von beiden Gelenken gehalten werden kann. Die Positionen der Gelenke **23**, **24** im Raum können variiert werden, jedoch bleibt die Ausrichtung einer Linie, welche die Drehmittelpunkte der Gelenk **23** miteinander verbindet, in Bezug auf die Werkzeughaltewelle **11** konstant. Zwei passive Gelenke reichen aus, um die Ausrichtung der Gelenke der Werkzeughaltewelle **11** im Raum zu definieren, jedoch kann bei Bedarf eine größere Anzahl von Gelenken und Armen verwendet werden, um das Gewicht der Werkzeughaltewelle **11** unter einer größeren Anzahl von Teilen zu verteilen.

[0055] Bei einigen Konfigurationen der Wellenhaltestruktur **20** können die Arme **21**, **22** miteinander koplanar sein, wobei in diesem Fall die Wellenhaltestruktur **20** eine zweidimensionale Verbindung definiert. Die Wellenhaltestruktur **20** kann jedoch auch andere Konfigurationen annehmen, bei denen die Arme **21**, **22** nicht Planar sind, wobei in diesem Fall die Wellenhaltestruktur **20** einen sogenannten Raum-Mechanismus oder eine sogenannte dreidimensionale Verbindung bilden kann. Die Fähigkeit der Wellenhaltestruktur **20**, als ein Raum-Mechanismus zu funktionieren, vergrößert die Bewegungsfreiheit der Werkzeughaltewelle **11** und ermöglicht Bewegungen, die mit einer zweidimensionalen Verbindung nicht möglich sind.

[0056] In [Fig. 1](#) sind die Drehmitten der Gelenke **23**, **24** schematisch als mit der Längsachse der Werkzeughaltewelle **11** übereinstimmend gezeigt, jedoch können die Positionen der Drehmitten der Gelenke relativ zu der Werkzeughaltewelle **11** beliebig gewählt sein. Beispielsweise können die Gelenke die Werkzeughaltewelle **11** durch ein Zwischenteil wie z.B. einen Rahmen halten und somit von der Werkzeughaltewelle **11** beabstandet sein.

[0057] Die Wellenhaltestruktur **20** kann zum Handhaben der Werkzeughaltewelle **11** mit jeder gewünschten Anzahl von Freiheitsgraden in der Translation und/oder Drehung ausgebildet sein. Für einige einfache medizinische Vorgänge kann ein einziger Freiheitsgrad ausreichend sein, jedoch ist es häufig zweckmäßig, wenn die Werkzeughaltewelle **11** mit mehreren Freiheitsgraden handhabbar ist. Beispielsweise kann es, wenn die Werkzeughaltewelle **11** mit dem Werkzeug **12** außerhalb des Körpers des Patienten gehandhabt wird, wünschenswert sein, dass die Wellenhaltestruktur **20** in der Lage ist, die Werkzeughaltewelle **11** mit bis zu sechs Freiheitsgraden zu handhaben. Wenn jedoch das untere Ende der Werkzeughaltewelle **11** in einen Einschnitt oder eine andere Öffnung im Körper des Patienten eingeführt

wird, ist es generell wünschenswert, die Anzahl der Freiheitsgrade der Werkzeughaltewelle **11** einzuschränken, um die Größe des Einschnitts zu minimieren, die zur Aufnahme der Bewegungen der Werkzeughaltewelle **11** erforderlich ist. Insbesondere, wie in [Fig. 2](#) schematisch angedeutet, sind die Bewegungen der Werkzeughaltewelle **11**, wenn diese durch einen Einschnitt **32** in der Körperwandung **31** des Patienten **30** in den Patienten-Körper eingeführt ist, vorzugsweise auf diejenigen Bewegungen beschränkt, welche die Längsachse des unteren Endes der Werkzeughaltewelle **11** innerhalb eines imaginären Konus halten, der an einem virtuellen Schwenkpunkt **13** zentriert ist, welcher in dem Einschnitt **32** angeordnet ist. Mit einem virtuellen Schwenkpunkt ist ein Punkt im Raum gemeint, um den die Werkzeughaltewelle **11** mit einem oder mehr Freiheitsgraden gedreht werden kann, ohne dass irgendeine Haltestruktur an dem virtuellen Schwenkpunkt erforderlich ist. Die Werkzeughaltewelle **11** kann in einer derartigen Weise gedreht werden, als ob tatsächlich ein Drehgelenk an dem virtuellen Schwenkpunkt **13** angeordnet wäre, jedoch ohne die strukturellen Beschränkungen, die ein derartiges Gelenk verursachen könnte. In [Fig. 2](#) kann die Werkzeughaltewelle **11** um eine x-Achse und eine rechtwinklig zur x-Achse verlaufende y-Achse gedreht werden, wobei beide Achsen durch den virtuellen Schwenkpunkt **13** verlaufen. Ferner kann die Werkzeughaltewelle **11** entlang einer z-Achse translatorisch bewegt werden, die der Längsachse der Werkzeughaltewelle **11** entspricht. Die Größe des Konus (gemessen als Winkel), in dem sich die Werkzeughaltewelle **11** bewegen kann, kann auf der Basis von Faktoren wie der Größe des Einschnitts **32** und des Ausmaßes gewählt werden, in dem die Körperwandung **31** einer Dehnung widerstehen kann, wenn sie von der Außenfläche der Werkzeughaltewelle **11** kontaktiert wird. Innerhalb dieses Konus kann die Werkzeughaltewelle **11** derart ausgebildet sein, dass sie jede Kombination von Drehungen um die x- und/oder die y-Achse und Translationen entlang der z-Achse ausführt und dabei die Längsachse der Werkzeughaltewelle **11** mit dem virtuellen Schwenkpunkt ausgerichtet bleibt. Die Werkzeughaltewelle **11** kann bei Bedarf auch zur Drehung um die z-Achse ausgelegt sein. Um die Größe des Einschnitts **32**, die zur Aufnahme eines gegebenen Konus-Winkels erforderlich ist, zu minimieren, ist der virtuelle Schwenkpunkt **13** vorzugsweise auf halbem Wege durch die Dicke der Körperwandung **31** des Patienten **30** angeordnet, wo der Einschnitt **32** oder eine andere Öffnung ausgebildet ist. Die Dicke kann von Patient zu Patient beträchtlich variieren. Sie kann weniger als einen halben Inch bei einem Kind und 4 bis 5 Inch bei einem fettleibigen Erwachsenen betragen.

[0058] Durch entsprechendes Koordinieren der Bewegungen der Arme **21**, **22** kann der virtuelle Punkt **13**, um den die Werkzeughaltewelle **11** schwenkbar

ist, an jedem gewünschten Punkt im Raum angeordnet sein. Beispielsweise kann er an einer beliebigen Position entlang der Länge der Werkzeughaltewelle **11** vorgesehen sein. Die Veränderbarkeit der Position des virtuellen Schwenkpunkts **13** entlang der Länge der Werkzeughaltewelle **11** ist zweckmäßig, da sie es ermöglicht, das Maß, um das sich die Werkzeughaltewelle **11** in den Körper des Patienten erstreckt, auf einen gewünschten Wert einzustellen. Somit kann, wenn der Teil des Körpers des Patienten, auf den das Werkzeug **12** zugreifen soll, nahe an der Körperwandung **31** gelegen ist, der virtuelle Schwenkpunkt **13** nahe an dem unteren Ende der Werkzeughaltewelle **11** liegen, während, falls der Zugriffsbereich tiefer innerhalb des Körpers des Patienten oder weiter von dem Einschnitt **32** entfernt ist, der virtuelle Schwenkpunkt **13** weiter von dem unteren Ende der Werkzeughaltewelle **11** weg liegen kann, um eine größere Länge der in den Körper des Patienten einzuführenden Werkzeughaltewelle **11** zu erlauben.

[0059] Die Werkzeughaltewelle **11** kann in beliebiger Weise gelagert sein. In [Fig. 1](#) ist sie an einem Boden **35** neben dem Tisch **36** angeordnet gezeigt, auf dem der Patient **30** während der Operation liegt, jedoch kann sie auch an dem Tisch **36**, einer Wand, einer Decke, einem über dem Patienten **30** befindlichen Bildaufnahmegerät-Halteausräger oder an jeder beliebigen geeigneten Struktur angeordnet sein. Die Wellenhaltestruktur **20** kann an einer festen Stelle installiert sein, oder sie kann mit Rollen oder anderen Mechanismen versehen sein, um ihr Mobilität zu verleihen.

[0060] Es können zahlreiche verschiedenartige Konfigurationen verwendet werden, mittels derer die Wellenhaltestruktur **20** die Werkzeughaltewelle **11** auf die in [Fig. 2](#) gezeigte Weise handhaben kann. Beispiele dafür sind folgende:

- (a) Beide Gelenke **23**, **24** können in einem zweidimensionalen Raum (in separaten Ebenen) bewegt werden, und die Werkzeughaltewelle **11** kann relativ zu dem Gelenken **23**, **24** in einer Richtung translatorisch bewegt werden, die quer zu den Bewegungsebenen der Gelenke **23**, **24** verläuft.
- (b) Beide Gelenke **23**, **24** können in einem zweidimensionalen Raum relativ zu einer Basis bewegt werden, und die Bewegungsebenen der Gelenke **23**, **24** können als eine Einheit in einer quer zu den Ebenen verlaufenden Richtung bewegt werden, während sie eine konstante Positionsbeziehung zueinander einhalten, um eine Translation der Werkzeughaltewelle **11** in der z-Achsen-Richtung zu bewirken.
- (c) Eines der Gelenke **23**, **24** kann in einem zweidimensionalen Raum bewegt werden, während das andere Gelenk in einem dreidimensionalen Raum bewegt werden kann.
- (d) Beide Gelenke **23**, **24** können in einem dreidi-

mensionalen Raum bewegt werden.

[0061] Es kann jede Kombination von (a)-(d) verwendet werden, und die Gelenke können auch auf weitere andere Arten bewegt werden.

[0062] [Fig. 3](#) zeigt schematisch die Geometrie einer Wellenhaltestruktur **50** mit der im obigen Abschnitt (a) beschriebenen Konfiguration, bei der zwei Gelenke mittels zweier entsprechender Arme jeweils in einem zweidimensionalen Raum bewegt werden. Wie in dieser Figur gezeigt, weist die Wellenhaltestruktur **50** einen ersten Arm mit einem ersten Dreh-Betätigungsteil **51** auf, das von einem stationären Support **52** wie z.B. einem stationären Rahmen gehalten ist. An dem ersten Dreh-Betätigungsteil **51** ist ein erstes Verbindungsteil **53** zur Drehung um eine erste Achse gesichert. Das erste Verbindungsteil **53** hält ein erstes Linear-Betätigungsteil **54**, das entlang eines geradlinigen Wegs wirken kann, der rechtwinklig zur Drehachse des ersten Dreh-Betätigungsteils **51** verläuft. Ein zweites Verbindungsteil **55** ist an einem Ende mit dem ersten Linear-Betätigungsteil **54** verbunden und an dem anderen Ende mit einem dritten Verbindungsteil **56** verbunden, das einem ersten Halterungspunkt **57** mittels eines ersten schwenkbaren Gelenks **57** eine Werkzeughaltewelle **11** hält. Der zweite Arm weist ein zweites Dreh-Betätigungsteil **60** auf, das von einem stationären Support gehalten ist, wie z.B. von dem gleichen Rahmen **52**, der das erste Dreh-Betätigungsteil **51** hält. Ein viertes Verbindungsteil **61** ist mit dem zweiten Dreh-Betätigungsteil **60** zur Drehung um eine zweite Achse verbunden. Zur Vereinfachung der Kinematik sind die Drehachsen der ersten und zweiten Dreh-Betätigungsteile **51**, **60** in [Fig. 3](#) miteinander ausgerichtet, jedoch brauchen die beiden Achsen weder miteinander ausgerichtet noch parallel zu sein. Das vierte Verbindungsteil **61** hält ein zweites Linear-Betätigungsteil **62**, das entlang eines geradlinigen Wegs wirken kann, der rechtwinklig zur Drehachse des zweiten Dreh-Betätigungsteils **60** verläuft. Ein fünftes Dreh-Betätigungsteil **63** ist an einem Ende an dem zweiten Linear-Betätigungsteil **62** befestigt und an dem anderen Ende mit dem dritten Verbindungsteil **56** durch ein zweites schwenkbares Gelenk **64** an einem zweiten Halterungspunkt verbunden. Jedes der ersten und zweiten Gelenke **57**, **64** ermöglicht mindestens zwei Freiheitsgrade des dritten Verbindungsteils **56** relativ zu den zweiten und fünften Verbindungsteilen **55**, **63**, so dass das dritte Verbindungsteil **56** relativ zu den zweiten und fünften Verbindungsteile **55**, **63** Kipp- und Gierbewegungen ausführen kann. Das dritte Verbindungsteil **56** und die Gelenke **57**, **64** sind ferner derart angeordnet, dass der Winkel zwischen den Verbindungsteilen **55**, **63**, gemessen um die Achse des dritten Verbindungsteils **56**, variieren kann. Beispielsweise kann eines der Gelenke **57**, **64** drei Dreh-Freiheitsgrade ermöglichen, so dass das dritte Verbindungsteil **56** zusätzlich zu der Kipp- und Gier-

bewegung eine Rollbewegung um seine Achse relativ zu einem der zweiten und fünften Verbindungsteile **55**, **63** ausführen kann. In diesem Fall kann eines der Gelenke **57**, **64** ein Knochengelenk oder ein diesem äquivalentes Gelenk sein, während das andere Gelenk ein Kugelgelenk oder ein diesem äquivalentes Gelenk ist. Alternativ kann jedes der Gelenke **57**, **64** nur zwei Dreh-Freiheitsgrade aufweisen, und das dritte Gelenk **56** kann zwei Abschnitte aufweisen, die durch ein Wälzgelenk verbunden sind, dessen Drehachse mit der Achse des dritten Verbindungsteils **56** ausgerichtet ist und das den beiden Abschnitten des Verbindungsteils **56** ermöglicht, sich relativ zueinander um die Achse des dritten Verbindungsteils **56** zu drehen. Die Gelenke **57**, **64** sind derart angeordnet, dass der Abstand zwischen ihnen variieren kann, wenn sie sich in parallelen Ebenen im Raum bewegen. Beispielsweise ist gemäß dieser Ausführungsform eines der Gelenke (wie z.B. das erste Gelenk **57** in **Fig. 3**) gegen eine Translation relativ zu dem dritten Verbindungsteil **56** in der Längsrichtung des dritten Verbindungsteils festgelegt, während das andere Gelenk (in diesem Beispiel das zweite Gelenk **64**) zu einer translatorischen Bewegung relativ zu dem dritten Verbindungsteil **56** in dessen Längsrichtung in der Lage ist. Der Abstand zwischen den Gelenken **57**, **64** kann auch in anderer Weise variierbar sein, z.B. indem jedes Gelenk **57**, **64** gegen eine Translation relativ zu demjenigen Teil des dritten Verbindungsteils **65** festgelegt ist, an welchem das Gelenk befestigt ist und welches das dritte Verbindungsteil **56** als teleskopierbares Teil bildet.

[0063] Das dritte Verbindungsteil **56** hält die Werkzeughaltewelle **11** durch ein drittes Linear-Betätigungsteil **65** (ein Welleneinführungs-Betätigungsteil), das die Werkzeughaltewelle **11** in einer quer zu den Bewegungsebenen der ersten und zweiten Gelenke **57**, **64** verlaufenden Richtung bewegen kann und das zum Einführen oder Zurückziehen der Werkzeughaltewelle **11** in den Körper des Patienten oder aus diesem verwendet werden kann, ohne die Ausrichtung der Werkzeughaltewelle **11** zu verändern. Bei der vorliegenden Ausführungsform wirkt das dritte Linear-Betätigungsteil **65** in einer Richtung, die parallel zu einer Linie verläuft, welche die ersten und zweiten Gelenke **57**, **64** verbindet, kann jedoch stattdessen auch in einer anderen Richtung wirken. Die Linie der Wirkung des dritten Linear-Betätigungsteils **65** ist versetzt von einer Linie gezeigt, welche die ersten und zweiten Gelenke **57**, **64** verbindet, kann jedoch auch mit dieser Linie ausgerichtet sein.

[0064] Die ersten bis fünften Verbindungsteile sind dahingehend gezeigt, dass sie aus linearen Abschnitten gebildet sind. Zum Beispiel weisen die ersten und vierten Verbindungsteile **53**, **61** in ihrer gezeigten Form zwei Abschnitte auf, die rechtwinklig zueinander verlaufen, und die übrigen Verbindungsteile **55**, **56** und **63** sind als geradlinige Teile gezeigt.

Solange jedoch die ersten und zweiten Gelenke **57**, **64** in Ebenen bewegt werden können, ist die Form der Verbindungsteile beliebig. Somit können die Verbindungsteile winklig oder gekrümmt sein oder eine Kombination aus geradlinigen und gekrümmten Abschnitten aufweisen.

[0065] **Fig. 4** zeigt schematisch die Geometrie einer weiteren verwendbaren Wellenhaltestruktur **50A**. Dieses Beispiel weist die im obigen Abschnitt (b) beschriebene Konfiguration auf, bei der zwei Gelenke mittels zweier Arme in einem zweidimensionalen Raum bewegt werden und die Gelenke als eine Einheit in einer Richtung bewegt werden können, die quer zur Ebene der Bewegung der Gelenke verläuft. Die Gesamt-Geometrie gemäß **Fig. 4** ist ähnlich ausgelegt wie die Geometrie gemäß **Fig. 3**, außer dass das dritte Linear-Betätigungsteil **65** (das Welleneinführungs-Betätigungsteil) weggelassen ist und die Bewegung der Werkzeughaltewelle **11** in der z-Achsen-Richtung erzielt wird, indem die Dreh-Betätigungsteile **51**, **60** als eine einzige Einheit translatorisch bewegt werden. Die Werkzeughaltewelle **11** ist starr mit dem fünften Verbindungsteil **56** verbunden. Die Dreh-Betätigungsteile **51**, **60** sind mit einem Rahmen **52** verbunden, der mittels einer Basis **66**, die mit einem Hubmechanismus für den Rahmen **52** versehen ist, angehoben und abgesenkt werden kann. Mit der Geometrie gemäß **Fig. 4** kann die gleiche Dreh- und Translationsbewegung der Werkzeughaltewelle **11** wie mit der Geometrie gemäß **Fig. 3** erzielt werden. Da das Welleneinführungs-Betätigungsteil **65** nicht erforderlich ist, kann die Größe der Handhabungsvorrichtung **50A** in der Umgebung des oberen Endes der Werkzeughaltewelle **11** reduziert werden, so dass es leichter wird, die Handhabungsvorrichtung in beengten Räumen zu betätigen. Um einer größeren operationalen Flexibilität willen ist es jedoch möglich, die Anordnung gemäß **Fig. 4** ferner mit einem dritten Linear-Betätigungsteil zu versehen, das dem dritten Linear-Betätigungsteil **65** gemäß **Fig. 3** entspricht, um die Werkzeughaltewelle **11** in der z-Achsen-Richtung translatorisch zu bewegen und dadurch die Werkzeughaltewelle **11** in den Körper des Patienten einzuführen oder aus diesem zurückzuziehen.

[0066] **Fig. 5** zeigt schematisch die Geometrie einer weiteren Wellenhaltestruktur **70**. Wie bei den Geometrien gemäß **Fig. 3** und **Fig. 4** sind zwei Gelenke für eine Werkzeughaltewelle **11** mittels erster und zweiter Arme beide in einem zweidimensionalen Raum bewegbar. Im Gegensatz zu jenen Geometrien werden bei dieser Geometrie nur Linear-Betätigungsteile zum Manövrieren der Gelenke verwendet.

[0067] Ein erster Arm weist ein erstes Verbindungsteil **71** auf, das an einem Ende mit einem stationären Support wie z.B. einer Basis verbunden ist und an einem zweiten Ende mit einem ersten Linear-Betäti-

gungsteil **73** verbunden ist, das in gerader Linie in einer x-Achsen-Richtung bewegbar ist. Ein zweites Verbindungsteil **74** ist an einem Ende mit dem ersten Linear-Betätigungsteil **73** verbunden und an einem zweiten Ende mit einem zweiten Linear-Betätigungsteil **75** verbunden, das in gerader Linie in einer y-Achsen-Richtung bewegbar ist, die quer (z.B. senkrecht) zur x-Achsen-Richtung verläuft. Bei der vorliegenden Ausführungsform verlaufen die x- und y-Achsen rechtwinklig zueinander, jedoch ist dies nicht erforderlich. Ein drittes Verbindungsteil **76** ist an einem ersten Ende mit dem zweiten Linear-Betätigungsteil **75** und an einem zweiten Ende mit einem vierten Verbindungsteil **77** an einem ersten Halterungspunkt für die Werkzeughaltewelle mittels eines ersten schwenkbaren Gelenks **78** verbunden. Der zweite Arm weist ein fünftes Verbindungsteil **80** auf, das an einem Ende mit einem stationären Support verbunden ist, wie z.B. mit dem gleichen Teil **72**, mit dem das erste Verbindungsteil **71** verbunden ist, und das an einem zweiten Ende mit einem dritten Linear-Betätigungsteil **81** verbunden ist, das in einer geraden Linie in der x-Achsen-Richtung arbeiten kann. Ein sechstes Verbindungsteil **82** ist an einem Ende mit dem dritten Linear-Betätigungsteil **81** und an dem anderen Ende mit einem vierten Linear-Betätigungsteil **83** verbunden, das in einer geraden Linie in der y-Achsen-Richtung bewegbar ist. Somit bewegt sich das dritte Linear-Betätigungsteil **82** entlang eines Wegs, der parallel zum ersten Linear-Betätigungsteil **73** verläuft, und das vierte Linear-Betätigungsteil **73** bewegt sich entlang eines Wegs, der parallel zum zweiten Linear-Betätigungsteil **75** und rechtwinklig zu dem Weg des dritten Linear-Betätigungsteils **81** verläuft. Ferner definieren die Bewegungswege der ersten und zweiten Linear-Betätigungsteile eine Ebene parallel zu derjenigen, die durch die Bewegungswege der dritten und vierten Linear-Betätigungsteile definiert ist. Die Bewegungswege der dritten und vierten Linear-Betätigungsteile können jedoch unter jedem beliebigen Winkel zueinander verlaufen, etwa dahingehend, dass sie nicht parallel sind, und die Bewegungswege der dritten und vierten Linear-Betätigungsteile **81**, **83** brauchen ferner nicht parallel zu denjenigen der ersten und zweiten Linear-Betätigungsteile **73**, **75** bzw. zu der Ebene zu verlaufen, die durch die Bewegungswege der ersten und zweiten Linear-Betätigungsteile definiert ist. Ein siebtes Verbindungsteil **84** ist an einem Ende mit dem vierten Linear-Betätigungsteil **83** und an dem anderen Ende mit dem vierten Verbindungsteil **77** an einem zweiten Halterungspunkt mittels eines zweiten schwenkbaren Gelenks **85** verbunden. Ein fünftes Linear-Betätigungsteil **86** (ein Welleneinführungs-Betätigungsteil), das in einer z-Achsen-Richtung quer zu den Bewegungsebenen der ersten und zweiten Gelenke **78**, **85** bewegbar ist, ist an dem vierten Verbindungsteil **77** befestigt und hält die Werkzeughaltewelle **11**. In [Fig. 5](#) verläuft die z-Achse parallel zu einer geraden Linie, welche die ersten und zweiten Gelenke **78**, **85** verbindet, kann

jedoch auch in einer anderen Richtung verlaufen.

[0068] Jedes der ersten und zweiten Gelenke **78**, **85** kann zwei Dreh-Freiheitsgrade des vierten Verbindungsteils **77** relativ zu den dritten und siebten Verbindungsteilen **76**, **84** ermöglichen, so dass das vierte Verbindungsteil **77** Kipp- und Gierbewegungen relativ zu den dritten und siebten Verbindungsteilen **76**, **84** ausführen kann. Eines der Gelenke **78**, **85** kann drei Freiheitsgrade zulassen, um dem vierten Verbindungsteil **77** zu ermöglichen, eine Wälzbewegung zusätzlich zu der Kipp- und Gierbewegung auszuführen; da jedoch die Verbindungsteile **76** und **84** eine konstante Ausrichtung im Raum beibehalten, wird ein dritter Freiheitsgrad nicht benötigt. Die Gelenke **78**, **85** sind derart angeordnet, dass der Abstand zwischen ihnen variieren kann, während sie sich in parallelen Ebenen im Raum bewegen. Beispielsweise kann eines der Gelenke (in [Fig. 5](#) das zweite Gelenk **85**) relativ zu dem vierten Gelenk **77** gegen Translation in der Längsrichtung des vierten Gelenks **77** festgelegt sein, während das andere Gelenk (in diesem Beispiel das erste Gelenk **78**) zu einer translatorischen Bewegung relativ zum vierten Gelenk **77** in der Längsrichtung des Gelenks **77** in der Lage sein kann. Alternativ können beide Gelenke **78**, **85** gegen Translation relativ zu dem vierten Gelenk **77** festgelegt sein, und das vierte Gelenk **77** kann eine teleskopierbare Struktur aufweisen, mittels derer der Abstand zwischen den Gelenken **78**, **85** variiert werden kann.

[0069] Statt beide der Gelenke **78**, **85** ausschließlich durch Linear-Betätigungsteile handzuhaben, besteht die Möglichkeit, eines (das erste oder das zweite) der Gelenke gemäß [Fig. 5](#) mittels der Kombination eines Dreh-Betätigungsteils und eines Linear-Betätigungsteils in der gleichen Weise wie bei der Anordnung gemäß [Fig. 3](#) handzuhaben. Beispielsweise können die Komponenten **71**, **73** und **74** gemäß [Fig. 5](#) zum Handhaben des Gelenks **78** durch ein Dreh-Betätigungsteil und ein Verbindungsteil entsprechend den Komponenten **51** und **53** gemäß [Fig. 3](#) ersetzt werden.

[0070] [Fig. 6](#) zeigt die Geometrie einer Wellenhalterstruktur **100**, bei der ein Gelenk für eine Werkzeughaltewelle **11** mittels eines entsprechenden Arms in einem zweidimensionalen Raum bewegt werden kann, während ein zweites Gelenk mittels eines weiteren Arms in einem dreidimensionalen Raum bewegt werden kann. Die ersten und zweiten Dreh-Betätigungsteile **101**, **120** eines ersten bzw. zweiten Arms sind jeweils an einem stationären Support wie z.B. einem Rahmen **102** befestigt. Das erste Dreh-Betätigungsteil **101** kann ein erstes Verbindungsteil **103** um eine Achse drehen. Das erste Verbindungsteil **103** ist mit ersten und zweiten Linear-Betätigungsteilen **104**, **105** verbunden, die in geraden Linien arbeiten können, welche rechtwinklig zur Drehachse des ersten Dreh-Betätigungsteils **101** und

parallel zueinander verlaufen. Ein zweites Verbindungsteil **106** und ein drittes Verbindungsteil **107** sind jeweils an einem Ende mit dem ersten Linear-Betätigungsteil **104** bzw. dem zweiten Linear-Betätigungsteil **105** verbunden. Ein viertes Verbindungsteil **108** ist an einem ersten Ende mittels eines Gelenks **109** schwenkbar mit einem Ende des zweiten Verbindungsteils **106** verbunden, und ein fünftes Verbindungsteil **110** ist an einem ersten Ende mittels eines Gelenks **111** schwenkbar mit einem Ende des dritten Verbindungsteils **107** verbunden. Das zweite Ende des fünften Verbindungsteils **110** ist mittels eines Gelenks **114** an einem ersten Halterungspunkt schwenkbar mit einem sechsten Verbindungsteil **113** verbunden, an dem die Werkzeughaltewelle **11** befestigt ist. Das zweite Ende des vierten Verbindungsteils **108** ist mit dem fünften Verbindungsteil **110** durch ein Gelenk **112** verbunden, das zwischen den beiden Enden des fünften Verbindungsteils **110** angeordnet ist. Jedes der Gelenke **109**, **111** und **112** ermöglicht einen Dreh-Freiheitsgrad um eine Achse, die rechtwinklig zur Drehachse des ersten Dreh-Betätigungsteils **101** verläuft, wobei die Drehachsen sämtlicher drei Gelenke parallel zueinander und rechtwinklig zu den Bewegungswegen der Linear-Betätigungsteile **104** und **105** verlaufen. Zur Vereinfachung der Kinematik ist diese Drehachse vorzugsweise mit der Drehachse des ersten Dreh-Betätigungsteils **101** ausgerichtet, jedoch brauchen die beiden Achsen nicht miteinander ausgerichtet oder parallel zu sein. Das siebte Verbindungsteil **121** ist mit dem dritten Linear-Betätigungsteil **122** verbunden, das entlang einer geraden Linie arbeitet, die rechtwinklig zur Drehachse des zweiten Dreh-Betätigungsteils **120** verläuft. Ein achtes Verbindungsteil **123** ist an einem Ende mit dem dritten Linear-Betätigungsteil **122** und an dem anderen Ende mittels eines Gelenks **124** an einem zweiten Halterungspunkt mit dem, sechsten Verbindungsteil **113** verbunden. Die Verbindungsteile **114** und **124** ermöglichen jeweils dem sechsten Verbindungsteil **113** ein Drehen mit mindestens zwei Dreh-Freiheitsgraden relativ zu den fünften und achten Verbindungsteilen **110** und **123**. Das sechste Verbindungsteil **113** und die Gelenke **114**, **124** sind ferner derart angeordnet, dass der Winkel zwischen den Verbindungsteilen **110** und **123**, gemessen um die Achse des sechsten Verbindungsteils **113**, variieren kann, z.B. indem einem der Gelenke **114** und **124** drei Freiheitsgrade gegeben werden oder indem ein Wälzgelenk in das sechste Verbindungsteil **113** eingebaut ist, so dass die beiden Abschnitte des sechsten Verbindungsteils **113** relativ zueinander um die Längsachse des sechsten Verbindungsteils **113** drehbar sind. Das Gelenk **114** ist relativ zu dem sechsten Verbindungsteil **113** gegen translatorische Bewegung in der Längsrichtung des sechsten Verbindungsteils **113** festgelegt, und das Gelenk **124** ist in der Lage zu einer translatorischen Bewegung relativ zum sechsten Verbindungsteil **113** in Längsrichtung des sechsten Verbindungsteils **113**,

um ein Variieren des Abstands zwischen den Gelenken **114** und **124** zu ermöglichen. Alternativ können beide Gelenke **114** und **124** gegen Translation relativ zu dem sechsten Gelenk **113** festgelegt sein, und das sechste Gelenk kann eine teleskopierbare Struktur aufweisen, mittels derer der Abstand zwischen den Gelenken **114** und **124** variieren kann.

[0071] In dieser Geometrie bewegen sich die Gelenke **109** und **111** jeweils in einem zweidimensionalen Raum, d.h. in einer Ebene. Im Gegensatz dazu kann das Gelenk **114** in einer dreidimensionalen Ebene bewegt werden. Beispielsweise kann das Gelenk **114** in [Fig. 6](#) aufwärtsbewegt werden, indem die ersten und zweiten Linear-Betätigungsteile **104**, **105** derart gesteuert werden, dass das Gelenk **109** zu der Drehachse des ersten Dreh-Betätigungsteils **101** bewegt wird, wobei das Gelenk **111** stationär gehalten wird, während das Gelenk **114** in [Fig. 6](#) abwärtsbewegt werden kann, indem die ersten und zweiten Linear-Betätigungsteile **104**, **105** derart gesteuert werden, dass das Gelenk **109** von der Drehachse des ersten Dreh-Betätigungsteils **101** weg bewegt wird, wobei das Gelenk **111** stationär gehalten wird. Somit kann die Werkzeughaltewelle **11** in der z-Achsen-Richtung bewegt werden, indem der Abstand des Gelenks von der Bewegungsebene des Gelenks **124** variiert wird, ohne dass ein separates Welleneinführungs-Betätigungsteil nötig ist. Folglich kann die Größe der Haltewellen-Haltestruktur **100** nahe dem oberen Ende der Werkzeughaltewelle **11** reduziert werden, was das Handhaben der Werkzeughaltewelle **11** in beengten Räumen erleichtert.

