

(19)



Europäisches Patentamt

European Patent Office

Office européen des brevets



(11)

EP 0 633 075 B2

(12)

NEUE EUROPÄISCHE PATENTSCHRIFT

(45) Veröffentlichungstag und Bekanntmachung des
Hinweises auf die Entscheidung über den
Einspruch:
22.12.1999 Patentblatt 1999/51

(51) Int. Cl.⁶: **B21C 37/29**, B21D 26/02

(45) Hinweis auf die Patenterteilung:
09.04.1997 Patentblatt 1997/15

(21) Anmeldenummer: **94890118.6**

(22) Anmeldetag: **08.07.1994**

(54) Verfahren zur innendruckgestützten Umformung von metallischen Hohlprofilen

Method for forming hollow metallic profiles supported by internal pressure

Procédé pour le formage de profils creux métalliques soutenu par pression interne

(84) Benannte Vertragsstaaten:
AT CH DE ES FR GB IT LI SE

(30) Priorität: **08.07.1993 AT 134693**

(43) Veröffentlichungstag der Anmeldung:
11.01.1995 Patentblatt 1995/02

(73) Patentinhaber: **ELB-Form GmbH**
6824 Schlins (AT)

(72) Erfinder:
• **Auer, Gerfried**
A-8680 Mürzzuschlag (AT)
• **Bitsche, Ernst, Dr.**
A-6712 Thüringen (AT)
• **Renner, Alexander, Dipl.-Ing. Dr.**
A-1120 Wien (AT)

(74) Vertreter:
Weinzinger, Arnulf, Dipl.-Ing. et al
Patentanwälte
Sonn, Pawloy, Weinzinger & Wolfram
Riemergasse 14
1010 Wien (AT)

(56) Entgegenhaltungen:

EP-A- 0 036 365 **DE-B- 1 452 547**
FR-A- 1 048 482 **US-A- 2 331 430**
US-A- 3 350 905

- Dissertation von Ch. Hessler, TH Darmstadt 1991, "Beitrag zur Entwicklung des Hydraulischen-Rohr-Innendruck-Umformens"
- Dissertation von P. Bieling, Universität-GH Paderborn 1992, "Untersuchung zum Aufweitstauchen von Rohren zu Hohlwellen"
- VDI-Berichte Nr. 614, VDI-Verlag, Düsseldorf 1986, "Technologie und Maschinenausrüstung für automatisiertes Umformen von T-Rohrstücken und Reduzierungen durch Flüssigkeit", von J. Tomasek
- Fortschrittsberichte VDI, Reihe 2: Fertigungstechnik, Nr. 142, VDI-Verlag, Düsseldorf 1987, "Aufweitstauchen von Rohren durch Innenhochdruckumformen", von F. Klaas
- Zeitschrift "Bänder, Bleche, Rohre," Nr. 8-1991, Seiten 19-29, "Bau von Werkzeugen und Maschinen zum Innenhochdruckumformen", von F. Dohmann und K.-U. Dudziak
- Zeitschrift "fluid", Oktober 1991, Seiten 20-22
- Industrie-Anzeiger, Werkzeugmaschine und Fertigungstechnik, Teil II: Umformtechnik, 88. Jahrgang, Nr. 37 (1966), Seiten 107-110, Nr. 48 (1968), Seiten 137-140
- "Technologie, Ausrüstung, Organisation und Wirtschaft der Maschinenbauproduktion", Serie 3, Technologie und Ausrüstung der Schmieden-Umformproduktion, VNIITEMP, Übersichtsinformation, Ausgabe 4, Moskau 1988
- Berg- und Hüttenmännische Monatshefte, 1987, Seiten 78-82
- Lexikon Werkstofftechnik, VDI-Verlag, Düsseldorf 1991, Seiten 327, 328

EP 0 633 075 B2

Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur innendruckgestützten Umformung von metallischen Hohlprofilen in Werkzeugen zum mit Ausbuchtungen, Aushaltungen, Abzweigungen oder dergl. versehenen Werkstücken, wobei dem Inneren eines im Werkzeug angebrachten Rohlings, der an seinen Stirnseiten mit zumindest einem beweglichen Preßstempel und einem stationären Gegenhalte-Werkzeugteil, vorzugsweise mit zwei beweglichen Preßstempeln, in Eingriff gebracht wird, ein flüssiges Druckmittel zugeführt wird, der Rohling mit Hilfe des oder der Preßstempel(s) unter Ausbauchen in zumindest einen Hohlraum im Werkzeug hinein gepreßt wird und der Druck des Druckmittels im Inneren des durch den Preßstempel und stationären Gegenhalte-Werkzeugteil bzw. die Preßstempel abgeschlossenen Rohlings in Abhängigkeit vom Prozeßfortschritt beim Pressen, vorzugsweise in Abhängigkeit vom Preßstempel-Weg, gesteuert wird.

[0002] Es ist bekannt, innendruckgestützte Umformverfahren für rohrförmige Werkstücke aus duktilen Stählen, mit kreisförmigem Querschnitt, einzusetzen, um aus diesen rohrförmigen Rohlingen T-Stücke herzustellen. Bei dieser Art von Umformtechnik wird das Werkstück durch ein vorgegebenes Werkzeug (auch Matrize oder Außenform genannt) von außen her und durch hohe Druckmittel-Drücke von der Innenseite her gestützt. Die Verformung wird dabei mit Hilfe von Preßstempeln durchgeführt, und im Zuge dieser Verformung oder dieses Verpressens werden Teile des rohrförmigen Rohlings in einen Hohlraum des Werkzeugs ausgebaucht und hineingeformt. Beispielsweise zeigen die FR-A-1 048 482 und die US-A-3 350 905 derartige Umformtechniken, wobei gemäß der FR-A-1 048 482 der Druck des Druckmittels im Inneren des Werkstücks gleich dem Druck, mit dem die Preßstempel beaufschlagt werden, gehalten oder aber mit Hilfe eines Reduzierventils auf einen demgegenüber kleineren Wert beschränkt wird; gemäß der US-A-3 350 905 kann dagegen dieser Innendruck mit Hilfe von festen Steuerkurven, die von einer Rolle zwecks Ansteuerung einer Druckmittelpumpe abgetastet werden abhängig von der Position der Preßstempel geändert werden, um einen überhöhten Innendruck und damit eine Zerstörung des Werkstückes während des Fortschreitens des Umformvorganges zu vermeiden. Aus der EP-A-36 365 ist schließlich ein Verfahren der eingangs angeführten Art bekannt, wobei im Hinblick auf immer vorhandene Gefügeunregelmäßigkeiten und Wanddickenunterschiede in den Ausgangsrohren ein möglichst geringer Ausschuß bei der Druckumformung dadurch erreicht werden soll, daß zumindest einmal bei einem vorherbestimmten Wert der Längsverdichtung, also des Preßstempel-Weges, der Druck des Druckmittels im Werkstück-Inneren und/oder die Querverformung, also der Weg eines Gegenhalte-Stempels im Werkzeug-Hohlraum, in den hinein das Werkstück ausgebaucht wird, gemessen wird bzw. werden und abhängig vom Meßergebnis das Verhältnis Innendruck zu Längsverdichtung neu festgelegt wird, und zwar auf Basis von zuvor an verschiedenen Rohlingstypen durchgeführten Experimenten.

[0003] Die bekannten Techniken können bisher jedoch nur für ganz bestimmte Werkstücke bzw. Rohlinge, insbesondere mit Kreisquerschnitt, und überdies nur, wenn sie aus ganz bestimmten Werkstoffen bestehen, nämlich duktilen Stählen, mit einer Sprödbbruchzähigkeit um $100 \text{ MN} \cdot \text{m}^{-3/2}$, angewandt werden; bei anderen Rohlingen, mit nicht-runden Querschnitten, etwa quadratischen, rechteckigen Querschnitten, und/oder bei anderen Werkstoffen, wie etwa hochfesten Aluminiumlegierungen (die eine Sprödbbruchzähigkeit von unter $30 \text{ MN} \cdot \text{m}^{-3/2}$ aufweisen), ist eine derartige innendruckgestützte Umformung bisher wegen der geringen Duktilität bzw. wegen der Schwierigkeiten, die beim Fließen des Werkstoffmaterials in Formteile großer Krümmung (d.h. mit kleinem Krümmungsradius) auftreten, praktisch nicht möglich gewesen, da es hier zum frühzeitigen Reißen des Werkstoffes kommt.

[0004] Es ist somit Aufgabe der Erfindung, hier Abhilfe zu schaffen und eine Technik vorzusehen, mit der auch Rohlinge mit unrundem Querschnitt bzw. aus derartigen spröden Materialien, wie etwa hochfesten Aluminiumlegierungen, einem innendruckgestützten Umformverfahren unterzogen werden können, um so T-Stücke, Anschlußstücke, Verzweigungsstücke, Knotenstücke und dergl. herstellen zu können. Dabei wird insbesondere angestrebt, Werkstücke zu erzeugen, die in den entsprechenden Bereichen einen Oberflächenkrümmungsradius aufweisen, der kleiner ist als 10 % des Ersatzdurchmessers D_{ers} des Außenquerschnittes Q dieses Rohlings, wobei dieser Ersatzdurchmesser $D_{\text{ers}} = 2 \cdot \sqrt{Q/\pi}$ ist.

[0005] Das erfindungsgemäße Verfahren der eingangs angeführten Art ist demgemäß dadurch gekennzeichnet, daß in Prozeßphasen mit kleinen Dehnungen des Werkstoffes der Druck des Druckmittels so eingestellt wird, daß die aus dem räumlichen Spannungszustand im Werkstück gebildete Vergleichsspannung im wesentlichen gerade die Formänderungsfestigkeit des Werkstoffes erreicht, wogegen in Prozeßphasen mit großen Dehnungen der Druck des Druckmittels erhöht wird, um die Bruchdehnung des Werkstoffes durch Absenken der mittleren Spannung ausreichend hinaufzusetzen. Mit einer derartigen Drucksteuerung des Drucks des - flüssigen - Druckmittels im Inneren des Rohlings während des Preßvorganges kann je nach Art und Dimension des herzustellenden Werkstückes, insbesondere je nach Wandstärke des Rohlings, nach Querschnitt des Rohlings usw., das Fließen des Materials ohne Reißen gewährleistet werden, wobei die Innendruckführung beim Fließen des Materials in Formteile großer Krümmung von entscheidender Bedeutung ist. Dabei gilt allgemein, daß der Innendruck umso höher einzustellen ist, je größer die Wandstärken des Rohlings sind, und/oder je kleiner die Formkrümmungsradien sind, denen beim Verformen des Rohlings gefolgt werden muß. Auch bei kleinen Werkstück- bzw. Rohling-Durchmessern ist der Innendruck vergleichsweise hoch zu bemessen.

Grund hierfür sind die in solchen Fällen auftretenden großen Vergleichsdehnungen (nach Tresca oder Mises) an einzelnen Punkten des Werkstückes, so daß durch Absenkung des hydrostatischen Spannungsanteiles (Vergrößerung des hydrostatischen Druckes) die mögliche Vergleichsbruchdehnung angehoben werden muß (Druckspannungen werden negativ gerechnet).

5 **[0006]** Dabei ist es bei Anwendung der erfindungsgemäßen Technik erstmals möglich, vor allem dünnwandige, hochfeste Aluminiumteile nicht-runden Querschnitts mit praktisch beliebig geformten Ausbuchtungen herzustellen. Derartige Werkstücke können beispielsweise als Knotenstücke bei sogenannten "Spaceframes" (Rahmenkonstruktionen aus Aluminium oder Aluminiumlegierungen, die mit mit Aluminiumplatten beplankt werden) in der Fahrzeugkarosserietechnik verwendet werden, wobei dann gerade oder gebogene Stäbe oder Profile in Knotenstücke eingeführt und darin verschweißt oder verklebt werden.

