



(19)  
Bundesrepublik Deutschland  
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 699 11 066 T2 2004.04.01**

(12) **Übersetzung der europäischen Patentschrift**

(97) **EP 1 149 330 B1**

(51) Int Cl.7: **G05B 19/4097**

(21) Deutsches Aktenzeichen: **699 11 066.1**

(86) PCT-Aktenzeichen: **PCT/CA99/01087**

(96) Europäisches Aktenzeichen: **99 972 317.4**

(87) PCT-Veröffentlichungs-Nr.: **WO 00/29918**

(86) PCT-Anmeldetag: **16.11.1999**

(87) Veröffentlichungstag  
der PCT-Anmeldung: **25.05.2000**

(97) Erstveröffentlichung durch das EPA: **31.10.2001**

(97) Veröffentlichungstag  
der Patenterteilung beim EPA: **03.09.2003**

(47) Veröffentlichungstag im Patentblatt: **01.04.2004**

(30) Unionspriorität:  
**108844 P 18.11.1998 US**

(84) Benannte Vertragsstaaten:  
**AT, BE, CH, CY, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT,  
LI, LU, MC, NL, PT, SE**

(73) Patentinhaber:  
**Alcan International Ltd., Montreal, Quebec, CA**

(72) Erfinder:  
**MACEWEN, Stuart, Inverary, CA; WU, Pei-Dong,  
Kingston, CA**

(74) Vertreter:  
**HOFFMANN · EITLE, 81925 München**

(54) Bezeichnung: **VERFAHREN ZUM MODELLIEREN DER FORMUNG EINES ANISOTROPISCHEN MATERIALS**

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**

## TECHNISCHES GEBIET

[0001] Die vorliegende Erfindung betrifft allgemein das Gestalten von verformbaren Materialien und genauer gesagt ein Verfahren zum Formen einer Metallbahn in nützliche Artikel, wobei Werkzeug ausgestaltet wird unter Verwendung von mathematischen Modellen, die auf den Techniken der Finite Elemente Analyse (FEA) beruhen, um Formvorgänge, die Werkzeuggestaltung und die Produktleistung der geformten Artikel zu optimieren.

## STAND DER TECHNIK

[0002] Viele Artikel werden hergestellt durch Stanzen, Pressen oder Lochen eines Basismaterials, um es in ein Stück oder ein Element zu verformen, das eine nützliche Gestalt und Funktion hat. Die vorliegende Erfindung befasst sich mit dem mathematischen Modellieren der Mechanik eines solchen Materialflusses und einer solchen Materialverformung und insbesondere mit der Verformung von Materialbahnen aus Metall (beispielsweise Aluminium) unter Verwendung von Werkzeugen und Formen, um eine große Bandbreite an Produkten herzustellen, von Getränkedosen bis hin zu Komponenten für Automobilanwendungen.

[0003] Beim Entwickeln der Gestalt eines Produkts wie beispielsweise einer Getränkedose ist es wichtig, zu verstehen, wie der Verformungsvorgang den Rohling aus der Metallmaterialbahn beeinflussen wird. Die Finite-Elemente-Analyse, die von verschiedenen Unternehmen zur Verfügung gestellt wird, kann verwendet werden, um die Plastizität, das Fließen und die Verformung zu analysieren, um Formvorgänge, Werkzeugausgestaltungen und die Produktleistungsfähigkeit im Produktdesign zu optimieren. Diese Modelle können zu einem Werkzeug führen, das die Qualität eines Produkts verbessert und auch seine Kosten reduziert. Die Vorhersagekraft solcher Finite-Elemente-Modelle wird weitestgehend durch die Art und Weise bestimmt, in welcher das Materialverhalten darin beschrieben ist.

[0004] Um die Komplexität des Modellierens des Verformungsvorgangs zu würdigen, ist es hilfreich, einige grundlegende Konzepte der mechanischen Metallurgie zu verstehen, einschließlich der Konzepte der Streckgrenze, der Kaltverfestigung und des Beanspruchungsweges.

[0005] Wenn eine externe Belastungseinrichtung wie beispielsweise eine Zugtestmaschine ein Metall verformt, ist die anfängliche Antwort elastisch mit einer linearen Beziehung zwischen der Belastung und der Beanspruchung.