[0072] [Fig. 7](#) zeigt eine weitere mögliche Geometrie der Wellenhaltestruktur **110A** einer Handhabungsvorrichtung. Diese Geometrie ist ähnlich ausgelegt wie die Geometrie gemäß [Fig. 6](#), ist jedoch geeignet zum Handhaben zweier Gelenke in einem dreidimensionalen Raum. Das achte Verbindungsteil **123** gemäß [Fig. 6](#) ist jedoch durch ein achtes Verbindungsteil **125** und ein neuntes Verbindungsteil **126** ersetzt worden, die durch ein Gelenk **127** schwenkbar miteinander verbunden sind, das einen Freiheitsgrad um eine Achse herum ermöglicht, die parallel zu den Drehachsen der Gelenke **109**, **111** und **112** verläuft. Ein Ende des achten Verbindungsteils **125** ist an dem dritten Linear-Betätigungsteil **122** befestigt, und ein Ende des neunten Verbindungsteils **126** ist schwenkbar mit dem sechsten Verbindungsteil **113** verbunden, und zwar durch ein Gelenk **128**, das dem sechsten Verbindungsteil **113** mindestens zwei Dreh-Freiheitsgrade relativ zu dem neunten Verbindungsteil **126** verleiht. Wie bei der Ausführungsform gemäß [Fig. 6](#) sind das sechste Verbindungsteil **113** und die Gelenke **114**, **128** derart angeordnet, dass der Winkel zwischen den Verbindungsteilen **110** und **126**, gemessen um die Achse des sechsten Verbindungsteils **113**, mittels einer beliebigen geeigneten Struktur variiert werden kann. Im Gegensatz zu dem Verbind-

dungsteil **124** gemäß [Fig. 6](#) ist das Verbindungsteil **128** in [Fig. 7](#) gegen translatorische Bewegung relativ zu dem sechsten Verbindungsteil **113** in der Längsrichtung des sechsten Verbindungsteils **113** festgelegt. Da Gelenk **127** zwischen den achten und neunten Verbindungsteilen **125**, **126** wird im zweidimensionalen Raum bewegt, während das Verbindungsteil **128** zur Bewegung im dreidimensionalen Raum in der Lage ist. Im Wesentlichen ist die translatorische Freiheit des Gelenks **124** in [Fig. 6](#) durch das Drehgelenk **127** und das Verbindungsteil **126** ersetzt worden.

[0073] Bei dieser Geometrie kann jedes der Verbindungsteile **109**, **111** und **127** in einem zweidimensionalen Raum bewegt werden, während die Verbindungsteile **114** und **128** jeweils in einem dreidimensionalen Raum bewegt werden können. Somit kann wie bei der Geometrie gemäß [Fig. 6](#) die Werkzeughaltewelle **11** in der z-Achsen-Richtung bewegt werden, ohne dass ein separates Welleneinführungs-Betätigungsteil verwendet wird.

[0074] Bei der Geometrie gemäß [Fig. 7](#) kann für das Verbindungsteil **128** eine einfachere Struktur verwendet werden als für das Verbindungsteil **124** bei der Geometrie gemäß [Fig. 6](#), und die Reibung, die mit der translatorischen Bewegung des Verbindungsteils **124** gemäß [Fig. 6](#) in Bezug auf das sechste Verbindungsteil **113** einhergeht, kann beseitigt werden. Somit ist die Geometrie gemäß [Fig. 7](#) geeignet zur Durchführung feinerer Bewegungen der Werkzeughaltewelle **11** als die Geometrie gemäß [Fig. 6](#).

[0075] Die Anordnungen gemäß [Fig. 6](#) und [Fig. 7](#) können dahingehend modifiziert werden, dass die Dreh-Betätigungsteile **101**, **120** durch Linear-Betätigungsteile ersetzt werden, die das erste Verbindungsteil **103** translatorisch in einer Richtung bewegen können, welche quer (z.B. rechtwinklig) zu den Bewegungswegen der ersten und zweiten Linear-Betätigungsteile **104**, **105** verläuft, und die das siebte Verbindungsteil **121** translatorisch in einer Richtung bewegen können, welche quer (z.B. rechtwinklig) zu dem Bewegungsweg des dritten Linear-Betätigungsteils **122** verläuft.

[0076] [Fig. 8](#) zeigt schematisch die Geometrie einer weiteren Wellenhaltestruktur **140** einer Handhabungsvorrichtung. Die Wellenhaltestruktur **140** kann ein Gelenk zum Halten einer Werkzeughaltewelle **11** in einem dreidimensionalen Raum und eines anderen Gelenks in einem zweidimensionalen Raum handhaben. Ein erstes Dreh-Betätigungsteil **141**, das eine Drehachse aufweist, ist an einem stationären Support wie z.B. einem Rahmen oder einer Basis angeordnet. Ein erstes Verbindungsteil **142** ist an einem Ende mit dem ersten Dreh-Betätigungsteil **141** und an einem zweiten Ende mit dem ersten Ende eines zweiten Verbindungsteils **143** mittels eines Gelenks

144 verbunden, das von der Drehachse des ersten Dreh-Betätigungsteils **141** beabstandet ist. Das zweite Ende des zweiten Verbindungsteils **143** ist durch ein Gelenk **146** mit dem ersten Ende eines dritten Verbindungsteils **145** verbunden. Das zweite Ende des dritten Verbindungsteils **145** ist mittels eines Gelenks **148** für die Werkzeughaltewelle **11** schwenkbar mit einem Ende eines vierten Verbindungsteils **147** verbunden. Die Werkzeughaltewelle **11** ist an dem vierten Verbindungsteil **147** befestigt. Ein zweites Dreh-Betätigungsteil **149** dreht ein drittes Dreh-Betätigungsteil **150** um eine Drehachse. Zur Vereinfachung der Kinematik sind die Drehachsen der ersten und zweiten Dreh-Betätigungsteile **141**, **149** ausgerichtet, jedoch brauchen sie nicht ausgerichtet oder parallel zu sein. Das dritte Dreh-Betätigungsteil **150** dreht ein fünftes Verbindungsteil **151** um eine Drehachse, die quer (z.B. rechtwinklig) zu der Drehachse des zweiten Dreh-Betätigungsteils **149** verläuft. Das fünfte Verbindungsteil **151** ist mit dem dritten Verbindungsteil **145** durch ein Gelenk **152** verbunden, das einen Freiheitsgrad um eine Achse aufweist, die quer (z.B. rechtwinklig) zu der Drehachse des dritten Dreh-Betätigungsteils **150** und rechtwinklig zu der Achse des Verbindungsteils **145** verläuft. Ein viertes Dreh-Betätigungsteil **160**, das eine Drehachse aufweist, ist an einem stationären Support angeordnet. In [Fig. 8](#) ist die Drehachse des vierten Dreh-Betätigungsteils **160** mit denjenigen der ersten und zweiten Dreh-Betätigungsteile **141**, **149** ausgerichtet, jedoch brauchen die Achsen nicht ausgerichtet oder parallel zu sein. Ein sechstes Verbindungsteil **161** ist an einem Ende mit dem vierten Dreh-Betätigungsteil **160** verbunden und an einem zweiten Ende mit einem Linear-Betätigungsteil **162** verbunden, das in einer geraden Linie wirkt. Bei dem vorliegenden Beispiel verläuft der Bewegungsweg des Linear-Betätigungsteils **162** rechtwinklig zu der Drehachse des vierten Dreh-Betätigungsteils **160**, so dass sich jeder Punkt auf dem Verbindungsteil **163** in einer Ebenen bewegt; es ist jedoch stattdessen auch möglich, dass der Bewegungsweg nicht rechtwinklig zu der Drehachse des vierten Dreh-Betätigungsteils **160** verläuft. Ein siebtes Verbindungsteil **163** ist an einem Ende mit dem Linear-Betätigungsteil **162** und an dem anderen Ende mit einem zweiten Gelenk **164** verbunden, das schwenkbar mit dem vierten Verbindungsteil **147** verbunden ist. Das Gelenk **148** ist gegen Translation relativ zu dem vierten Verbindungsteil **147** in dessen Längsrichtung festgelegt. Ferner sind die Gelenke **148** und **164** derart angeordnet, dass der Abstand zwischen ihnen variieren kann. Beispielsweise kann das Gelenk **164** zu einer translatorischen Bewegung relativ zu dem vierten Verbindungsteil **147** in dessen Längsrichtung in der Lage sein, oder das Gelenk **164** kann gegen Translation relativ zu dem vierten Verbindungsteil **147** festgelegt sein, und das vierte Verbindungsteil **147** kann eine teleskopierbare Struktur aufweisen. Jedes der Gelenke **148**, **164** erlaubt dem vierten Verbindungsteil **147** ein Verschwenken relativ

zu dem dritten oder siebten Verbindungsteil **145**, **163** mit mindestens zwei Dreh-Freiheitsgraden. Das vierte Verbindungsteil **147** und die Gelenke **148**, **164** sind ferner derart angeordnet, dass der Winkel zwischen den Verbindungsteilen **145** und **163**, gemessen um die Achse des vierten Verbindungsteils **147**, variieren kann. Beispielsweise kann eines der Gelenke **148**, **164** drei Dreh-Freiheitsgrade ermöglichen, oder die Gelenke **148**, **164** können zwei Dreh-Freiheitsgrade ermöglichen, und es kann ein zusätzliches Drehgelenk (oder Wälzgelenk) in dem vierten Verbindungsteil **147** enthalten sein, um das vierte Verbindungsteil **147** in zwei Abschnitte zu unterteilen, die relativ zueinander um die Längsachse des vierten Verbindungsteils **147** drehbar sind.

[0077] Für die Gelenke **144** und **146** können zahlreiche verschiedene Strukturen verwendet werden. Beispielsweise können beide Gelenke drei Freiheitsgrade aufweisen (z.B. in Form zweier Kugelgelenke oder Äquivalente derselben), oder ein Gelenk kann zwei Freiheitsgrade aufweisen (z.B. in Form eines Kardangelenks oder eines Äquivalents desselben), während das andere Gelenk drei Freiheitsgrade aufweist (z.B. in Form eines Kugelgelenks oder eines Äquivalents desselben), oder beide Gelenke können zwei Freiheitsgrade aufweisen (z.B. in Form zweier Kugelgelenke oder Äquivalente derselben) und ein weiteres Gelenk (ein Wälzgelenk) kann in das zweite Verbindungsteil **143** eingebaut sein, um den beiden Abschnitten des zweiten Verbindungsteils **143** zu ermöglichen, sich relativ zueinander um die Längsachse des zweiten Verbindungsteils **143** zu drehen.

[0078] Von den fünf Betätigungsteilen, die bei dieser Anordnung verwendet werden, sind drei stationär, und das dritte Betätigungsteil **150** und das Linear-Betätigungsteil **162** können derart angeordnet werden, dass ihre Schwerpunkte so nahe wie möglich an den Drehachsen der zweiten und vierten Dreh-Betätigungsteile **149** bzw. **160** angeordnet sind, so dass ihre Trägheitsmomente um diese Achsen herum minimiert sind. Somit kann die Wellenhaltestruktur **140** als Ganzes ein sehr geringes Trägheitsmoment aufweisen, was unter dem Aspekt einer Erhöhung der Handhabungspräzision der Handhabungsvorrichtung wünschenswert ist.

[0079] Die ersten, zweiten und dritten Dreh-Betätigungsteile **141**, **149**, **150** können zusammen das Gelenk **148** in eine beliebige Position im dreidimensionalen Raum bewegen, während das vierte Dreh-Betätigungsteil **160** und das Linear-Betätigungsteil **162** zusammen das Gelenk **164** in eine beliebige Position im zweidimensionalen Raum bewegen können. Durch entsprechende Steuerung der Positionen der Gelenke **148** und **164** kann die Werkzeughaltewelle **11** mit einem virtuellen Schwenkpunkt ausgerichtet gehalten werden, und die Werkzeughaltewelle **11** kann in der z-Achsen-Richtung bewegt werden, ohne

dass ein Welleneinführungs-Betätigungsteil erforderlich ist.

[0080] In einer Weise ähnlich derjenigen, in der die Ausführungsform gemäß **Fig. 6** zur Bildung der Ausführungsform gemäß **Fig. 7** modifiziert werden kann, kann die Ausführungsform gemäß **Fig. 8** dahingehend modifiziert werden, dass das Verbindungsteil **163** durch zwei schwenkbar miteinander verbundene Verbindungsteile ersetzt wird (die den Verbindungsteilen **125** und **126** gemäß **Fig. 7** entsprechen) und das zweite Gelenk **164** durch ein Gelenk ersetzt wird, das dem Gelenk **128** gemäß **Fig. 7** entspricht, das gegen eine translatorische Bewegung relativ zu dem Verbindungsteil **147** festgelegt ist.

[0081] Eine Wellenhaltestruktur gemäß der vorliegenden Erfindung ist nicht auf die Ausrichtungen gemäß **Fig. 3-Fig. 8** beschränkt und kann jede gewünschte Ausrichtung relativ zur Vertikalen einnehmen. Beispielsweise kann bei der Anordnung gemäß **Fig. 6** die Ausrichtung um 180 Grad umgekehrt werden, so dass das erste Dreh-Betätigungsteil **101** und die ersten und zweiten Linear-Betätigungsteile **104**, **105** unter dem zweiten Dreh-Betätigungsteil **130** und dem dritten Linear-Betätigungsteil **122** angeordnet sind.

[0082] Die bei den Ausführungsformen gemäß **Fig. 3-Fig. 8** verwendeten Linear- und Dreh-Betätigungsteile sind nicht auf irgendeinen bestimmten Typ beschränkt. Zu den Beispielen geeigneter Linear-Betätigungsteile zählen Linear-Elektromotoren, Drehmotoren, die so angeschlossen sind, dass sie Umsetzmechanismen (wie z.B. Bügelschrauben oder Zahnstangengetriebe) zum Umsetzen von Dreh- zu Linearbewegung antreiben, und hydraulische oder pneumatische Zylinder. Wenn die Werkzeughaltewelle nur eine kleine Anzahl von Ausrichtungen anzunehmen braucht, können Linear-Betätigungsteile verwendet werden, die nur für eine kleine Anzahl diskreter Zustände ausgelegt sind, z.B. ein Magnet; wenn jedoch gewünscht ist, die Werkzeughaltewelle über einen fortlaufenden Bereich von Winkeln relativ zur Vertikalen zu bewegen, ermöglichen die Linear-Betätigungsteile vorzugsweise eine im Wesentlichen kontinuierlichen Positions- und Kraftsteuerung. Unter den verschiedenen Typen von Linear-Betätigungsteilen sind Linear-Elektromotoren besonders geeignet, insbesondere für Anwendungsfälle, bei denen eine präzise Steuerung des Werkzeughaltewellen-Winkels gewünscht ist. Linearmotoren erzeugen eine lineare Abtriebskraft, so dass sie verwendbar sind zum direkten Antreiben von Teilen der Werkzeughaltestruktur ohne die Notwendigkeit von Kugelgewindespindeln, Kabeln oder anderer Bewegungs-umsetzmechanismen (die einen Gegenschlag, eine vergrößerte Trägheit und eine vergrößerte Reibung verursachen, was in jedem Fall nachteilig für eine präzise Steuerung der Werkzeughaltewelle ist). So-

mit ermöglichen Linearmotoren ein Handhaben der Werkzeughaltewelle mit hoher Präzision. Zudem ist die bewegbare Masse eines Linearmotors im Wesentlichen unabhängig vom Bewegungsbereich des bewegbaren Teils des Motors. Im Gegensatz dazu tendiert bei den meisten anderen Typen von Linear-Betätigungsteilen, einschließlich hydraulischer Zylinder oder Motoren, die mit Kugelgewindespindeln verbunden sind, ein Betätigungsteil mit einem langen Bewegungsbereich dazu, eine größere bewegbare Masse, die eine Drehung und/oder Translation vollzieht, aufzuweisen als ein Betätigungsteil mit einem kurzen Bewegungsbereich. Somit können Linearmotoren, die als Linear-Betätigungsteile verwendet werden, einen langen Bewegungsbereich aufweisen, während sie dennoch eine geringe bewegbare Masse und ein niedriges Trägheitsmoment aufweisen. Ein weiterer Vorteil von Linearmotoren besteht darin, dass sie eine sehr geringe Reibung zeigen, was zusammen mit der geringen bewegbaren Masse und der geringen Trägheit eine hohe Zweckmäßigkeit unter dem Aspekt des Erzielens einer präzisen Kraftsteuerung und/oder Positionsteuerung sowie einer glatten Bewegung ermöglicht. Diese niedrige Reibung führt dazu, dass die Linearmotoren rückantreibbar sind, d.h. sie können durch eine externe Kraft angetrieben werden, die in Gegenrichtung zu der Richtung der vom Motor ausgeübten Kraft ausgeübt wird. Diese Rück-Antreibbarkeit ist bei einer chirurgischen Handhabungsvorrichtung zweckmäßig, da sie der Handhabungsvorrichtung Anpassbarkeit verleiht. Wenn sich somit z.B. der Patient während des chirurgischen Eingriffs aufgrund einer unbeabsichtigten Muskelbewegung bewegt und eine Kraft auf irgendeinen Teil der Handhabungsvorrichtung ausübt, können die Handhabungsvorrichtungen **10** rück-angetrieben werden, um der Handhabungsvorrichtung zu ermöglichen, sich unter der vom Patienten ausgeübten Kraft zu bewegen, statt sich als starres Objekt zu verhalten. Somit vergrößert die Rück-Antreibbarkeit die Sicherheit einer Handhabungsvorrichtung. Ein besonders bevorzugtes Beispiel eines Linear-Betätigungsteils ist ein Permanentmagnet-Gleichstrom-Linearmotor des Typs, der von Trilogy Systems in Webster, Texas, und von Northern Magnetics in Santa Clarita, California hergestellt wird, obwohl auch andere Varianten und Marken von Linearmotoren verwendet werden können, wie z.B. Wechselstrom-Vektorantrieb-Linearmotoren. Bei den gezeigten Ausführungsformen weisen die mit der vorliegenden Erfindung verwendeten Elektromotoren eine stationäre Magnetbahn und eine bewegbare Wicklungseinheit auf, die entlang der Magnetbahn bewegbar ist; es ist jedoch auch möglich, Motoren mit einem bewegbaren Magneten und einer stationären Wicklungseinheit zu verwenden.

[0083] Die Dreh-Betätigungsteile sind ebenfalls nicht auf einen bestimmten Typ beschränkt. Bürstenlose schlitzzlose Gleichstrommotoren sind besonders

geeignet, um Drehmomentabweichungen und Verkämmung zu vermeiden, jedoch können auch andere Typen wie z.B. Schrittmotoren verwendet werden. Wenn ein Motor als Dreh-Betätigungsteil verwendet wird, ist der Motor vorzugsweise direkt mit einem zu drehenden Verbindungsteil verbunden, um Gegen-schlag, Reibung und Trägheit zu reduzieren und die Fähigkeit zur direkten Steuerung des auf den Motor aufgetragenen Drehmoments zu verbessern, wobei es jedoch auch möglich ist, ein Untersetzungsgetriebe zwischen dem Motor und dem Verbindungsteil anzuordnen.

[0084] Die verschiedenen Betätigungsteile können mit Sensoren ausgestattet sein, um die Positionen der bewegbaren Teile der Betätigungsteile oder der von den Betätigungsteilen bewegten Teile zu detektieren und dadurch ein Bestimmen der Stellen der Gelenke für die Werkzeughaltewelle zu ermöglichen. Es kann eine weite Vielfalt herkömmlicher Sensoren verwendet werden, um die Positionen mechanisch, magnetisch, optisch oder in anderer Weise zu detektieren. Wenn eine Positions-Feinsteuerung eines Linear-Betätigungsteils gewünscht ist, ist ein holographischer interferometrischer Linearkodierer besonders geeignet zur Verwendung als Positionssensor, da er eine Position mit einer feinen Auflösung von sogar 10 Nanometern erfassen kann. Ein Beispiel eines verwendbaren holographischen interferometrischen Linear-Positionssensors ist der von MicroE, Inc. in Natick, Massachusetts hergestellte Sensor. Ein derartiger Linear-Positionssensor weist eine längliche Positionsskala und eine Positionsleseeinheit auf, in der ein Schlitz ausgebildet ist, in dem die Positionsskala bewegbar angeordnet werden kann. Entweder die Positionsskala oder die Positionsleseeinheit können an einem bewegbaren Teil des Linear-Betätigungsteils angeordnet sein, und die andere der beiden kann an einem stationären Teil angeordnet sein. Die Positionsleseeinheit erzeugt ein elektrisches Ausgangssignal, das die Position der Positionsskala relativ zu der Positionsleseeinheit angibt. Ein Beispiel eines Positionssensors, der zur Verwendung mit Dreh-Betätigungsteilen geeignet ist, ist ein von MicroE, Inc. hergestellter holographischer interferometrischer Drehkodierer.

[0085] In ähnlicher Weise können die verschiedenen Betätigungsteile mit Sensoren zum Detektieren der von den Betätigungsteilen aufgetragenen Kräfte oder Drehmomente versehen sein und dadurch ein Bestimmen der auf die Werkzeughaltewelle aufgetragenen Kräfte und Drehmomente ermöglichen. Diese sensorische Information kann in einer Feedback-Regelschleife verwendet werden, um die auf die Werkzeughaltewelle aufgetragenen Kräfte und Drehmomente zu steuern, und/oder – bei Verwendung in Verbindung mit einer Antriebssteuervorrichtung, die zum Erzeugen von Kräften in der Lage ist – um ein Feedback dieser Kräfte und Drehmomente

zum Chirurgen oder Bediener, der die Werkzeughaltewelle steuert, zu ermöglichen.

[0086] Zum Detektieren der von den Betätigungsteilen aufgebrachtten Kräfte oder Drehmomente kann jedes bekannte Verfahren der Messung von Kräften und/oder Drehmomenten angewandt werden. Ein Beispiel eines geeigneten Verfahrens besteht in der Anordnung von Spannungsmessern an strukturellen Teilen.

[0087] [Fig. 9](#) zeigt schematisch eine Ausführungsform einer Handhabungsvorrichtung, welche die Geometrie gemäß [Fig. 7](#) aufweist und zwei Gelenke im dreidimensionalen Raum bewegen kann. Die Handhabungsvorrichtung weist eine Werkzeughaltewelle **170**, die an einem Ende ein chirurgisches Werkzeug **171** trägt, und eine Wellenhaltestruktur **180** auf, welche die Werkzeughaltewelle **170** trägt und in der Lage ist, die Werkzeughaltewelle **170** mit mehreren Freiheitsgraden zu handhaben.

[0088] Die Wellenhaltestruktur **180** weist ein Support-Basis **181** auf, die bei Positionierung an einem Boden **182** gezeigt ist. Die Basis **181** kann mit Rollen oder anderen Teilen versehen sein, um ihr Mobilität zu verleihen, oder sie kann als stationäres Teil vorgesehen sein. An der Basis **181** ist ein Halterahmen **183** befestigt. Zur Vergrößerung des Bewegungsbereichs der Werkzeughaltewelle **170** kann die Basis **181** mit einem Mechanismus zum Anheben oder Absenken oder anderweitigen Bewegen des Halterahmens versehen sein. Beispielsweise kann die Basis einen stationären unteren Teil **181a** und einen oberen Teil **181b** aufweisen, der relativ zu dem unteren Teil **181a** angehoben oder abgesenkt und/oder um eine vertikale Achse gedreht werden kann. Der obere Teil **181b** kann mittels jeder beliebigen geeigneten Anordnung angehoben und abgesenkt werden, z.B. durch hydraulische Zylinder, pneumatische Zylinder oder einen Elektromotor, der sich in Antriebsverbindung mit dem oberen Teil **181b** befindet, z.B. über ein Zahnrad, das in eine an dem oberen Teil **181b** ausgebildete Zahnstange eingreift. Wenn der obere Teil **181b** relativ zu dem unteren Teil **181a** drehbar ist, kann er durch einen Antriebsmechanismus wie z.B. einen Motor gedreht werden, oder er kann manuell drehbar sein. Es kann eine lösbare mechanische Verriegelung vorgesehen sein, um bei Bedarf den oberen Teil **181b** in an einer Drehung zu hindern.

[0089] Der Rahmen **183** hält erste und zweite Arme, die erste und zweite Dreh-Betätigungsteile **185**, **200** in Form bürstenloser Gleichstrommotoren aufweisen, deren Drehachsen miteinander ausgerichtet sind. Jeder Dreh-Betätigungsteil kann mit einem nicht gezeigten Kodierer oder einem anderen Typ von Drehpositionssensor zum Detektieren der Drehposition seiner Abtriebswelle versehen sein. Er kann auch mit einem Drehmomentsensor zum Detektieren des Ab-

triebs-Drehmoments des Betätigungsteils versehen sein.

[0090] Die Abtriebswelle des ersten Dreh-Betätigungsteils **185** ist mit dem Rahmen **186** verbunden, an dem erste und zweite Linear-Betätigungsteile **187**, **188** angeordnet sind. Das erste Linear-Betätigungsteil **187** kann ein erstes Verbindungsteil **190** in der Längenrichtung des ersten Verbindungsteils **190** translatorisch bewegen, und das zweite Linear-Betätigungsteil **188** kann ein zweites Verbindungsteil **191** in der Längenrichtung des zweiten Verbindungsteils **191** translatorisch bewegen. Beide Linear-Betätigungsteile **187**, **188** wirken in einer Richtung, die rechtwinklig zur Drehachse des ersten Dreh-Betätigungsteils **185** verläuft. Ein Ende des ersten Verbindungsteils **190** ist mittels eines Gelenks **193** schwenkbar mit einem ersten Ende eines dritten Verbindungsteils **192** verbunden, und ein Ende des zweiten Verbindungsteils **191** ist mittels eines Gelenks **195** schwenkbar mit dem ersten Ende eines vierten Verbindungsteils **194** verbunden. Das zweite Ende des vierten Verbindungsteils **194** ist mittels eines Gelenks **198** schwenkbar mit einem Halterahmen **197** verbunden, und das zweite Ende des dritten Verbindungsteils **192** ist mit dem vierten Verbindungsteil **194** zwischen seinen beiden Enden mittels eines Gelenks **196** schwenkbar verbunden.

[0091] Das zweite Dreh-Betätigungsteil **200** dreht ein drittes Linear-Betätigungsteil **201** um die Drehachse des zweiten Dreh-Betätigungsteils **200**. Das dritte Linear-Betätigungsteil **201** kann ein fünftes Linear-Betätigungsteil **205** in einer Richtung rechtwinklig zur Drehachse des zweiten Dreh-Betätigungsteils **200** bewegen. Ein Ende des fünften Verbindungsteils **205** ist durch ein Gelenk **207** schwenkbar mit dem ersten Ende eines sechsten Verbindungsteils **206** verbunden. Das zweite Ende des sechsten Verbindungsteils **206** ist mittels eines Gelenks **208** schwenkbar mit dem Halterahmen **197** verbunden.

[0092] Jedes der Linear-Betätigungsteile **187**, **188**, **201** weist einen bürstenlosen Linear-Gleichstrommotor mit einer langgestreckten Magnetbahn **187a**, **188a**, **201a** und einer Wicklungseinheit **187b**, **188b**, **201b** auf, die sich translatorisch entlang der Magnetbahn bewegen kann, obwohl, wie oben angeführt, die Wicklungseinheiten stationär sein können und die Magnetbahnen relativ zu den Wicklungseinheiten translatorisch bewegbar sein können. Jede Wicklungseinheit kann direkt von der entsprechenden Magnetbahn oder von einem am Linearmotor vorgesehenen Lager gehalten sein, oder sie kann von einem Teil gehalten sein, das separat von dem Linearmotor ausgebildet ist, z.B. einem Linearlager, das parallel zur Magnetbahn verläuft. Ein Kugel-Gleitelement oder ein rezirkulierendes Linear-Gleitelement sind besonders geeignet als Linearlager, da sie einen äußerst niedrigen Reibkoeffizienten aufweisen. Zu den

Beispielen geeigneter Kugel-Gleitelemente zählen diejenigen, die von THK Co. Ltd., Japan und Deltron Precision, Inc. in Bethel, Connecticut erhältlich sind. Ein niedriger Reibkoeffizient ist bei einer Linearführung hoch vorteilhaft, da sie den Linearmotoren (und somit den Gelenken für die Werkzeughaltewelle) die Möglichkeit gibt, sich in äußerst feinen Inkrementen zu bewegen, mit dem Ergebnis, dass die Ausrichtung der Werkzeughaltewelle mit einem hohen Präzisionsgrad steuerbar ist und passiv rück-antriebbar ist. Der niedrige Reibkoeffizient verbessert ferner die Fähigkeit eines Steuersystems, die auf die Werkzeughaltewelle **170** aufgebrachten Kräfte zu steuern. Jedes der ersten, zweiten und fünften Verbindungsteile ist schematisch dahingehend gezeigt, dass es auslegerartig von einer der Wicklungseinheiten gehalten ist, jedoch können die Verbindungsteile auch in einer anderen geeigneten Weise gehalten sein. Beispielsweise kann jedes Verbindungsteil durch den bewegbaren Teil eines Linearlagers in der gleichen Weise gehalten sein, wie es für die Wicklungseinheiten gilt.

[0093] Jedes der Verbindungsteile **198** und **208** ermöglicht mindestens zwei Dreh-Freiheitsgrade des Halterahmens **197** relativ zu den vierten und siebten Verbindungsteilen **194**, **206**, so dass der Halterahmen **197** Kipp- und Gierbewegungen relativ zu diesen Verbindungsteilen ausführen kann. Ferner kann jedes der Verbindungsteile **198**, **208** drei Freiheitsgrade ermöglichen, so dass der Halterahmen **197** relativ zu einem der Verbindungsteile **194** und **206** rollen kann. Beispielsweise kann eines der Gelenke ein Kardangelenke oder ein Äquivalent desselben sein, während das andere Gelenk ein Kugelgelenk oder ein Äquivalent desselben ist. Alternativ können beide Gelenke **198**, **208** zwei Dreh-Freiheitsgrade aufweisen, und in dem Halterahmen **197** kann ein Wälzgeltenk enthalten sein, um zu ermöglichen, dass sich zwei Abschnitte des Halterahmens **197** relativ zueinander und um die Längsachse des Halterahmens **197** drehen.

[0094] Die Werkzeughaltewelle **170** ist als relativ zum Halterahmen **197** stationär gezeigt, kann jedoch stattdessen bewegbar sein. Wie weiter unten noch detaillierter beschrieben wird, kann es vorteilhaft sein, wenn die Werkzeughaltewelle **170** leicht von dem Halterahmen **197** abnehmbar ist, damit die Werkzeughaltewelle leicht ersetzt oder sterilisiert werden kann. Die Längsachse der Werkzeughaltewelle **170** ist versetzt von einer Linie gezeigt, welche die Mitten der Gelenke **198** und **208** verbindet, könnte jedoch auch mit dieser Linie übereinstimmen.

[0095] Zur Vereinfachung der Struktur und der Kinematik der Handhabungsvorrichtung sind sämtliche der Verbindungsteile geradlinige Teile, und die ersten, zweiten und fünften Verbindungsteile **190**, **191** und **205** werden von den entsprechenden Linear-Betätigungsteilen in parallelen Ebenen bewegt, die

rechtwinklig zur Ebene der Zeichnung verlaufen. Die Form der Verbindungsteile kann jedoch beliebig gewählt werden, und die ersten, zweiten und fünften Verbindungsteile können sich auch in nichtparallelen Ebenen bewegen.