10 **[0007]** Mehr im Detail wird die Steuerung des Druckes des Druckmittels während der Umformung derart erfolgen daß in Prozeßphasen, in denen ein beginnendes Ausbauchen, gegebenenfalls ein Anformen des Werkstückes an variable (bewegliche) Werkzeugteile, erfolgt und die auftretenden Vergleichsdehnungen klein sind, der Druck zusammen mit den durch die Preßstempel hervorgerufenen Spannungen im Werkstück auf den einachsigen Spannungszustand durch Bildung der sog. Vergleichsspannung (nach Tresca oder Mises) modellmäßig ausgebildet die Formänderungsfestigkeit des Werkstoffes erreicht (bei den gegebenen Spannungsverhältnissen der nächste Punkt auf der sog. Hyperfließfläche im Spannungsraum, welche bei plastischer Verformung gemäß der Fließbedingung von Tresca (schiefes Sechskantprisma) oder Mises (schiefer elliptischer Zylinder) alle während des Fließens denkbaren Spannungszustände umfaßt);

15 dagegen wird in Prozeßphasen, in denen große Dehnungen auftreten, beispielshalber zum Nachschub von Material in ausgeformte Werkstückteile, der Druck zu jedem Zeitpunkt mindestens so groß gehalten, daß der insgesamt im Werkstück aus dem räumlichen Spannungszustand gebildete resultierende hydrostatische Spannungsanteil (negativ), bezogen auf die Formänderungsfestigkeit gemäß der entsprechenden Werkstoffkennlinie, eine Bruchdehnung besitzt, die größer ist als die maximal am Werkstück in diesem Zeitpunkt auftretende Vergleichsdehnung.

20 **[0008]** Im Rahmen der erfindungsgemäßen Drucksteuerung während des Verpressens der Rohlinge hat es sich für einen effektiven Preßvorgang als besonders vorteilhaft erwiesen, wenn das Druckmittel am Beginn des Preßvorganges auf einen niedrigen Überdruck, z.B. in der Größenordnung von 300 bis 600 bar, und gegen Ende des Preßvorganges auf den Maximalwert, beispielsweise in der Größenordnung von einigen kbar, gebracht wird. Dabei kann der Innendruck des Rohlings, d.h. der Druck des Druckmittels, beispielsweise während ungefähr der ersten Hälfte des Preßvorganges (d.h. der Hälfte des Weges des oder der Preßstempel) mehr oder weniger konstant auf ungefähr einem Drittel

25 bis zu einem Fünftel des gegen Ende des Preßvorganges vorgesehenen Maximalwertes gehalten werden, und ungefähr ab der Hälfte des Preßvorganges kann dann der Innendruck allmählich, beispielsweise linear, bis zum Maximaldruck zum Ende des Preßvorganges hin gesteigert werden. In jedem Fall muß während des anfänglichen Ausbauchens durch den eingestellten Innendruck die Vergleichsspannung resultierend aus Innendruck und den Spannungen aus den Preßkräften und Reibungskräften die Formänderungsfestigkeit des Materials erreichen.

30 **[0009]** Weiters hat es sich als günstig erwiesen, wenn das Druckmittel während des Preßvorganges auf einen Maximaldruck von mindesten 80% der Zugfestigkeit des Werkstoffes des Rohlings gebracht wird. An sich ist bei der Festlegung des Wertes für den Maximaldruck selbstverständlich nicht nur der Werkstoff selbst, sondern auch die Materialstärke sowie auch der Querschnitt des Werkstückes zu berücksichtigen, wie dies bereits vorstehend erwähnt worden ist. Die Drucksteuerung hängt im Detail von der Art und Form des herzustellenden Werkstückes ab, und es

35 kann hier mit Vorteil vorgesehen werden, daß der Druck des Druckmittels in Preßphasen, in denen der Werkstoff des Rohlings kleine Krümmungsradien des Werkzeugs umfließt, je nach Wandstärke auf 5%-40% des Maximaldrucks beim Pressen eingestellt wird (die Vergleichsspannung erreicht die Formänderungsfestigkeit). Der maximale Innendruck wird dagegen außerhalb dieser Phasen erreicht.

40 **[0010]** Für die erfindungsgemäß herzustellenden Werkstücke bzw. zu verarbeitenden Werkstoffe (die eine geringere Duktilität als duktile Stähle aufweisen) ist es sodann von ganz besonderem Vorteil, wenn das Druckmittel bereits vor dem Pressen des Rohlings auf einen erhöhten Vorspanndruck, vorzugsweise 5%-20%, insbesondere ungefähr 10%, des beim Pressen erreichten Maximaldrucks, z.B. auf einen Wert in der Größenordnung von 100 bis 1000 bar, gebracht wird. Eine derartige Vorspannung des Druckmittels ist insbesondere für das anfängliche problemfreie Ausbauchen des Rohlings von Bedeutung, wobei der Wert des Vorspanndruckes abhängig von der Knickspannung des zu verformenden

45 Werkstoffes gewählt wird; insbesondere ist der Innendruck so festzulegen, daß kein Einknicken an der Stelle der herzustellenden Ausbuchtung erfolgt, was bei einer fehlenden Vorspannung des Druckmittels insbesondere bei Verarbeitung von im Verhältnis zu den übrigen Abmessungen des Hohlprofils kleinen Wandstärken passieren könnte.

50 **[0011]** Um während des Preßvorganges eine exakte Drucksteuerung zu ermöglichen, ist es auch vorteilhaft, wenn der Rohling vor dem Preßvorgang Gaseinschlüsse-frei mit dem Druckmittel gefüllt wird, und wenn das Druckmittel durch eine Pumpe auf einen erhöhten Druck gebracht wird. Würden sich im - flüssigen - Druckmittel Gaseinschlüsse befinden, so wäre aufgrund der Komprimierung und des Expandierens der Gaseinschlüsse die jeweilige gewünschte Druckerhöhung bzw. -reduktion nicht zu erzielen und damit die angestrebte exakte Drucksteuerung beeinträchtigt.

55 **[0012]** Um auch aus anderer Sicht, nämlich der Sicht des Verschleißens des Rohlings während des Preßvorganges,

um den erhöhten Innendruck sicherzustellen, die gewünschte exakte Drucksteuerung zu gewährleisten, ist eine möglichst gute Abdichtung des Rohlings an dessen Stirnseiten erforderlich. Beispielsweise können zum dichten Abschließen des Rohlings Preßstempel mit stufenförmigen Absätzen an den Stirnseiten-Rändern eingesetzt werden, die eine Höhe von 5%-100% der mittleren Wandstärke des Rohlings aufweisen, und mit denen der Werkstoff des Rohlings zur Herbeiführung einer metallischen Dichtung plastifiziert wird.

[0013] Bevorzugt werden die Rohlinge vor dem Preßvorgang einer Wärmebehandlung unterzogen, um dadurch den Werkstoff duktiler zu machen. Dieser weist dann aufgrund seiner Gefügestruktur eine deutlich erhöhte Bruchdehnung auf. In diesem Zusammenhang ist eine vorteilhafte Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens dadurch gekennzeichnet, daß im Fall von Rohling-Werkstoffen, die Auslagerungen von Legierungsbestandteilen an die Korngrenzen aufweisen, insbesondere von hochtesten Aluminiumlagierungen, vor dem Preßvorgang eine Wärmebehandlung derart durchgeführt wird, daß durch Einlagerung dieser Legierungsbestandteile in die Korngitter die Duktilität des Werkstoffs erhöht wird, und daß der Preßvorgang innerhalb eines vorgegebenen Zeitfensters, z.B. 1h bis 4h nach der Wärmebehandlung, jedoch bevor es zu einer erneuten Auslagerung der Legierungsbestandteile an die Korngrenzen kommt, durchgeführt wird. Beispielsweise hat sich gezeigt daß es von Vorteil ist, wenn Rohlinge aus AlMgSi-Legierungen bei ca. 400°C ungefähr 100 min lang in einem Glühofen erwärmt, anschließend in Luft gekühlt und ca. 3h nach Ende der Glühofen-Wärmebehandlung verpreßt werden. Die Zeitdauer des eigentlichen Preßvorganges liegt dabei im Bereich von einer oder einigen wenigen Minuten, oft auch unter einer Minute, einschließlich des vorhergehenden Füllens mit dem Druckmittel. Die reine Preßzeit kann daher manchmal auch bloß 20 s bis 30 s betragen.

[0014] Bei manchen herzustellenden Werkstücken ist es denkbar die herzustellende Ausbuchtung einfach in einen entsprechenden Hohlraum in der Matrize oder im Werkzeug hineinzuverformen, d.h. auszubauchen; für einen exakten Formvorgang, insbesondere bei längeren Ausbuchtungen oder Abzweigungen, wird jedoch beim Verpressen des Rohlings in dem (jeweiligen) Werkzeug-Hohlraum, in den das Material des Rohlings hineinverformt wird, mit einem variablen Gegenhalte-Werkzeugteil, der eine Querschnittsform entsprechend dem (jeweiligen) auszubauchenden Teil aufweist, gegengehalten, und es ist hier erfindungsgemäß von besonderem Vorteil, wenn mit dem (jeweiligen) variablen Werkzeugteil druck-und/oder weggesteuert gegengehalten wird und die dabei in das Werkstück eingeleitete Kraft so bemessen wird, daß die insgesamt im Werkstück auftretende mittlere Spannung (der hydrostatische Spannungsanteil) soweit vermindert wird, daß die dadurch festgelegte Bruchdehnung größer wird als die größte im betreffenden durch den variablen Werkzeugteil abgestützten Werkstückteil auftretende Dehnung. Die exakte Druck- oder Wegführung des oder der variablen Gegenhalte-Werkzeugteile zur Abstützung ausgebuchteter Werkstückteile ist umso wichtiger, je spröder der Werkstoff und je kleiner die Wandstärke ist. Die Gegenstützung erzeugt in der anliegenden Außenfaser des Werkstückes einen hydrostatischen Spannungsanteil, der die mögliche, ausnützbare Bruchdehnung (insbesondere bei spröden Werkstoffen) entscheidend erhöht, so daß die in diesen Bereichen auftretenden größten Vergleichsdehnungen kleiner als die Bruchdehnung werden. Auf diese Weise wird ein Bersten des Werkstückes verhindert. Ein derartiges Gegenhalten ist insbesondere dann von Vorteil, wenn der Rohling eine Wandstärke kleiner als 10% des Ersatzdurchmessers D_{ers} (wie oben definiert) aufweist bzw. wenn Werkstoffe mit einer Sprödbbruchzähigkeit kleiner als $50 \text{ MM} \cdot \text{m}^{-3/2}$ bzw. Werkstoffe mit einer Zugfestigkeit R_m kleiner als 350 N/mm^2 verwendet werden. Auch ist ein derartiges Gegenhalten günstig im Fall von bezüglich des Querschnittes ungleichmäßig herzustellenden Ausbuchtungen, die auf Teilen der Oberfläche kleine Krümmungsradien, insbesondere Meiner als 10% des genannten Ersatzdurchmessers D_{ers} , aufweisen. Insbesondere ist nun hier erfindungsgemäß, wie vorstehend definiert, eine Steuerung der gegen das Werkstück gerichteten, von den variablen Gegenhalte-Werkzeugteilen übertragenen Kraft anzustreben, bei der in der am jeweiligen variablen Gegenhaltewerkzeug anliegenden Faser (der Außenfaser) des Werkstückes ein auf die Formänderungsfestigkeit bezogener hydrostatischer Spannungsanteil hervorgerufen wird, dessen Bruchdehnung gemäß der entsprechenden Werkstoffkennlinie in jedem Zeitpunkt größer ist als die größte dort auftretende Vergleichsdehnung.

[0015] Von Vorteil ist auch, wenn die durch den variablen Gegenhalte-Werkzeugteil aufzubringende Kraft zu jedem Zeitpunkt des Prozesses, insbesondere auch bereits bei Prozeßbeginn, mindestens 5% der durch den Innendruck auf den auszubauchenden Teil ausgeübten Kraft beträgt.

[0016] Weiters hat es sich als günstig erwiesen, wenn im Fall der gleichzeitigen Herstellung von mehreren Ausbuchtungen, Abzweigungen oder dergl. und demgemäß der Verwendung von mehreren variablen druckgesteuerten Gegenhalte-Werkzeugteilen zusätzlich zu deren Drucksteuerung eine Wegüberwachung bzw. -messung durchgeführt wird, um bei ungleich schnellen Bewegungen der variablen Gegenhalte-Werkzeugteile ihre Drucksteuerung anzupassen.