[0006] Bei einem bestimmten Wert der Belastung, bestimmt durch die Mikrostruktur des Metalls, beginnt die plastische Verformung, und die Antwort ist nicht linear und weist elastische und plastische Verformung auf. Die Streckgrenze definiert die Festigkeit des Metalls an dem Punkt, an dem die plastische Verformung beginnt.

[0007] Eine Verformung bis jenseits der Streckgrenze ist durch die Kaltverfestigung charakterisiert, die dazu führt, dass die Belastung mit einer absinkenden Geschwindigkeit ansteigt, bis ein Fehlermechanismus eingreift und die Probe zerbricht. So sind der Wert der Streckgrenze und die Kaltverfestigungskurve die beiden fundamentalen Einheiten, die die plastische Verformung von Metallen definieren.

[0008] Das Formen einer Metallmaterialbahn in industrielle oder Verbraucherprodukte (beispielsweise Blechdosen und Automobilkomponenten) geschieht unter multiaxialen Beanspruchungsbedingungen, nicht mit dem einfachen oben beschriebenen Weg mit einer einzigen Achse (Zugtest). In solchen Fällen wird die Verformung durch den Beanspruchungsweg beschrieben. Der Beanspruchungsweg wird durch den plastischen Beanspruchungstensor definiert.

[0009] Ein Tensor ist eine mathematische Einheit, die beim Beschreiben von verschiedenen physikalischen Eigenschaften nützlich ist. Die meisten physikalischen Eigenschaften können entweder als Skalar, als Vektor oder als Tensor ausgedrückt werden.

[0010] Eine Skalargröße ist eine, die mit einer einzigen Zahl spezifiziert werden kann (beispielsweise Temperatur oder Masse), während eine Vektorgröße eine Größe ist, die zwei Werte erfordert, beispielsweise Größe und Richtung (beispielsweise Geschwindigkeit oder Kraft).

[0011] Eine Tensorgröße ist eine höherwertige Einheit, die mehr als zwei Werte erfordert, d. h. mehr als eine einzige Größe und Richtung. Beispielsweise ist ein Beanspruchungstensor ein Feld mit  $3 \times 3$  Werten, wobei jeder Ausdruck definiert ist durch die auf eine gegebene Ebene in einer gegebenen Richtung einwirkende Beanspruchung. Da zwei Richtungsosini erforderlich sind für Transformationen, ist der Beanspruchungstensor ein Tensor zweiter Ordnung.

[0012] Der Tensor der plastischen Beanspruchung (oder Beanspruchungsgeschwindigkeit) ist ein Tensor zweiter Ordnung, der als  $3 \times 3$  Matrix ausgedrückt werden kann und in Hauptachsen die folgende Form hat:

$$\begin{matrix} a & 0 & 0 \\ 0 & b & 0 \\ 0 & 0 & c \end{matrix}$$

Gemeinsame Beanspruchungswege und ihre zugehörigen Werte für die Komponenten des Tensors der plastischen Beanspruchung sind wie folgt:

<u>BEANSPRUCHUNGSWEG</u>	a	b	c
Spannung entlang einer Achse	-0,5	1	-0,5
Kompression entlang einer Achse	0,5	-1	0,5
Spannung entlang zweier Achsen	0,5	0,5	-1
Beanspruchungsspannung in der Ebene	0	1	-1
Beanspruchungskompression in der Ebene	0	-1	1

[0013] Die Konzepte der Belastungs-Beanspruchungs-Kurve entlang einer Achse werden auf die multiaxiale Plastizität erweitert durch Definieren einer effektiven Belastung und einer effektiven Beanspruchung  $\sigma_{\text{eff}}$  und  $\epsilon_{\text{eff}}$ , die Funktionen der Komponenten der Tensoren der Belastung und der plastischen Beanspruchung sind. Die Konzepte der Streckgrenze und der Kaltverfestigung werden dann erweitert auf multiaxiale Zustände durch die Verwendung von  $\sigma_{\text{eff}}$  und  $\epsilon_{\text{eff}}$  anstelle des  $\sigma$  und  $\epsilon$  des einachsigen Falls.

[0014] Insbesondere ist die effektive Belastung gegeben durch die zweite Invariante des Belastungstensors, und die Plastizität wird entweder als  $J_2$  oder als von Mises bezeichnet.