[0096] Falls die Drehachsen der Dreh-Betätigungsteile **185**, **200** koaxial miteinander sind, kann die Werkzeughaltewelle **170** um diese Achsen geschwenkt werden, ohne dass die Positionen der Verbindungsteile relativ zueinander verändert werden, und zwar entweder durch gleichzeitige Betätigung der Dreh-Betätigungsteile **185**, **200** in der gleichen Richtung oder von Hand bei abgeschalteten Dreh-Betätigungsteilen. Es können Verriegelungsteile vorgesehen sein, um, wenn die Werkzeughaltewelle in der erwähnten Weise geschwenkt wird, eine Bewegung der Verbindungsteile relativ zueinander zu verhindern. Beispielsweise können die Wicklungseinheiten **187b**, **188b**, **201b** der Linearmotoren mit Verriegelungsmechanismen versehen sein, so dass sie in Bezug auf die entsprechenden Magnetbahnen lösbar immobilisiert werden können. Falls die Dreh-Betätigungsteile **185**, **200** nichtausgerichtete Achsen haben, kann es wünschenswert sein, den oberen Teil **181b** der Basis **181** um eine vertikale Achse relativ zu dem unteren Teil drehbar auszubilden, wobei in diesem Fall die Werkzeughaltewelle **170** um eine vertikale Achse gedreht werden kann, indem der obere Teil **181b** der Basis **181** und sämtliche von ihm getragenen Teile gedreht werden.

[0097] Die Linear-Betätigungsteile **187**, **188** können aufgrund der Belastung durch das Gewicht der Werkzeughaltewelle **170** und sämtlicher daran montierter zusätzlicher Betätigungsteile oder anderer Komponenten einem gewissen Maß an Schwerkrafteinwirkung ausgesetzt sein. Die Schwerkraftbelastung kann vollständig von den Betätigungsteilen **187** und **188** getragen werden, oder es kann ein Gegenbalance-Mechanismus zwischen den Verbindungsteilen **190**, **191** und dem Rahmen **186** hinzugefügt werden, um diese Belastung auszugleichen. Zu diesem Zweck kann jeder bekannte Gegenbalance-Mechanismus verwendet werden, einschließlich Kräftefedern, Luftzylindern mit niedriger Reibung und ähnlicher Vorrichtungen.

[0098] An verschiedenen Stellen können Kraftsensoren installiert sein, um die von den Betätigungsteilen ausgeübten Kräfte oder die auf verschiedene Teile der Handhabungsvorrichtung einwirkenden Kräfte zu detektieren. Bei der vorliegenden Ausführungsform ist jedes der Gelenke **193**, **195** und **207** mit einem Kraftsensor zum Detektieren der von jedem der Linear-Betätigungsteile **187**, **188** und **201** aufgebrachten Axialkraft versehen. [Fig. 23](#) zeigt eine isometrische Ansicht der mit den Gelenken **193**, **195** und **207** verbundenen Verbindungsteile, und [Fig. 24-Fig. 26](#) zeigen Ansichten verschiedener Teile

des Kraftsensors für das Gelenk **195**. Die Kraftsensoren für die Gelenke **193** und **207** können von ähnlicher Struktur sein. Wie in diesen Figuren gezeigt, weist das Gelenk **195** eine Platte **195a** auf, an deren einer Seite eine Welle **195b** gelagert ist, die drehbar mit Lagern zusammengreift, welche am Ende des Verbindungssteils **194** angeordnet sind. Das Gelenk **195** ist von einem Verbindungsteil **191** durch einen Rahmens **210** gehalten, an dem ein oder mehrere Spannungsmesser angeordnet sind, um die Spannungen zu messen, die aus den auf das Verbindungsteil **191** aufgebrachten Axialkräften resultieren. Der Rahmen **210** weist einen äußeren rechteckigen Rand **211** auf, der durch Stifte, Schweißungen oder andere geeignete Mittel an dem Verbindungsteil **191** befestigt ist. Der Rahmen **210** weist ferner eine Platte **212** auf, die an dem Rand **211** befestigt ist (beispielsweise können der Rand **211** und die Platte **212** einstückig miteinander oder als separate Teile ausgebildet sein) und mehrere Öffnungen **212a** aufweist, die mehrere Schenkel definieren. Die gezeigte Platte **212** weist zwei vertikale Schenkel **212b** und zwei horizontale Schenkel **212c** auf, welche die vertikalen Schenkel **212b** kreuzförmig schneiden. Das Gelenk **195** ist derart an dem Rahmen **210** befestigt, dass die Schenkel den auf das Gelenk **195** ausgeübten Kräften widerstehen kann. Beispielsweise hat das gezeigte Gelenk **195** eine Welle **195c**, die von der der Welle **195b** gegenüberliegenden Seite der Platte **195a** absteht und durch eine Öffnung **212d** in der Mitte der Platte **212** des Rahmens **210** hindurchläuft. Die Befestigung der Welle **195c** an der Platte **212** kann durch eine Mutter oder eine andere Befestigungsvorrichtung, durch Verbonden oder ein anderes gewünschtes Verfahren erfolgen, das ermöglicht, dass die auf das Gelenk **195** einwirkenden Kräfte auf den Rahmen **210** übertragen werden. Die Welle **195c** kann einen Teil aufweisen, der mit der im Rahmen **210** ausgebildeten Öffnung **212d** zusammengreift, um eine korrekte Ausrichtung des Gelenks **195** relativ zu dem Rahmen **210** zu gewährleisten. Beispielsweise hat die gezeigte Welle **195c** einen Schlitz **195d**, der mit einem in der Öffnung **212d** ausgebildeten Vorsprung zusammengreift.

[0099] An dem Rahmen **210** kann jede gewünschte Anzahl von Spannungsmessern zum Messen der aufgebrachten Belastungen angeordnet sein. Bei der vorliegenden Ausführungsform sind gemäß [Fig. 26](#) zwei zum Detektieren aufgebrachter Kräfte vorgesehene Spannungsmesser **214a** (die im Folgenden als Lastdetektions-Spannungsmesser bezeichnet werden) an der Rückfläche (der Fläche, die dem Verbindungsteil **191** zugewandt ist) der vertikalen Schenkel **212b** angeordnet, und zwei weitere Spannungsmesser **214b** (von denen nur einer gezeigt ist) zur Temperatur-Kompensation sind an Teilen des Rahmens **210** angeordnet, die während des Betriebs der Handhabungsvorrichtung **10** im Wesentlichen belastungsfrei sind, wie z.B. an den vertikalen Seitenflächen des

äußeren Randes **211** des Rahmens **210**. Der Außentemperatur-Kompensations-Spannungsmesser **214b** kann z.B. an der vertikalen Seitenfläche an der gegenüberliegenden Seite des Randes **211** angeordnet sein. Die vier Spannungsmesser **214a**, **214b** können zur Bildung einer Wheatstone-Brücke miteinander verbunden sein, wobei jeder der Spannungsmesser **214a** an den vertikalen Schenkeln **212b** elektrisch in Serie mit einem der Temperatur-Kompensations-Spannungsmesser **214b** verbunden ist. Der Wheatstone-Brücke kann in herkömmlicher Weise eine Spannung zugeführt werden, und das Ausgangssignale der Wheatstone-Brücke gibt die von dem Spannungsmesser gefühlten Belastungen an.

[0100] Wenn eine Kraft auf die Mitte des Rahmens **210** in der Längsrichtung des Verbindungsteils **191** aufgebracht wird, wird jeder der Lastdetektions-Spannungsmesser **214a** gleichermaßen in einen Spannungs- oder Kompressionszustand versetzt, und das Ausgangssignal der Wheatstone-Brücke ist der aufgebrachten Kraft proportional. Falls eine Kraft auf die Mitte des Rahmens **210** in der Richtung der Achse der vertikalen Schenkel **212b** aufgebracht wird, ist der eine der beiden Lastspannungsmesser **214a** unter Spannung gesetzt, während der andere zusammengedrückt ist. Die Signale von den beiden Lastdetektions-Spannungsmessern **214a** heben sich gegenseitig auf, und das Ausgangssignal der Wheatstone-Brücke ist im Wesentlichen Null. Falls ein um die Achse des horizontalen Schenkels verlaufendes Biegemoment auf den Rahmen **210** aufgebracht wird, werden die Lastdetektions-Spannungsmesser **214a** im gleichem Maß und einander entgegengesetzt belastet, so dass in diesem Fall auch das Ausgangssignal der Wheatstone-Brücke im Wesentlichen Null ist. Ein um die Längsachse des Verbindungsteils **191** aufgebrachtes Drehmoment, ein um die Achse der vertikalen Schenkel **212b** aufgebrachtes Drehmoment oder eine entlang der Achse der horizontalen Schenkel **212c** wirkende Kraft erzeugen keine wesentliche Verformung der Lastdetektions-Spannungsmesser **214a** und haben somit im Wesentlichen keine Auswirkung auf die Wheatstone-Brücke. Folglich kann die gezeigte Anordnung Kräfte in der Axialrichtung des Verbindungsteils **191** detektieren, bei denen es sich um die Kräfte handelt, die von dem Linear-Betätigungsteil **181** ausgeübt werden, und die Anordnung kann sämtliche anderen Kräfte, die auf das Verbindungsteil **191** oder das Gelenk **195** einwirken, ignorieren.

[0101] Der Rahmen **210** ist nicht auf irgendeine bestimmte Form eingeschränkt und braucht nicht mit Öffnungen **212a** oder Schenkeln **212b**, **212c** versehen zu sein. Jedoch ist die gezeigte Konfiguration mit zwei vertikalen Schenkeln **212b** und zwei horizontalen Schenkeln **212c** praktisch, da aufgrund ihrer geometrischen Einfachheit axiale Belastungen, die auf das Gelenk **195** einwirken, problemlos aus den von

den Lastdetektions-Spannungsmessern **214a** gemessenen Spannungen errechnet werden können.

[0102] Hinsichtlich der Spannungen, die von den Lastdetektions-Spannungsmessern **214** zuverlässig gemessen werden können, ist es vorzuziehen, dass die von dem Gelenk **195** auf den Rahmen **210** aufgebrachte Last an der Mitte des Rahmens **210** platziert wird, so dass der Widerstand gegen die Last im Wesentlichen vollständig von den Schenkeln des Rahmens **210** statt von dem Umfang des Rahmens **210** ausgeübt wird, da es in diesem Fall leichter ist, das Verhältnis zwischen den gemessenen Spannungen und der aufgebrachten Last zu berechnen. Falls jedoch die Verformung des Rahmens **210** aufgrund der aufgebrachten Last zu groß wird, können möglicherweise die an den Schenkeln **212b** oder dem Rahmen **210** angeordneten Lastdetektions-Spannungsmesser **214a** selbst beschädigt werden.

[0103] Der gezeigte Kraftmesser ist derart ausgebildet, dass derjenige Teil des Rahmens **210**, auf den Lasten aufgebracht werden, seinen Bereich vergrößert, wenn die Größe der Verformung zunimmt, damit die genannte Beschädigung verhindert wird. Gemäß **Fig. 24** und **Fig. 25**, die explodierte isometrische Ansichten des Kraftsensors zeigen, sind zwei Abstandhalter **215** und **216**, wie z.B. Unterlegscheiben, an gegenüberliegenden Seiten der Platte **212** des Rahmens **210** um die Welle **195c** des Gelenks **195** angeordnet, und ein Teil, das einen größeren Oberflächenbereich aufweist als der innere Abstandhalter **216**, wie z.B. eine Platte **217**, ist an der Welle **195c** nahe dem inneren Abstandhalter **216** angeordnet. Wenn keine Lasten auf das Gelenk **195** einwirken, halten die beiden Abstandhalter **215**, **216** die Platte **195a** des Gelenks **195** und die Platte **217** im Abstand von der Platte **212** des Rahmens **210**. Wenn eine Last unterhalb eines bestimmten Niveaus in einer der Axialrichtungen des Verbindungsteils **191** auf das Gelenk **195** aufgebracht wird, kontaktieren die Platte **195a** des Gelenks **195** und die Platte **217** den Rahmen **210** nicht, so dass Lasten auf den Rahmen **210** nur in dem Bereich nahe der Öffnung **212d** aufgebracht werden und der Widerstand gegen die Lasten im Wesentlichen vollständig von den Schenkeln des Rahmens **210** ausgeübt wird. Wenn eine auf den Rahmen **210** aufgebrachte Axiallast ein höheres Niveau erreicht, das niedriger gewählt ist als das Niveau, welches eine Beschädigung der Spannungsmesser **212b** oder des Rahmens **210** verursacht, kontaktiert die Platte **195a** des Gelenks **195** die Platte **212** des Rahmens **210**, und die Axiallast wird über einen größeren Bereich des Rahmens **210** verteilt, einschließlich z.B. des Umfangs der Platte **212** um die Schenkel herum, so dass die Verformung des Rahmens **210** daran gehindert wird, ein Niveau zu erreichen, welches Beschädigungen verursacht. In ähnlicher Weise kontaktiert, wenn eine auf den Rahmen **210** in der entgegengesetzten Axialrichtung einwirkende Last

ein bestimmtes Niveau erreicht, das niedriger gewählt ist als das Niveau, welches eine Beschädigung der Spannungsmesser **212b** oder des Rahmens **210** verursacht, die Platte **217** die innere Seite der Platte **212** (wie z.B. die horizontalen Schenkel **212c** und/oder den Umfang der Platte **212**) und verteilt die Axiallast über einen größeren Bereich der Platte **212**, um eine Beschädigung der Spannungsmesser **212b** oder des Rahmens **210** zu verhindern.

[0104] Es können zahlreiche andere Anordnungen verwendet werden, um die auf die Handhabungsvorrichtung einwirkenden oder von ihr ausgeübten Kräfte zu detektieren. Beispielsweise können Spannungsmesser oder andere Kraftsensoren direkt an den Betätigungsteilen oder den Verbindungsteilen der Handhabungsvorrichtung angeordnet sein.

[0105] **Fig. 10-Fig. 13** zeigen eine Anordnung einer Handhabungsvorrichtung, die eine Geometrie wie diejenige gemäß **Fig. 5** aufweist. **Fig. 10** zeigt eine isometrische Ansicht dieser Ausführungsform, **Fig. 11** zeigt eine Seitenansicht, **Fig. 12** zeigt eine vergrößerte Ansicht desjenigen Teils der Handhabungsvorrichtung, der in der Umgebung der Linear-Betätigungsteile gelegen ist, und **Fig. 13** zeigt eine vergrößerte Ansicht desjenigen Teils der Handhabungsvorrichtung, der eine Werkzeughaltewelle trägt. Wie in diesen Figuren gezeigt, weist die Handhabungsvorrichtung eine Werkzeughaltewelle **170** mit einem an deren unterem Ende angeordneten Werkzeug **171**, und eine Wellenhaltestruktur **220** auf, welche die Werkzeughaltewelle **170** bewegbar hält. Die Wellenhaltestruktur **220** weist eine Haltebasis **221** auf, die am Fußboden oder einer anderen Tragfläche angeordnet ist. Wie die Haltebasis **181** der Ausführungsform gemäß **Fig. 9** kann die Haltebasis **221** bewegbare Teile aufweisen. Beispielsweise kann sie einen stationären unteren Teil **221a** und einen oberen Teil **221b** aufweisen, der relativ zu dem unteren Teil **221a** angehoben oder abgesenkt und/oder um eine vertikale Achse relativ zu dem unteren Teil **221a** gedreht werden kann, wie im Zusammenhang mit **Fig. 9** beschrieben.

[0106] Ein erster Rahmen **222** ist oben an dem oberen Teil **221b** der Basis **221** angeordnet, und ein zweiter Rahmen **223** wird von dem ersten Rahmen **222** zur Drehung um eine Achse **224** gehalten, die in der Figur horizontal verläuft, jedoch schräg zur Horizontalen verlaufen kann. Der zweite Rahmen **223** kann entweder manuell oder durch einen Motor oder einen anderen Antriebsmechanismus gedreht werden, der an einem der Rahmen **222**, **223** angeordnet ist. An einem der Rahmen **222**, **223** kann eine Verriegelungsvorrichtung vorgesehen sein, um den zweiten Rahmen **223** lösbar gegen Drehung zu verriegeln. Der zweite Rahmen **223** trägt ein oberes Set von Linear-Betätigungsteilen **230**, **235** eines ersten Arms und ein unteres Set von Linear-Betätigungstei-

len **250**, **255** eines zweiten Arms, mittels derer die Werkzeughaltewelle **170** translatorisch bewegt und geschwenkt werden kann. Das erste Set von Betätigungsteilen weist ein erstes Linear-Betätigungsteil **230** mit einem bewegbaren Teil, der in einer geraden Linie in einer ersten Richtung bewegt werden kann, und ein zweites Linear-Betätigungsteil **235** auf, das an dem bewegbaren Teil des ersten Linear-Betätigungsteils befestigt ist und einen bewegbaren Teil aufweist, der relativ zu dem ersten Linear-Betätigungsteil **230** in einer quer (wie z.B. rechtwinklig) zu der ersten Richtung verlaufenden Richtung bewegt werden kann. Ein erstes Verbindungsteil **238** ist an dem bewegbaren Teil des zweiten Linear-Betätigungsteils **235** befestigt. Ähnlich dazu weist das zweite Set von Betätigungsteilen ein drittes Linear-Betätigungsteil **250** mit einem bewegbaren Teil, der in einer dritten Richtung bewegt werden kann, und ein viertes Linear-Betätigungsteil **255** auf, das an dem bewegbaren Teil des dritten Linear-Betätigungsteils **250** befestigt ist und einen bewegbaren Teil aufweist, der relativ zu dem dritten Linear-Betätigungsteil **250** in einer quer (wie z.B. rechtwinklig) zu der dritten Richtung verlaufenden Richtung bewegt werden kann. Ein zweites Verbindungsteil **258** ist an dem bewegbaren Teil des vierten Linear-Betätigungsteils **255** befestigt. In dieser Figur verlaufen die ersten und zweiten Richtungen rechtwinklig zueinander, die dritten und vierten Richtungen verlaufen rechtwinklig zueinander, die erste Richtung verläuft parallel zur der dritten Richtung, und die zweite Richtung verläuft parallel zu der vierten Richtung, so dass sich die bewegbaren Teile der Linear-Betätigungsteile sämtlich in parallelen Ebenen bewegen. Wie anhand von [Fig. 5](#) beschrieben, können die Richtungen jedoch auch unter anderen Winkeln relativ zueinander verlaufen. Die Linear-Betätigungsteile können von jedem gewünschten Typ sein. Bei der gezeigten Ausführungsform weist jedes Linear-Betätigungsteil **230**, **235**, **250**, **255** einen bürstenlosen Linear-Elektromotor mit einer langgestreckten Magnetbahn **231**, **236**, **251**, **256** und einem bewegbaren Teil auf, der eine Wicklungseinheit **232**, **237**, **252**, **257** aufweist, die sich in einer geraden Linie entlang der Magnetbahn bewegen kann. Die Magnetbahn **236** des zweiten Linear-Betätigungsteils **235** ist an der Wicklungseinheit **232** des ersten Linear-Betätigungsteils **230** befestigt, und die Magnetbahn **256** des vierten Linear-Betätigungsteils **255** ist an der Wicklungseinheit **252** des dritten Linear-Betätigungsteils **250** befestigt. Ferner ist das erste Verbindungsteil **238** an der Wicklungseinheit **237** des zweiten Linear-Betätigungsteils **235** befestigt, und das zweite Verbindungsteil **258** ist an der Wicklungseinheit **257** des vierten Linear-Betätigungsteils **255** befestigt. Jedes der Linear-Betätigungsteile kann mit einem Kodierer oder einem anderen Positionssensor versehen sein, um die Position der Wicklungseinheit des Betätigungsteils relativ zu der Magnetbahn zu detektieren. Ferner kann jedes Linear-Betätigungsteil mit einem Kraftsensor ver-

sehen sein, um die Abtriebskraft des Betätigungsteils zu detektieren. Jede der Wicklungseinheiten ist dahingehend gezeigt, dass sie ausschließlich von der Magnetbahn des entsprechenden Motors gehalten ist, und die Verbindungsteile **238**, **258** sind dahingehend gezeigt, dass sie ausschließlich von den Wicklungseinheiten der zweiten und vierten Linear-Betätigungsteile **235**, **255** gehalten sind. Jedoch kann jedes dieser Teile auch von anderen Teilen als den Linear-Betätigungsteilen selbst gehalten sein, wie z.B. von separaten Linear-Lagern.

[0107] Die von den Linear-Betätigungsteilen entfernt gelegenen Enden der ersten und zweiten Verbindungsteile **238**, **258** sind mit dem Halterahmen **270** durch erste und zweite Gelenke **240** bzw. **260** verbunden, von denen jedes zwei Freiheitsgrade des Halterahmens **270** relativ zu dem entsprechenden Verbindungsteil ermöglichen kann. Eine der Gelenke **240**, **260** kann zur Ermöglichung dreier Freiheitsgrade ausgelegt sein; da jedoch jedes Verbindungsteil **238**, **258** eine konstante Ausrichtung im Raum beibehält, wird ein dritter Freiheitsgrad nicht benötigt. Der Abstand zwischen den Gelenken **240** und **260** ist variierbar. Beispielsweise kann eines der Gelenke **240**, **260** relativ zu dem Halterahmen **270** gegen Translation festgelegt sein, während das andere Gelenk zur Translation relativ zum Halterahmen **270** in der Lage ist. Alternativ können beide Gelenke **240**, **260** gegen Translation relativ zum Halterahmen **270** festgelegt sein, und derjenige Teil des Halterahmens **270**, der mit den Gelenken **240**, **260** verbunden ist, kann eine teleskopierbare Struktur aufweisen. Die Gelenke können in ihrer Struktur ähnlich wie diejenigen der Ausführungsform gemäß [Fig. 9](#) ausgebildet sein. Bei diesem Beispiel weist das erste Gelenk **240** ein Joch **241**, das schwenkbar mit einer Hülse **242** verbunden ist, die zwecks Drehung um eine Achse A gleitbar um eine Stange **271** des Halterahmens **270** passt, und einen Kragen **243** auf, der mit dem Joch **241** verbunden ist und passend auf ein Ende des ersten Verbindungsteils **238** gesetzt sowie an diesem befestigt ist. Der Kragen weist ein inneres Lager auf, welches das Joch **241** drehbar derart hält, dass sich das Joch **241** um eine rechtwinklig zur Achse A verlaufende Achse B drehen kann. Das zweite Gelenk **260** weist ebenfalls ein Joch **261** auf, das schwenkbar mit einer Hülse **262** verbunden ist und das drehbar von einem Kragen **263** gehalten ist, der passend auf ein Ende des zweiten Verbindungsteils **258** gesetzt sowie an diesem befestigt ist. Die Hülse **262** ist drehbar an einer Buchse **264**, einem Kugellager oder einem ähnlichen Teil angeordnet, das an der Stange **271** des Halterahmens **270** befestigt ist. Die Hülse **262** kann sich an der Buchse **264** um die Längsachse der Stange **271** drehen, wird jedoch daran gehindert, eine translatorische Bewegung in der Längsrichtung der Stange **271** auszuführen.

[0108] Der Halterahmen **270** hält ein Linear-Betäti-

gungsteil **280** zur Wellen-Einführung, das seinerseits die Werkzeughaltewelle **170** zur Bewegung in x-Achsen-Richtung hält. Das Linear-Betätigungsteil **280** kann gemäß einem beliebigen der Typen ausgebildet sein, die im Zusammenhang mit den vorhergehenden Ausführungsformen beschrieben wurden. Das gezeigte Linear-Betätigungsteil **280** ist ein Linear-Elektromotor, der eine langgestreckte Magnetbahn **281**, welche an dem Halterahmen **270** befestigt ist, und eine Wicklungseinheit **282** aufweist, welche in der z-Achsen-Richtung entlang der Magnetbahn **281** bewegbar ist. Die Werkzeughaltewelle **170** ist derart an der Wicklungseinheit befestigt, dass sie durch diese translatorisch bewegt werden kann.

[0109] Wenn das untere Ende der Werkzeughaltewelle **170** in den Körper des Patienten eingeführt wird, wird die Werkzeughaltewelle **170** typischerweise ausschließlich von den Linear-Betätigungsteilen betätigt, während eine Translation und/oder Drehung des oberen Teils **221b** der Basis **221** und eine Drehung des zweiten Rahmens **223** relativ zu dem ersten Rahmen **222** typischerweise zur Grobpositionierung der Werkzeughaltewelle **170** verwendet werden, wenn diese nicht in den Körper des Patienten eingeführt wird. Die Drehbarkeit des zweiten Rahmens **223** relativ zum ersten Rahmen **222** ist besonders zweckmäßig, da sie der Werkzeughaltewelle **170** die Möglichkeit gibt, jeden Winkel relativ zur Vertikalen einzunehmen. Beispielsweise kann die Werkzeughaltewelle **170** in eine Position bewegt werden, in der sie horizontal oder von oben nach unten umgekehrt angeordnet ist, wobei das Werkzeug **171** höher positioniert ist als der Rest der Werkzeughaltewelle **170**.

[0110] [Fig. 14](#) zeigt eine Ausführungsform einer Handhabungsvorrichtung, die eine Geometrie wie diejenige gemäß [Fig. 8](#) aufweist. Sie weist eine Werkzeughaltewelle **315**, die an ihrem unteren Ende ein Werkzeug **316** trägt, und eine Wellenhaltestruktur **290** auf, welche die Werkzeughaltewelle **315** bewegbar trägt. Die Wellenhaltestruktur **290** weist einen oberen Teil **291**, der ein Gelenk für die Werkzeughaltewelle **315** im dreidimensionalen Raum handhaben kann, und einen unteren Teil **310** auf, der ein weiteres Gelenk für die Werkzeughaltewelle **315** im zweidimensionalen Raum handhaben kann. Die oberen und unteren Teile **291**, **310** sind typischerweise an einer nicht gezeigten Haltestruktur befestigt, wie z.B. an einer Basis wie denjenigen gemäß [Fig. 9](#) und [Fig. 10](#).

[0111] Der obere Teil **291** weist erste bis dritte Dreh-Betätigungsteile **292**, **293**, **294** und erste bis dritte Verbindungsteile **296**, **298**, **300** auf. Das erste Dreh-Betätigungsteil **292** kann einen Rahmen **295**, der das dritte Dreh-Betätigungsteil **294** hält, um eine Achse drehen. Das zweite Dreh-Betätigungsteil **293** ist in der Lage, das erste Ende des ersten Verbindungsteils **296** an jedem Punkt entlang eines Kreis-

bogens zu positionieren, der konzentrisch mit der Drehachse des zweiten Dreh-Betätigungsteils **293** ist. Das dritte Dreh-Betätigungsteil **294** kann das dritte Verbindungsteil **300** um eine Achse drehen, die rechtwinklig zu den Achsen der ersten und zweiten Dreh-Betätigungsteile **292**, **293** verläuft und der Längsachse des dritten Verbindungsteils **300** entspricht. Damit man die ersten und zweiten Dreh-Betätigungsteile **292**, **293** aufeinanderstapeln kann, ist das zweite Dreh-Betätigungsteil **293** vorzugsweise hohl, so dass die Abtriebswelle des ersten Dreh-Betätigungsteils **292** sich durch das zweite Dreh-Betätigungsteil **293** erstrecken kann. Beispielsweise kann es sich bei dem zweiten Dreh-Betätigungsteil **293** um einen herkömmlichen Hohlkernmotor handeln, bei dem ein Rotor um den Kern herum angeordnet ist, während das erste Dreh-Betätigungsteil **292** ein Motor sein kann, der einen an seiner Mitte angeordneten Rotor und eine Abtriebswelle aufweist, die an dem Rotor befestigt ist und sich durch den hohlen Kern des zweiten Dreh-Betätigungsteils **293** erstreckt. Ein Ende des ersten Verbindungsteils **296** ist durch ein Gelenk **297** schwenkbar mit dem drehenden Teil des zweiten Dreh-Betätigungsteils **293** verbunden, und das andere Ende des ersten Verbindungsteils **296** ist durch ein weiteres Gelenk **299** schwenkbar mit einem Ende des zweiten Verbindungsteils **298** verbunden. Eines der beiden Gelenke **297**, **299** ist ein sphärisches Gelenk (wie z.B. Kugelgelenk) oder ein Äquivalent desselben, während das andere der beiden Gelenke ein Universalgelenk (wie z.B. ein Kreuzgelenk) oder ein Äquivalent desselben ist. Das äußere Ende des dritten Verbindungsteils **300** ist mit dem zweiten Verbindungsteil **298** zwischen dessen beiden Enden mittels eines Gelenkstifts **301** schwenkbar verbunden. Das zweite Ende des zweiten Verbindungsteils **298** ist mit der Werkzeughaltewelle **315** mittels eines Gelenks **302** schwenkbar verbunden, das relativ zu der Werkzeughaltewelle **315** gegen Translation festgelegt ist. Der untere Teil **310** der Wellenhaltestruktur **290** weist ein viertes Dreh-Betätigungsteil **311** und ein Linear-Betätigungsteil **312** auf, das von dem vierten Dreh-Betätigungsteil **311** um seine Drehachse gedreht werden kann. Zur Vereinfachung der Kinematik ist die Drehachse des vierten Dreh-Betätigungsteils **311** vorzugsweise mit den Drehachsen der ersten und zweiten Dreh-Betätigungsteile **292**, **293** ausgerichtet, obwohl dies nicht der Fall sein muss. Das Linear-Betätigungsteil **312** kann ein viertes Verbindungsteil **313** in einer Richtung translatorisch bewegen, die quer (z.B. rechtwinklig) zu der Drehachse des vierten Dreh-Betätigungsteils **311** verläuft. Das Linear-Betätigungsteil **312** kann von jedem beliebigen geeigneten Typ sein. Beispielsweise kann es sich um einen Linearmotor wie demjenigen gemäß [Fig. 9](#) handeln, der eine langgestreckte Magnetbahn, die an der Abtriebswelle des vierten Dreh-Betätigungsteils **311** befestigt ist, und eine bewegliche Spuleneinheit aufweist, die an einem Ende des vierten Verbindungsteils **313** befestigt

ist. Das äußere Ende des vierten Verbindungsteils **313** ist vorzugsweise mit der Werkzeughaltewelle **315** durch ein zweites Gelenk **314** verbunden, das relativ zur Werkzeughaltewelle **315** in deren Längsrichtung translatorisch bewegbar ist.

[0112] Jedes der ersten und zweiten Verbindungsteile **302**, **314** erlaubt der Werkzeughaltewelle **315** eine Drehung relativ zu dem zweiten oder vierten Verbindungsteil **298**, **313** mit mindestens zwei Freiheitsgraden, um Kipp- und Gierbewegungen der Werkzeughaltewelle **315** zu ermöglichen, und eines der Gelenke **302**, **314** kann der Werkzeughaltewelle **315** eine Schwenkbewegung relativ zu dem entsprechenden Verbindungsteil mit drei Freiheitsgraden erlauben, um eine Rollbewegung der Werkzeughaltewelle **315** zuzulassen. Beispielsweise kann eines der Gelenke **302**, **314** ein Kardangelenkelement desselben sein, während das andere Gelenk ein sphärisches Gelenk, wie z.B. ein Kugelgelenk, oder ein Äquivalent desselben sein kann. Alternativ können beide Gelenke **302** und **314** zwei Dreh-Freiheitsgrade aufweisen, und in der Werkzeughaltewelle **315** kann ein Wälzgelenk enthalten sein. Der Abstand zwischen den Gelenken **312** und **314** ist variierbar, während die Gelenke im Raum bewegt werden. Beispielsweise kann das Gelenk **314** eine Bewegung der Werkzeughaltewelle **315** in ihrer Längsrichtung relativ zu dem Gelenk **314** erlauben, und/oder die Werkzeughaltewelle **315** kann eine teleskopierbare Struktur aufweisen.