[0017] In Formteilen großer Krümmung, z.B. abgerundeten Ecken eines rechteckigen oder spitzwinkligen Ausbuchtungsteiles, ist auch die Prozeßschmierung von Bedeutung, da hier im Verhältnis zum umgeformten Materialvolumen eine große Reibungsfläche besteht. Ein entsprechender Schmiermittelauftrag ist also insbesondere an Kanten der Halbzeuge wesentlich. Es hat sich hier als vorteilhaft erwiesen, wenn in Zonen mit kleinem Oberflächen-Krümmungsradius von Rohling bzw. Werkzeug, insbesondere an abgerundeten Kanten, um mindestens 50% mehr Schmiermittel aufgetragen wird als an den übrigen Teilen von Rohling bzw. Werkzeug.

[0018] Zur Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens mit der angegebenen Innendrucksteuerung könnte an

sich eine Druckmittelquelle eingesetzt werden, von der das Druckmittel mit steuerbarem Druck abgegeben wird, wobei dieses Druckmittel variablen Drucks dem Inneren des Rohlings zugeführt wird. Hierbei könnten jedoch Komplikationen bei einer etwaigen Rücknahme des Innendrucks während des Prozeßverlaufes auftreten, und es wäre in der Regel eine entsprechende Umschaltventileinrichtung mit Rücklauf in einen Sumpf oder dergl. erforderlich.

5 **[0019]** Bevorzugt führt jedoch die Druckmittel-Abfuhrleitung durch den (anderen) Pressstempel oder gegebenenfalls den stationären Gegenhalte-Werkzeugteil, und in diese Druckmittel-Abfuhrleitung ist die Druckeinstelleinrichtung aufgenommen.

[0020] Es wird also das Druckmittel von einer Druckmittelquelle her mit an sich konstantem, hohen Druck geliefert, und in der Abfuhrleitung wird die Druckeinstellung vorgenommen, wobei hierfür vorzugsweise einfach ein gesteuertes Druckventil eingesetzt wird. Für die Druckmittelzuführung kann einfach als Druckmittelquelle eine das Druckmittel mit vorgegebenem hohen Druck liefernde Pumpe vorgesehen sein, und dann ist in der Druckmittel-Zufuhrleitung vorteilhafterweise ein Rückschlagventil aufgenommen, so daß das Druckmittel nicht aus dem Inneren des Rohlings zur Pumpe hin zurückgedrückt werden kann.

10 **[0021]** Wie erwähnt kann mit dem erfindungsgemäßen Verfahren erstmals ein Werkstück aus sprödem Werkstoff, etwa mit einer Sprödbrozähigkeit von unter $30 \text{ MN.m}^{-3/2}$, insbesondere aus einer Aluminiumlegierung, erhalten werden.

[0022] Die Erfindung wird nachfolgend anhand von Ausführungsbeispielen unter Bezugnahme auf die Zeichnungen noch weiter erläutert. Es zeigen im einzelnen:

20 Fig.1 schematisch das innendruckgestützte Umformen von kreisrunden rohrförmigen Werkstücken aus duktilen Stählen in einem Werkzeug, wie dies an sich bekannt ist;

Fig.2 in einem schematischen Detailschnitt die Dehnung eines Werkstückes in einer Zone großer Oberflächenkrümmung;

25 Fig.3 schematisch eine Vorrichtung zum innendruckgestützten Umformen mit Innendrucksteuerung gemäß der Erfindung;

Fig.4 eine schematische Seitenansicht des dabei verwendeten Werkzeuges, in Richtung des Pfeils IV in Fig.3;

Fig.5 einen schematischen Querschnitt durch dieses Werkzeug, gemäß der Linie V-V in Fig.4;

Fig.6 ein Diagramm zur Veranschaulichung einer möglichen Innendruck-Steuerung während des Prozeßverlaufes, abhängig vom Weg der Preßstempel;

30 Fig.7 ein Schema zur detaillierteren Veranschaulichung einer Vorrichtung ähnlicher jener von Fig.3, wobei beispielsweise ein Werkstück mit zwei Abzweigungen hergestellt wird;

die Fig.8 bis 10 je eine Flußdiagramm zur Veranschaulichung von verschiedenen Steuer- und Regelungsmöglichkeiten während des innendruckgestützten Umformens von Werkstücken mit Innendrucksteuerung; und

Fig.11 schematisch eine modifizierte Umform-Vorrichtung.

35 **[0023]** Gemäß Fig.1 wird in an sich herkömmlicher Weise ein Rohling aus einem Rohr mit kreisförmigem Querschnitt zu einem Werkstück 1 mit einer Ausbauchung in Form eines T-Stückes umgeformt, wobei das Werkstück 1 in einem stationären Werkzeug 2 mit Hilfe von stirnseitig angelegten Preßstempeln 3, 4 gepreßt wird. Die Preßkraft, die mit den Preßstempeln 3, 4 auf das Werkstück 1 ausgeübt wird, ist mit Pfeilen 5 bzw. 6 schematisch veranschaulicht. Das Werkstück 1 wird vor dem Umformen oder Verpressen mit einem flüssigen Druckmittel gefüllt, wonach die beiden Preßstempel 3, 4 mit den Stirnseiten des Werkstückes 1 in Eingriff gebracht werden und der Preßvorgang beginnt. Beim Pressen baut sich ein entsprechender Innendruck im Werkstück 1 auf, der den Werkstoff des Werkstückes 1 von innen her stützt, wogegen eine äußere Abstützung durch das Werkzeug 2 gegeben ist. Auf diese Weise wird das Material des Werkstückes 1 zum Fließen in den Hohlraum 7 im Werkstück 2 gebracht.

45 **[0024]** In der Vergangenheit konnte ein derartiges innerdruckgestütztes Umformen nur bei duktilen Stählen als Werkstoff sowie weiters für Rohlinge mit kreisrundem Rohrquerschnitt durchgeführt werden, wogegen spröde Werkstoffe, wie insbesondere Aluminiumwerkstoffe, sowie Werkstücke mit anderen Querschnittsformen, wie etwa quadratischen oder rechteckigen Querschnittsformen, einer solchen Umformung nicht unterzogen werden konnten, da es zuvor zu einem Einknicken. Reißen oder Bersten des Werkstoffes kam. Vor allem war es auch nicht möglich, das Material des Werkstückes um vergleichsweise scharfe Kanten, mit kleinen Krümmungsradien, zum Fließen zu bringen. In diesem Zusammenhang sei auf die schematische Darstellung in Fig.2 verwiesen, in der ein Abschnitt des Werkstückes 1 in einem Kantenbereich des Werkzeuges 2 veranschaulicht ist, wo ein relativ kleiner Krümmungsradius gegeben ist. Das Werkstück 1 wird von der Innenseite her mit Hilfe des Druckmittels, das in das Werkstück 1 eingefüllt wurde, abgestützt. wie in Fig.2 schematisch mit Pfeilen 8 veranschaulicht ist. Für die Dehnung φ im Material des Werkstückes 1 gilt dabei

55 im Bereich der Außenfaser 9 bzw. der Innenfaser 10 die folgende Beziehung:

$$\text{Innenfaser : } \varphi_i = \ln (1 + w/(2r+w))$$

$$\text{Außenfaser : } \varphi a = \ln(1 - w/(2r+w))$$

Dabei bezeichnet w wie erwähnt die Wandstärke des Werkstückes 1, und mit r ist der Krümmungsradius bezeichnet, um den der Werkstoff herum am Werkzeug 2 entlang fließt. Die neutrale Faser ist im übrigen in Fig.2 bei 11 angegeben.

[0025] Aus diesen Beziehungen wie auch aus Fig.2 ist ersichtlich, daß die Dehnung an der Innenfaser 10 um so größer ist, je kleiner der Krümmungsradius r ist. Demgemäß besteht an dieser Stelle ein hohes Risiko eines Reißens oder dergl., wobei diesem Risiko jedoch durch entsprechend bemessene Innendruck-Abstützung entgegengewirkt werden kann.

[0026] Bei der innendruckgestützten Umformung macht man sich die Erkenntnis zunutze, daß die Verformbarkeit eines Materials nicht nur vom Werkstoff selbst, sondern auch in starkem Ausmaß von den Beanspruchungsbedingungen abhängt. Dies ergibt sich beispielsweise aus der in der Literatur in Zusammenhang mit der Theorie der plastischen Verformung bekannten Beziehung für die Fließbedingung k_f (nach Mises)

$$k_f = \sqrt{3/2} \cdot \sqrt{(\sigma_x - \sigma_m)^2 + (\sigma_y - \sigma_m)^2 + (\sigma_z - \sigma_m)^2}$$

[0027] Darin sind σ_x , σ_y und σ_z die Spannungen in den Hauptspannungsrichtungen (Spannungshauptachsen) x , y und z , und σ_m ergibt sich als mittlere Spannung wie folgt:

$$\sigma_m = (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)/3$$

[0028] Die mittlere Spannung σ_m wird in der Literatur auch als hydrostatischer Spannungsanteil bezeichnet.

[0029] Die Formänderungsfestigkeit k_f ist in der Regel nur von der erfolgten Formänderung sowie von der Temperatur beim Umformen abhängig, jedoch kann in besonderen Fällen auch die Umformgeschwindigkeit in die Formänderungsfestigkeit k_f eingehen.

[0030] Wesentlich für die Erfindung ist der physikalische Effekt, daß die Druckdehnung (das ist die größte mögliche positive oder negative Dehnung, die Material, Temperatur und Spannungszustand zulassen) eines plastizierbaren Werkstoffes durch Absenken des hydrostatischen Spannungsanteiles (eventuell bezogen auf die Formänderungsfestigkeit, um die Verformungsvorgeschichte zu erfassen) erheblich erhöht werden kann. Je negativer der hydrostatische Spannungsanteil ist (allseitiger Druck), desto besser unterstützt er durch Gefügeordnung die plastischen Umformeffekte (Korngrenzengleiten, Versetzungen etc.). Rein theoretisch wäre es demgemäß möglich, beliebige Dehnungen zu erzielen, wobei der Spannungszustand in jedem Punkt des Werkstückes immer auf der sog. Hyperfließfläche, die durch obige Gleichung für k_f nach Mises festgelegt ist, liegen muß. Je größer also die auftretenden Dehnungen sind, insbesondere wenn Material in ausgebuchtete Teile nachgeschoben werden muß, desto größer muß auch der Innendruck des flüssigen Stützmediums sein (er geht ja als negative Spannung in die mittlere Spannung im Werkstück ein).

[0031] Wie bereits erwähnt bestehen im Umformverhalten große Unterschiede zwischen Stahl-Werkstoffen und hochfesten Aluminiumlegierungen, die insbesondere eine Sprödbbruchzähigkeit unter $30 \text{ MN} \cdot \text{m}^{-3/2}$ aufweisen. Nichtsdestoweniger können auch derartige spröde Werkstoffe sowie weiters auch Werkstücke mit unrunder Querschnitten einer innendruckgestützten Umformung unterzogen werden, wenn auf Basis der vorstehend angedeuteten Erkenntnisse eine entsprechende Innendrucksteuerung - insbesondere in Verbindung mit einer vorhergehenden werkstoffgerechten Wärmebehandlung (Weichglühen) - vorgenommen wird.

[0032] In Fig.3 ist nun ganz schematisch eine Anordnung zum innendruckgestützten Umformen mit einer derartigen Drucksteuerung veranschaulicht. Dabei sind in Fig.3 - ebenso wie in der noch zu erläuternden Fig.7 - den jeweiligen Komponenten von Fig.1 entsprechende Komponenten mit denselben Bezugszeichen bezeichnet. Im einzelnen befindet sich wiederum ein Werkstück 1 im Inneren eines Werkzeuges 2, und von oben bzw. unten werden Preßstempel 3 bzw. 4 herbeigeführt, um das Werkstück 1 zu pressen und dabei in einen Werkzeug-Hohlraum 7 hinaus auszubauchen, wie dies in Fig.3 veranschaulicht ist. Im Werkzeughohlraum 7 ist zur Abstützung des ausgebuchteten Werkstück-Teiles 12 ein beweglicher Werkzeugteil 13 zum Gegenhalten angeordnet, wobei dieser bewegliche oder variable Gegenhalte-Werkzeugteil 13 nachstehend der Einfachheit halber Gegenhaltestempel bezeichnet werden soll. Die Gegenhaltetkraft dieses Gegenhaltestempels 13 wird mit F_g angegeben, wogegen die Preßkraft der Preßstempel 3, 4 mit F_{p1} bzw. F_{p2} angegeben wird. Der Innendruck im Inneren des Werkstückes 1 ist mit p_i angegeben, wobei dieser Innendruck p_i während des Prozeßverlaufes vorzugsweise vom Weg s der Preßstempel 3, 4 abhängig gesteuert wird. Demgemäß sind den Preßstempeln 3, 4 in der Zeichnung nicht näher veranschaulichte Weggeber von an sich herkömmlicher Bauart zugeordnet, um so jederzeit den Weg s der Preßstempel 3, 4 zu erfassen. Abhängig von diesem Weg s wird der Innendruck $p_i(s)$ mit Hilfe eines Druckventils 14 eingestellt, welches in einer durch den oberen Preßstempel 3 hindurchführenden Druckmittel-Abfuhrleitung 15 angeordnet ist, wobei ihm ein Steuerventil 16 vorgeschaltet ist, welches zwei Stellungen - Füllen bzw. Pressen - besitzt.