[0015] Für eine isotropische Materialbahn aus Metall hängen die Plastizitätseigenschaften nicht von der Richtung oder dem Beanspruchungsweg ab, und die Beanspruchungsbelastungskurve gemäß einer Achse ist allein erforderlich, um das Formen der Materialbahn zu einem Produkt zu kennzeichnen. Wenn eine Materialbahn aus Aluminium aufgerollt wird, ist sie jedoch anisotropisch, was bedeutet, dass einige der mechanische Eigenschaften nicht in allen Richtungen gleich sein werden.

[0016] Weil eine aufgerollte Materialbahn anisotropisch ist, hängen sowohl die Streckgrenze als auch die Kaltverfestigung sowohl von der Richtung in der Materialbahn als auch von dem Beanspruchungsweg ab. Beispielsweise liegt bei einem Material für den Körper eine Aluminiumdose die Belastungsbeanspruchungskurve für eine Schnittprobe, deren Zugachse in Walzrichtung liegt, unterhalb der für eine Schnittprobe in der Querrichtung. Unter multiaxialen Belastungsbedingungen muss man nun das Konzept eines Streckpunkts durch das einer Streckoberfläche ersetzen, welche in dem multidimensionalen Belastungsraum begrenzt zwischen der elastischen und plastischen Antwort definiert.

[0017] Die Kaltverfestigung manifestiert sich selbst als Anstieg im Abstand vom Ursprung der Belastung hin zu einem Punkt auf der Streckoberfläche. Man muss also auch die Möglichkeit in Betracht ziehen, dass die Kaltverfestigungsgeschwindigkeit von dem Beanspruchungsweg abhängen kann. So verändert die Kaltverfestigung nicht nur die Größe der Streckoberfläche, sondern auch ihre Gestalt.

[0018] Die Anisotropie von Materialbahnen wird bestimmt durch die kristallographische Textur, d. h. durch die Orientierungen der Kristalle, die die Materialbahn bilden. Da die einzelnen Kristalleigenschaften sehr anisotropisch sind, hängt die Anisotropie der Materialbahn von der Verteilung von Orientierungen der Kristalle ab, die sie bilden. Daher ist die Orientierungsverteilungsfunktion (Orientation Distribution Function, ODF) eine fundamentale Eigenschaft der Materialbahn. Es gibt verschiedene Arten von Analyseprogrammen, die die kristallographische Textur verwenden.

[0019] Die kristallographische Textur der Materialbahn wird in Form von Polfiguren experimentell unter Verwendung der Röntgenstrahlen- oder Neutronenbrechung erhalten. Die ODF Tabelle und die Gewichtstabelle werden aus den Polfigurendaten berechnet. Letztere ist insbesondere wichtig, da sie die Volumenfraktion von Kristallen mit einer bestimmten Orientierung bestimmt. Typischerweise werden die Gewichte für zumindest 600 diskrete Orientierungen bestimmt durch die Analyse von experimentellen Brechungsdaten, und sie bieten die wichtigsten Eingabedaten für Berechnungen der Kristallplastizität.

[0020] Eine Analysetechnik, die die kristallographische Textur verwendet, ist der Materialpunktsimulator (MPS), der die Kristallplastizitätstheorie verwendet, um die Antwort einer kleinen Menge von Material zu berechnen, das einem spezifizierten Beanspruchungsweg unterliegt. Die Antwort des Aggregats wird aus den gewichtete Antworten jedes der Kristalle berechnet, die sich darin befinden. Streckgrenzen- und Kaltverfestigungsparameter der einzelnen Kristalle werden bestimmt durch einen iterativen Vorgang, um eine Vorhersage der Simulation an eine gemessene Belastungsbeanspruchungskurve (allgemein mit einachsiger Zugspannung oder Druckbeanspruchung) in Übereinstimmung mit zu bringen.

[0021] Wenn die Eigenschaften der einzelnen Kristalle bestimmt sind, kann das Belastungsbeanspruchungsverhalten für jeden gewünschten Beanspruchungsweg berechnet werden. Zusätzlich zu der herkömmlichen Kaltverfestigung beinhalten die Berechnungen normalerweise die Entwicklung der Textur während der Verformung entlang des Beanspruchungswegs. Der Vergleich von gemessenen und vorhergesagten Texturen nach der Verformung dient dann als hauptsächliches Mittel zur Validierung der Materialpunktsimulatoren.

[0022] Eine weitere Analysetechnik, die verwendet wird, um das Formen und die Leistungsfähigkeit von Produkten aus einer Materialbahn zu modellieren, ist die Finite-Elemente-Analyse (FEA). Eine FEA unterteilt die Materialbahn in eine Anzahl von Elementen, typischerweise zwischen einigen hundert für eine einfache Analyse bis 100.000 oder mehr für komplexe Teile und Formvorgänge.