[0113] Bei der Handhabungsvorrichtung gemäß der vorliegenden Erfindung kann das Werkzeug in einer festgelegten Position relativ zu der Werkzeughaltewelle angeordnet sein, so dass das Werkzeug gehandhabt wird, indem die Werkzeughaltewelle als Ganzes bewegt wird. Alternativ kann das Werkzeug derart an der Werkzeughaltewelle angeordnet sein, dass seine Ausrichtung relativ zur Werkzeughaltewelle mittels Fernsteuerung mit einem oder mehr Freiheitsgraden eingestellt werden kann. Beispielsweise kann die Werkzeughaltewelle einen Handgelenkmechanismus aufweisen, der das Werkzeug hält und eine Schwenkung des Werkzeugs relativ zur Werkzeughaltewelle ermöglicht, um eine oder mehrere Kipp-, Gier- und Rollbewegungen auszuführen. Auf dem Gebiet existiert eine große Vielfalt von Handgelenkmechanismen, und es kann jeder Typ verwendet werden, der in der Lage ist, die gewünschten Bewegungen des Werkzeugs zuzulassen. [Fig. 15](#) zeigt eine schematische querschnittene Seitenansicht einer Ausführungsform einer Werkzeughaltewelle **320** gemäß der vorliegenden Erfindung, bei der ein einfacher, leichtgewichtiger Handgelenkmechanismus **330** mit einer kardanartigen Struktur verwendet wird, und [Fig. 16](#) zeigt eine Draufsicht auf den Handgelenkmechanismus bei Installation an der Werkzeughaltewelle. Wie in diesen Figuren gezeigt ist, weist die Werkzeughaltewelle **320** ein hohles langge-

strecktes Rohr **321** mit einer beliebigen gewünschten Querschnittsform, z.B. einer Kreisform, auf. An seinem unteren Ende hält das Rohr **321** einen Handgelenkmechanismus **330**, der ein Halterrohr **331** zum Halten eines Werkzeugs **332** und einen Ring **340** aufweist, der das Halterrohr **331** umgibt. Das Halterrohr **331** ist von dem Ring **340** um eine erste Achse **333** schwenkbar gehalten, und der Ring **340** ist von dem Rohr **321** der Werkzeughaltewelle **320** schwenkbar gehalten, um relativ zu dem Rohr **321** eine Schwenkbewegung um eine zweite Achse **342** durchzuführen, die quer zu der ersten Achse **333** verläuft. Zur Vereinfachung der Kinematik und zur Reduzierung von Momenten verlaufen die ersten und zweiten Achsen **333**, **342** vorzugsweise rechtwinklig zueinander, obwohl sie nicht rechtwinklig zueinander oder einander schneidend zu verlaufen brauchen.

[0114] Das Halterrohr **331** kann um die erste Achse **333** geschwenkt werden, und der Ring **340** kann um die zweite Achse **342** geschwenkt werden, und zwar mittels mehrerer langgestreckter Konnektoren **350**, die zwischen dem Handgelenkmechanismus **330** und entsprechenden Betätigungsteilen **355** angeordnet sind, welche am oberen Ende der Werkzeughaltewelle **320** angeordnet sind. Die Konnektoren können zur Wirkung mittels Spannung, Kompression oder beidem ausgebildet sein. Somit können die Konnektoren **350** in Abhängigkeit von den Typen von Kraft, die sie übertragen sollen, in Form von Stäben, Stangen, Drähten, Ketten, Riemen, Federn oder ähnlicher Teile vorgesehen sein. Bei der vorliegenden Ausführungsform ist jeder Konnektor **350** in der Lage, sowohl mit einem Zugeffekt als auch mit einem Kompressionseffekt zu arbeiten, so dass nur zwei Konnektoren **350** und zwei Betätigungsteile **355** erforderlich sind, um das Werkzeug **322** um die ersten und zweiten Achsen zu drehen. Falls jeder Konnektor **350** nur in einer einzigen Richtung wirken kann, sie z.B. zum Spannen, kann eine größere Anzahl von Konnektoren und Betätigungsteilen erforderlich sein, um das Werkzeug **322** um die beiden Achsen zu drehen, z.B. zwei Konnektoren und zwei Betätigungsteile für das Halterrohr **331** und den Ring **340**, so dass insgesamt vier Konnektoren und vier Betätigungsteile benötigt werden. Alternativ, falls das Halterrohr **331** und der Ring **340** mit Rückkehrfedern versehen sind, die diese Teile in einer bestimmten Drehrichtung vorspannen, besteht die Möglichkeit, zwei mit Spannungseffekt arbeitende Konnektoren statt vierer Konnektoren zu verwenden. Als weitere Alternative können das Halterrohr **331** und der Ring **340** durch drei Konnektoren, die an dem Halterrohr **331** befestigt sind und mit Spannungseffekt arbeiten, um die ersten und zweiten Achsen geschwenkt werden.

[0115] Bei der vorliegenden Ausführungsform ist einer der Konnektoren **350** an seinem unteren Ende an einer von der ersten Achse **333** beabstandeten Stelle mit dem Halterrohr **331** verbunden, und der andere

Konnektor **350** ist an einer von der zweiten Achse **242** beabstandeten Stelle **343** mit dem Ring **340** verbunden. Gemäß [Fig. 16](#) ist bei der vorliegenden Ausführungsform ein Konnektor **350** derart mit dem Halterohr **331** verbunden, dass er Kraft an einer Stelle **334** aufbringt, die im Wesentlichen mit der zweiten Achse **342** ausgerichtet ist, und der andere Konnektor **350** ist derart mit dem Ring **340** verbunden, dass er Kraft an einer Stelle **343** aufbringt, die im Wesentlichen mit der ersten Achse **333** ausgerichtet ist. Die Stellen **334** und **343**, an denen die Konnektoren **350** mit dem Rohr **331** und dem Ring **340** ausgerichtet sind, brauchen jedoch nicht mit den Achsen **342** und **333** ausgerichtet zu sein. Vorzugsweise ist jeder der Konnektoren **350** durch eine Schwenkverbindung mit dem Halterohr **331** oder dem Ring **340** verbunden, da der Winkel zwischen einem Konnektor **350** und dem Halterohr **331** oder dem Ring **340** um die erste oder zweite Achse geschwenkt wird. Die Konnektoren **350** können jede beliebige Querschnittsform aufweisen, mittels derer verhindert werden kann, dass sie einknicken, wenn sie einer axialen Kompression ausgesetzt werden. [Fig. 17](#) zeigt eine Querschnittsansicht der Werkzeughaltewelle **320**, in der ein Beispiel einer Querschnittsform der Konnektoren **350** gezeigt ist. Bei diesem Beispiel weist jeder Konnektor **350** über mindestens einen Teil seiner Länge einen gekrümmten Querschnitt auf, damit er widerstandsfähiger gegen Einknicken ist. Entlang mindestens eines Teils seiner Länge sind die Breiten-Ränder der Konnektoren **350** zwischen Führungen **322** aufgenommen, die ein Gleiten der Konnektoren **350** in der Längsrichtung der Werkzeughaltewelle **320** erlauben, während sie die Lateralbewegung einschränken und den Konnektoren eine noch größere Widerstandsfähigkeit gegen Einknicken verleihen. An ihren unteren und oberen Enden können die Querschnitte der Konnektoren **350** abweichend von der gekrümmten Form eine Form aufweisen, die für die Anbringung der Konnektoren **350** an den Gelenkmechanismen **330** oder den Betätigungsteilen **355** praktischer ist.

[0116] Statt dass einer der Konnektoren **350** an dem Halterohr **331** und ein anderer der Konnektoren **350** an dem Ring **340** befestigt ist, können beide Konnektoren **350** an verschiedenen Stellen an dem Halterohr **331** befestigt sein. Beispielsweise kann ein Konnektor **350** an der Stelle **334** gemäß [Fig. 16](#) mit dem Halterohr **331** verbunden sein, und der andere Konnektor **350** kann an einer Stelle wie z.B. der Stelle **336** gemäß [Fig. 16](#), die mit der ersten Achse **333** ausgerichtet ist, mit dem Halterohr **331** verbunden sein.

[0117] Bei der Anordnung, bei der das Halterohr **331** und der Ring **340** durch drei Konnektoren, die an dem Halterohr **331** befestigt sind und mit Spannungseffekt arbeiten, um die ersten und zweiten Achsen **333** und **342** geschwenkt werden, können die Kon-

nektoren an zahlreichen verschiedenen Stellen an dem Halterohr **331** befestigt sein. Beispielsweise kann ein Konnektor an dem Halterohr **331** in Ausrichtung mit der zweiten Achse **342** (wie z.B. an der Stelle **334** in [Fig. 16](#)) befestigt sein, ein weiterer Konnektor kann an dem Halterohr **331** in Ausrichtung mit der ersten Achse **333** (wie z.B. an der Stelle **336** in [Fig. 16](#)) befestigt sein, und ein dritter Konnektor kann an dem Halterohr **331** an einer Stelle befestigt sein, die von den ersten und zweiten Achsen **333** und **342** beabstandet ist (wie z.B. an der Stelle **337** in [Fig. 16](#)).

[0118] Die Betätigungsteile **355** für die Konnektoren **350** können von jedem beliebigen Typ sein, der in der Lage ist, eine Axialkraft auf die Konnektoren **350** aufzubringen, einschließlich Linear-Betätigungsteilen oder Dreh-Betätigungsteilen, die mit Mechanismen zum Umsetzen von Dreh- in Linearbewegung versehen sind. Wie im Fall der Linear-Betätigungsteile für die Wellenhaltestruktur sind Linearmotoren besonders geeignet. Die Betätigungsteile **355** sind mit Positionssensoren und/oder Kraftsensoren versehen, um den Abtriebs-Anteil und/oder die Abtriebskraft der Betätigungsteile **355** zu messen.

[0119] Der gezeigte Handgelenkmechanismus **320** ermöglicht dem Werkzeug **322** nicht nur Schwenkbewegungen um die ersten und zweiten Achsen, sondern ermöglicht dem Werkzeug **322** auch das Durchführen einer Wälzbewegung um eine Wälzachse, die quer (wie z.B. rechtwinklig) zu den ersten und zweiten Achsen verläuft. Die Fähigkeit des Werkzeugs **322**, um eine Wälzachse gedreht zu werden, macht es leichter, das Werkzeug **322** in die für eine gegebene Operation am meisten geeignete Ausrichtung zu bewegen, und macht den Handgelenkmechanismus eigenheiten-frei innerhalb des Arbeitsraums des Werkzeugs **322**. Ferner kann in Abhängigkeit vom Typ des Werkzeugs eine Drehbewegung verwendet werden, um dem Werkzeug zu ermöglichen, ein Drehmoment auf ein Teil auszuüben oder eine drehende Schneid- oder Schleifbewegung auszuführen. Das Werkzeug **322** kann auch dann zum Drehen um eine Wälzachse in der Lage sein, wenn seine Ausrichtung relativ zu der Werkzeughaltewelle **320** ansonsten festgelegt ist. Bei der vorliegenden Ausführungsform kann das Werkzeug **322** mittels einer Werkzeugwälzwelle **360** gedreht werden, die innerhalb der Werkzeughaltewelle **320** angeordnet ist und zwischen einem Dreh-Betätigungsteil **366** am oberen Ende der Werkzeughaltewelle **320** und dem Werkzeug **322** verläuft. Das Werkzeug **322** ist drehbar von einem Lager gehalten, z.B. von einer Buchse **335**, die an dem Halterohr **331** angeordnet ist. Die Werkzeugwälzwelle **360** kann mittels jedes geeigneten Typs von Dreh-Betätigungsteil gedreht werden, z.B. mittels eines bürstenlosen Gleichstrommotors oder eines anderen Typs von Elektromotor, der mit dem oberen Ende der Werkzeugwälzwelle befestigt ist. Falls das Werkzeug **322** relativ zu der Werkzeughal-

tewelle **360** um eine oder beide der ersten und zweiten Achsen drehbar ist, ist die Werkzeugwälzwelle **360** vorzugsweise derart mit dem Werkzeug **322** verbunden, dass das Werkzeug **322** von der Werkzeugwälzwelle **360** gedreht werden kann, wenn die Wälzachse nicht mit der Achse der Werkzeugwälzwelle **360** ausgerichtet ist. Beispielsweise ist bei der vorliegenden Ausführungsform das untere Ende der Werkzeugwälzwelle **360** durch ein Universalgelenk **365** mit dem Werkzeug **322** verbunden. Die Werkzeugwälzwelle **360** kann durch nicht gezeigte Lager drehbar von der Werkzeughaltewelle **320** gelagert sein, z.B. an einer oder mehreren Stellen entlang ihrer Länge, um die Werkzeugwälzwelle **360** an einer gewünschten Position relativ zu dem Rohr **321** der Werkzeughaltewelle **320** zu halten.

[0120] In manchen Fällen kann das Werkzeug **322** bewegbare Teile aufweisen, die während der chirurgischen Verwendung des Werkzeugs gehandhabt werden. Zu den Beispielen von Werkzeugen mit bewegbaren Teilen zählen ein Forceps, eine Schere, ein Nadelhalter, Klemmen und Klammervorrichtungen. Je nach der Struktur des Werkzeugs **322** können die bewegbaren Teile durch zahlreiche verschiedene Mechanismen betätigt werden, z.B. ein Kabel, eine Stange, pneumatische oder hydraulische Röhren, oder elektrische Kabel, die von dem Werkzeug zu einem oberen Teil oder Außenbereich der Werkzeughaltewelle verlaufen, damit das Werkzeug aus der Ferne mechanisch, pneumatisch, hydraulisch oder elektrisch betätigt werden kann. Ein Kabel, Draht oder anderes Teil zum Betätigen des Werkzeugs kann sich durch eine Bohrung in der Werkzeugwälzwelle **360** erstrecken, oder es kann sich entlang des Außenbereichs der Werkzeugwälzwelle **360** erstrecken.

[0121] Bei der vorliegenden Ausführungsform weist das Werkzeug **322** bewegbare Teile auf, die mittels eines Konnektors **367** betätigt werden können, der sich durch die Werkzeugwälzwelle **360** und das Universalgelenk **365** zwischen den bewegbaren Teilen und einem Betätigungsteil **368** erstreckt, das am oberen Ende der Werkzeughaltewelle **320** angeordnet ist. Der Konnektor **367** kann ein mit Spannungs- und/oder Kompressionseffekt arbeitender Konnektor sein, je nach der Struktur des Werkzeugs **322**. Beispielsweise kann das Werkzeug **322** durch den mit Spannungseffekt arbeitenden Konnektor **367** gegen eine am Werkzeug **322** angeordnete Rückkehrfeder arbeiten, die das Werkzeug in einen Ausgangszustand zurückbewegt, wenn die Zugkraft aufgehoben wird. Der Konnektor **367** kann die Werkzeughaltewelle **360** drehen, oder er kann derart gehalten sein, dass er stationär bleibt, wenn sich die Werkzeughaltewelle **360** dreht. Der Konnektor **367** ist vorzugsweise in der Lage, das Werkzeug auch dann zu betätigen, wenn die Längsachse des Werkzeugs **322** nicht mit der Längsachse der Werkzeughaltewelle **360**

ausgerichtet ist. Beispielsweise kann der Konnektor **367** ein flexibles Teil wie z.B. ein Kabel sein, das sich biegen kann, wenn die beiden Achsen nicht ausgerichtet sind, oder er kann starre Abschnitte aufweisen, die miteinander durch schwenkbare Gelenke verbunden sind, welche dem Konnektor **367** ermöglichen, eine Kraft durch einen Winkel auszuüben. Wie die Betätigungsteile **355** zum Schwenken des Halterohrs **331** und des Rings **340** des Handgelenkmechanismus **330** kann das Betätigungsteil **368** für den Konnektor **367** gemäß einem beliebigen geeigneten Typ ausgebildet sein, wie z.B. als Linear-Betätigungsteil oder als Dreh-Betätigungsteil, das mit dem Konnektor durch einen Mechanismus verbunden ist, der Dreh- in Linearbewegung umsetzt.

[0122] **Fig. 18** zeigt eine schematische Schnittansicht eines weiteren Beispiels einer bei der vorliegenden Erfindung verwendbaren Handgelenkmechanismus **370**. Dieser Handgelenkmechanismus **370** weist ein Halterohr **371**, das ein Werkzeug **322** durch eine Buchse **372** drehbar hält, und eine ringförmige Membran **373** aus Plastik, Papier, Metall oder einem anderen geeigneten Material auf, die das Halterohr **371** umgibt. Der Innenumfangsbereich der Membran **373** ist an dem Halterohr **371** entlang dessen gesamten Umfangs befestigt und vorzugsweise fluidundurchlässig abgedichtet, und der Außenumfangsbereich der Membran **373** ist an dem Rohr **321** der Werkzeughaltewelle **320** entlang dessen gesamten Umfangs dichtend befestigt. Die Membran **373** ist hinreichend stark, um das Gewicht des Halterohrs **371** zu tragen, jedoch hinreichend flexibel, um dem Halterohr **371** ein Schwenken um die ersten und zweiten Achsen zu ermöglichen, so dass das Halterohr Kipp- und Gierbewegungen ausführen kann. Die gezeigte Membran **373** ist mit ringförmigen Korugationen **374** versehen, die ihr Flexibilität verleihen. Der radial äußere Bereich der Membran **373** ist vorzugsweise stärker flexibel als der zentrale Bereich, der das Halterohr **371** umgibt. Zwei Konnektoren **350** wie diejenigen, die bei der vorherigen Ausführungsform verwendet werden, sind an dem Halterohr **371** an Stellen befestigt, welche voneinander in einer Umfangersrichtung um einen geeigneten Winkel (wie z.B. 90°) beabstandet sind. Das obere Ende jedes Konnektors **350** ist mit einem entsprechenden nicht gezeigten Betätigungsteil verbunden, das den Konnektor **350** in seiner Längsrichtung translatorisch bewegen kann. Wenn ein Konnektor **350** in seiner Längsrichtung translatorisch bewegt wird, werden das Halterohr **371** und das Werkzeug **322** um die erste Achse gedreht, und wenn der andere Konnektor **350** in seiner Längsrichtung translatorisch bewegt wird, werden das Halterohr **371** und das Werkzeug **322** um die zweite Achse gedreht. Falls die Membran **373** sowohl an dem Halterohr **371** als auch an dem Rohr **321** der Werkzeughaltewelle **320** dichtend befestigt ist, kann die Membran **373** die Übertragung kontaminierender Substanzen zwischen dem Inneren der Werkzeug-

haltewelle **320** und dem Inneren des Körpers des Patienten in beiden Richtungen verhindern. Mit Ausnahme des Handgelenkmechanismus **370** kann die Struktur der Werkzeughaltewelle **320** die gleiche sein wie die anhand von [Fig. 15](#) beschriebene Struktur.

[0123] Zumindest der untere Teil der Werkzeughaltewelle in der Nähe des Werkzeugs muss generell vor jeder chirurgischen Verwendung der Werkzeughaltewelle sterilisiert werden. Um das Sterilisieren der Werkzeughaltewelle zu erleichtern, kann die gesamte Werkzeughaltewelle von anderen Teilen der Handhabungsvorrichtung abnehmbar sein. In [Fig. 19-Fig. 21](#) ist eine Anordnung gezeigt, die geeignet ist, eine Werkzeughaltewelle **320** abnehmbar zu tragen, während sie ihre bewegbaren Teile betätigt. Bei dieser Anordnung kann die Werkzeughaltewelle **320** abnehmbar an einem Halterahmen **270** einer Wellenhaltestruktur befestigt werden, die den Aufbau jeder der oben beschriebenen Wellenhaltestrukturen haben kann. An dem Halterahmen **270** sind mehrere Betätigungsteile **380A-380C** und **390** angeordnet. Ein erstes und ein zweites Linear-Betätigungsteil **380A** und **380B** erzeugen eine lineare Bewegung zweier Konnektoren **350**, die – z.B. ähnlich wie diejenigen, die in [Fig. 15](#) oder [Fig. 18](#) gezeigt sind – mit einem nicht gezeigten Handgelenkmechanismus verbunden sind. Ein drittes Linear-Betätigungsteil **380C** erzeugt eine Linearbewegung eines Konnektors **367** zum Betätigen bewegbarer Teile eines nicht gezeigten Werkzeugs, das von dem Handgelenkmechanismus gehalten ist, und ein Dreh-Betätigungsteil **390** dreht die mit dem Werkzeug verbundene Werkzeugwälzwelle **360**. Jedes der Linear-Betätigungsteile **380A-380C** kann lösbar mit dem entsprechenden Konnektor zusammengreifen, während das Dreh-Betätigungsteil **390** lösbar mit der Werkzeugwälzwelle **360** zusammengreifen kann. [Fig. 20](#) zeigt eine Seitenansicht des ersten Linear-Betätigungsteils **380A**. Die anderen Linear-Betätigungsteile **380B** und **380C** können eine ähnliche Struktur aufweisen. Das Linear-Betätigungsteil **380A** weist einen Gleichstrom-Linear-Servomotor mit einem zylindrischen Gehäuse **381** und einer Abtriebswelle **382** auf, die in beiden Axialrichtungen des Gehäuses **381** bewegbar ist. Obwohl der Motor nicht zylindrisch zu sein braucht, ist eine zylindrische Form unter dem Aspekt der Raumbedingungen oft vorteilhaft. Zylindrische Linear-Servomotoren dieses Typs sind von zahlreichen Herstellern erhältlich, wie z.B. von Northern Magnetics in Santa Clarita, California. Der Motor kann entweder vom Typ mit bewegbarem Magneten oder mit bewegbarer Wicklung sein, obwohl der Typ mit bewegbarem Magneten unter dem Aspekt der Ableitung der von der Wicklung erzeugten Wärme vorteilhaft sein kann, da die Wicklung eines Motors mit bewegbarem Magneten außerhalb des Magneten vorgesehen ist und an einer Wärmeabfuhrereinrichtung angeordnet sein kann. Damit der bewegbare Teil des Motors seine translatorische Bewegung glatter aus-

führen kann, kann der bewegbare Teil an einem Gleitteil **387** eines Linearlagers **385** angeordnet sein, wobei der stationäre Teil **386** des Lagers **385** von dem Halterahmen **270** gehalten ist. Die Abtriebswelle **382** ist an jedem Ende mit einem Rahmen **383** verbunden, der im Profil im Wesentlichen U-förmig ist. Der Rahmen weist zwei parallele Schenkel auf, die vom Halterahmen **270** abstehen. Der untere Schenkel weist an seinem unteren Ende eine Ausnehmung **384** auf. Das obere Ende jedes Konnektors **350** ist derart geformt, dass es abnehmbar in der Ausnehmung **384** aufgenommen werden kann. Beispielsweise weist bei dieser Ausführungsform das obere Ende jedes Konnektors **350** einen spulenförmigen Teil **351** mit einem Mittelteil **352**, der klein genug ist, um in die Ausnehmung **384** des Rahmens **383** zu passen, und obere und untere Flansche **353** auf, die im Durchmesser größer sind als die Ausnehmung **384**. Wenn der spulenförmige Teil **351** in die Ausnehmung **384** eingeführt wird, bringt eine Translation des Rahmens **383** in der Längsrichtung der Abtriebswelle **382** die Flasche **353** in Anlage an dem Rahmen **383**, wodurch der Konnektor **350** in seiner Längsrichtung translatorisch bewegt wird.

[0124] Das Dreh-Betätigungsteil **390** weist eine Abtriebswelle auf, an der eine Rolle **391** angeordnet ist. Wenn die Rahmen **383** der Linear-Betätigungsteile **380A-380C** mit den oberen Enden der entsprechenden Konnektoren **350** und **367** für den Handgelenkmechanismus und zum Betätigen des Werkzeugs zusammengreifen, wird die Rolle **391** in Reibeingriff mit der Außenfläche der Werkzeugwälzwelle **360** gedrückt, so dass durch Drehung der Rolle **391** die Werkzeugwälzwelle **360** um ihre Achse gedreht wird. Die Materialien, aus denen die Rolle **391** und/oder die Außenfläche der Werkzeugwälzwelle **360** gebildet sind, können nach Maßgabe eines guten Rollkontakts gewählt werden. Beispielsweise kann die Rolle **391** verformbares Gummi mit hoher Reibung aufweisen. Ferner ist es möglich, die Rolle **391** durch ein Ritzel zu ersetzen und die Werkzeugwälzwelle **360** außen mit Zahnradzähnen zum Zusammengriff mit dem Ritzel zu versehen.

[0125] Nach jeder Verwendung kann eine verschmutzte Werkzeughaltewelle **320** von der Wellenhaltestruktur entfernt und durch eine saubere Welle ersetzt werden, und die verschmutzte Werkzeughaltewelle **320** kann entweder sterilisiert oder entsorgt werden. Die Werkzeughaltewelle **320** selbst erfordert keine kostenaufwendigen Komponenten, so dass sie unter dem ökonomischen Aspekt ausreichend günstig hergestellt werden kann und nach einmaliger Verwendung entsorgbar ist.

[0126] Die Arme der Handhabungsvorrichtung gemäß der vorliegenden Erfindung können dahingehend ausgebildet sein, dass sie physisch unabhängig voneinander bewegbar sind, d.h. dass sie nicht derart

miteinander verbunden sind, dass eine Bewegung eines Arms den anderen Arm dazu zwingt, sich auf eine bestimmte Weise zu bewegen. Somit kann es zum Einstellen der Ausrichtung der Werkzeughaltewelle, wenn deren unteres Ende in den Körper des Patienten eingeführt ist und dabei die Werkzeughaltewelle mit einem virtuellen Schwenkpunkt ausgerichtet gehalten wird, erforderlich sein, die Operation von zwei oder mehreren der Betätigungsteile zu koordinieren. Für einige Bewegungen der Werkzeughaltewelle kann es möglich sein, dass eine menschliche Bedienungsperson die Operation verschiedener Betätigungsteile manuell koordiniert. Gewöhnlich jedoch ist es leichter, einen automatischen Steuermechanismus wie z.B. einen elektronischen Controller zu verwenden, der die Operation mehrerer Betätigungsteile auf der Basis von Befehlen einer menschlichen Bedienungsperson, die die gewünschten Bewegungen der Werkzeughaltewelle angeben, automatisch koordinieren kann.

[0127] [Fig. 22](#) zeigt ein Blockschaltbild eines Beispiels einer Steuersystems **400**, das mit einer Handhabungsvorrichtung gemäß der vorliegenden Erfindung verwendbar ist. Das Steuersystem **400** weist einen elektronischen Controller **401** auf, wie z.B. einen Allzweck- oder Spezial-Mikrocomputer. Der Controller **401** empfängt von Positionssensoren **403** und/oder Kraftsensoren Eingangssignale für die verschiedenen Linear- und/oder Dreh-Betätigungsteile **404** der Handhabungsvorrichtung. Der Controller **401** empfängt auch Eingangssignale von einer oder mehreren geeigneten Eingabevorrichtungen **402**, mit denen die Bedienungsperson dem Controller **401** Befehle geben kann, welche die auf die Werkzeughaltewelle zu übertragende gewünschte Bewegung und/oder Kraft angeben. Es kann eine breite Vielfalt von Eingabevorrichtungen **402** verwendet werden, wie z.B. ein Joystick, ein haptisches Interface (eine Eingabevorrichtung, die der Bedienungsperson ein Kraft-Feedback übermitteln kann), eine Tastatur, ein Bandspeicher oder eine andere Speichervorrichtung, ein Fußpedal, eine Maus, einen Digitalisierer, einen Computer-Handschuh oder einen stimmbetätigten Controller. Ein Beispiel eines haptischen Interface, das hier verwendet werden kann, ist eine Parallel-Handhabungsvorrichtung des in der U.S.-Anmeldung Nr. 60/056,237 mit dem Titel "Parallel Mechanism" beschriebenen Typs. Es können separate Eingabevorrichtungen zum Steuern verschiedener Typen von Bewegungen der Handhabungsvorrichtung oder zum Steuern der Werkzeughaltewelle zu unterschiedlichen Zeitpunkten vorgesehen sein. Beispielsweise kann eine der Eingabevorrichtungen verwendet werden, wenn gewünscht ist, die Werkzeughaltewelle um einen virtuellen Schwenkpunkt zu drehen, während eine andere der Eingabevorrichtungen verwendet werden kann, wenn gewünscht ist, die Werkzeughaltewelle in ihrer Längsrichtung translatorisch zu bewegen, ohne sie zu verschwenken. Eine wie-

derum weitere Eingabevorrichtung kann verwendet werden, um die Werkzeughaltewelle zu handhaben, wenn kein Teil der Welle in den Körper des Patienten eingeführt werden soll. Basierend auf Eingangssignalen von den Eingabevorrichtungen und den Signalen von den Positionssensoren erzeugt der Controller **401** Steuersignale für die Betätigungsteile **404**, um die Werkzeughaltewelle in der gewünschten Weise anzutreiben.

[0128] Die Eingabevorrichtungen) **402** zum Steuern der Bewegungen und/oder der Kräfte, die von der Werkzeughaltewelle übertragen werden, kann auch zum Steuern der Betätigungsteile **404** für das Werkzeug verwendet werden, oder es können zu diesem Zweck eine oder mehrere separate Eingabevorrichtungen **402** vorgesehen sein.

[0129] Der Controller **401** kann die Werkzeughaltewelle und das Werkzeug auf vielfältige Arten steuern, je nach den Erfordernissen der Aufgabe, die von der Handhabungsvorrichtung durchgeführt werden soll. Beispielsweise kann der Controller **401** eine Positionssteuerung, eine Kraftsteuerung oder eine Kombination von Positions- und Kraftsteuerung (Hybrid-Positions-/Kraftsteuerung) durchführen. Beispiele dieser und weiterer geeigneter Steuerverfahren, die zur Verwendung bei der vorliegenden Erfindung geeignet sind, sowie Beispiele von Algorithmen zur Implementierung dieser Verfahren sind auf dem Gebiet der Robotertechnik weithin bekannt und in der veröffentlichten Literatur detailliert beschrieben. Kraftsteuerungs- oder Hybrid-Positions/Kraftsteuerungsverfahren sind für die vorliegende Erfindung bestens geeignet, da sie die von der Werkzeughaltewelle und dem Werkzeug auf den Patienten ausgeübten Kräfte auf geeigneten Niveaus halten können und eine sichere Verwendung der Handhabungsvorrichtung auch bei delikaten chirurgischen Vorgängen einschließlich mikrochirurgischer Operationen ermöglichen.

[0130] Die Werkzeughaltewelle und das Werkzeug können von dem Controller **401** derart gesteuert werden, dass sie sich in der gleichen Richtung bewegen, in der der Benutzer seine Hand bewegt, wenn er die Eingabevorrichtung **402** betätigt, z.B. derart, dass, wenn der Benutzer einen Joystick oder eine andere Eingabevorrichtung **402** im Uhrzeigersinn dreht, die Werkzeughaltewelle oder das Werkzeug ebenfalls im Uhrzeigersinn gedreht werden. Bei einigen herkömmlichen minimalinvasiven chirurgischen Techniken ist es jedoch erforderlich, dass der Benutzer seine Hand in der entgegengesetzten Richtung zu derjenigen bewegt, in der ein Werkzeug bewegt werden soll. Für einen Benutzer, der an das Betätigen derartiger Vorrichtungen gewöhnt ist, kann der Controller **401** derart ausgelegt werden, dass er die Werkzeughaltewelle und das Werkzeug zur Bewegung in entgegengesetzter Richtung zu derjenigen bewegt, in der der Benutzer beim Betätigen der Eingabevorrich-

tung **402** seine Hand bewegt. Der Controller **401** kann mit einem Schalter versehen sein, mittels dessen der Benutzer wählen kann, ob relativ zur Bewegung der Hand des Benutzers umgekehrte oder nicht umgekehrte Bewegungen der Werkzeughaltewelle und des Werkzeugs ausgeführt werden sollen.