[0033] Durch den anderen - unteren - Preßstempel 4 verläuft eine Druckmittel-Zufuhrleitung 17, durch die eine regelbare Pumpe 18, die von einem Motor 19 angetrieben wird, das flüssige Druckmittel - vorzugsweise einfach Wasser -

dem Inneren des Werkstückes 1 zuführt. In der Druckmittel-Zuführleitung 17 ist weiters, um ein Zurücktreiben des Druckmittels zur Pumpe 18 zu verhindern, ein Rückschlagventil 20 angeordnet.

[0034] Aus den Fig.4 und 5 geht in Verbindung mit Fig.3 die Gestalt der Matrize oder des Werkzeuges 2, auch Form genannt, mehr im einzelnen hervor, wobei ersichtlich ist, daß das außen kreisrunde Werkzeug 2 einen länglichen Innenraum oder Formraum 21 von quadratischem Querschnitt, für das einen quadratischen Querschnitt aufweisende Werkstück 1, sowie weiters den davon abzweigenden Hohlraum 7 von rechteckigem Querschnitt für die herzustellende Ausbuchtung oder Abzweigung 12 des Werkstückes 1 aufweist.

[0035] Im Betrieb wird ein Rohling, d.i. ein Hohlprofil mit quadratischem Querschnitt, aus dem das Werkstück 1 mit der Abzweigung 12 geformt werden soll, in das Werkzeug 2 eingelegt, wonach die beiden Preßstempel 3, 4 in Eingriff mit den Stirnseiten des Rohlings gebracht werden, wobei ein dichtes Abschließen an diesen Stirnseiten mit Hilfe der Preßstempel 3, 4 herbeigeführt wird. Zu diesem Zweck können die Preßstempel 3, 4 an ihren Stirnseiten am Außenumfang abgestuft sein, d.h. stufenförmige Absätze aufweisen, die insbesondere eine Höhe im Bereich von 5% bis 100% der mittleren Wandstärke des Rohlings aufweisen, und mit denen das Material des Rohlings beim Pressen plastifiziert wird, wobei eine metallische Dichtung herbeigeführt wird.

[0036] Nach diesem Anlegen der Preßstempel 3, 4 an den Rohling wird die Pumpe 18 eingeschaltet, um Druckmittel, insbesondere Wasser, dem Inneren des Rohlings über die Druckmittel-Zuführleitung 17 zuzuführen. Das Ventil 16 auf der Auslaßseite befindet sich dabei in der Stellung "Füllen", wie dargestellt, wobei in dieser Stellung einfach festgestellt werden kann, wann das Druckmittel ausgangsseitig austritt (wie in Fig.3 schematisch mit der Auslaßleitung 22 veranschaulicht ist).

[0037] Das Steuerventil 16 wird dann gemäß der Darstellung in Fig.3 in seine Stellung "Pressen" nach oben verstellt, in der ausgangsseitig eine Verbindung zum Druckventil 14 anstatt zur Auslaßleitung 22 hergestellt wird. Nach erfolgtem Abdichten des Hohlprofils durch die Preßstempel wird mit Hilfe der Pumpe 18 nun der Druck des Druckmittels erhöht, und der Preßvorgang kann durch Antreiben der Preßstempel 3, 4 mit der Preßkraft F_{p1} bzw. F_{p2} beginnen. Dabei kommt es zu dem erwähnten dichten Verschließen der Stirnseiten des Rohlings durch die Preßstempel 3, 4, durch Plastifizieren des Rohlings-Werkstoffs, und beim Pressen wird der Innendruck p_i des Druckmittels durch den Stauchvorgang erhöht. Der Innendruck $p_i(s)$ wird dabei wegababhängig mit Hilfe des Druckventils 14 laufend eingestellt, wobei beginnend bei einem Vorspanndruck am Beginn des Pressens zunächst eine Druckerhöhung auf ungefähr den doppelten Vorspanndruck vorgesehen werden kann, wonach in einem nächsten Abschnitt des Prozeßverlaufes beispielsweise ein linearer Druckanstieg auf ungefähr den zehnfachen Druckwert - bis ungefähr zur Mitte des gesamten Preßvorganges, d.h. zum halben Weg der Preßstempel 3, 4- vorgesehen wird; danach wird der Innendruck p_i beispielsweise auf diesem nunmehr erreichten Maximalwert konstant gehalten.

[0038] Während des so innendruckgesteuert ablaufenden Verpressens des Werkstückes 1 wird die Ausbuchtung oder Abzweigung 12 hergestellt, wobei hier mit dem Gegenhaltestempel 13 mit einer vorzugsweise ebenfalls wegababhängig gesteuerten Gegenhaltekraft F_g gegengehalten wird, um so ein Aufplatzen oder Bersten der Ausbuchtung 12 zu verhindern.

[0039] In Fig.6 ist ein Diagramm des Innendruckes p_i (in bar) über dem Weg s (in mm) der Preßstempel 3, 4 veranschaulicht, wobei der Innendruck p_i allgemein so wie vorstehend dargelegt wegababhängig gesteuert verläuft. Im einzelnen wird am Beginn des Preßvorganges ein Vorspanndruck p_v von beispielsweise 130 bar eingestellt, und bei Beginn des Pressens steigt der Innendruck p_i auf einen Wert p_a von z.B. 250 bar an, der bis zu einem Preßstempel-Weg s von 7,5 mm konstant gehalten wird (Phase der Anformung an den Stempel 13 und beginnenden Ausbuchtung mit noch kleinen Dehnungen). Sodann wird der Innendruck p_i linear steigend auf den Endwert oder maximalen Wert p_e von beispielsweise 2000 bar erhöht, wobei dieser Abschnitt der Druckerhöhung bei ungefähr der Hälfte des Preßvorganges (Preßstempel-Weg $s = 15$ mm) endet, wonach der Endwert p_e von 2000 bar bis zum Ende des Preßvorganges ($s = 30$ mm) gehalten wird. (Phase der großen Dehnungen während des Nachschubes von Material in die ausgeformte Ausbuchtung).

[0040] Mit einem grundsätzlich ähnlichen Innendruckverlauf wie gemäß Fig.6 kann auch ein Werkstück 1' mit zwei Abzweigungen 12', 12'' hergestellt werden, wie dies im Schema von Fig.7 veranschaulicht ist. Das Werkzeug 2' hat in diesem Fall zwei Hohlräume 7', 7'' für die Ausbuchtungen oder Verzweigungen 12', 12'', wobei in diesen Hohlräumen 7', 7'', entsprechende Gegenhaltestempel 13', 13'' als variable Werkzeugteile mit einer Anpreßkraft $F_{g1}(s)$ bzw. $F_{g2}(s)$ beweglich gehalten sind. Die Preßstempel 3, 4 werden an das Werkstück 1' mit einer Preßkraft F_{p1} bzw. F_{p2} angelegt. Zum Füllen des Werkstückes 1' mit Wasser ist eine Zuleitung 23 vorgesehen, an die die Druckmittel-Zuführleitung 17 über ein Wegeventil 24 sowie einerseits über die Pumpe 18 bzw. andererseits direkt über ein Rückschlagventil 25 angeschlossen ist.

[0041] Auslaßseitig ist an die Druckmittel-Abführleitung 15 wiederum ein Druckventil 14' angeschlossen, welches im vorliegenden Fall über einen Hydraulik-Steuerkreis mit einer regelbaren Pumpe 26 und einer Steuerleitung 27, in der ein Rückschlagventil 28 aufgenommen ist, druckmäßig eingestellt werden kann.

[0042] Weiters ist eine Steuerungs- und Regelungseinheit 30 vorhanden, die die Prozeßwasser-Vorspannpumpe 18 sowie die hinsichtlich des Ausgangsdrucks einstellbare Pumpe 26 im Steuerkreis für das Druckventil 14', zwecks Ein-

stellung des jeweiligen Innendrucks p_i , ansteuert. Eingangsgrößen für die Steuer- und Regeleinheit 30 sind der Weg s der Preßstempel 3, 4 (in der Regel genügt es, den Weg eines Preßstempels, z.B. 3, aufzunehmen, und der Einheit 30 zuzuführen) sowie der aus Sicherheitsgründen ebenfalls gemessene Innendruck $p_i(s)$. Für die Preßstempel 3, 4 sowie die Gegenhaltestempel 13', 13'' kann je nach Wunsch eine Steuerung oder Regelung vorgesehen werden, und dem-
 5 gemäß werden die Größen F_{p1} , F_{p2} , F_{g1} und F_{g2} gemäß Fig.7 sowohl erfaßt als auch eingestellt, z.B. einfach weg-
 abhängig oder mit einer zusätzlichen Nachregelung (Istwert-Sollwert-Vergleich), wie dies nachstehend noch näher
 anhand der Flußdiagramme von Fig.8 bis 10 näher erläutert werden wird.

[0043] Im einfachsten Fall könnte es sich bei der Einheit 30 um eine SPS (Speicher-programmierbare Steuerung) -
 Einheit handeln, mit der einfach wegabhängig die Preßdrücke (Preßkräfte F_{p1} , F_{p2} , F_{g1} , F_{g2}) sowie insbesondere der
 10 Innendruck p_i eingestellt werden. Ein entsprechendes Flußdiagramm ist in Fig.8 gezeigt, das eine derartige einfache
 wegabhängige Druckführung sowie Gegenhaltekraftführung beinhaltet.

[0044] Im einzelnen erfolgen gemäß Fig.8 nach einem Start des Prozeßablaufes bei 31 im Block 32 die Eingaben für
 v_1 (Ventil für den Preßstempel 3, für die Preßkraft F_{p1}), für v_2 (Ventil für den Preßstempel, 4, für die Preßkraft F_{p2}), für
 den Innendruck $p_i(s)$, für die Gegenhaltekraft $F_{g1}(s)$ und für die Gegenhaltekraft $F_{g2}(s)$.

[0045] Nach dieser Eingabe erfolgt im Block 33 ein Füllen des Werkstückes 1', bis das Druckmittel am Ausgang des
 Druckventils 14' austritt. Nach diesem Vorgang erfolgt gemäß Block 34 mit Hilfe der Pumpe 18 ein Vorspannen des
 Druckmittels im Werkstück 1' auf den gewünschten Vorspanninnendruck $p_v = p_i(s = 0)$; nach Erreichen des Vorspann-
 drucks p_v werden - gemäß Block 35 in Fig.8 - die Ventile v_1 und v_2 gestellt. Damit beginnt der eigentliche Preßvorgang,
 währenddessen der Weg s des oder der Preßstempel 3, 4 gemessen wird, s. Block 36 in Fig.8. Dabei wird gleichzeitig
 20 das Überdruckventil 14' für den Innendruck p_i abhängig vom Weg s laufend gestellt, Block 37 in Fig.8. Weiters erfolgt
 ein Stellen der Ventile für die Gegenhaltestempel 13' und 13'', für die Gegenhaltekraft $F_{g1}(s)$ und $F_{g2}(s)$, s. Block 38 in
 Fig.8. Anschließend wird in Block 39 zyklisch abgefragt, ob der Preßstempel-Weg s den Endwert hierfür erreicht hat,
 d.h. ob der Preßvorgang beendet werden kann oder nicht. Wenn dies nicht der Fall ist, wird bei 40 wieder zum Block
 36 etc. zurückgekehrt, und es erfolgt eine neuerliche Wegmessung, Überdruckventilstellung etc. Ist der Preßstempel-
 25 weg an seinem Endwert s_{Ende} angelangt, dann folgt nach dem Block 39 das Ende des Prozeßablaufes, wie in Fig.8
 bei 41 angedeutet ist.