[0023] Das zum Formen eines Teils verwendete Werkzeug wird auch vermascht, und der Kontakt zwischen dem Werkzeug und der Materialbahn wird ermöglicht, so dass die simulierte Bewegung des Werkzeugs in dem Modell die Materialbahn verformt und ein virtuelles Element macht, genau wie ein wirkliches Werkzeug in einer Anlage ein Bauteil herstellt. Daher ist es nicht notwendig, a priori den Beanspruchungsweg zu kennen, dem jedes Element während des Formvorgangs folgt; es ist einfach eine Antwort auf die Bewegung des Werkzeugs.

[0024] Beispiele für die Verwendung der FEA zum Ausbilden von Produkten aus einer Materialbahn sind in den US-Patenten Nr. 5,128,877, 5,379,229, 5,390,127 sowie 5,402,366 gegeben. Die ersten drei dieser Patente offenbaren Verfahren zum Unterstützen von Formwerkzeugen für Materialbahnen aus Metall, die das Darstellen der Materialbahn als Netz und das Einschließen von mehreren Knoten und zugehörigen Elementen beinhalten. Ein Computer bestimmt den Belastungszustand eines Stichprobenpunkts auf der Basis einer inkrementellen Verformungstheorie der Plastizität (die beschriebene "Auslenkungsmethode" ist eine FEA). Das vierte Patent offenbart ein Verfahren zum Simulieren eines Formvorgangs mittels FEA und eines Partikelflussmodells. Diese Ansätze unterscheiden in keiner Weise zwischen den anisotropen und den isotropen Eigenschaften der Materialbahn.

[0025] Die Plastizitätseigenschaften eines individuellen Elements (oder genauer gesagt bei jedem Integrationspunkt innerhalb eines Elements) sind definiert durch die Definitionen der Streckoberfläche und das Härtungsgesetz, die die wichtigen Materialdefinitionen aufweisen, die für die Analyse erforderlich sind.

[0026] Die große Mehrheit der FEA verwenden isotropische, von Mises Plastizität für die erste und eine einfache einachsige Belastungsbeanspruchungskurve für letzteres.

[0027] Eine Schwierigkeit besteht oft darin, dass die Beanspruchungen für einen Formvorgang die bei der Laborcharakterisierung der Materialbahn erzielten überschreiten können (in manchen Fällen um einen Faktor von 10 oder mehr). In einem solchen Fall muss der FE Analytiker den Code mit einer Extrapolation der experimentellen Daten versehen, und zwar für Beanspruchungen, die über die hinausgehen, die während des Formvorgangs von dem Werkzeug aufgebracht wurden. Diese Anforderung ist nicht trivial, da die Härtung sowohl von der Beanspruchung als auch von dem Beanspruchungsweg abhängt, aufgrund der Entwicklung der Textur während des Formvorgangs.

[0028] In vielen Fällen und insbesondere bei einer Materialbahn aus einer Aluminiumlegierung sollte die Anisotropie in eine FEA eingeschlossen werden. Zwei grundlegende Optionen gibt es dafür. In den letzten 50 Jahren sind verschiedene analytische Funktionen vorgeschlagen worden, um die der isotropischen von Mises zu ersetzen. Bemerkenswert sind Formulierungen von Hill 1948, 1979 und 1990, von Karafillis & Boyce 1993 und von Barlat 1989, 1991 und 1997. Der analytische Funktionsansatz hat jedoch zwei Schwierigkeiten.

[0029] Zunächst kann die Funktion, da sie ein relativ einfacher, geschlossenformiger algebraischer Ausdruck ist, nur eine Annäherung an die Gestalt der tatsächlichen Streckoberfläche in dem sechsdimensionalen Belastungsraum sein. Tatsächlich ist in vielen Fällen der zulässige Belastungsraum für die analytischen Streckfunktionen reduziert worden auf solche, die für die Belastungsverformung in der Ebene geeignet sind.

[0030] Zweitens müssen die Konstanten in diesen Funktionen experimentell bestimmt werden, und zwar aus Labormessungen der Anisotropie der Streckgrenze und/oder des  $r$ -Werts (des Verhältnisses der Breite zur Dickenbeanspruchung in einem Zugfestigkeitstest) für verschiedene Beanspruchungswege und Richtungen in der Materialbahn. Typischerweise müssen zumindest fünf experimentelle Messungen gemacht werden, um die Konstanten einer analytischen Streckfunktion zu bewerten.