[0131] Der Verstärkungsfaktor des Steuersystems **400** kann dahingehend eingestellt werden, dass die Handhabungspräzision des Benutzers der Handhabungsvorrichtung verbessert wird. Beispielsweise ist der Verstärkungsfaktor derart einstellbar, dass eine Bewegung der Hand des Benutzers beim Betätigen eines Joysticks oder einer anderen Eingabevorrichtung in wesentlich kleineren Bewegungen (entweder translatorisch oder drehend) der Werkzeughaltewelle oder des Werkzeugs resultiert. Somit können von der Hand des Benutzers ausgeführte Bewegungen in der Größenordnung von Millimetern auf Bewegungen der Werkzeughaltewelle oder des Werkzeugs in der Größenordnung von Mikrometern reduziert werden, was dem Benutzer die Möglichkeit gibt, gesteuerte Bewegungen des Werkzeugs auszuführen, die sehr viel kleiner sind als der Benutzer sie von Hand ausführen könnte. Die Fähigkeit der Handhabungsvorrichtung zur Reduzierung der Größenordnung der Bewegung der Hand ist nicht nur in der Chirurgie, sondern auch bei anderen Aufgaben zweckmäßig, bei denen Handhabungspräzision erforderlich ist, wie z.B. beim Zusammenfügen sehr kleiner Teile. Wenn andererseits die Werkzeughaltewelle oder das Werkzeug sehr große Bewegungen ausführen sollen, kann der Verstärkungsfaktor derart eingestellt werden, dass die der Eingabevorrichtung vermittelte Bewegung der Hand des Benutzers zu größeren translatorischen und/oder Drehbewegungen der Werkzeughaltewelle oder des Werkzeugs führt. Eine in dieser Weise vorgenommene Maßstabsvergrößerung der Bewegungen der Hand des Benutzers ermöglicht dem Benutzer, seine Hand relativ stationär in der bequemsten Position zu halten, was wiederum die Handhabungspräzision des Benutzers erhöht. Wenn das Steuersystem **400** ein Kraft-Feedback an die Eingabevorrichtung vorsieht, kann der Verstärkungsfaktor des Steuersystems **400** auch dahingehend eingestellt werden, dass das Tastempfinden des Benutzers verbessert wird. Beispielsweise kann der von der Hand des Benutzers gefühlte Widerstand gegenüber einer Bewegung der Eingabevorrichtung **402** dahingehend gesteuert werden, dass er größer ist als derjenige Widerstand, auf den das Werkzeug trifft, so dass der Benutzer selbst niedrige Niveaus auf das Werkzeug einwirkender Widerstände deutlich wahrnehmen kann. Das Vergrößern des Maßstabs des vom Benutzer wahrgenommenen Widerstands ist zweckmäßig, wenn das Werkzeug weiches Gewebe kontaktiert. Wenn hingegen das Werkzeug Knochen oder andere harte Materialien kontaktiert, kann es wünschenswert sein, den vom Benutzer empfundenen Widerstand im Maßstab zu reduzieren.

[0132] Die meisten Personen erfahren ein gewisses Maß an Tremor in ihren Händen, wenn sie manuelle Operationen durchführen. Falls das Steuersystem **400** eine manuell betätigte Eingabevorrichtung hat, kann das Steuersystem **400** mit einem Filter versehen sein, der diejenigen Komponenten eines Signals aus der Eingabevorrichtung **402** herausfiltert, welche die Frequenz des Tremors aufweisen, so dass der Tremor nicht in den Bewegungen der Werkzeughaltewelle oder des Werkzeugs reproduziert wird.

[0133] [Fig. 27-Fig. 34](#) zeigen weitere Beispiele von Kardan-Typ-Handgelenkmechanismen zur Verwendung mit der vorliegenden Erfindung. [Fig. 27](#) und [Fig. 28](#) zeigen von vorne betrachtete Seitenansichten eines Handgelenkmechanismus, der durch Konnektoren betätigt wird, die durch Torsion statt durch Spannung oder Kompression wirken. Wie der Handgelenkmechanismus gemäß [Fig. 15](#) weist der Handgelenkmechanismus gemäß [Fig. 27](#) und [Fig. 28](#) ein Halterohr **410** zum drehbaren Halten eines Werkzeugs **322** und einen das Halterohr **410** umgebenden Ring **415** auf. Das Halterohr **410** braucht nicht irgendeine bestimmte Struktur zu haben. Beispielsweise kann seine Struktur im Wesentlichen der Struktur des Halterohrs **331** gemäß [Fig. 5](#) gleichen. Das Werkzeug **322** kann wie dasjenige gemäß [Fig. 15](#) mit einem Mechanismus zum Drehen des Werkzeugs **322** um seine Achse oder zum Betätigen der bewegbaren Komponenten des Werkzeugs **322** verbunden sein. Zur Vereinfachung der Zeichnungen ist jedoch ein derartiger Mechanismus in [Fig. 27-Fig. 34](#) weggelassen. Wie bei der Ausführungsform gemäß [Fig. 15](#) ist das Halterohr **410** in beliebiger geeigneter Weise von dem Ring **415** zur Schwenkung um eine erste Achse gehalten, und der Ring **415** ist in beliebiger geeigneter Weise durch ein Rohr **321** oder ein anderes zweckmäßiges Halteteil zur Schwenkung eine zweite Achse gehalten, die rechtwinklig zur ersten Achse verläuft. Beispielsweise kann das Halterohr **410** durch zwei Lager **411** (von denen nur eines gezeigt ist) schwenkbar gehalten sein, die an dem Ring **415** in Ausrichtung mit der ersten Achse befestigt sind, und der Ring **415** kann von zwei Lagern **416** schwenkbar gehalten sein, die an dem Rohr **321** in Ausrichtung mit der zweiten Achse befestigt sind. [Fig. 27](#) zeigt den Handgelenkmechanismus in einer Ausgangsposition, in der das Werkzeug **322** mit der Achse des Rohrs **321** ausgerichtet ist, und [Fig. 28](#) zeigt den Handgelenkmechanismus in einer Position, in der das Halterohr **410** aus seiner Ausgangsposition um die erste Achse geschwenkt ist. Das Halterohr **410** und der Ring **415** können jeweils durch einen drehbaren Konnektor **420** um die erste Achse bzw. die zweite Achse geschwenkt werden, der von einem beliebigen geeigneten Betätigungsteil gedreht werden kann, wie z.B. einem Motor **422**, der an seinem oberen Ende befestigt ist. Jeder Konnektor **420** weist an seinem unteren Ende einen Schenkel **421** auf, der quer zur Achse des Konnektors **420** verläuft. Jeder

Schenkel **421** ist derart mit dem Halterohr **410** oder dem Ring **415** verbunden, dass, wenn der Konnektor **420** um seine Achse gedreht wird, eine Bewegung des Schenkels **421** um die Achse des Konnektors **420** bewirkt, dass das Halterohr **410** oder der Ring **415** um die erste oder zweite Achse geschwenkt wird. Beispielsweise steht bei der vorliegenden Ausführungsform ein Vorsprung **412** von dem Halterohr **410** in Ausrichtung mit der ersten Achse ab, ein weiterer Vorsprung **417** steht von dem Ring **415** in Ausrichtung mit der zweiten Achse ab, und der Schenkel **421** jedes Konnektors **420** greift locker mit einem Schlitz oder einer anderen Öffnung zusammen, die in dem entsprechenden Vorsprung ausgebildet ist, wie z.B. mit dem im Vorsprung **412** ausgebildeten Schlitz **413**. Wenn der Konnektor **420** um seine Achse gedreht wird, drückt der Schenkel **421** des Konnektors **420** gegen eine der Seiten des Schlitzes und bewirkt dadurch, dass das Halterohr **410** oder der Ring **415** um die erste oder zweite Achse geschwenkt wird. Der Schlitz kann langgestreckt ausgebildet sein, um dem Vorsprung **412**, **417** zu ermöglichen, mit dem Schenkel **421** des entsprechenden Konnektors **420** in Eingriff zu bleiben, während die Ausrichtung des Halterohrs **410** oder des Rings **414** variiert.

[0134] [Fig. 29](#) zeigt ein weiteres Beispiel eines Handgelenkmechanismus vom Kardan-Typ, bei dem ein Halterohr **425** und ein Ring **435** durch Konnektoren, die mit Torsionseffekt arbeiten, um erste bzw. zweite Achsen gedreht werden. Das Halterohr **425** und der Ring **435**, die in ihrer Struktur ähnlich wie diejenigen gemäß der vorhergehenden Ausführungsform ausgelegt sind, können auf jede beliebige Weise schwenkbar gelagert sein. Beispielsweise ist in [Fig. 29](#) das Halterohr **425** durch zwei Lager **426** schwenkbar gelagert, die an dem Ring **435** in Ausrichtung mit der ersten Achse befestigt sind, und der Ring **435** ist durch zwei Lager **436** schwenkbar gelagert, die an einem Rohr **321** in Ausrichtung mit der zweiten Achse befestigt sind. Bei diesem Beispiel ist das Halterohr **425** mit einem Zahnrad **427** versehen, das an ihm koaxial mit der ersten Achse befestigt ist, und der Ring **435** ist mit einem Zahnrad **437** versehen, das an ihm koaxial mit der zweiten Achse befestigt ist. Das Zahnrad **427** an dem Halterohr **425** kämmt mit einem weiteren Zahnrad **428**, das am unteren Ende einer Antriebswelle **429** befestigt ist, die durch einen Motor **430** oder ein anderes Betätigungsteil, das an ihrem oberen Ende befestigt ist, um ihre Achse gedreht werden kann. In ähnlicher Weise kämmt das Zahnrad **437** an dem Ring **435** mit einem weiteren Zahnrad **438**, das am unteren Ende einer Antriebswelle **439** befestigt ist, die durch einen Motor **440** oder ein anderes Betätigungsteil, das an ihrem oberen Ende befestigt ist, um ihre Achse gedreht werden kann. Die Zahnräder **427**, **428**, **437**, **438** können von jedem Typ sein, der in der Lage ist, ein Drehmoment zu übertragen, wenn die Drehachsen der beiden kämmenden Zahnräder nicht miteinander

ausgerichtet sind. In [Fig. 29](#) sind die Zahnräder Kegelhäder, die zwei rechtwinklige Antriebsvorrichtungen bilden. Falls zu erwarten ist, dass sich eines der Zahnräder um weniger als 360° um seine Achse dreht, kann das Zahnrad als Zahnrad-Sektor (ein Zahnrad, das sich nur um ein Kreissegment dreht) ausgebildet sein, um sein Gewicht zu reduzieren. Die zweite Achse, um die sich der Ring **435** dreht, hält stets einen konstanten Winkel zur Vertikalen und relativ zu der Achse der Antriebswelle **439** für den Ring **435** ein. Im Gegensatz dazu variiert bei Drehung des Rings um die zweite Achse der Winkel, der relativ zur Vertikalen der ersten Achse existiert, um die sich das Halterohr dreht. Deshalb können die beiden Zahnräder **427**, **428** für das Halterohr **425** derart gewählt werden, dass sie in der Lage sind, ein Drehmoment zueinander zu übertragen, wenn ihre Drehachsen unter einem von zahlreichen verschiedenen Winkeln zueinander angeordnet sind. Alternativ kann die Antriebswelle **429** zum Drehen des Halterohrs **425** eine flexible Welle sein, oder es kann ein Universalgelenk **431** oder ein anderes Gelenk an der Welle **429** installiert sein, damit das untere Ende der Welle **429** verschiedene Winkel relativ zu dem oberen Ende der Welle **429** einnehmen kann und die Drehachsen der beiden Zahnräder **427**, **428** für das Halterohr **425** einen konstanten Winkel relativ zueinander aufrechterhalten können.

[0135] [Fig. 30](#) zeigt eine Variation der Struktur gemäß [Fig. 29](#), bei der die Kegelhäder gemäß [Fig. 29](#) durch Schneckenradgetriebe ersetzt worden sind, die jeweils eine Schnecke, welche an dem unteren Ende einer Drehwelle angeordnet ist, und ein Schneckenrad aufweisen, welches an dem Halterohr **425** oder dem Ring **435** koaxial mit der ersten bzw. zweiten Achse ausgerichtet ist. Gemäß [Fig. 30](#) ist eine Schnecke **432** an dem unteren Ende der Antriebswelle **429** befestigt, und ein Schneckenrad **433**, das mit der Schnecke **432** zusammengreift, ist an dem Halterohr **425** in Ausrichtung mit der ersten Achse befestigt. In ähnlicher Weise ist eine Schnecke **441** an dem unteren Ende der Antriebswelle **439** befestigt, und ein Schneckenrad **442**, das mit der Schnecke **441** zusammengreift, ist an dem Ring **435** in Ausrichtung mit der zweiten Achse befestigt. Jede Antriebswelle **429**, **439** kann durch einen Motor **430**, **440** oder ein anderes geeignetes Betätigungsteil, das an ihrem oberen Ende befestigt ist, um ihre Achse gedreht werden. Wie im Zusammenhang mit [Fig. 29](#) beschrieben, kann die Antriebswelle **429** zum Drehen des Halterohrs **425** ein Universalgelenk **431** aufweisen oder in anderer Weise derart strukturiert sein, dass sie ein Drehmoment auf das Schneckenrad **433** übertragen kann, wenn die Achse des Schneckenrads **432** aufgrund der Tatsache, dass sich der Ring **435** um die zweite Achse dreht, nicht vertikal angeordnet ist.

[0136] [Fig. 31](#) zeigt eine explodierte Seitenansicht

eines weiteren Beispiels eines zur Verwendung mit der vorliegenden Erfindung vorgesehenen Handgelenkmechanismus vom Kardan-Typ. Bei diesem Beispiel sind ein Halterohr **450** und ein Ring **455**, die in ihrer Struktur ähnlich wie diejenigen gemäß der vorhergehenden Ausführungsform ausgelegt sind, in einer beliebigen geeigneten Weise derart drehbar gelagert, dass sie um eine erste Achse bzw. eine zweite Achse, die rechtwinklig zur ersten Achse verläuft, geschwenkt werden können. Beispielsweise kann das Halterohr **450** durch zwei Lager **451** schwenkbar gelagert sein, die an dem Ring **455** in Ausrichtung mit der ersten Achse befestigt sind, und der Ring **455** kann durch zwei Lager **456** schwenkbar gelagert sein, die an einem Rohr **321** in Ausrichtung mit der zweiten Achse befestigt sind. Das Halterohr **450** und der Ring **455** sind mit einem Ritzel **452** und **457** versehen, die an ihnen coaxial mit der ersten Achse oder der zweiten Achse angeordnet sind. Das Halterohr **450** und der Ring **455** können um die ersten und zweiten Achsen mittels erster und zweiter coaxialer Rohre **460** und **465** gedreht werden, die jeweils mit einem der Ritzel **452** oder **457** zusammengreifen, um das Ritzel und das Halterohr **450** oder den Ring **455** um ihre Achsen zu drehen. Das erste Rohr **460** weist an seinem unteren Ende angeformte oder befestigte Zahnradzähne **461** zum Zusammengriff mit dem Ritzel **452** des Halterohrs **450** auf, und das zweite Rohr **465** weist an seinem unteren Ende angeformte oder befestigte Zahnradzähne **466** zum Zusammengriff mit dem Ritzel **457** des Rings **455** auf. Jedes der Rohre **460**, **465** kann durch einen Motor oder ein anderes geeignetes Betätigungsteil um seine Längsachse gedreht werden. Beispielsweise wird gemäß [Fig. 31](#) jedes Rohr mittels eines Motors **462** über eine Rolle **463** gedreht, die an der Abtriebswelle des Motors **462** befestigt ist und sich in Reibeingriff mit der Außenfläche eines der Rohre **460**, **465** befindet. Gemäß einem weiteren Beispiel kann jeder Motor **462** ein Ritzel antreiben, das mit Zahnradzähnen zusammengreift, die in Umfangsrichtung des entsprechenden Rohrs **460**, **465** verlaufen. Der Winkel der Drehachse des Ritzels **457** für den Ring **455** (die der zweiten Achse entspricht) bleibt relativ zu der Drehachse des zweiten Rohrs **465** konstant; der Winkel der Drehachse des Ritzels **452** für das Halterohr **450** (die der ersten Achse entspricht) variiert jedoch relativ zu der Drehachse des ersten Rohrs **460**, wenn der Ring **455** um seine Achse gedreht wird. Somit werden die Zahnradzähne **461** an dem ersten Rohr **460** und das Ritzel **452** an dem Halterohr **450** vorzugsweise derart gewählt, dass die Übertragung von Drehmomenten zwischen ihnen unter vielen verschiedenen Winkeln zwischen ihren Drehachsen möglich ist.

[0137] Anstelle der Verwendung von Zahnrädern zur Verbindung der Rohre mit dem Ring **455** und dem Halterohr **450** können die Zahnräder **452**, **457** durch Rollen ersetzt werden, und die Zahnradzähne **461**,

466 können durch Reibflächen ersetzt werden, die an den unteren Enden der Rohre ausgebildet sind und in Kontakt mit den Rollen stehen.

[0138] [Fig. 32-Fig. 34](#) zeigen Ansichten eines weiteren Beispiels eines Kardan-Typ-Handgelenkmechanismus zur Verwendung mit der vorliegenden Erfindung. [Fig. 32](#) zeigt eine explodierte Ansicht des Handgelenkmechanismus. [Fig. 33](#) zeigt eine Seitenansicht des Handgelenkmechanismus gemäß [Fig. 32](#) in dem Zustand, in dem sich ein Halterohr des Handgelenkmechanismus in einer horizontalen Ausgangsposition befindet, und [Fig. 34](#) zeigt eine Seitenansicht der Handgelenkmechanismus mit in einer Schrägposition angeordnetem Halterohr. Wie bei den vorhergehenden Mechanismen weist dieser Mechanismus ein Halterohr **470** und einen das Halterohr **470** umgebenden Ring **475** auf, wobei das Halterohr **470** von dem Ring **475** schwenkbar zur Drehung um eine erste Achse gehalten ist, und wobei der Ring **475** durch ein geeignetes Teil, wie z.B. ein entsprechendes Rohr **321**, schwenkbar zur Schwenkung um eine zweite Achse gehalten ist, die rechtwinklig zur ersten Achse verläuft. Das Halterohr **470** und der Ring **475** können in jeder beliebigen Weise schwenkbar gehalten sein. Beispielsweise ist in [Fig. 32](#) das Halterohr **470** durch zwei Lager **471** schwenkbar gehalten, die an dem Ring **475** in Ausrichtung mit der ersten Achse befestigt sind, und der Ring **475** ist durch zwei Lager **476** schwenkbar gehalten, die an dem Rohr **321** in Ausrichtung mit der zweiten Achse befestigt sind. Ein drehbares erstes Rohr **480** weist an seinem unteren Ende einen Nockenvorsprung **481** auf, der in der Axialrichtung des ersten Rohrs **480** gegen zwei Nockenfolger **472** an dem Halterohr **470** gedrückt wird, und ein drehbares zweites Rohr **485**, das coaxial mit dem ersten Rohr **480** angeordnet ist und dieses umgibt, weist an seinem unteren Ende einen Nockenvorsprung **486** auf, der in der Axialrichtung des zweiten Rohrs **485** gegen zwei Nockenfolger **477** an dem Ring **475** gedrückt wird. Die gezeigten Nockenfolger **472**, **477** weisen Stifte auf, die von der Außenumfangsfläche des Halterohrs **470** oder des Rings **475** an gegenüberliegenden Seiten eines der Lager **471** oder eines der Lager **476** abstehen, jedoch können die Nockenfolger jede beliebige Struktur aufweisen, die es ihnen ermöglicht, den Nockenvorsprung oder einen anderen Teil des unteren Endes des entsprechenden Rohrs **480**, **485** an verschiedenen Drehpositionen der Rohre zu kontaktieren. Jedes Rohr **480**, **485** wird durch die Schwerkraft und/oder mittels eines Vorspannteils wie z.B. einer Feder in der Axialrichtung gegen die entsprechenden Nockenfolger gedrückt. Jedes Rohr **480**, **485** kann durch einen Motor oder ein anderes geeignetes Betätigungsteil um seine Längsachse gedreht werden. Beispielsweise kann gemäß [Fig. 32](#) jedes Rohr durch einen Motor **482** gedreht werden, der eine reibend mit dem Rohr zusammengreifende Rolle **483** antreibt. Wenn eines der Rohre gedreht wird, verän-

dert sich die Stelle des Nockenvorsprungs an dem Rohr relativ zu den entsprechenden Nockenfolgern, und das Halterohr **470** oder der Ring **475** werden derart geschwenkt, dass ihre beiden Nockenfolger in Kontakt mit dem entsprechenden Nockenvorsprung gehalten werden. Als Beispiel ist in [Fig. 33](#) und [Fig. 34](#) gezeigt, wie die Drehung des ersten Rohrs **480** das Halterohr **470** um die erste Achse schwenken kann. [Fig. 33](#) zeigt das erste Rohr **480** in einer Ausgangs-Drehposition, in welcher der Nockenvorsprung **281** relativ zu den Nockenfolgern **472** zentriert ist und das Halterohr **470** horizontal verläuft. [Fig. 34](#) zeigt das erste Rohr **480** nach einer derartigen Drehung um seine Längsachse ausgehend von seiner Ausgangsposition, dass der Nockenvorsprung **481** aus der Position gemäß [Fig. 33](#) nach links bewegt worden ist. Da das erste Rohr **480** stets in seiner Längsrichtung gegen die Nockenfolger **472** an dem Halterohr **470** gedrückt wird, schwenkt das Halterohr **470** in der Figur im Gegenuhrzeigersinn, um beide Nockenfolger **472** in Kontakt mit dem Nockenvorsprung **481** oder einem anderen Bereich des unteren Endes des ersten Rohrs zu halten. Der Drehwinkel des Halterohrs **470** relativ zu der horizontalen Position gemäß [Fig. 33](#) hängt vom Betrag der Drehung des ersten Rohrs **480** ab. Falls das erste Rohr **480** um seine Längsachse in der Gegenrichtung in der Figur gedreht wird, dreht sich das Halterohr **470** im Uhrzeigersinn auf einen Winkel, der dem Drehbetrag des ersten Rohrs **480** entspricht. Der Ring **475** kann in ähnlicher Weise von dem zweiten Rohr **485** um die zweite Achse gedreht werden.

[0139] Die in [Fig. 27-Fig. 34](#) gezeigten verschiedenen Mechanismen zum Schwenken eines Halterohrs und eines Rings eines Handgelenkmechanismus um die ersten und zweiten Achsen können miteinander kombiniert werden, wobei ein Typ von Mechanismus zum Schwenken des Halterohrs und ein anderer Typ von Mechanismus zum Schwenken des Rings verwendet wird. Beispielsweise kann ein Zahnradantrieb wie der in [Fig. 29](#) oder [Fig. 30](#) gezeigte zum Schwenken des Rings verwendet werden, und eine Anordnung wie diejenige gemäß [Fig. 27](#), die eine Welle mit einem Schenkel **421** zum Zusammengriff mit einem Vorsprung aufweist, kann zum Schwenken des Halterohrs um die erste Achse verwendet werden.

Patentansprüche

1. Manipulator (**10, 50, 100, 180, 220**) zur Verwendung bei medizinischen Eingriffen, mit ersten und zweiten Armen (**21, 22, 53, 55, 61, 63, 103, 106, 107, 108, 110, 121, 123, 186, 190, 192, 194, 205, 206, 238, 258**); und einem medizinischen Werkzeug (**12, 171**), das mittels der ersten und zweiten Arme schwenkbar gelagert ist, wobei jeder Arm das medizinische Werkzeug an einer unterschiedlichen Stelle lagert,

dadurch gekennzeichnet, dass jeder Arm ein zugehöriges erstes Betätigungsteil (**54, 62, 104, 105, 122, 230, 250**) zum Bewirken einer Längsbewegung des betreffenden Arms und ein zugehöriges zweites Betätigungsteil (**51, 60, 101, 121, 235, 255**) zum Bewirken einer Schwenkbewegung des betreffenden Arms aufweist, derart, dass die Arme unabhängig voneinander in einer Längsrichtung und einer Schwenkrichtung bewegbar sind, um das Werkzeug mit mindestens drei Freiheitsgraden zu handhaben.

2. Manipulator nach Anspruch 1, bei dem das zweite jedem Arm zugehörige Betätigungsteil (**51, 60, 101, 121**) ein Dreh-Betätigungsteil aufweist.

3. Manipulator nach Anspruch 2, bei dem jedes Dreh-Betätigungsteil (**51, 60, 101, 121**) einen bürstenlosen spaltlosen Gleichstrommotor aufweist.

4. Manipulator nach Anspruch 1, bei dem der erste Arm (**53, 55, 103, 106, 107, 108**) um eine erste Achse schwenkbar ist und der zweite Arm (**61, 63, 121, 123**) um eine zweite Achse schwenkbar ist und die ersten und zweiten Achsen miteinander ausgerichtet sind.

5. Manipulator nach Anspruch 1, bei dem die ersten und zweiten Achsen vertikal verlaufen.

6. Manipulator nach Anspruch 1, bei dem jeder Arm (**21, 22, 53, 55, 61, 63, 103, 106, 107, 108, 110, 121, 123, 186, 190, 192, 194, 205, 206, 238, 258**) mehrere Lenker aufweist, die in Reihe miteinander verbunden sind, wobei jeder Lenker relativ zu einem benachbarten der Lenker bewegbar ist.

7. Manipulator nach Anspruch 1, bei dem jeder der Arme erste und zweite Lenker (**53, 55, 61, 63**) aufweist, die durch das erste Betätigungsteil (**54, 62**) miteinander verbunden sind, um den zweiten Lenker relativ zu dem ersten Lenker in einer Längsrichtung des zweiten Lenkers translatorisch zu bewegen.

8. Manipulator nach Anspruch 7, bei dem jedes erste Betätigungsteil (**54, 62**) einen Linearmotor aufweist.

9. Manipulator nach Anspruch 8, bei dem jedes erste Betätigungsteil (**54, 62**) einen bürstenlosen Linear-Gleichstrommotor aufweist.

10. Manipulator nach Anspruch 4, bei dem jeder Arm erste und zweite Lenker (**53, 55, 61, 63**) aufweist, die durch das erste Betätigungsteil (**54, 62**) miteinander verbunden sind, um den zweiten Lenker relativ zu dem ersten Lenker in einer Längsrichtung des zweiten Lenkers rechtwinklig zur Drehachse des Arms translatorisch zu bewegen.

11. Manipulator nach Anspruch 1, mit einem Linear-Betätigungsteil (**65**), das mittels der Arme (**53, 55, 61, 63**) schwenkbar gelagert ist und das medizinische Werkzeug (**12**) zur Bewegung entlang eines quer zu den Armen verlaufenden linearen Wegs lagert.

12. Manipulator nach Anspruch 11, bei dem das Linear-Betätigungsteil (**65**) einen bürstenlosen Linear-Gleichstrommotor aufweist.

13. Manipulator nach Anspruch 1, mit einem Werkzeug-Halteteil (**11, 170**), an dem das Werkzeug (**12, 171**) befestigt ist, und das in den Körper eines Patienten einführbar ist und schwenkbar von den Armen gelagert ist.

14. Manipulator nach Anspruch 1, mit einem Controller (**401**), der die Bewegung der Arme koordiniert, um das Werkzeug-Halteteil mit einem virtuellen Schwenkpunkt ausgerichtet zu halten.

15. Manipulator nach Anspruch 14, bei dem die Position des virtuellen Schwenkpunkts entlang des Werkzeug-Halteteils durch den Controller (**401**) variiert werden kann.

16. Manipulator nach Anspruch 1, bei dem jeder Arm (**53, 55, 61, 63**) ein erstes Ende und ein zweites Ende hat, das relativ zu dem ersten Ende auf Bewegungen in einer Ebene beschränkt ist.

17. Manipulator nach Anspruch 1, bei dem einer der Arme (**103, 106, 107, 108, 110**) ein erstes Ende und ein zweites Ende hat, das relativ zu dem ersten Ende zur Bewegung in drei Dimensionen in der Lage ist.

18. Manipulator nach Anspruch 1, bei dem jeder der Arme (**186, 190, 192, 194, 205, 206**) ein erstes Ende und ein zweites Ende hat, das relativ zu dem ersten Ende zur Bewegung in drei Dimensionen in der Lage ist.

19. Manipulator nach Anspruch 1, bei dem der erste Arm (**186, 190, 192, 194**) ein erstes Ende und ein zweites Ende hat, das relativ zu dem ersten Ende zur Bewegung in drei Dimensionen in der Lage ist, und der zweite Arm (**205, 206**) ein erstes Ende und ein zweites Ende hat, das relativ zu dem ersten Ende des zweiten Arms zur Bewegung in drei Dimensionen in der Lage ist.

20. Manipulator nach Anspruch 1, bei dem der erste Arm (**186, 190, 192, 194**) erste und zweite Linear-Betätigungsteile (**187, 188**), einen ersten Lenker, der durch das erste Linear-Betätigungsteil in einer Längsrichtung des ersten Lenkers bewegbar ist, einen zweiten Lenker, der durch das zweite Linear-Betätigungsteil in einer Längsrichtung des zweiten Len-

kers bewegbar ist, einen dritten Lenker, der schwenkbar mit dem zweiten Lenker verbunden ist, und einen vierten Lenker aufweist, der schwenkbar mit dem ersten Lenker und mit dem dritten Lenker verbunden ist.

21. Manipulator nach Anspruch 20, bei dem der zweite Arm (**205, 206**) ein drittes Linear-Betätigungsteil (**201**) und einen fünften Lenker aufweist, der mit dem dritten Linear-Betätigungsteil zur translatorischen Bewegung in einer Längsrichtung des fünften Lenkers verbunden ist.

22. Manipulator nach Anspruch 21, bei dem der zweite Arm (**205, 206**) einen sechsten Lenker aufweist, der schwenkbar mit dem fünften Lenker verbunden ist.