[0046] Fig.9 veranschaulicht in einem weiteren Flußdiagramm einen gegenüber Fig.8 insofern etwas modifizierten
 Prozeßablauf, als hier eine innendruckabhängige Regelung für die Gegenhaltestempel-Kräfte F_{g1} und F_{g2} erfolgt. Die
 Schritte 31 bis 37 sind gleich wie beim Flußdiagramm gemäß Fig.8, so daß sich eine neuerliche Beschreibung dersel-
 30 ben erübrigen kann. Nach dem Schritt 37 (Stellen des Innendrucks p_i) erfolgt eine Messung des Innendrucks p_i , der
 Gegenhaltekraft F_{g1} des einen Gegenhaltestempels 13' und der Gegenhaltekraft F_{g2} des zweiten Gegenhaltestem-
 pels 13'' (Block 42 in Fig.9). Danach folgt eine Regelung von F_{g1} und F_{g2} , d.h. abhängig vom Innendruck p_i werden
 ein Sollwert $F_{g1}(p_i)$ und ein Sollwert $F_{g2}(p_i)$ festgelegt und mit dem Istwert F_{g1} ist bzw. F_{g2} ist verglichen. Abhängig
 vom Istwert-Sollwert-Vergleich werden die Ventile für die Betätigung der Gegenhaltestempel 13' bzw. 13'' eingestellt
 35 (Block 43 in Fig.9). Danach wird wieder in Block 39 abgefragt, ob die Preßstempel bereits ihr Wegende erreicht haben,
 und wenn nein, wird zu Block 39 zurückgekehrt, wenn ja, wird zum Ende 41 gegangen.

[0047] Im durch das Flußdiagramm gemäß Fig.10 veranschaulichten Prozeßablauf ist eine andere Modifikation inso-
 fern vorgesehen, als hier eine Regelschleife für die Preßkraft F_{p1} bzw. F_{p2} der Preßstempel 3 bzw. 4 abhängig vom
 Preßstempelweg s vorgesehen ist. Im einzelnen folgt auf die wiederum gleich ablaufenden Schritte 31 bis 35 ein modi-
 40 fizierter Meßschritt bei 36', wo nicht nur der Preßstempel-Weg s , sondern auch die Preßstempelkräfte F_{p1} und F_{p2}
 gemessen werden. Nach dem Einstellen des Innendrucks $p_i(s)$ mit Hilfe des Druckventils 14' im Schritt 37 - wie im
 Schritt 37 gemäß Fig.8 - folgt die im Block 44 veranschaulichte Regelung von F_{p1} und F_{p2} abhängig vom Preßstempel-
 Weg s , wobei ein wegabhängiger Sollwert für F_{p1} und F_{p2} festgelegt wird und ein Istwert-Sollwert-Vergleich durchge-
 führt wird, wobei die Ventile für F_{p1} bzw. F_{p2} entsprechend gestellt werden.

[0048] Im Anschluß an diesen Regelungsschritt 44 folgt wiederum, analog wie gemäß Fig.8, das Stellen der Ventile
 für die Gegenhaltestempel 13' bzw. 13'' (F_{g1} , F_{g2}). Der weitere Ablauf ist wieder gleich jenem von Fig.8 oder 9.

[0049] In Fig.11 ist schematisch eine Vorrichtung mit einem Werkzeug 2 ohne variable Werkzeugeile (Gegenhalte-
 stempel) in einem Hohlraum 7 gezeigt, wobei beispielsweise eine halbkugelförmige Ausbuchtung 12 am Werkstück 1'
 beim Pressen mit Hilfe der Preßstempel 3, 4 erzeugt werden sollen.

[0050] Die Technik der dichten Führung von Druckmittelleitungen durch Preßstempel hindurch, wie im vorliegenden
 Fall der Druckmittel-Zuführleitung 17 und der Druckmittel-Abführleitung 15 durch die Preßstempel 4 bzw. 3, ist an sich,
 z.B. von Rohrbiegemaschinen, bekannt und bedarf hier keiner näheren Erläuterung.

[0051] Sofern eine Wärmebehandlung des zu verpressenden Rohlings vor den Preßvorgang gewünscht wird - in der
 Regel wird eine solche Wärmebehandlung zum Weichglühen bevorzugt -, so hängen die Dauer sowie der Grad der
 55 Wärmebehandlung (Temperatur) selbstverständlich vom jeweiligen Rohling, insbesondere vom jeweiligen Werkstoff
 ab. Üblicherweise wird eine Wärmebehandlung derart durchzuführen sein, daß der Rohling ausreichend lange, z.B. 1
 bis 2 Stunden, in einem Glühofen auf einige 100°C erhitzt wird, wonach man ihn an Luft abkühlen läßt; bevor der so
 weichgeglühte Werkstoff wieder, durch Auslagerung von Legierungsbestandteilen an die Korngrenzen, an Duktilität

verlieren würde, wird dann der Preßvorgang - z.B. ca. 2 oder 3 Stunden nach der Wärmbehandlung - durchgeführt.

[0052] Die in den Fig.3 und 7 gezeigte aufrechte Anordnung des Werkzeugs mit dem Zuführen des Druckmittels von unten hat den Vorteil, daß beim Füllen Luftblasen oder allgemein Gasblasen nach oben steigen können, so daß der Innenraum des Rohlings bzw. Werkstücks 1 bzw. 1' problemlos gasblasenfrei gefüllt werden kann.

[0053] Von Bedeutung ist beim Verpressen auch eine adäquate Schmierung insbesondere an Stellen starker Krümmung, wo der Werkstoff um enge Radien oder in enge Faden fließen muß. Ein entsprechender Schmiermittelauftrag ist also insbesondere an Kanten - auch des Rohlings - von Bedeutung. Insbesondere ist es günstig, im Kantenbereich um ca. 50% mehr Schmiermittel aufzutragen.

[0054] Nachfolgend soll anhand eines konkreten Beispiels die erfindungsgemäße innendruckgestützte Umformung mit Innendruckführung noch näher erläutert werden.

Beispiel:

[0055] Es wurde ein Hohlprofil-Rohling mit quadratischem Querschnitt aus einem AlMgSi 0,5-Werkstoff verpreßt, wobei die Abmessungen des Rohlings wie folgt waren: Außenmaß 30 x 30 mm², Wandstärke 2 mm, Eckradius 2 mm, Länge 155 mm. Die Zugfestigkeit für AlMgSi 0,5 beträgt ca. 200 N/mm².

[0056] Der Rohling wurde vor dem Verpressen 100 min lang in einem Glühofen auf 400°C erhitzt und danach an Luft abgekühlt. Die Preßbearbeitung erfolgte nach ca. 3 Stunden. Hierfür wurde eine Vorspanndruck von 130 bar eingestellt (am Beginn des Preßvorganges), und der maximale Innendruck, der in der zweiten Hälfte der Prozeßphase erreicht wurde, wo große Dehnungen des Werkstoffes des Werkstückes erforderlich waren, betrug 2000 bar. Die Preßgeschwindigkeit betrug 5 mm/s, und die Gegenhaltekraft des einen Gegenhaltestempels, für die Herstellung eines Werkstückes mit einer Abzweigung, quadratisch wie das Ausgangsprofil, betrug 10 kN.

[0057] Das hergestellte Werkstück war wie erwähnt ein T-Stück, ähnlich wie in Fig.3 dargestellt, mit einer Abzweiglänge von 53 mm (gegen die Hinterwand gemessen), und das Werkstück hatte eine Endlänge von 90 mm. Im Bereich der Abzweigung betrug der Eckradius 3mm.

[0058] Wenn die Erfindung vorstehend anhand von besonders bevorzugten Ausführungsbeispielen näher erläutert wurde, so sind doch selbstverständlich weitere Abwandlungen und Modifikationen im Rahmen der Erfindung möglich. So ist es insbesondere auch denkbar, in Abwandlung des Verlaufs des Innendrucks p_i , wie im Diagramm von Fig.6 dargestellt, auch Prozeßphasen vorzusehen, in denen zwischendurch der Innendruck wieder etwas abgesenkt wird, etwa dann, wenn der Werkstoff des Werkstücks in der Abzweigung um einen zusätzlichen Eckenbereich zum Fließen gebracht werden soll. Weiters ist es selbstverständlich möglich, die in Fig.9 und 10 jeweils veranschaulichte Regelung einerseits für die Gegenhaltekraft der Gegenhaltestempel und andererseits für die Preßkraft der Preßstempel kombiniert im Prozeßablauf vorzusehen, d.h. es wäre beispielsweise im Ablauf gemäß Schema Fig.10 ein Schritt gemäß Block 43 von Fig.9 vor oder nach dem Block 44 vorzusehen.

[0059] Als Druckventil 14 bzw. 14' können die verschiedensten herkömmlichen Druckventil-Typen verwendet werden, wie insbesondere auch außer dem gezeigten hydraulisch betätigten Druckventil 14' gemäß Fig.7 auch elektromagnetisch betätigte Druckventile.

[0060] Die Steuer- und Regeleinheit 30 kann weiters in an sich herkömmlicher Weise mit entsprechenden elektrischen Schaltkreisen realisiert werden, wie insbesondere A/D-Wandlern, D/A-Wandlern, Komparatoren und/oder Mikroprozessoren. Derartige Regel- und Steuereinheiten sind an sich bei herkömmlichen Pressen grundsätzlich bekannt, so daß sich hier eine nähere Erläuterung erübrigen kann.

[0061] Wenn die Erfindung vorstehend anhand von besonders bevorzugten Ausführungsbeispielen erläutert wurde, so sind doch Abwandlungen und Modifikationen im Rahmen der Erfindung möglich. Beispielsweise ist es denkbar, an den Werkstücken zugleich mit den Ausbuchtungen, Aushalsungen, Abzweigungen usw. auch Einbuchtungen herzustellen.

Patentansprüche

1. Verfahren zur innendruckgestützten Umformung von metallischen Hohlprofilen in Werkzeugen zu mit Ausbuchtungen, Aushalsungen, Abzweigungen oder dergl. versehenen Werkstücken (1), wobei dem Inneren eines im Werkzeug (2) angebrachten Rohlings, der an seinen Stirnseiten mit zumindest einem beweglichen Preßstempel und einem stationären Gegenhalte-Werkzeugteil, vorzugsweise mit zwei beweglichen Preßstempeln (3, 4), in Eingriff gebracht wird, ein flüssiges Druckmittel zugeführt wird, der Rohling mit Hilfe des oder der Preßstempel(s) (3, 4) unter Ausbauchen in zumindest einen Hohlraum (7) im Werkzeug (2) hinein gepreßt wird und der Druck des Druckmittels im Inneren des durch den Preßstempel und stationären Gegenhalte-Werkzeugteil bzw. die Preßstempel (3, 4) abgeschlossenen Rohlings in Abhängigkeit vom Prozeßfortschritt beim Pressen, vorzugsweise in Abhängigkeit vom Preßstempel-Weg (5), gesteuert wird, dadurch gekennzeichnet, daß in Prozeßphasen mit kleinen Dehnungen (φ) des Werkstoffes der Druck (p_i) des Druckmittels so eingestellt wird, daß die aus dem räumlichen Spannungszustand im Werkstück (2) gebildete Vergleichsspannung im wesentlichen gerade die Formänderungsfestigkeit (k_f)

des Werkstoffes erreicht, wogegen in Prozeßphasen mit großen Dehnungen (φ) der Druck (p_i) des Druckmittels erhöht wird, um die Bruchdehnung des Werkstoffs durch Absenken der mittleren Spannung ausreichend hinaufzusetzen.