[0031] Die zweite Option ist, die Kristallplastizität zu verwenden, um die Eigenschaften jedes Elements zu bestimmen. Im Grunde bedeutet dies, eine Materialpunktsimulatorberechnung für jeden Integrationspunkt jedes Elements bei jeder Iteration der FEA durchlaufen zu lassen. Während die Verwendung von analytischen Funktionen die Computerberechnungszeit (CPU Zeit) um ungefähr einen Faktor von zwei oder drei verglichen mit einer von Mises Berechnung steigert, kann die Verwendung einer vollständig gekoppelten Kristallplastizität die CPU Zeit um Größenordnungen steigern, und momentan ist sie nur für die kleinsten Modelle machbar und nicht praktikabel für Simulationen eines wirklichen Formvorgangs.

[0032] Daher wäre es wünschenswert, ein Verfahren vorzusehen, das die Betrachtung der Anisotropie ein eine FEA einschließt, ohne die enormen Kosten des Erfordernisses einer vollständigen Kristallplastizitätsberechnung für jede Iteration (oder sogar jede zehnte oder hundertste Iteration) einer Analyse zu bezahlen. Es wäre außerdem vorteilhaft, wenn das Verfahren eine Kennzeichnung der Streckoberfläche und der Härtung

beinhalten könnte, die in einem sechsdimensionalen Befehlsraum definiert war, der mittels der FEA simuliert wurde.

#### OFFENBARUNG DER ERFINDUNG

[0033] Es ist daher ein Ziel der vorliegenden Erfindung, ein verbessertes Verfahren zum Ausbilden einer Materialbahn aus Metall zu verschiedenen Artikeln zu verschaffen.

[0034] Ein anderes Ziel der vorliegenden Erfindung ist es, ein solches Verfahren zu schaffen, welches mathematische (Berechnungs-)Modelle verwendet, um die Ausgestaltung der Werkzeuge und die Formvorgänge zu optimieren, um den geformten Artikeln die gewünschten Eigenschaften zu verleihen.

[0035] Ein noch weiteres Ziel der vorliegenden Erfindung ist es, ein solches mathematisches Modell zu schaffen, das auf der Finite-Elemente-Analyse (FEA) beruht und die anisotropen Eigenschaften der Materialbahn aus Metall in Betracht zieht, ohne übermäßige Berechnungszeit zu erfordern.

[0036] Das hauptsächliche Ziel der vorliegenden Erfindung ist es, ein Verfahren zu schaffen, um die Anisotropie in eine Finite-Elemente-Analyse einzubringen, und zwar ohne die normale Strafe hinsichtlich der CPU Zeit für diesen Vorgang, durch Entkoppeln der Anisotropieberechnungen von den Finite-Elemente-Berechnungen.

[0037] Gemäß einem ersten Aspekt der Erfindung wird ein Verfahren zum Herstellen eines Artikels geschaffen, das die folgenden Schritte aufweist:

- (a) Erzeugen eines Rohlings (**12**) aus einem Material mit anisotropen mechanischen Eigenschaften;
- (b) Ausgestalten von Werkzeug (**14**) zur Herstellung des Artikels durch Vorhersagen des Flusses und der Verformung des Rohlings mittels einer Formanalyse (**52**), bei welcher eine isotrope Finite-Elemente-Analyse (isotrope FEA) des Rohlings zusammen mit einer separaten entkoppelten Analyse der anisotropen Verformungseigenschaften des Rohlings verwendet wird; und
- (c) Ausformen des Artikels aus dem Rohling unter Verwendung des im Schritt (b) ausgestalteten Werkzeugs.

[0038] Gemäß einem zweiten Aspekt der Erfindung wird ein Computersystem mit einer Speichereinrichtung und einer mit der Speichereinrichtung verbundenen Bearbeitungseinheit geschaffen, wobei Programmmittel in der Speichereinrichtung gespeichert sind und von der Bearbeitungseinheit ausführbar sind, um den Strom und die Verformung eines Rohlings aus einem Material mit anisotropen Verformungseigenschaften vorherzusagen, und zwar unter Verwendung einer Formanalyse, bei welcher eine isotrope Finite-Elemente-Analyse (isotrope FEA) des Rohlings zusammen mit einer separaten, entkoppelten Analyse der anisotropen Verformungseigenschaften des Rohlings verwendet wird.