Es folgen 31 Blatt Zeichnungen

Suctioning systems and

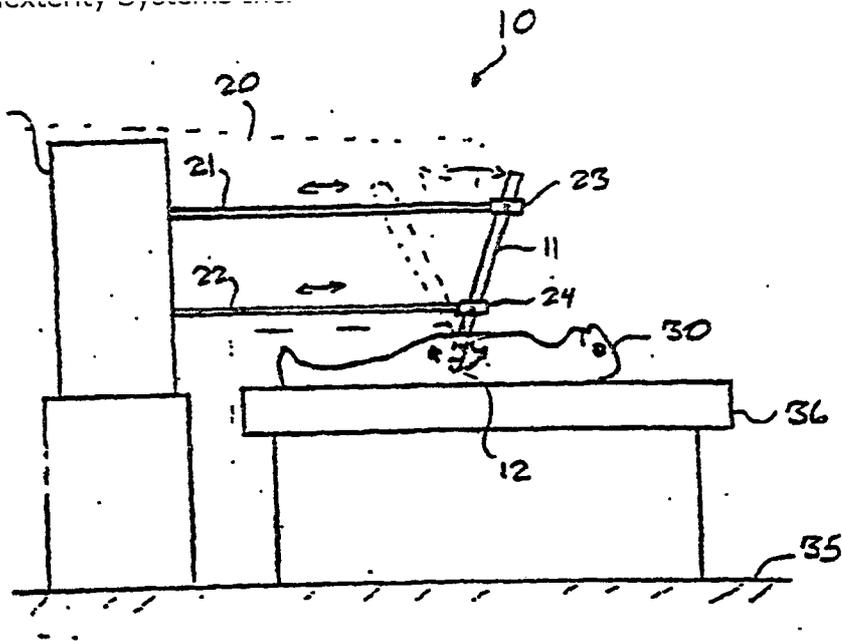


FIG. 1

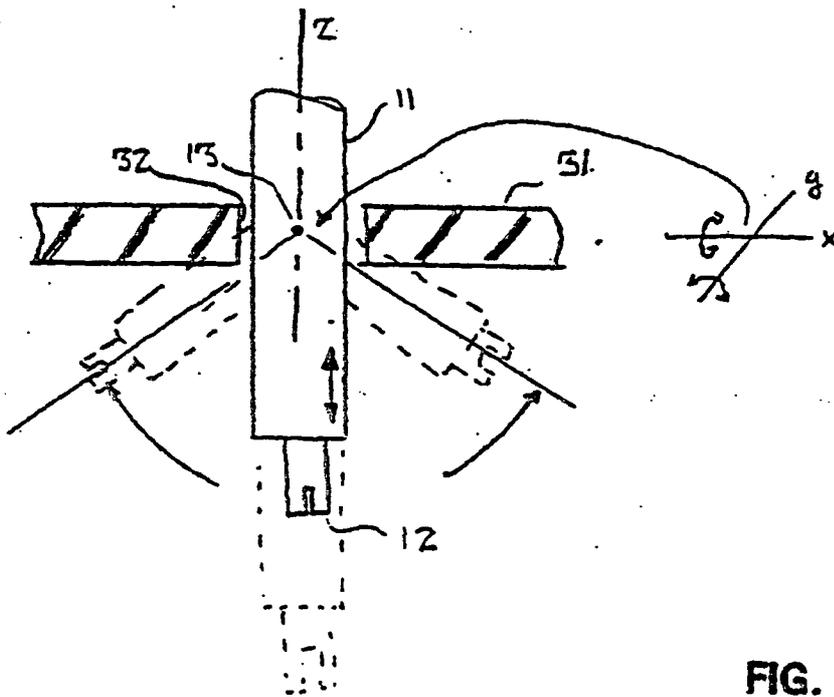


FIG. 2

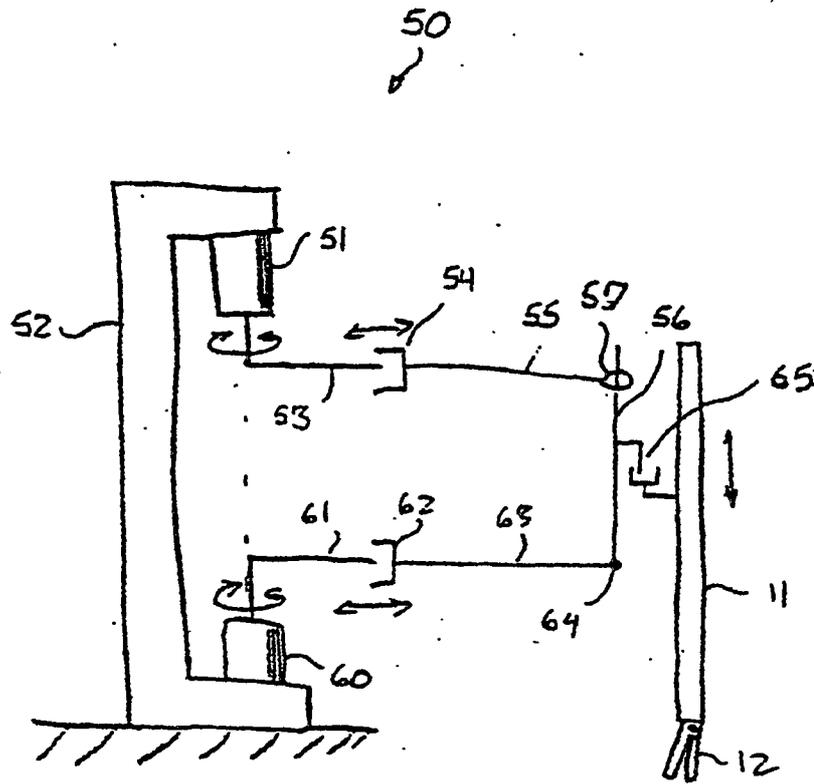


FIG. 3

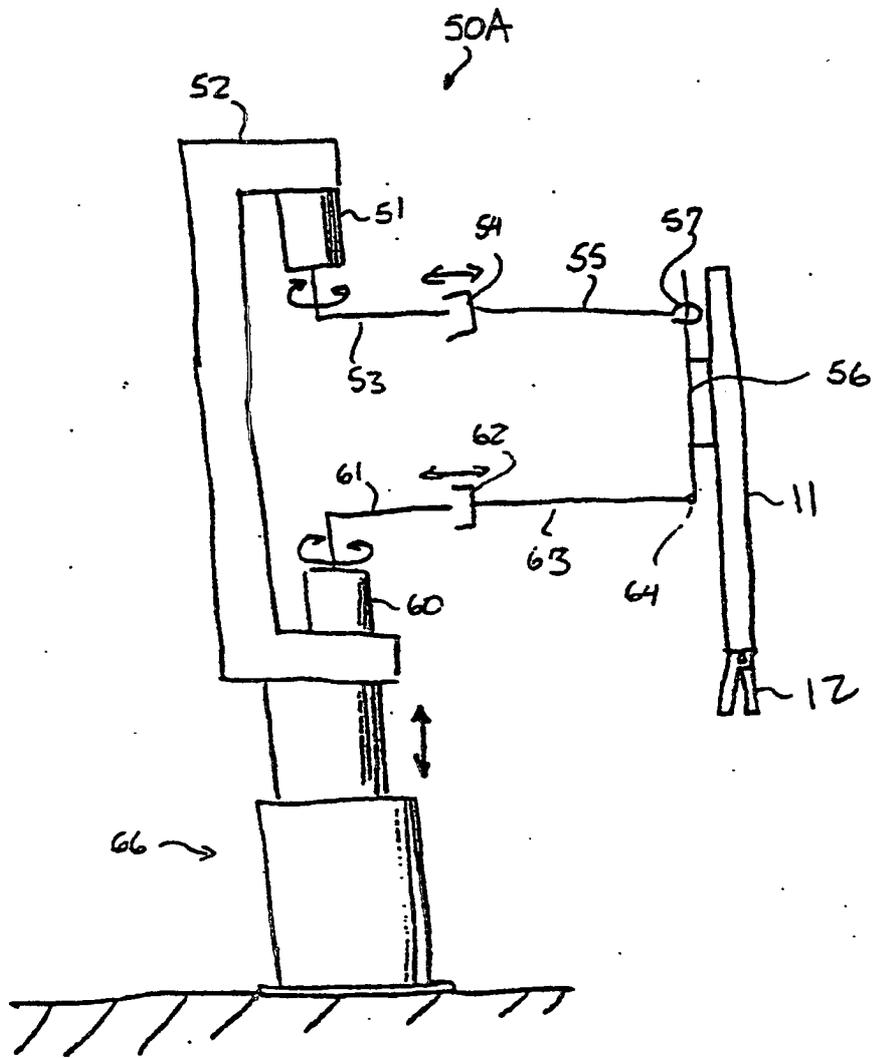


FIG. 4

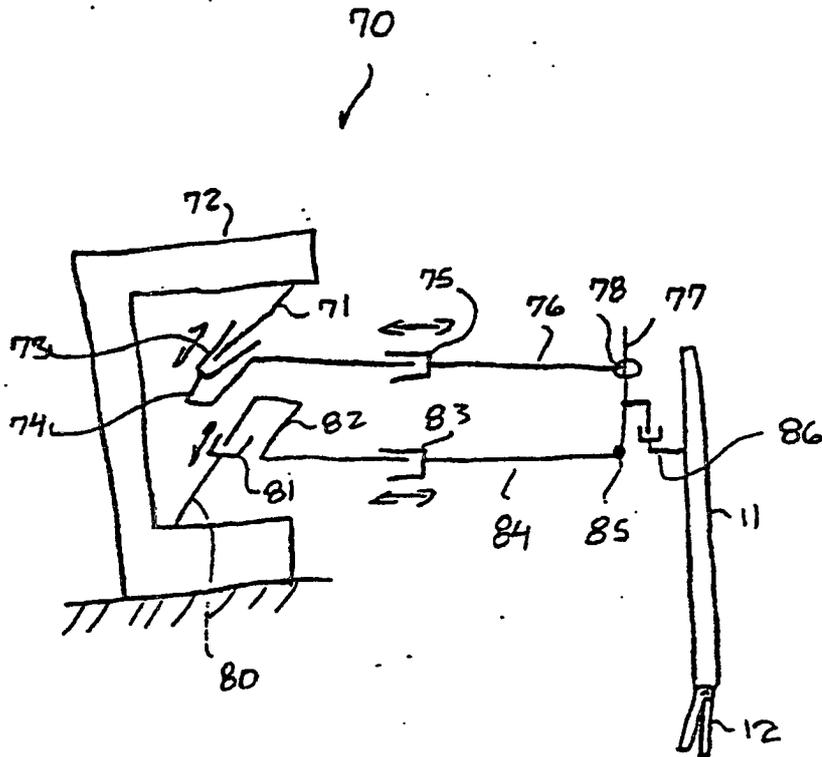


FIG. 5

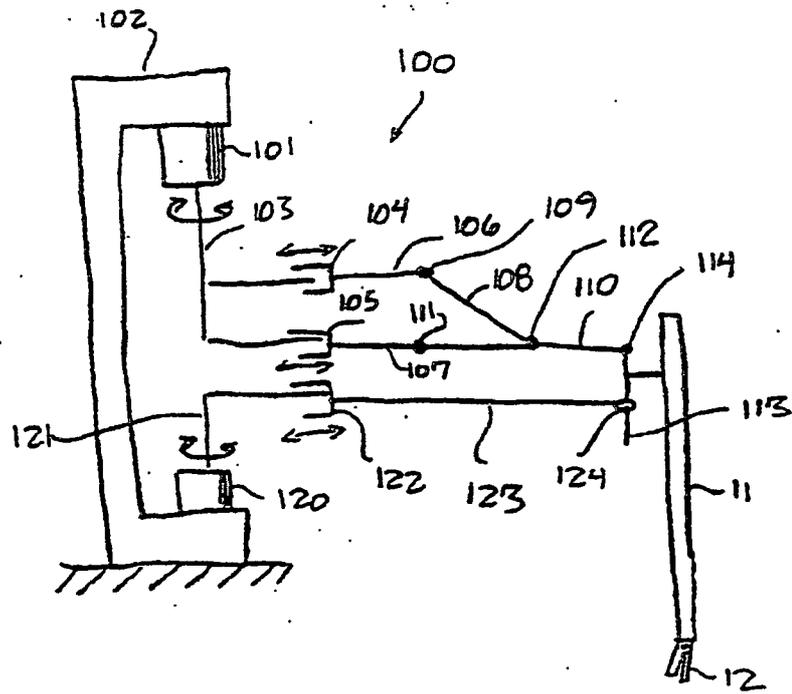


FIG. 6

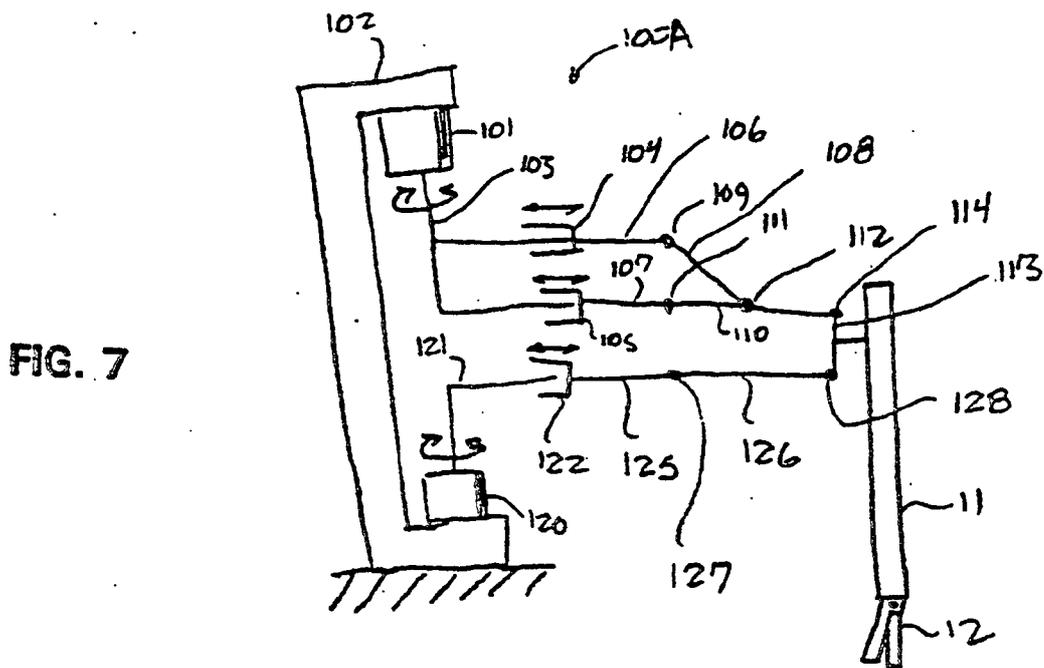


FIG. 7

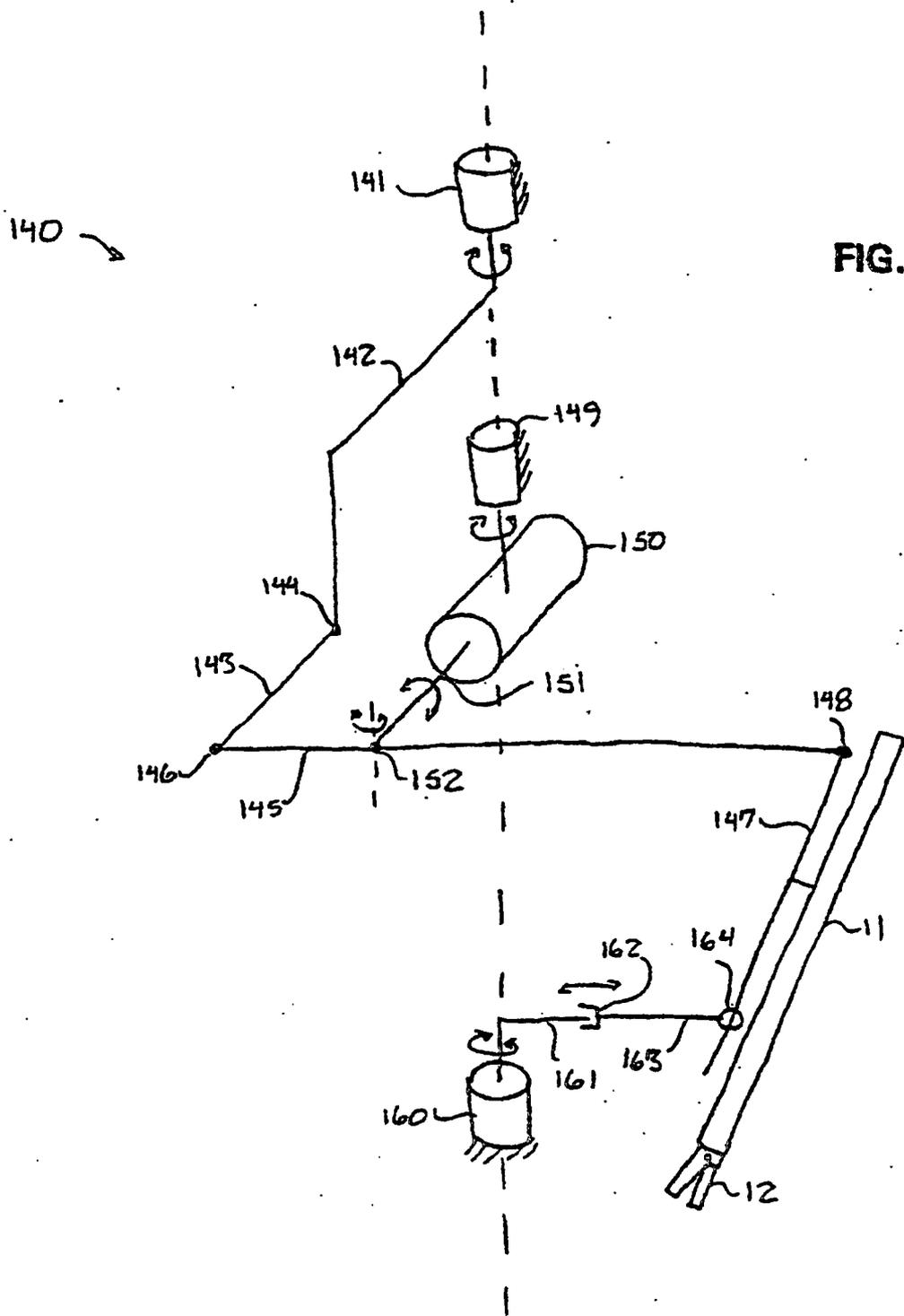


FIG. 8

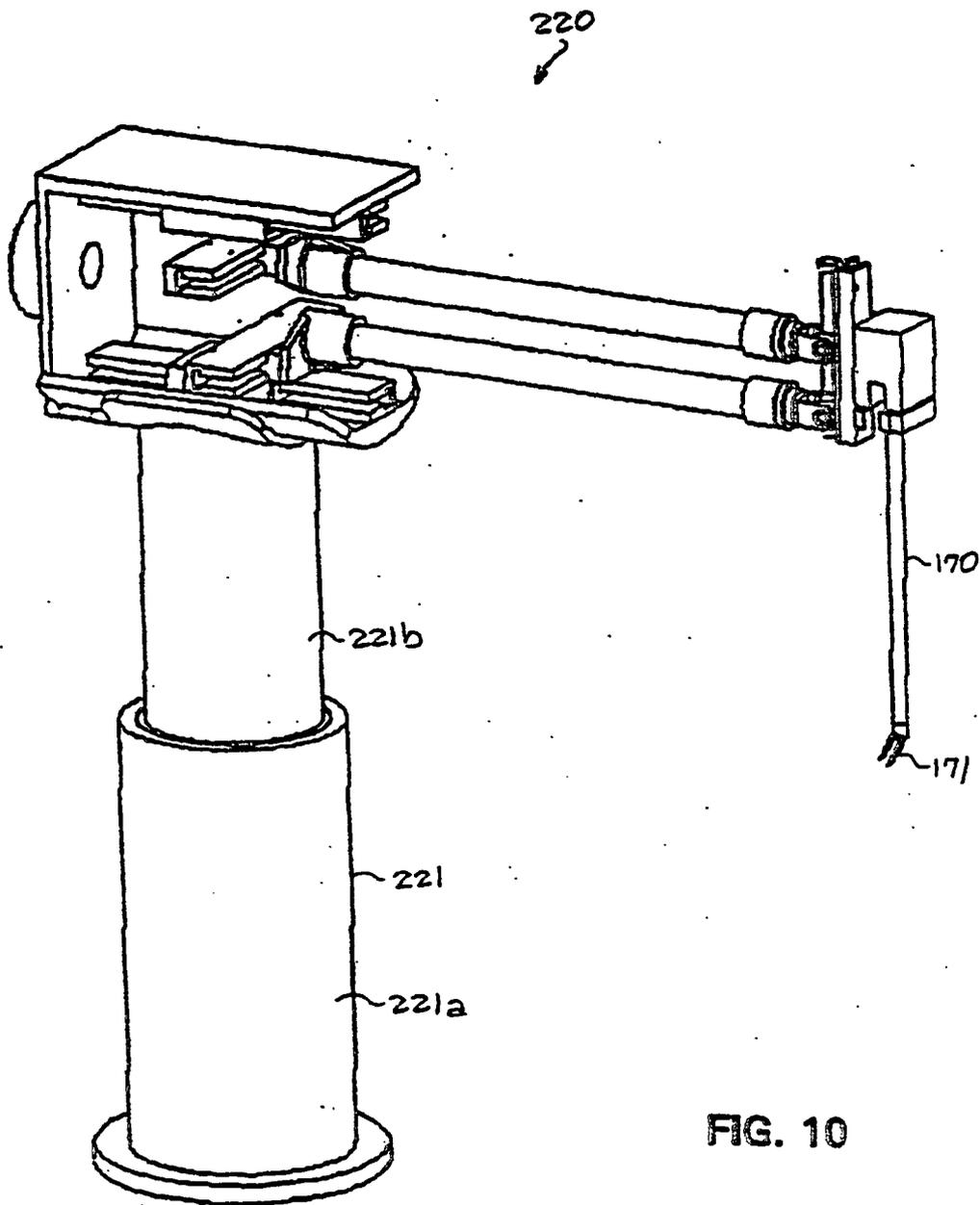


FIG. 10

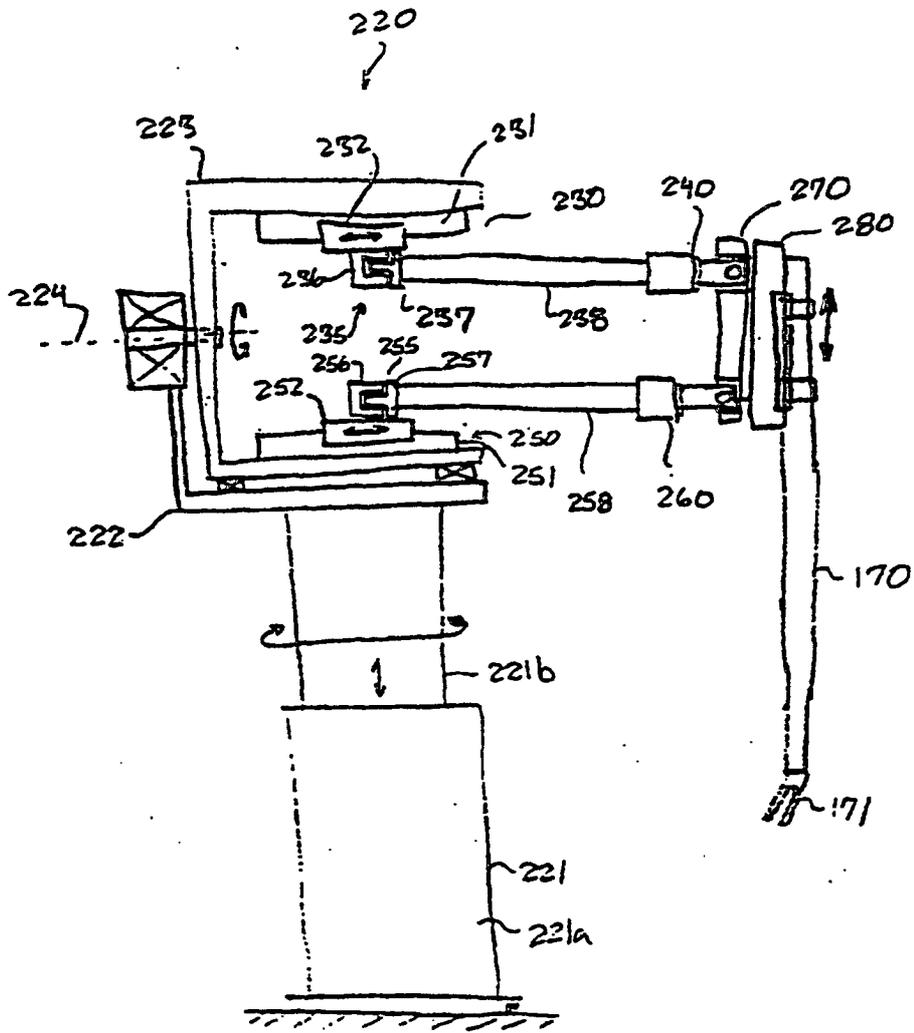