- 5 2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß das Druckmittel am Beginn des Preßvorganges auf einen niedrigen Überdruck (p_a), z.B. in der Größenordnung von 300 bis 600 bar, und gegen Ende des Preßvorganges auf den Maximalwert (p_e) beispielsweise in der Größenordnung von einigen kbar, gebracht wird.
- 10 3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß das Druckmittel während des Preßvorganges auf einen Maximaldruck (p_e) von mindestens 80% der Zugfestigkeit des Werkstoffes des Rohlings gebracht wird.
- 15 4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, daß der Druck (p_i) des Druckmittels in Preßphasen, in denen der Werkstoff des Rohlings kleine Krümmungsradien des Werkzeugs (2) umfließt, je nach Wandstärke (w) auf 5%-40% des Maximaldrucks beim Pressen eingestellt wird.
- 20 5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, daß das Druckmittel bereits vor dem Pressen des Rohlings auf einen erhöhten Vorspanndruck (p_v), vorzugsweise 5%-20%, insbesondere ungefähr 10% des beim Pressen erreichten Maximaldrucks (p_e), z.B. auf einen Wert in der Größenordnung von 100 bis 1000 bar, gebracht wird.
- 25 6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, daß der Rohling vor dem Preßvorgang Gaseinschlüssefrei mit dem Druckmittel gefüllt wird, und daß das Druckmittel durch eine Pumpe (18) auf einen erhöhten Druck (p_i) gebracht wird.
- 30 7. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 6, dadurch gekennzeichnet, daß im Fall von Rohling-Werkstoffen, die Auslagerungen von Legierungsbestandteilen an die Korngrenzen aufweisen, insbesondere von hochfesten Aluminiumlegierungen, vor dem Preßvorgang eine Wärmebehandlung derart durch geführt wird, daß durch Einlagerung dieser Legierungsbestandteile in die Korngitter die Duktilität des Werkstoffs erhöht wird, und daß der Preßvorgang innerhalb eines vorgegebenen Zeitfensters, z.B. 1h bis 4h nach der Wärmebehandlung, jedoch bevor es zu einer erneuten Auslagerung der Legierungsbestandteile an die Korngrenzen kommt, durchgeführt wird.
- 35 8. Verfahren nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, daß Rohlinge aus AlMgSi-Legierungen bei ca. 400°C ungefähr 100 min lang in einem Glühofen erwärmt anschließend in Luft gekühlt und ca. 3h nach Ende der Glühofen-Wärmebehandlung verpreßt werden.
- 40 9. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 8, wobei beim Verpressen des Rohlings in dem (jeweiligen) Werkzeug-Hohlraum (7), in den der Werkstoff des Rohlings hineinverformt wird, mit einem variablen Gegenhalte-Werkzeugteil (13), der eine Querschnittsform entsprechend dem (jeweiligen) auszubauchenden Teil aufweist, gegengehalten wird, dadurch gekennzeichnet daß mit dem (jeweiligen) variablen Werkzeugteil (13) druck- und/oder weggesteuert gegengehalten wird und die dabei in das Werkstück eingeleitete Kraft so bemessen wird, daß die insgesamt im Werkstück (1) auftretende mittlere Spannung (der hydrostatische Spannungsanteil) soweit vermindert wird, daß die dadurch festgelegte Bruchdehnung größer wird als die größte im betreffenden durch den variablen Werkzeugteil (13) abgestützten Werkstückteil auftretende Dehnung.
- 45 10. Verfahren nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, daß die durch den variablen Gegenhalte-Werkzeugteil (13) aufgebrauchte Kraft (F_g) auf mindestens 5% der durch den Innendruck im Rohling auf den auszubauchenden Teil ausgeübten Kraft eingestellt wird.
- 50 11. Verfahren nach Anspruch 9 oder 10, dadurch gekennzeichnet, daß im Fall der gleichzeitigen Herstellung von mehreren Ausbuchtungen, Abzweigungen oder dergl. (12, 12') und demgemäß der Verwendung von mehreren variablen druckgesteuerten Gegenhalte-Werkzeugteilen (13, 13') zusätzlich zu deren Drucksteuerung eine Wegüberwachung bzw. -messung durchgeführt wird, um bei ungleich schnellen Bewegungen der variablen Gegenhalte-Werkzeugteile (13, 13') ihre Drucksteuerung anzupassen.
- 55 12. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 11, dadurch gekennzeichnet, daß in Zonen mit Meinem Oberflächen-Krümmungsradius von Rohling bzw. Werkzeug, insbesondere an abgerundeten Kanten, um mindestens 50% mehr Schmiermittel aufgetragen wird als an den übrigen Teilen von Rohling bzw. Werkzeug (2).

Claims

1. A method for internal pressure supported forming of metallic hollow sections in tools to work pieces (1) provided with bulges, necks, branchings or the like, wherein a liquid pressure medium is supplied to the interior of a blank arranged in the tool (2) which, at its front sides, is engaged with at least one movable press die and one stationary counter-holding tool part, preferably with two movable press dies (3, 4), the blank is pressed, under bulging, into at least one cavity (7) in the tool (2), by aid of the press die(s) (3, 4), and the pressure of the pressure medium in the interior of the blank sealed off by the press die and the stationary counter-holding tool part or by the press dies (3, 4) is controlled in dependence on the process progress at pressing, preferably in dependence on the distance (5) passed by the press die, characterised in that in process phases with slight elongations (φ) of the material, the pressure (p_i) of the pressure medium is adjusted such that the comparative strain formed on the basis of the spatial state of stress in the work piece (2) substantially just reaches the mean tensile strength (k_t) of the material, whereas in process phases with strong elongations (φ), the pressure (p_i) of the pressure medium is increased so as to sufficiently raise the elongation at break of the material by lowering the mean tension.
2. A method according to claim 1, characterised in that the pressure medium is adjusted to a slight overpressure (p_a), e.g. in the range of from 300 to 600 bar, at the beginning of the pressing procedure, and to a maximum value (p_e), e.g. in the range of a few kbar, towards the end of the pressing procedure.
3. A method according to claim 1 or 2, characterised in that during the pressing procedure, the pressure medium is adjusted to a maximum pressure (p_e) of at least 80% of the tensile strength of the material of the blank.
4. A method according to any one of claims 1 to 3, characterised in that in pressing phases, in which the material of the blank flows around small radii of curvature of the tool (2), the pressure (p_i) of the pressure medium is adjusted to 5% to 40% of the maximum pressure during pressing, depending on the wall thickness (w).
5. A method according to any one of claims 1 to 4, characterised in that already before pressing the blank, the pressure medium is adjusted to an increased bias pressure (p_v), preferably 5% to 20%, in particular approximately 10% of the maximum pressure (p_e) reached during pressing, e.g. to a value in the range of from 100 to 1000 bar.
6. A method according to any one of claims 1 to 5, characterised in that the blank is filled with pressure medium before the pressing procedure so as to be free from gas bubbles, and that the pressure medium is adjusted to an increased pressure (p_i) by means of a pump (18).
7. A method according to any one of claims 1 to 6, characterised in that in case of blank materials exhibiting segregations of alloying components to the grain boundaries, in particular of high-strength aluminum alloys, a heat treatment is carried out before the pressing procedure such that the ductility of the material is increased by incorporation of these alloying components into the grain lattices, and that the pressing procedure is carried out within a given time-window, e.g. 1h to 4h after the heat treatment, yet before the occurrence of a renewed segregation of the alloying components to the grain boundaries.
8. A method according to claim 7, characterised in that blanks of AlMgSi alloys are heated in an annealing furnace at approximately 400°C for, approximately, 100 minutes, subsequently are cooled in air and are pressed approximately 3 hours after termination of the annealing furnace heat treatment.
9. A method according to any one of claims 1 to 8, wherein, when compressing the blank in the (respective) tool cavity (7), into which the material of the blank is moulded, a variable counter-holding tool part (13) having a cross-sectional shape corresponding to the (respective) portion to be bulged, is counter-held, characterised in that counter-holding with the (respective) variable tool part (13) is effected under the control of pressure and/or distance and the force introduced thereby into the work-piece is selected such that the mean tension (the hydrostatic tension portion) occurring in sum in the work piece (1) is reduced so much that the elongation at break determined thereby becomes greater than the greatest elongation occurring in the respective work piece portion supported by the variable tool part (13).
10. A method according to claim 9, characterised in that the force (F_g) applied by the variable counter-holding tool part (13) is adjusted to at least 5% of the force exerted by the internal pressure in the blank on the portion to be bulged.
11. A method according to claim 9 or 10, characterised in that when simultaneously making several bulges, branchings

or the like (12, 12') and thus when using several variable pressure-controlled counter-holding tool parts (13, 13'), a distance control or measurement, respectively, is carried out in addition to the pressure control thereof so as to adapt their pressure control when the variable counter-holding tool parts (13, 13') perform movements of un-equal speeds.

12. A method according to any one of claims 1 to 11, characterised in that the lubricant applied in zones having a small surface-radius of curvature of the blank or of the tool, respectively, in particular at rounded-off edges, is by at least 50% more than that applied on the remaining portions of blank and tool (2), respectively.

Revendications

1. Procédé de déformation de profilés métalliques creux dans un outillage, avec assistance par une pression intérieure, pour réaliser des pièces (1) pourvues de renflements, de collets en saillie, d'embranchements ou analogues, dans lequel on introduit un agent de pression liquide à l'intérieur d'une ébauche disposée dans l'outillage (2) et amenée en prise, par ses faces d'extrémité, avec au moins un poinçon de compression mobile et un outil de retenue fixe, de préférence avec deux poinçons de compression mobile (3, 4), on comprime l'ébauche, à l'aide du ou des poinçons de compression (3, 4), de façon que cette ébauche s'épanouisse dans au moins une cavité (7) de l'outillage, et on commande la pression de l'agent de pression à l'intérieur de l'ébauche fermée par le poinçon de compression et l'outil de retenue fixe ou par les poinçons de compression (3, 4), en fonction de l'avancement du processus de compression, de préférence en fonction de la course (5) d'un poinçon de compression, caractérisé en ce que, dans des étapes du procédé correspondant à de faibles allongements (φ) du matériau, on règle la pression (p_i) de l'agent de pression de façon que la contrainte de référence développée dans la pièce à partir de l'état de tension dans l'espace atteigne à peu près exactement la résistance à la déformation (k_f) du matériau, tandis que, dans des étapes du procédé correspondant à de grands allongements (φ), on augmente la pression (p_i) de l'agent de pression pour augmenter suffisamment l'allongement à la rupture du matériau par réduction de la contrainte moyenne (?).
2. Procédé suivant la revendication 1, caractérisé en ce que, au début du processus de compression, l'agent de pression est amené à une surpression faible (p_a), par exemple de l'ordre de 300 à 600 bars, et vers l'extrémité du processus de compression, à la valeur maximale (p_e), par exemple de l'ordre de quelques kilobars.
3. Procédé suivant la revendication 1 ou 2, caractérisé en ce que, pendant le processus de compression, l'agent de pression est amené à une pression maximale (p_e) d'au moins 80% de la résistance à la traction du matériau de l'ébauche.
4. Procédé suivant l'une des revendications 1 à 3, caractérisé en ce que la pression (p_i) de l'agent de pression est réglée, dans des phases de compression dans lesquelles le matériau de l'ébauche flue autour de petits rayons de courbure de l'outillage (2), à 5% à 40%, suivant l'épaisseur de paroi (w), de la pression maximale atteinte pendant la compression.
5. Procédé suivant l'une des revendications 1 à 4, caractérisé en ce que l'agent de pression, avant la compression de l'ébauche, est déjà amené à une pression élevée de pré-tension (p_v) égale de préférence à 5% à 20%, en particulier à environ 10%, de la pression maximale (p_e) atteinte pendant la compression, par exemple à une valeur de l'ordre de 100 à 1000 bars.
6. Procédé suivant l'une des revendications 1 à 5, caractérisé en ce que, avant le processus de compression, on remplit l'ébauche avec l'agent de pression de manière à en éliminer les inclusions gazeuses, et en ce que l'agent de pression est amené par une pompe (18) à une pression élevée (p_i).
7. Procédé suivant l'une des revendications 1 à 6, caractérisé en ce que, dans le cas de matériaux d'ébauche qui comprennent des transferts de constituants d'alliage aux joints des grains, en particulier d'alliages d'aluminium à haute résistance, on effectue avant le processus de compression un traitement thermique qui, en provoquant l'inclusion de ces constituants d'alliage dans le réseau cristallin, augmente la ductilité du matériau, et en ce qu'on procède à la compression à l'intérieur d'un intervalle de temps prédéterminé, par exemple de 1 heure à 4 heures après le traitement thermique, mais avant que se produise un nouveau transfert des constituants d'alliage aux joints des grains.
8. Procédé suivant la revendication 7, caractérisé en ce qu'on chauffe des ébauches en alliages AlMgSi vers 400°C

pendant environ 100 mn dans un four à malléabiliser, puis on les refroidit dans de l'air et, environ 3 heures après la fin du traitement thermique dans le four de malléabilisation, on les comprime.