[0039] Gemäß einem dritten Aspekt der Erfindung wird ein Computerprogrammprodukt geschaffen, mit einem von einem Computer lesbaren Speichermedium und mit Programmmitteln, die in dem Speichermedium gespeichert sind, um den Strom und die Verformung eines Rohlings aus einem Material mit anisotropen Verformungseigenschaften vorherzusagen, und zwar unter Verwendung einer Formanalyse, bei welcher eine isotrope Finite-Elemente-Analyse (isotrope FEA) des Rohlings zusammen mit einer separaten, entkoppelten Analyse der anisotropen Verformungseigenschaften des Rohlings verwendet wird.

[0040] In einer Ausführungsform können bei einer Analyse eines Formvorgangs die folgenden vier Schritte verwendet werden:

1. Einachsige Zugspannungs- (oder Kompressions-)Kurven und kristallographische Texturdaten, die experimentell von der Materialbahn erhalten wurden, werden verwendet, um die Konstanten in einem geeigneten Kristallplastizitäts-Materialpunktsimulator zu kalibrieren. Der Materialpunktsimulator kann dann verwendet werden, um wirksame Belastungsbeanspruchungskurven für eine Vielzahl von möglichen Beanspruchungswegen zu erzeugen. Diese werden einen Satz mit einer oberen und einer unteren Grenze bilden.
2. Die Finite-Elemente-Analyse wird vorzugsweise durchgeführt mit einem lokalen Koordinatensystem, das der Festkörperbewegung der Materialbahn während des Formens folgt. Auf diese Art und Weise wird der Tensor der plastischen Beanspruchung (oder Beanspruchungsgeschwindigkeit) immer in einem Koordinatensystem definiert sein, das aus Richtungen parallel zur Walzrichtung, rechtwinklig zur Walzrichtung und durch die Dicke der Materialbahn hindurch besteht. Die Schritte 1 und 2 definieren die für die FEA benötigte Anisotropie.
3. Der Beanspruchungsweg muss bestimmt werden für jedes finite Element bei jedem konvergierten Schritt (oder in vorbestimmten Abständen in der Analyse). Dies kann auf verschiedene Art und Weise erzielt werden, mit steigender Komplexität:
  - durch Überprüfen der Geometrie des Werkzeugs und des Formvorgangs (beispielsweise der Walz- oder Plättvorgänge) oder
  - durch Durchführen einer isotropischen Analyse mit einer einzigen Belastungsbeanspruchungskurve (sprich einachsige Zugspannung) des Formvorgangs und Extrahieren des erforderlichen Beanspruchungswegs in einem Nachbearbeitungsmodus für jedes Element, oder
  - durch Berechnen bei jedem konvergierten Schritt der Analyse eines Parameters, der von dem bestimmten Zu-

stand des Beanspruchungstensors für jedes Element abhängt.

4. Eine geeignete Belastungsbeanspruchungskurve für jedes Element wird dann aus der Kurvenfamilie ausgewählt, die im Punkt (1) oben beschrieben ist. Im einfachsten Fall wird die untere Grenze für alle Elemente ausgewählt (unabhängig von ihren tatsächlichen Wegen). Dies gibt eine Analyse der unteren Grenzen mit den unteren Grenzwerten für die Belastungen bei den Materialbahn- und Werkzeuglasten. Die nächste Stufe der Bildung ist, Gruppen von Elementen und gleichen Beanspruchungswegen zu definieren (beispielsweise eines Satzes mit der Kuppel eines Bauchs) und jeder Gruppe eine der Belastungsbeanspruchungskurven aus dem in (1) beschriebenen Satz zuzuordnen.

[0041] Das Verfahren wird als analog zu dem Definieren von temperaturabhängigen Belastungsbeanspruchungskurven in einem finiten Elementmodell angesehen, wobei die den Beanspruchungsweg definierenden Parameter die Stelle der Temperatur einnehmen.

[0042] Das Ergebnis ist ein Finite-Elemente-Modell, das eng mit experimentell erzeugten Daten übereinstimmt und viel weniger Bearbeitungszeit (CPU-Zeit) verglichen mit herkömmlichen Verfahren erfordert.

[0043] Die oben bereits erwähnten sowie weitere Ziele, Merkmale und Vorteile der Erfindung ergeben sich aus der nun folgenden ausführlich beschriebenen Erläuterung.