FIG. 11

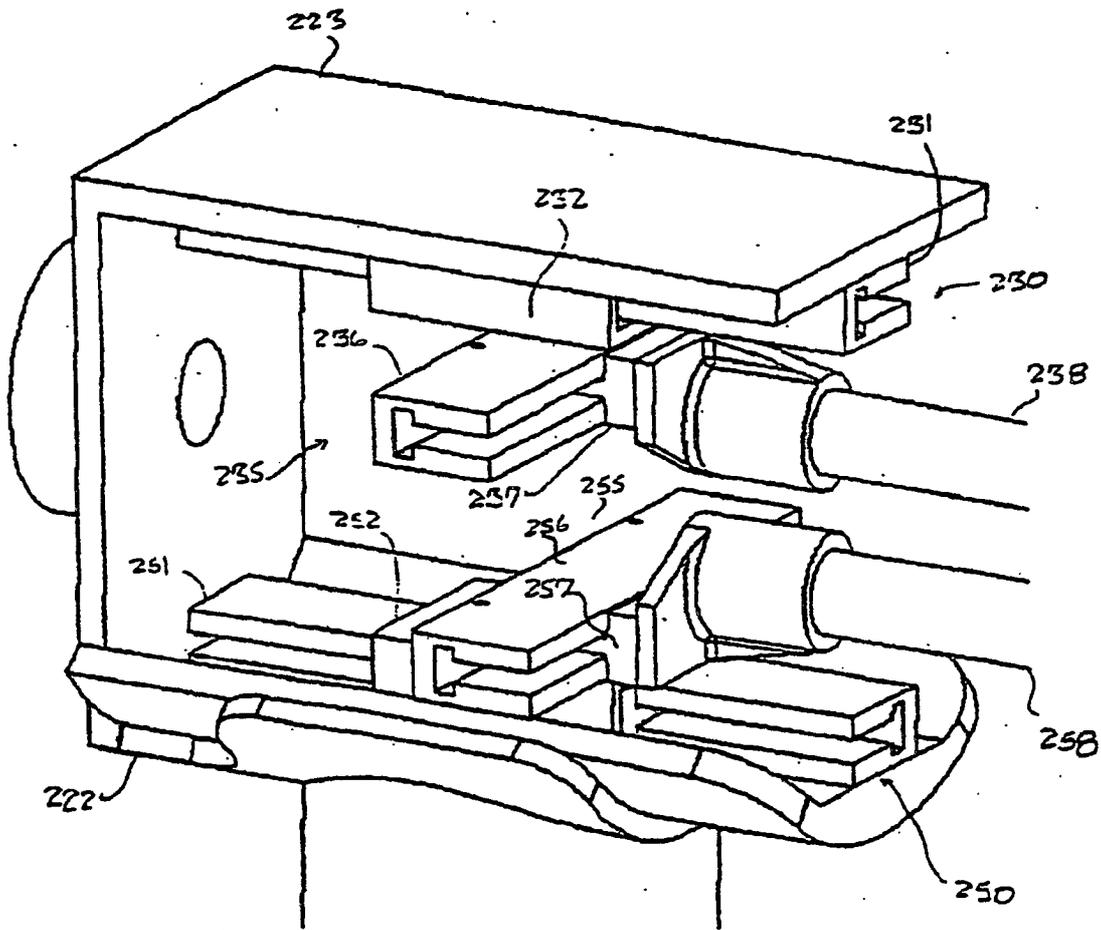


FIG. 12

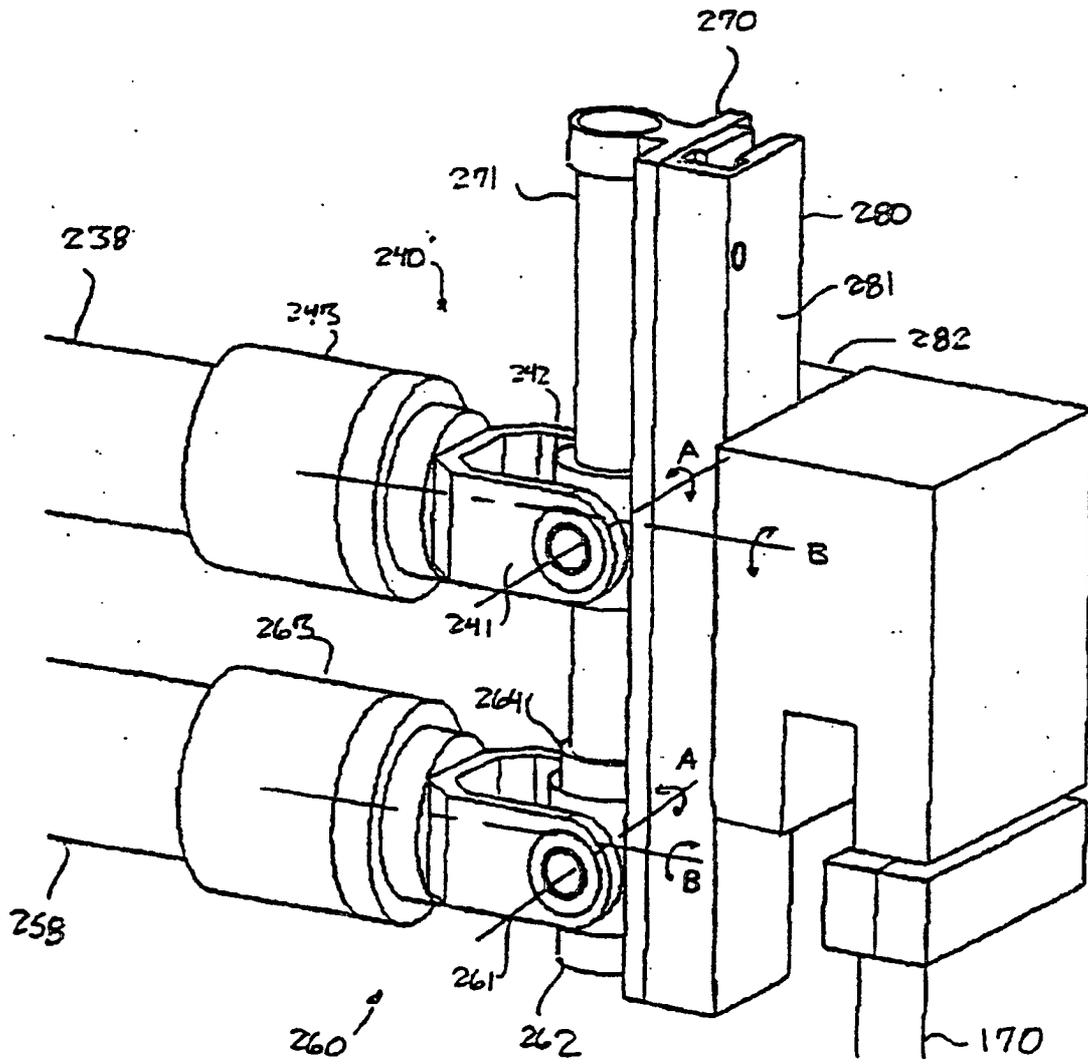


FIG. 13

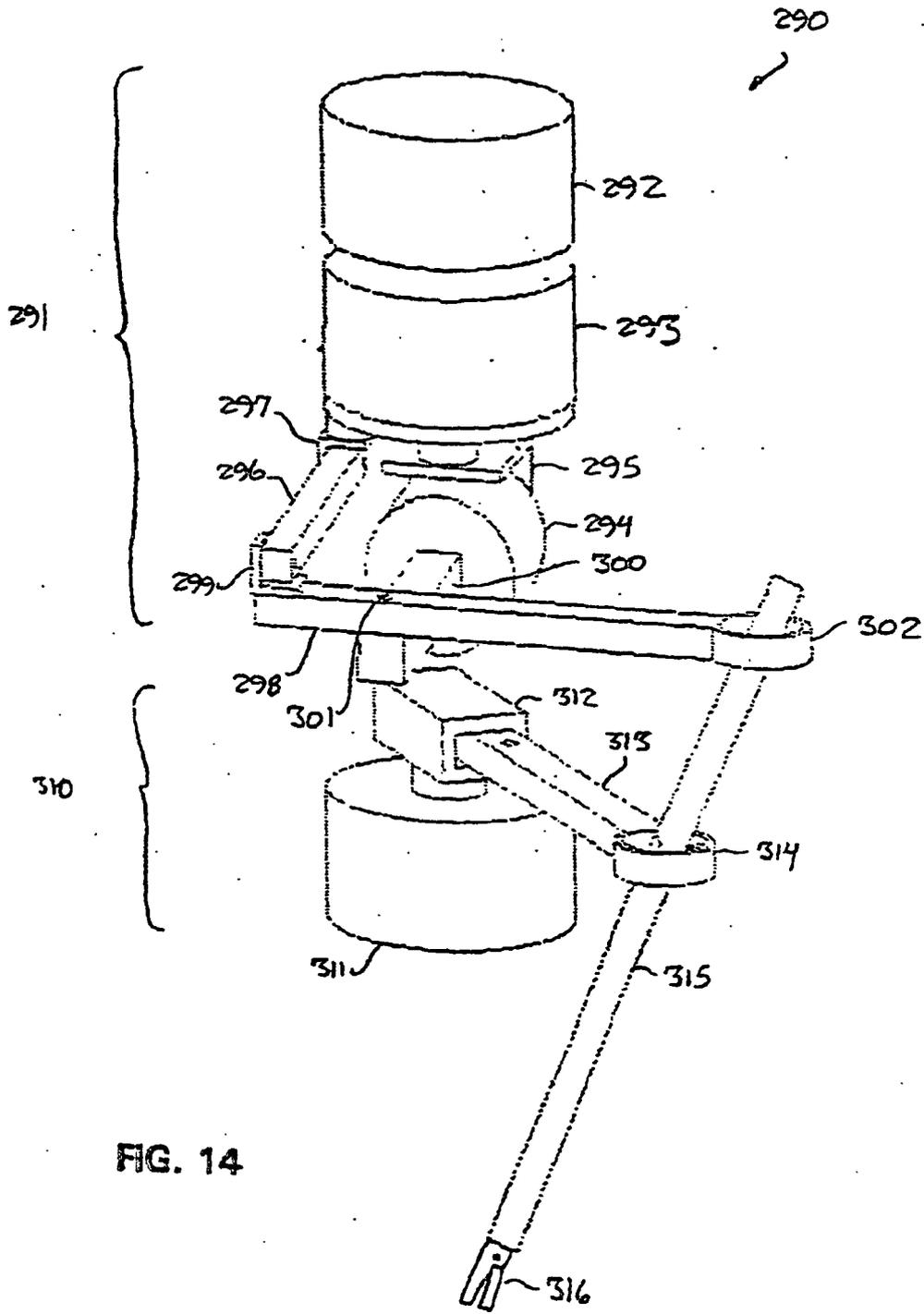


FIG. 14

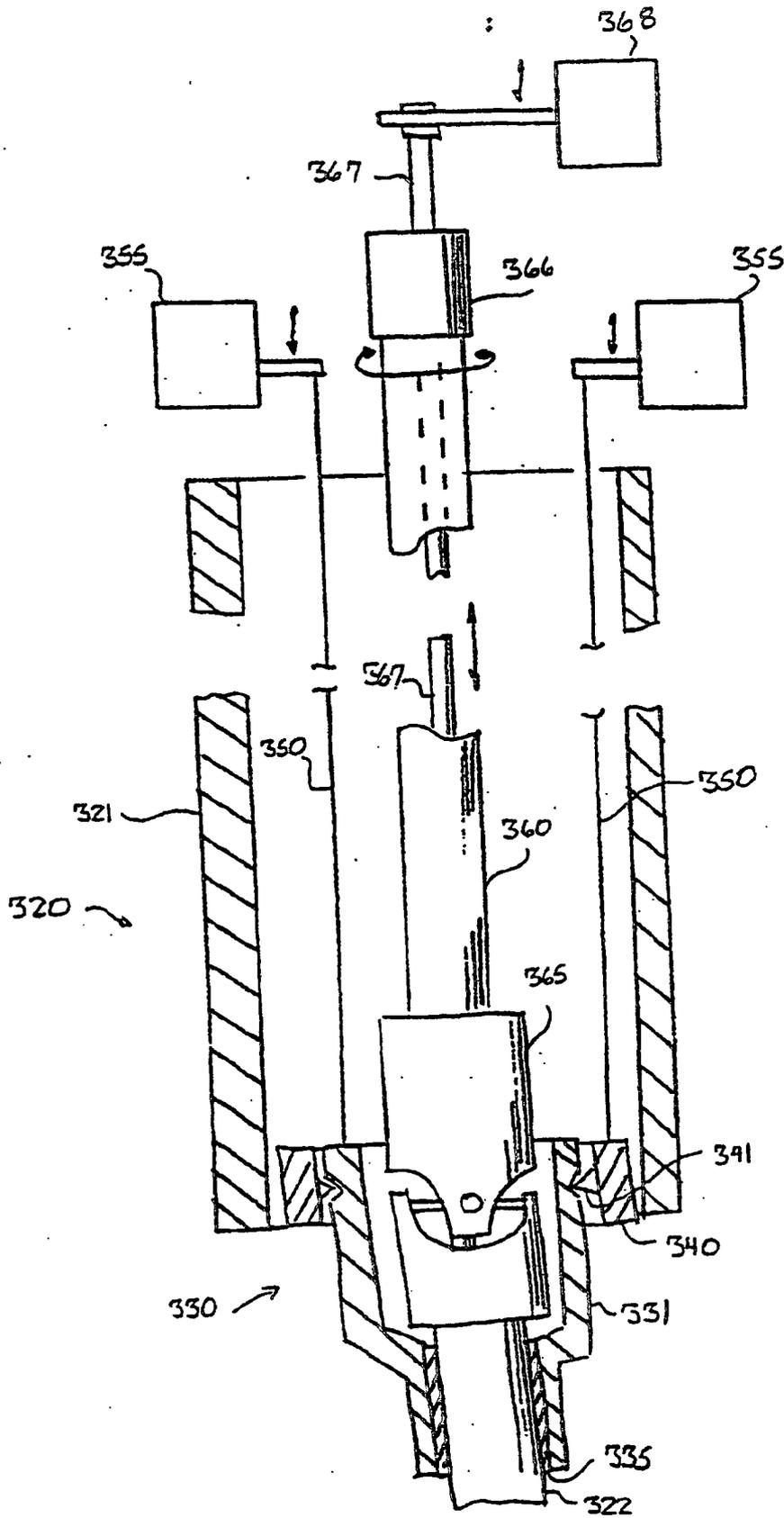


FIG. 15

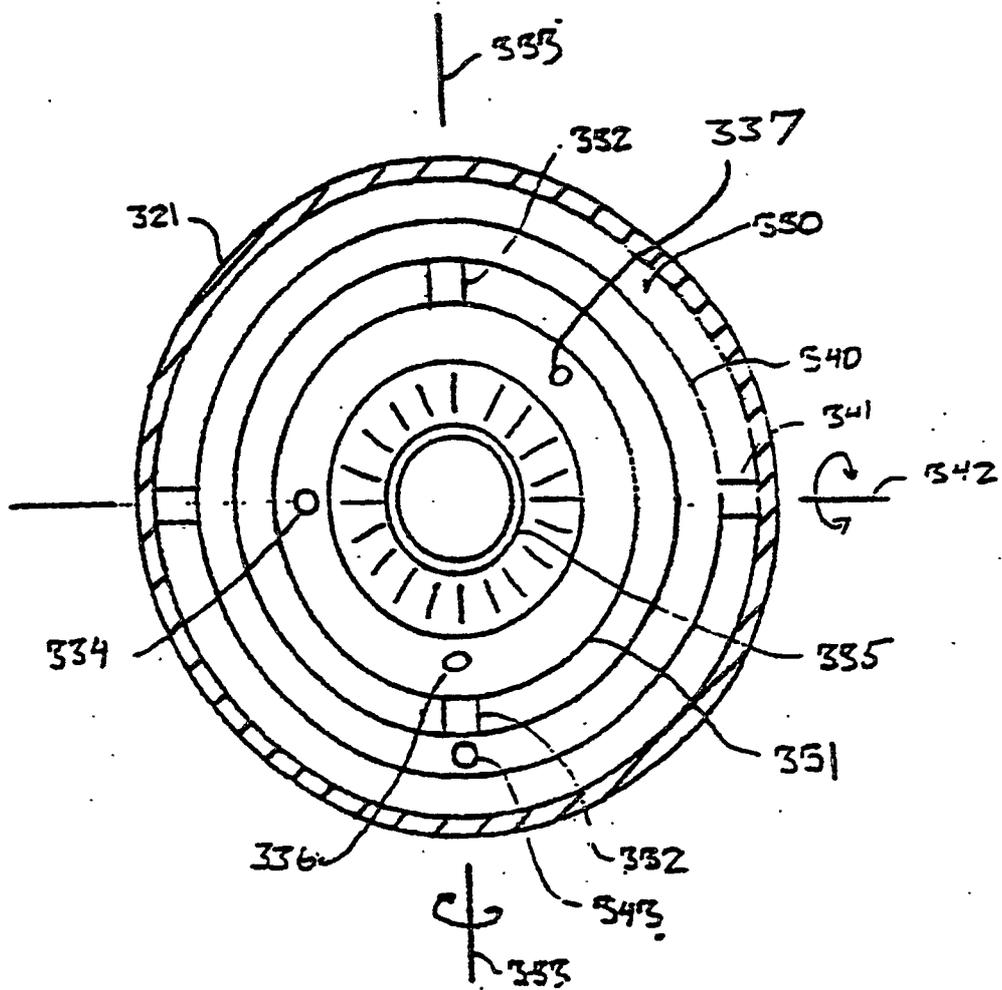


FIG. 16

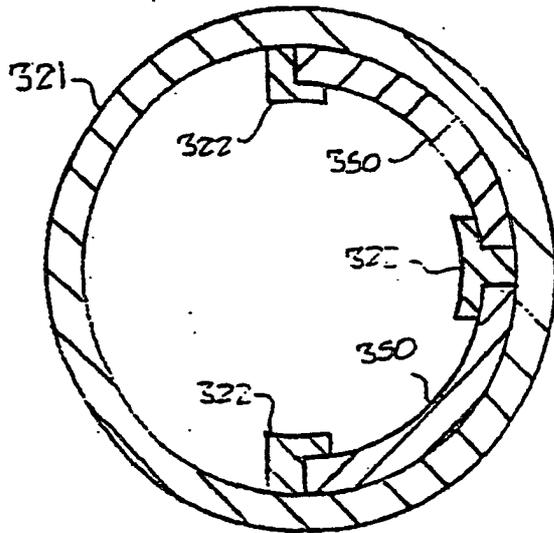


FIG. 17

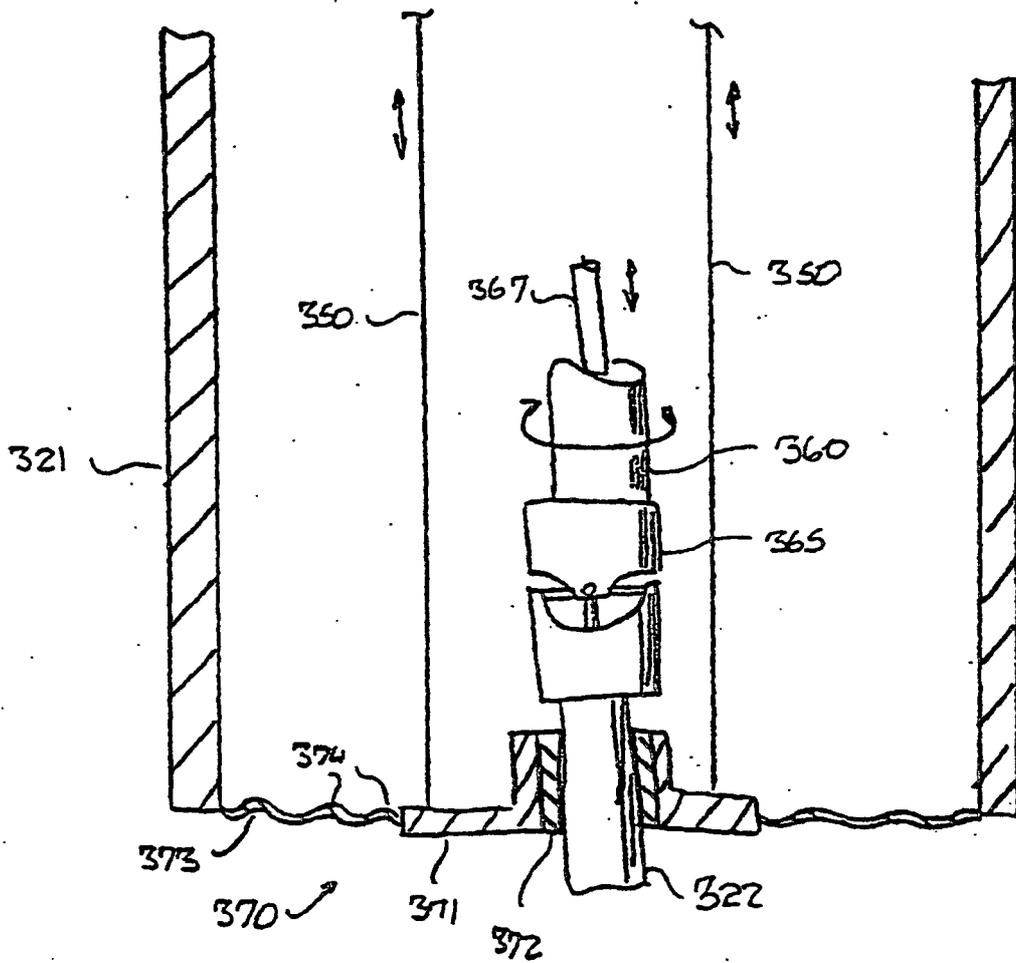


FIG. 18

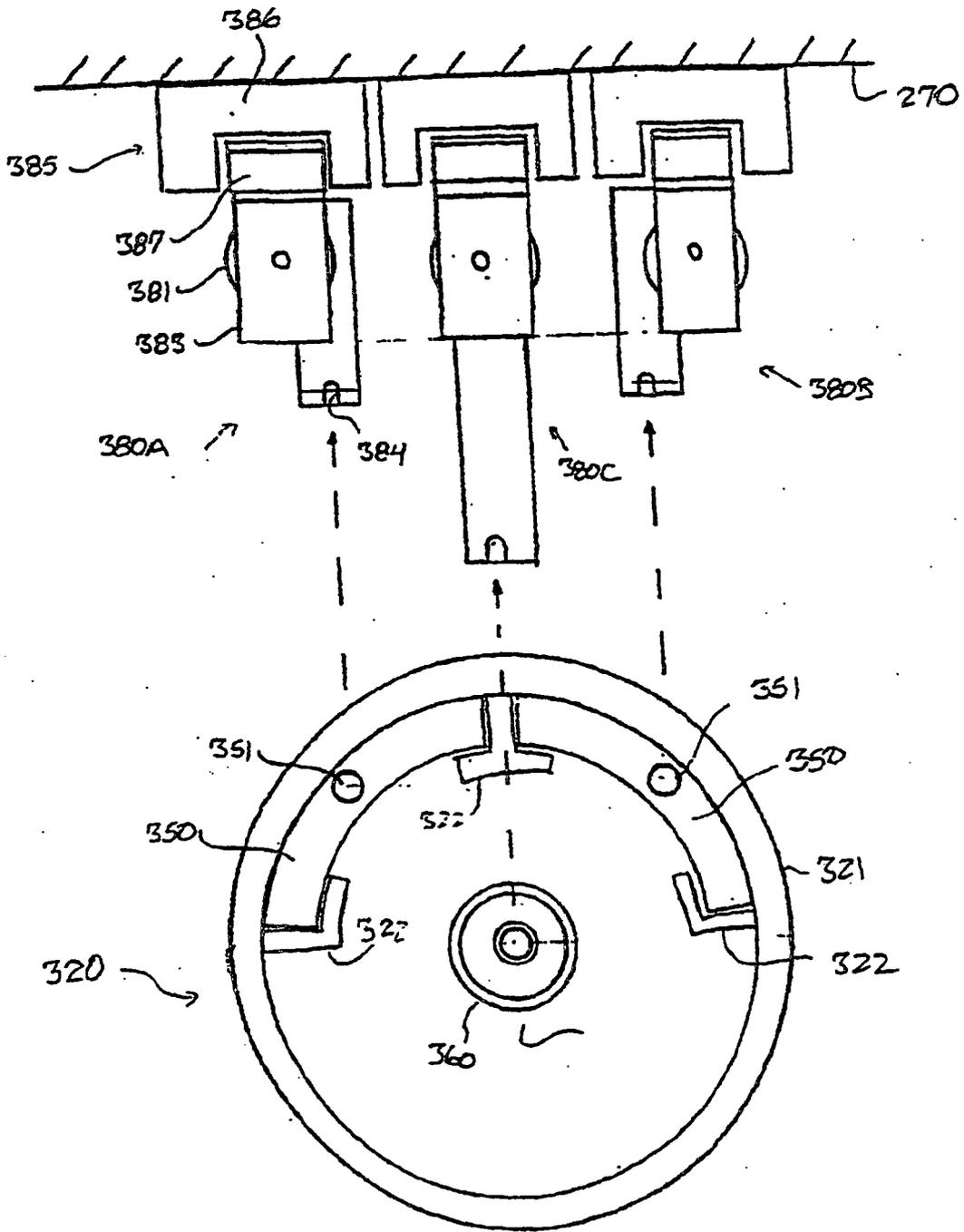


FIG. 19

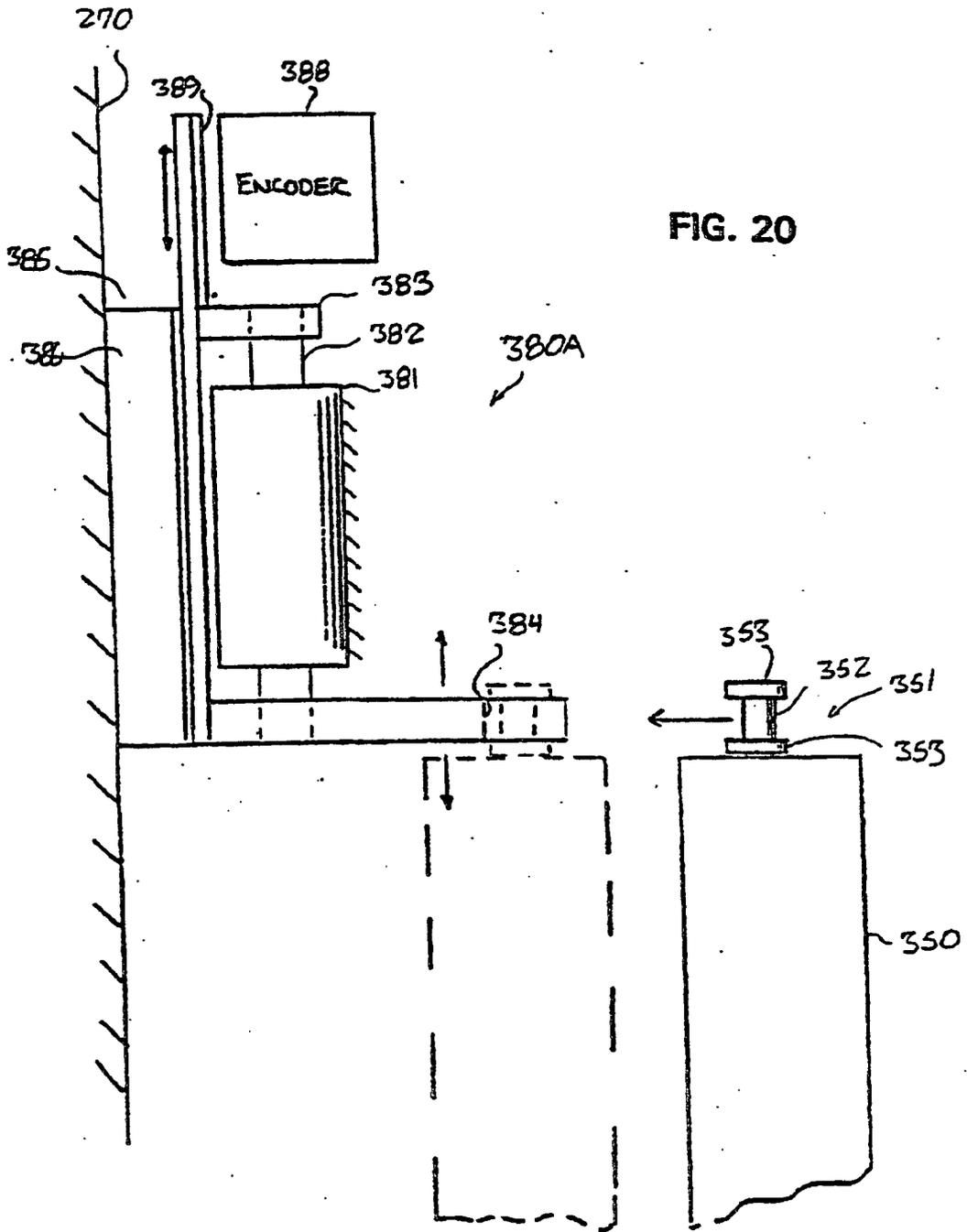


FIG. 20

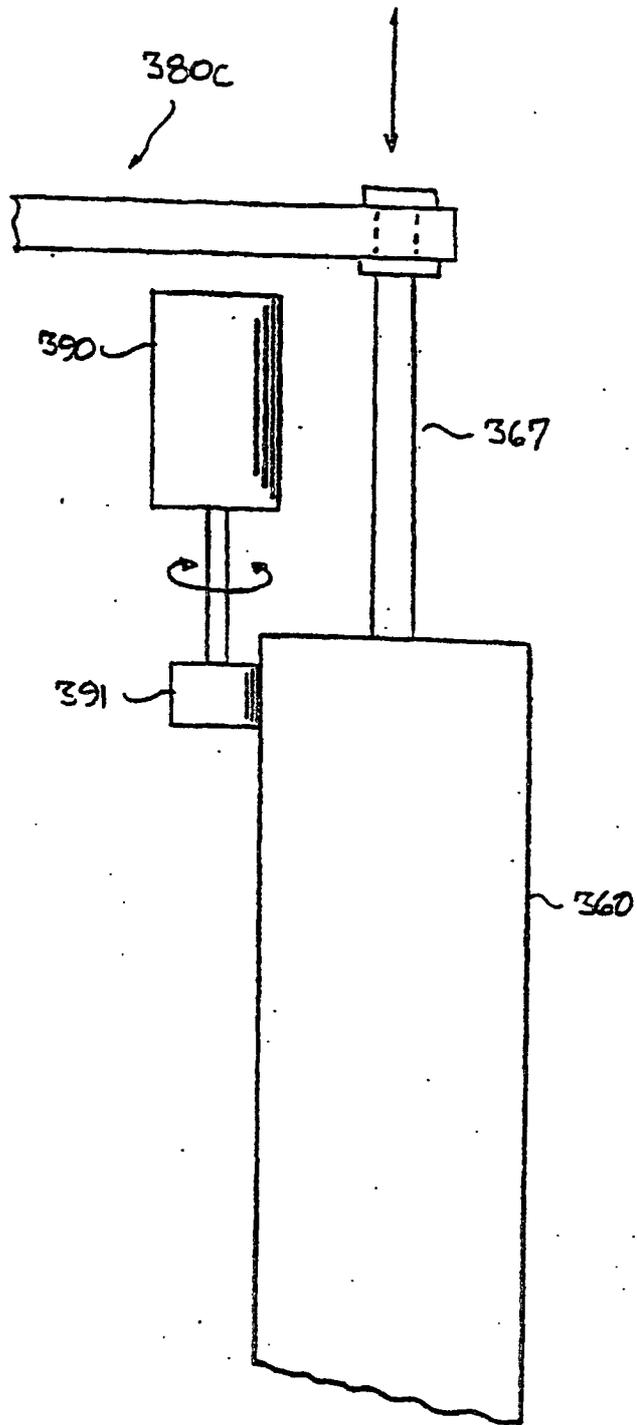
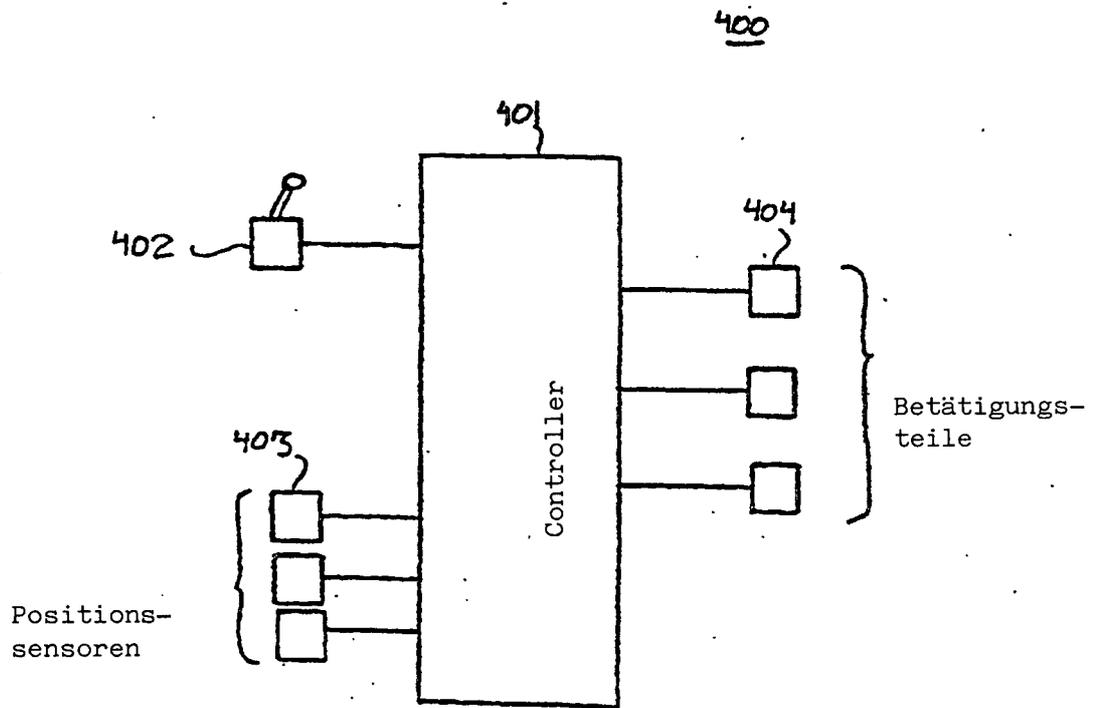