- 5 9. Procédé suivant l'une des revendications 1 à 8, dans lequel, lors de la compression de l'ébauche dans la ou dans chaque cavité (7) de l'outillage dans laquelle on fait pénétrer par déformation le matériau de l'ébauche, on réalise une retenue au moyen d'un outil de retenue variable (13) dont la forme en section correspond à la ou à chaque partie à déformer par épanouissement, caractérisé en ce qu'on effectue la retenue au moyen de l'outil ou de chaque outil variable (13) commandé par pression et/ou par déplacement, et on définit les forces ainsi appliquées à la pièce de façon que la contrainte moyenne se développant dans l'ensemble dans la pièce (1) (la partie hydrostatique de la contrainte) soit réduite dans une mesure telle que l'allongement à la rupture ainsi défini soit supérieur au plus grand allongement qui se produit dans la partie de la pièce qui s'appuie sur l'outil variable (13).
10
10. Procédé suivant la revendication 9, caractérisé en ce que la force (F_g) développée par l'outil de retenue variable (13) est réglée à au moins 5% de la force exercée sur la partie à épanouir par la pression intérieure régnant dans l'ébauche.
15
11. Procédé suivant la revendication 9 ou 10, caractérisé en ce que, dans le cas où l'on réalise simultanément plusieurs renflements, embranchements ou analogues (12, 12') et, de façon correspondante, on utilise plusieurs outils de retenue variables (13, 13') commandés par pression, on procède en outre, pour leur commande de pression, à une surveillance ou mesure de déplacement, afin d'adapter leur commande de pression lors de déplacements à vitesse variable des outils de retenue variables (13, 13').
20
12. Procédé suivant l'une des revendications 1 à 11, caractérisé en ce qu'on amène au moins 50% de plus de lubrifiant dans des zones de l'ébauche ou de l'outillage ayant des petits rayons de courbure superficiels, en particulier à l'emplacement d'arêtes arrondies, par rapport à la quantité de lubrifiant amenée dans les autres parties de l'ébauche ou de l'outillage (2).
25

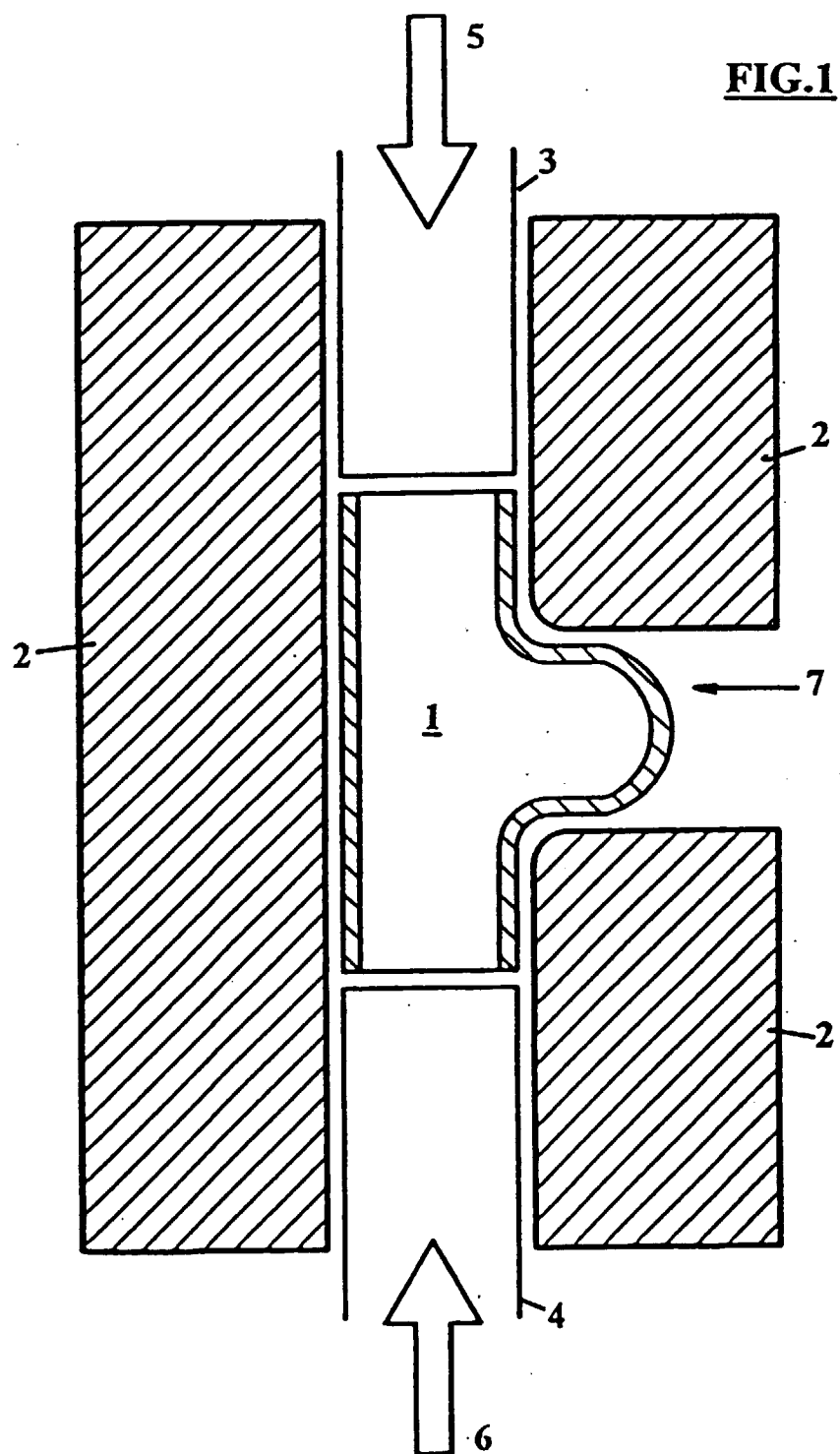


FIG.2

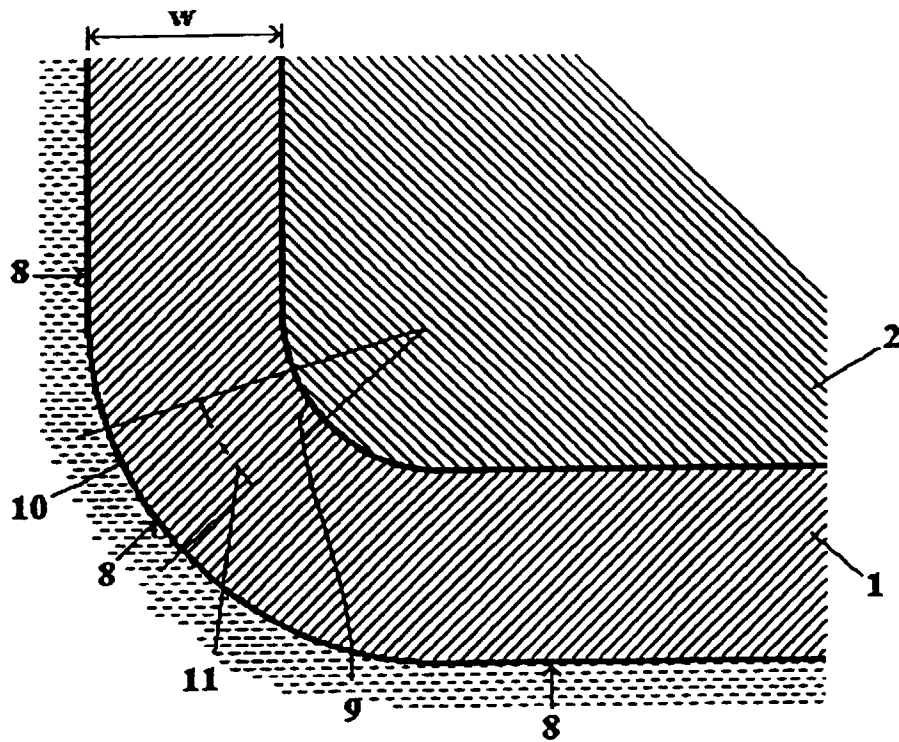


FIG.3

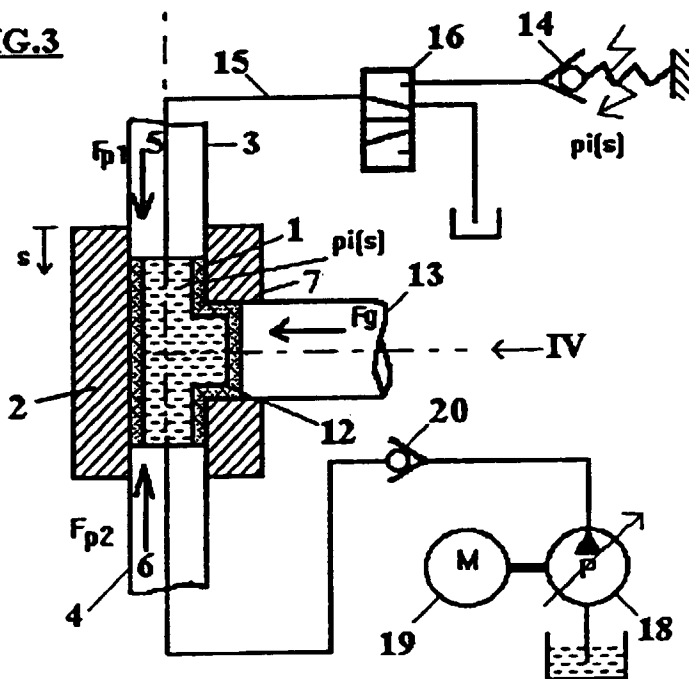


FIG.4

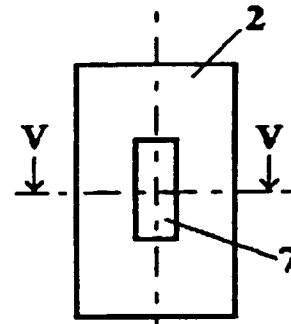
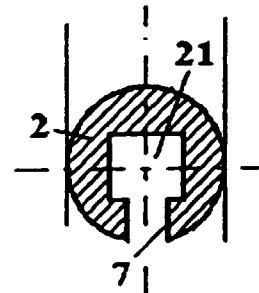


FIG.5



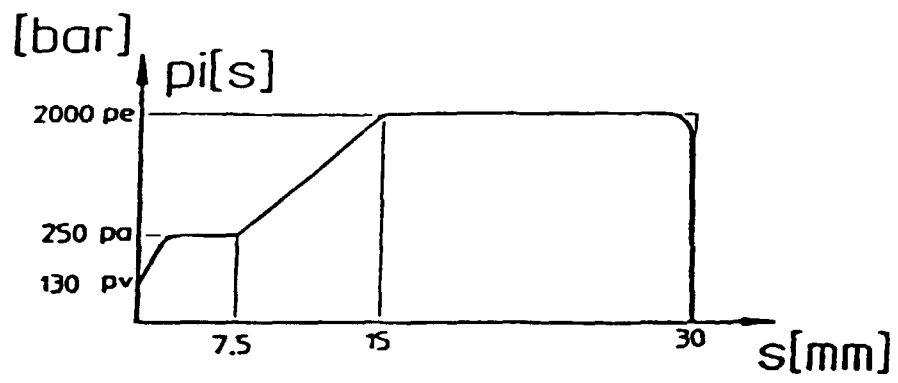
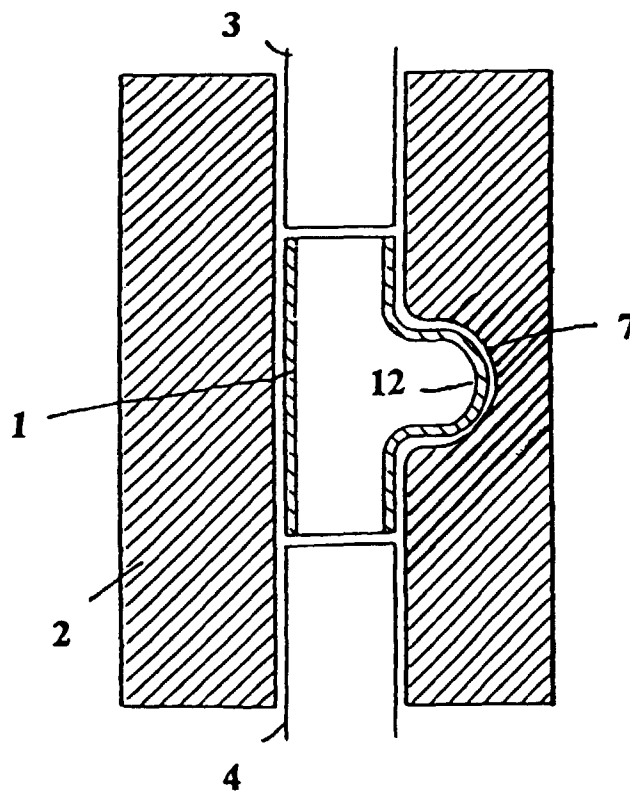