FIG. 21

FIG. 22



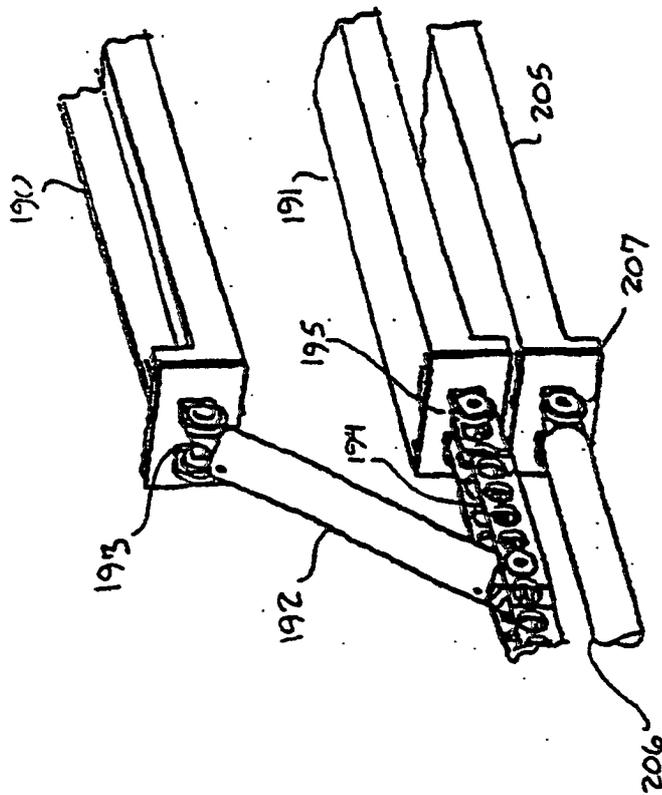


FIG. 23

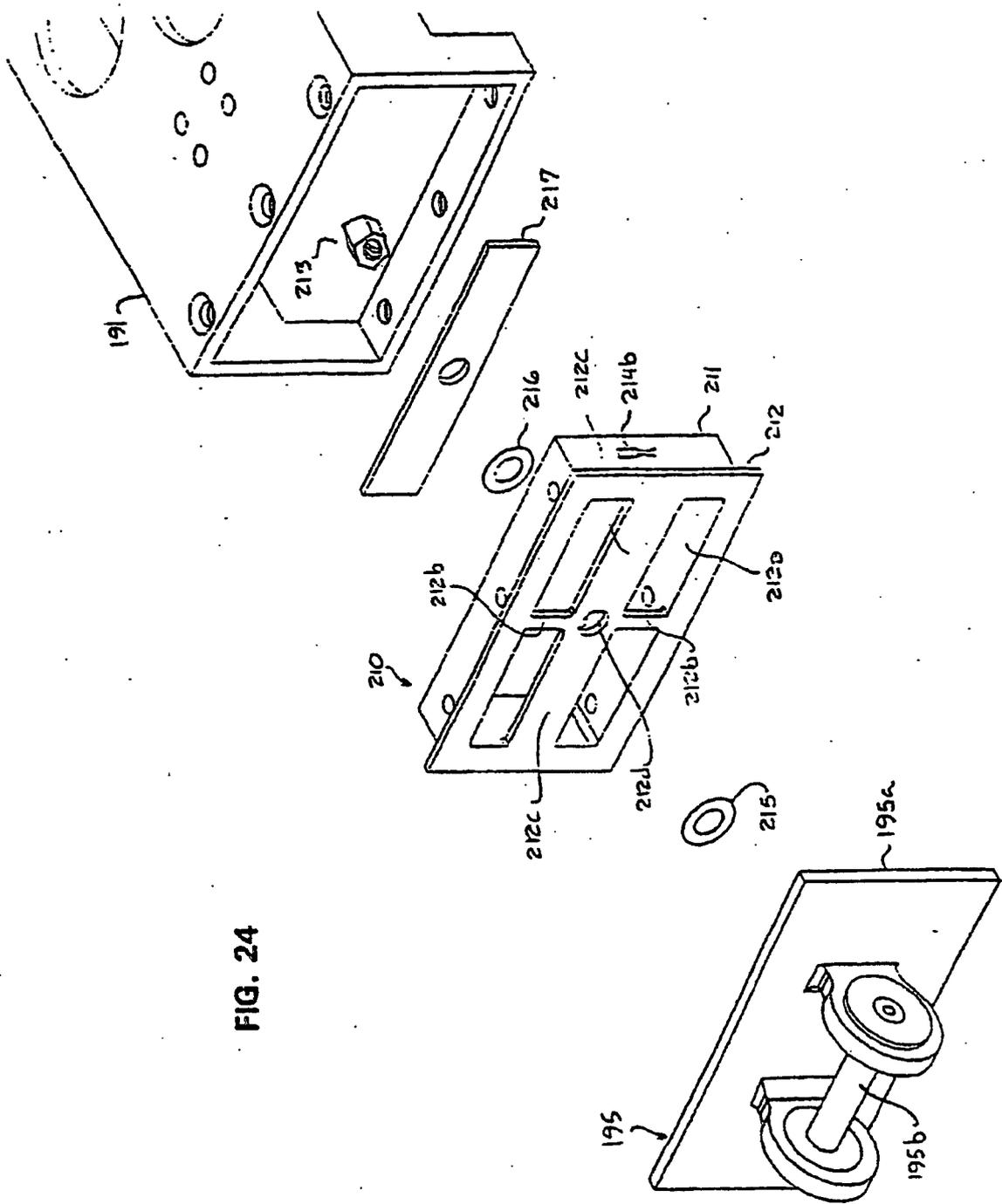


FIG. 24

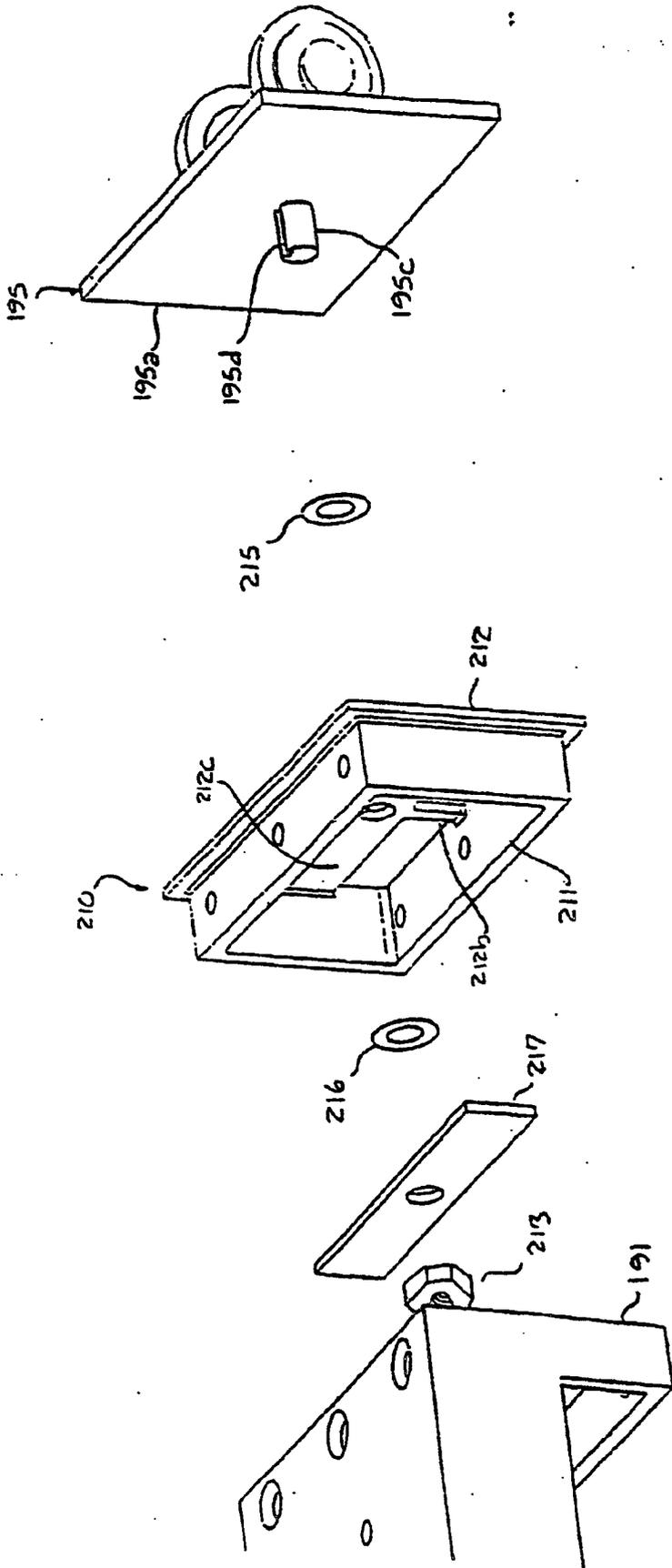
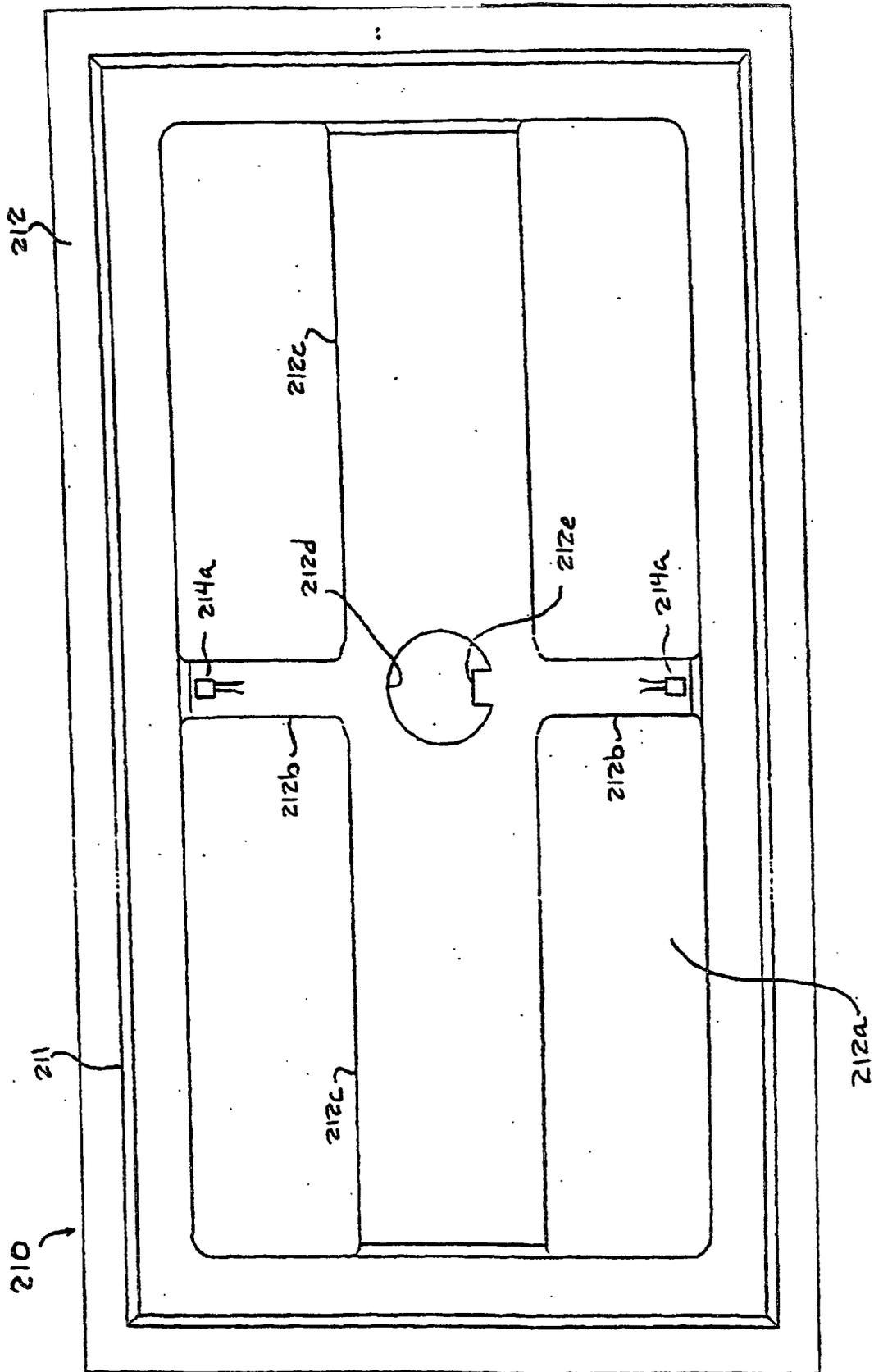
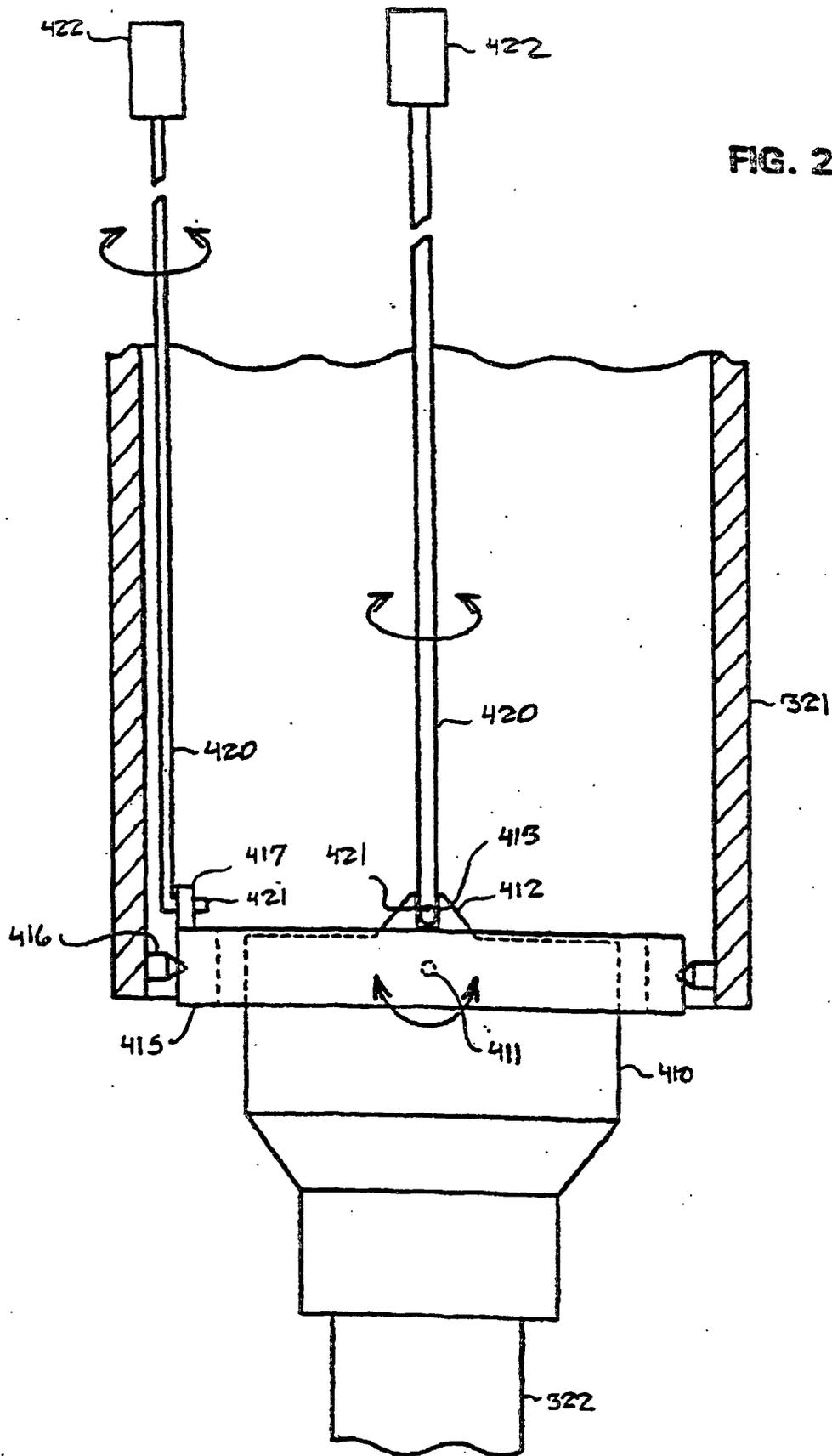


FIG. 25

FIG. 26





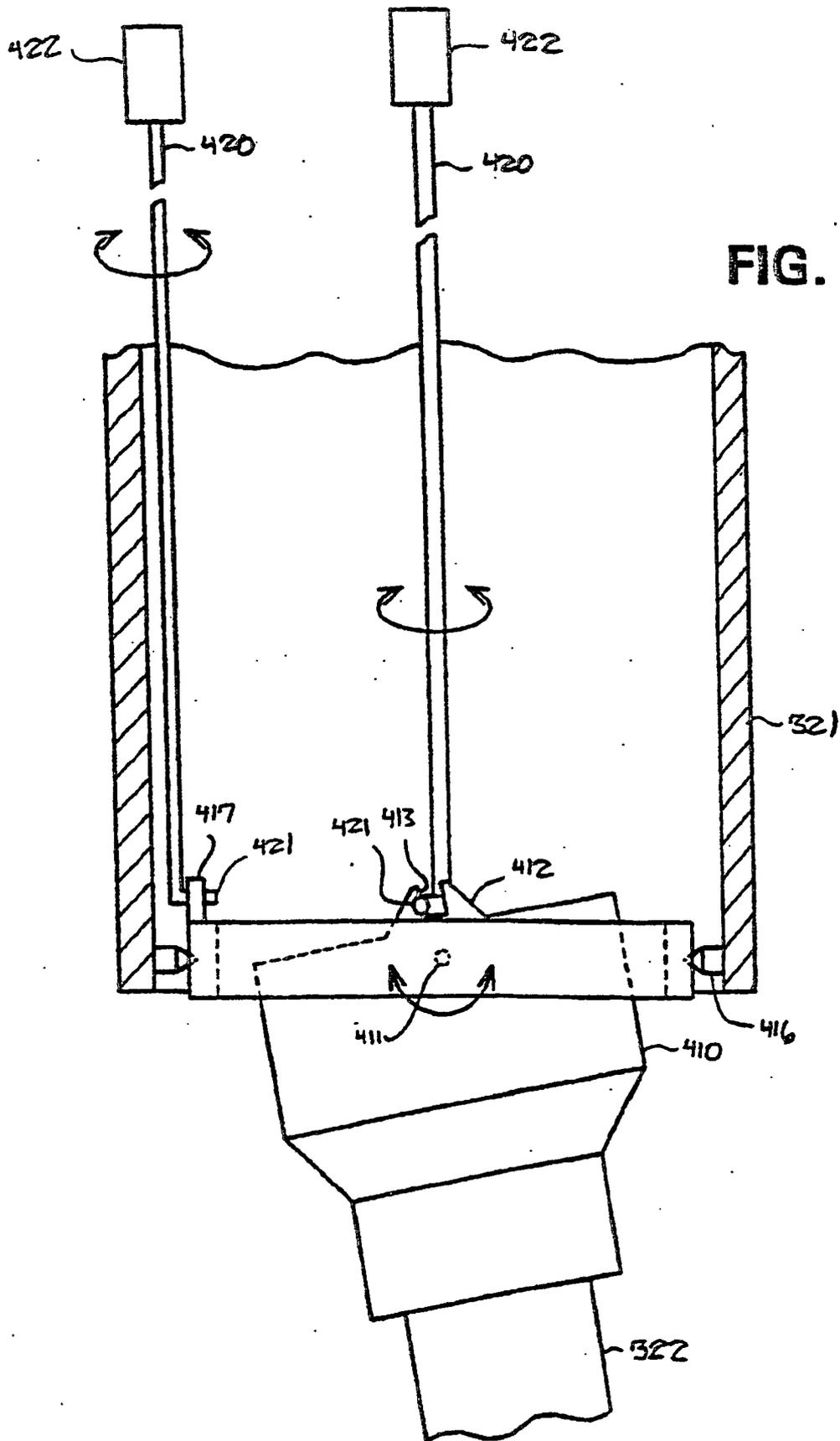


FIG. 29

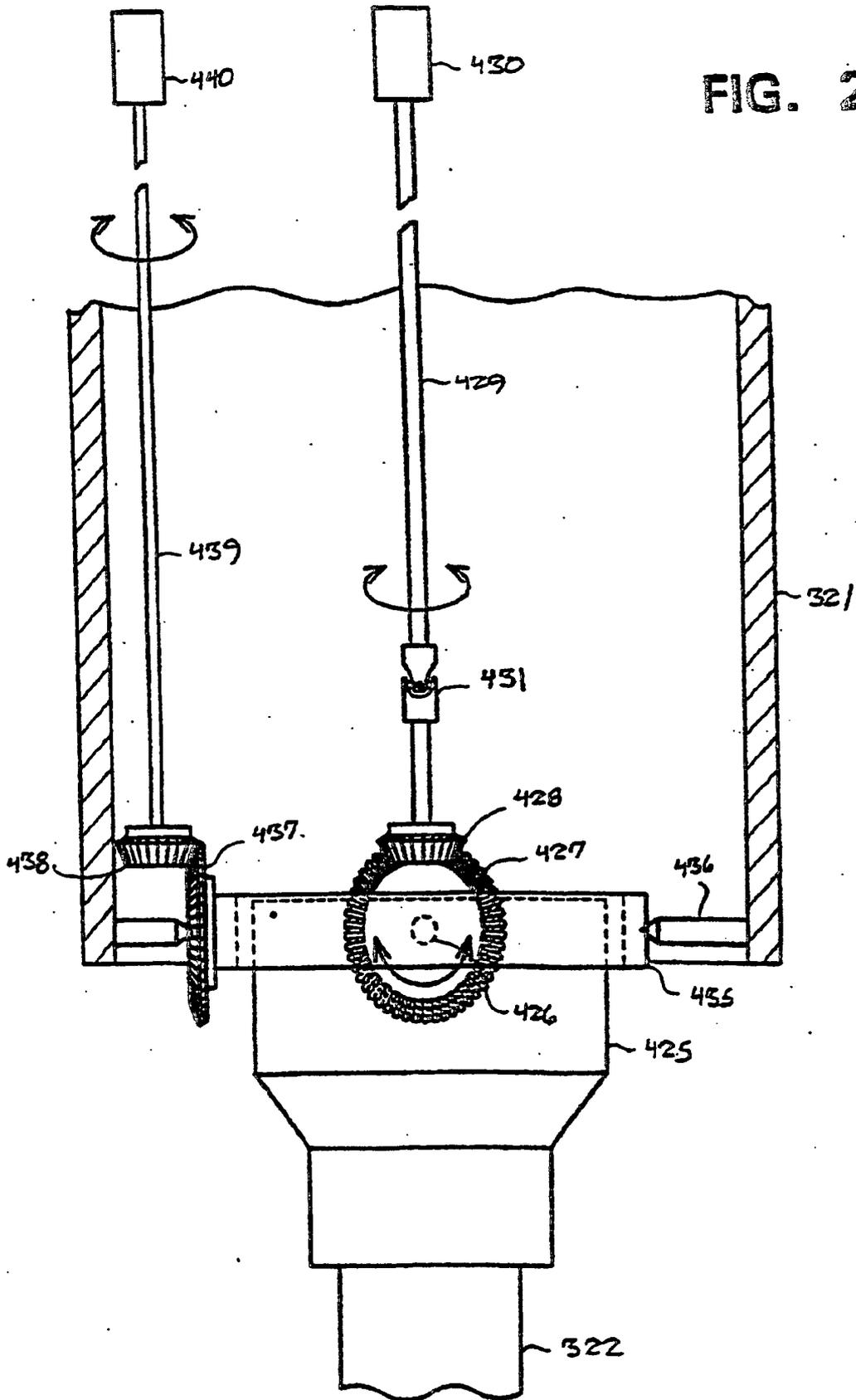
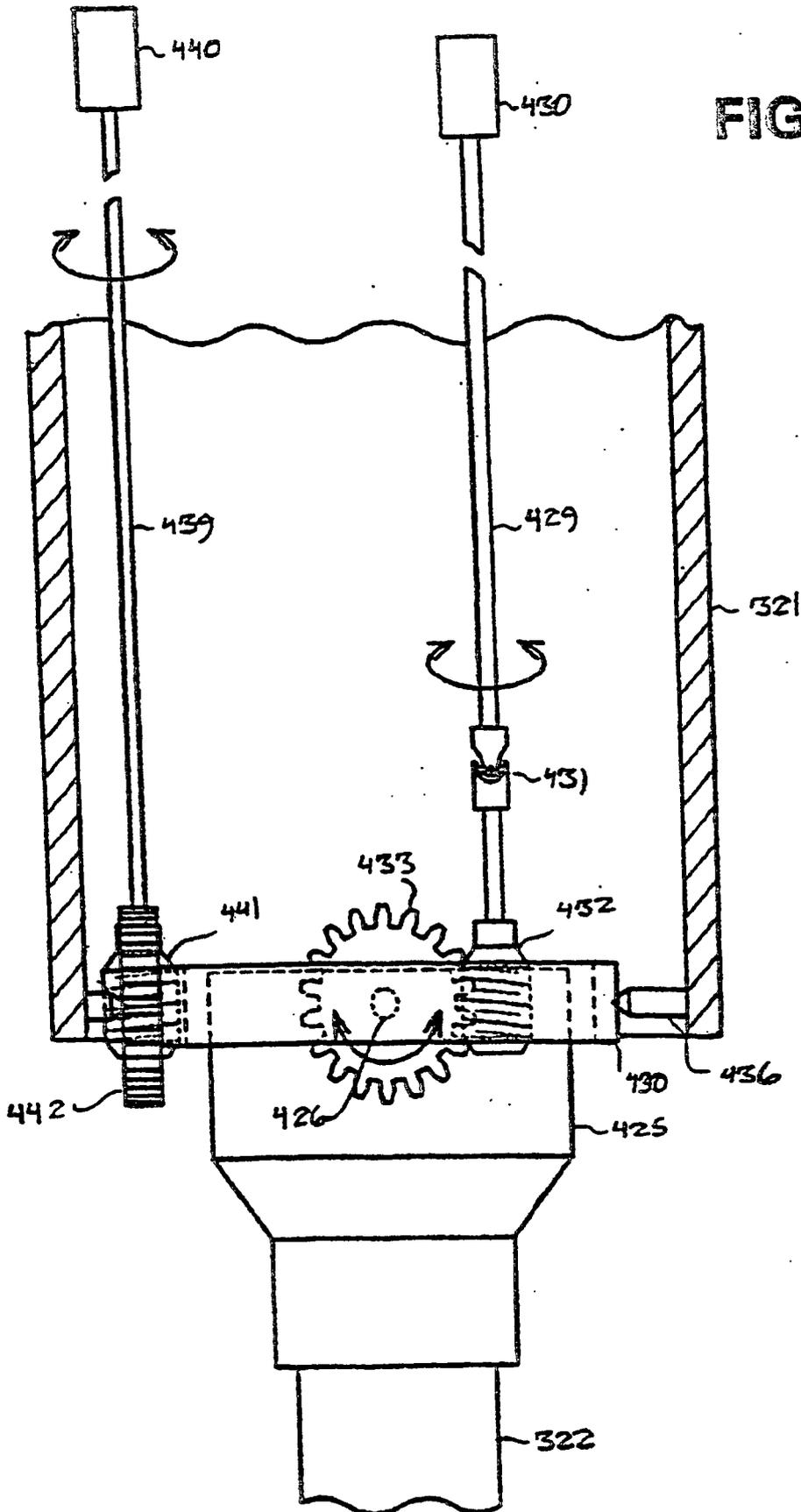


FIG. 30



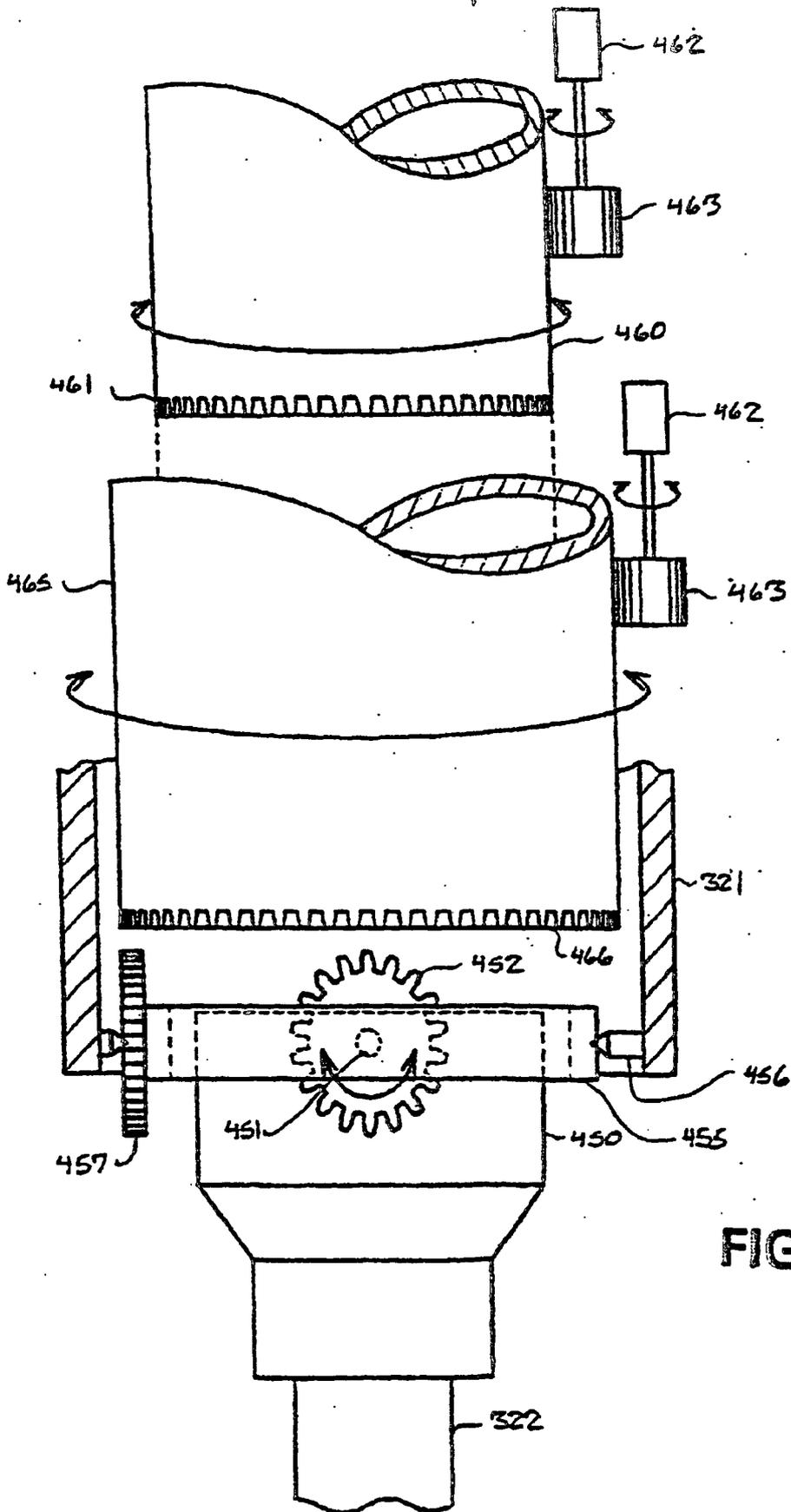
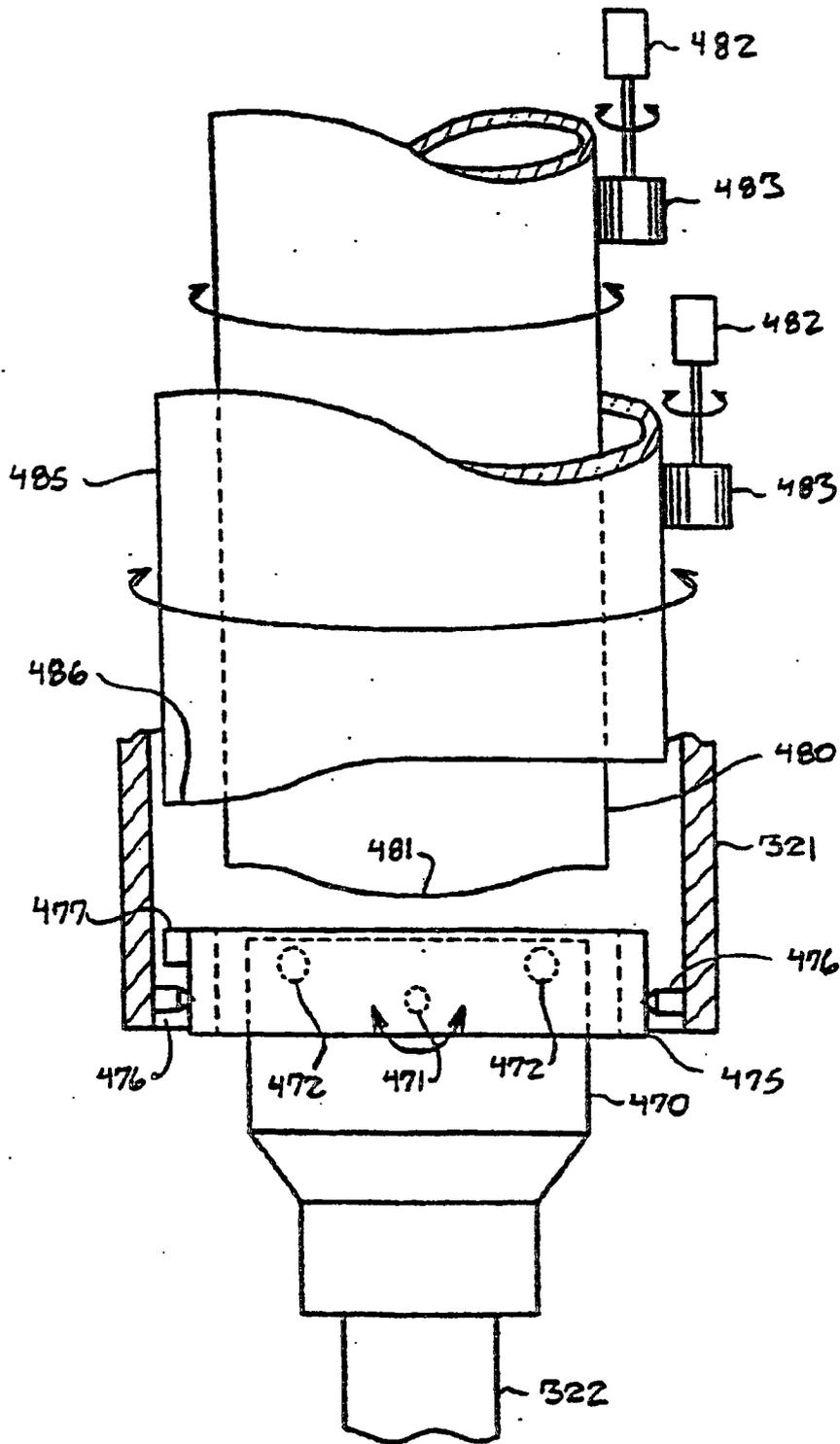


FIG. 31

FIG. 32



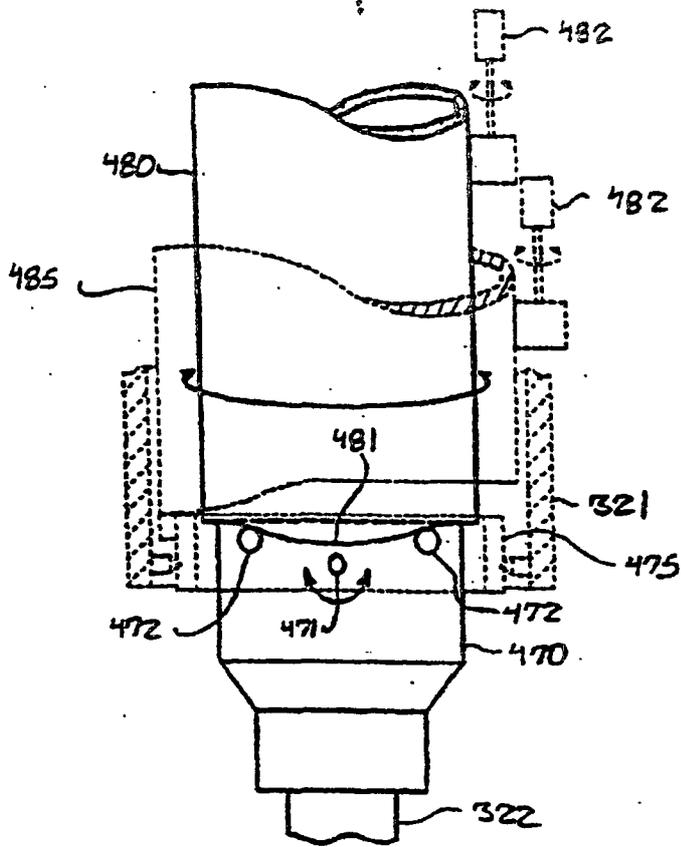


FIG. 33

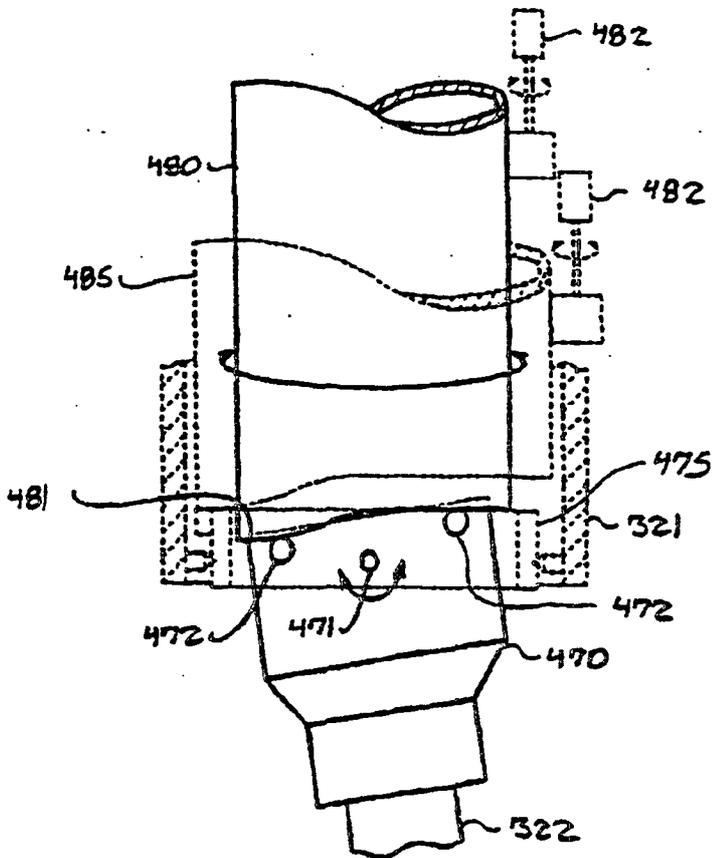


FIG. 34