FIG.6

FIG.11



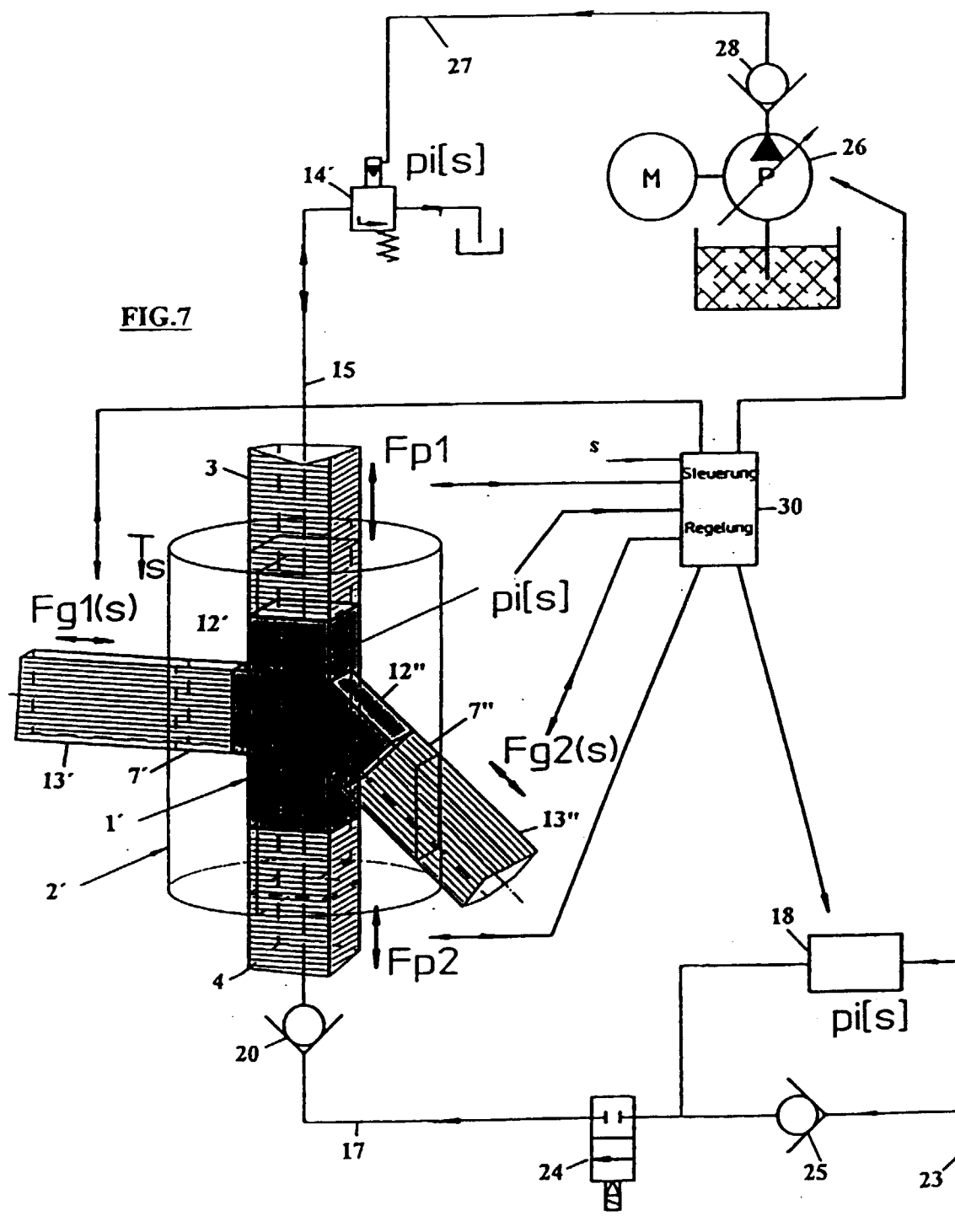


FIG.8

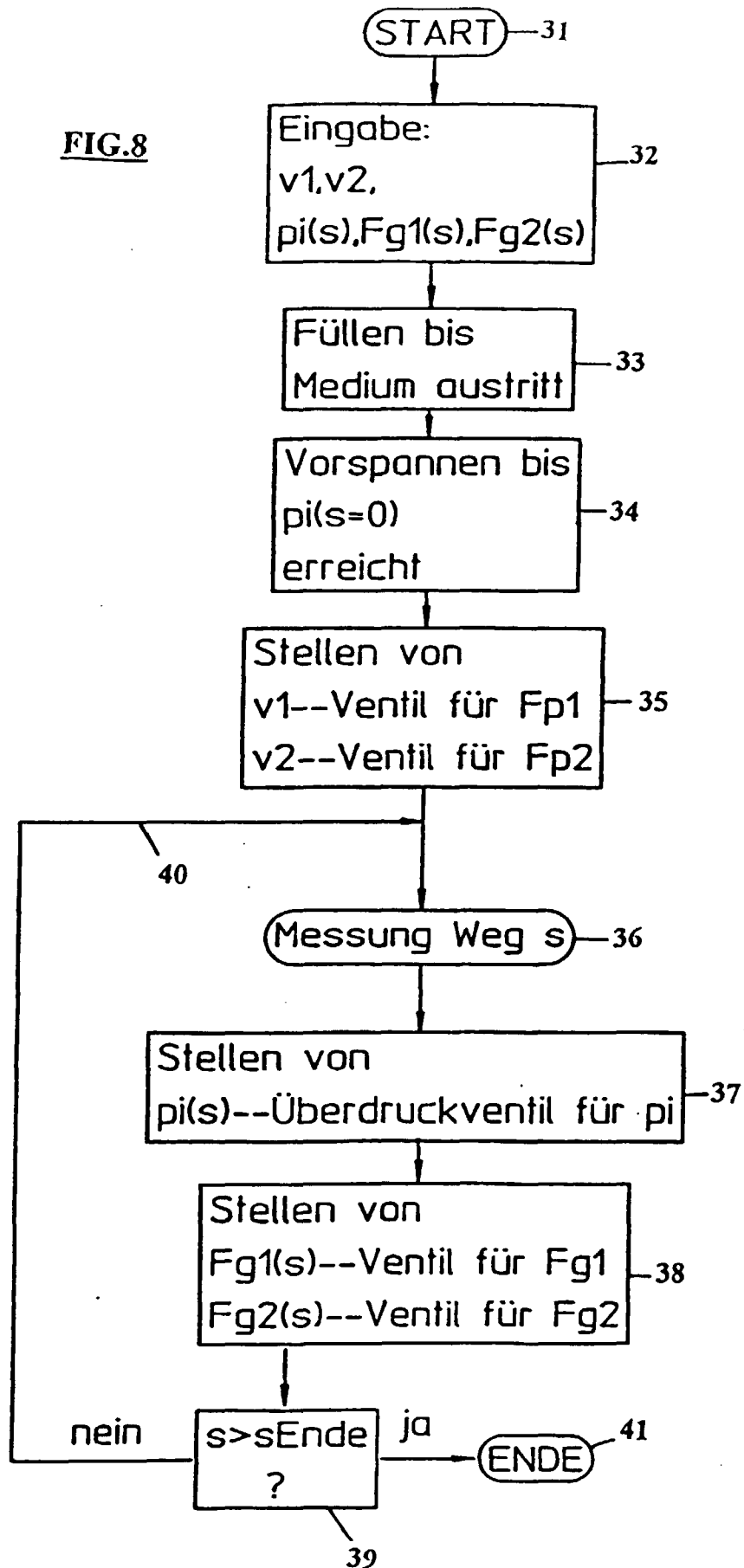


FIG. 9

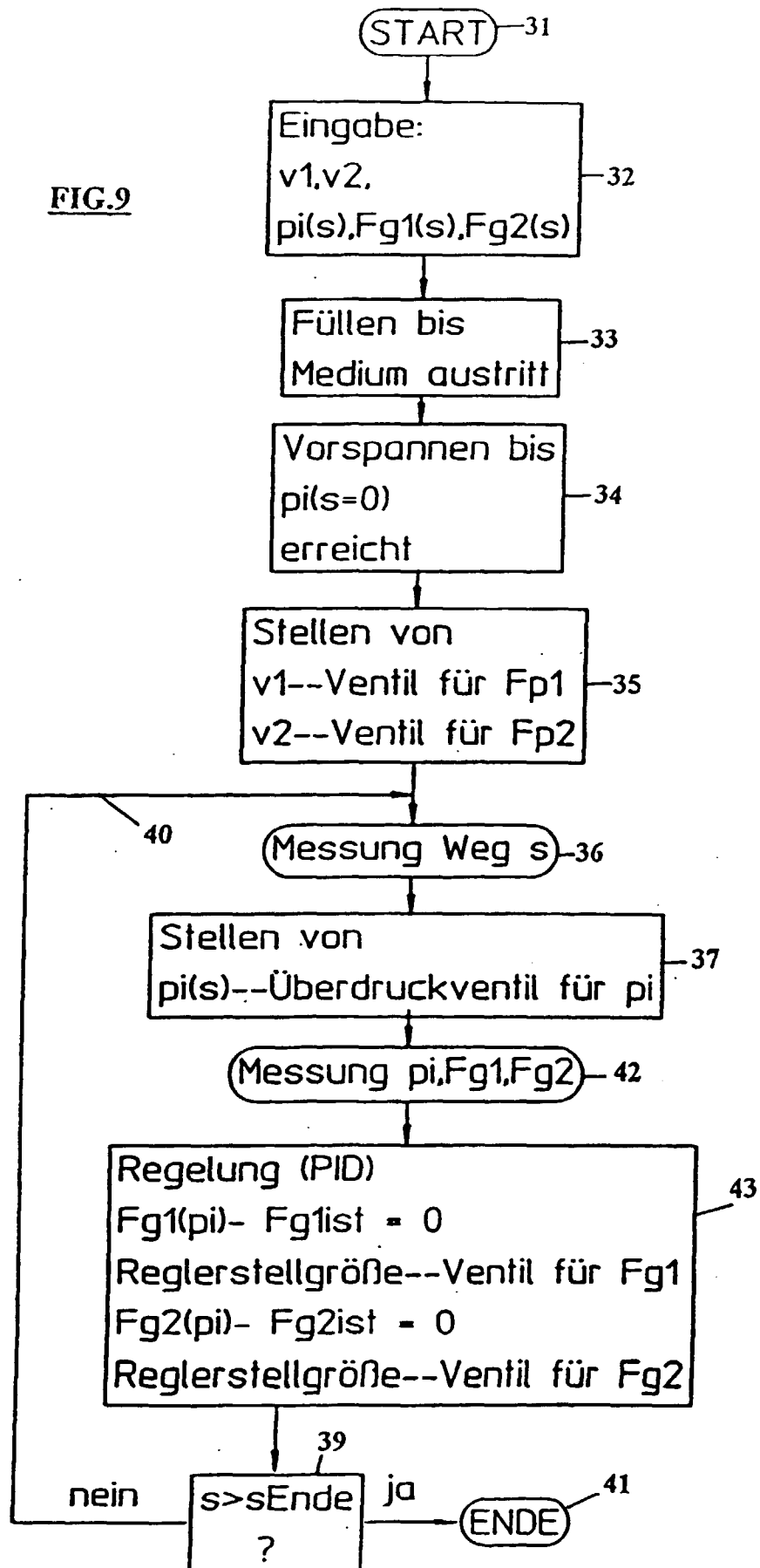


FIG.10