#### KURZE BESCHREIBUNG DER ZEICHNUNGEN

[0044] Die neuen Merkmale, die als kennzeichnend für die Erfindung angesehen werden, sind in den anliegenden Ansprüchen dargelegt. Die Erfindung selbst sowie eine bevorzugte Ausführungsform, weitere Ziele und Vorteile der Erfindung werden jedoch am besten verstanden mit Bezug auf die nun folgende ausführliche Beschreibung einer beispielhaften Ausführungsform, wenn diese zusammen mit den begleitenden Zeichnungen gelesen wird, wobei:

[0045] **Fig. 1** eine perspektivische Ansicht eines zum Ausbilden einer Materialbahn aus Metall mit anisotropen Eigenschaften verwendeten Walzvorgangs ist, welche Eigenschaften in eine Analyse von Werkzeug eingeschlossen sind, die gemäß der vorliegenden Erfindung durchgeführt wird;

[0046] **Fig. 2** ist eine Schnittansicht von Werkzeug zum Ausbilden eines Blechdosenbodens aus einer Materialbahn aus einer Aluminiumlegierung, wobei eine Finite-Elemente-Analyse durchgeführt wird, um die Werkzeugausgestaltung und den Formvorgang zu optimieren unter Verwendung des neuen Ansatzes zum Beschreiben der anisotropen Materialeigenschaften des Rohlings gemäß der vorliegenden Erfindung;

[0047] **Fig. 3** ist ein Diagramm, das den logischen Fluss beim Durchführen einer Finite-Elemente-Analyse (FEA) eines Formmodells gemäß der vorliegenden Erfindung darstellt, so dass anisotrope Eigenschaften der Metallmaterialbahn von der Analyse entkoppelt sind;

[0048] **Fig. 4** ist ein Blockdiagramm eines Computersystems, das dazu verwendet werden kann, die FEA gemäß der vorliegenden Erfindung durchzuführen; und

[0049] **Fig. 5** ist ein Diagramm, das den logischen Fluss beim Ausgestalten des Werkzeugs und der Formvorgänge darstellt, die erforderlich sind, um ein Bauteil mit optimalen Eigenschaften unter Verwendung des Plastizitätsmodells gemäß der vorliegenden Erfindung herzustellen.

#### BESTE ART UND WEISE ZUM DURCHFÜHREN DER ERFINDUNG

[0050] Mit Bezug auf die Zeichnungen und insbesondere auf **Fig. 1** ist die Ausbildung einer Metallmaterialbahn **10** mit einem herkömmlichen Walzvorgang hergestellt. Wie weiter unten beschrieben ist, können verschieden Artikel aus der Materialbahn **10** gebildet werden. Die Formvorgänge und die Leistungsfähigkeit solcher Produkte können gemäß der vorliegenden Erfindung optimiert werden. Die Materialbahn **10** kann beispielsweise aus gewalzter Aluminiumlegierung bestehen. Die mechanischen (Verformungs-)Eigenschaften der Materialbahn **10** sind anisotropisch als Ergebnis der Orientierungen der Kristalle, die die Materialbahn ausmachen. So variieren die mechanischen Eigenschaften für unterschiedliche Richtungen in der Materialbahn, wie durch die drei Pfeile in **Fig. 1** angedeutet ist.

[0051] Mit weiterem Bezug auf **Fig. 2** wird ein Rohling **12**, der aus der Materialbahn **10** ausgeschnitten ist, mit einem Werkzeug **14** zu einem Artikel geformt. Die Werkzeugausgestaltung und der Vorgang sowie die Eigenschaften des hergestellten Produkts können durch die FEA gemäß der vorliegenden Erfindung optimiert werden. In der dargestellten Ausführungsform, einer generischen Darstellung des zum Herstellen eines Blechdosenbodens verwendeten Werkzeugs, besteht das Werkzeug **14** allgemein aus einem Stempel **18**, einem Gesenk (oder Domer Plug) **16** und einem Rückhaltering **20**. Das Werkzeug **14** kann auch andere herkömmliche Komponenten wie beispielsweise eine Nocke oder einen Kolben (nicht dargestellt) beinhalten, die bzw. der an dem Stempel **18** angebracht ist, wodurch der Stempel **18** in das Gesenk **16** hinein gezwungen werden kann, um den Rohling **12** in die gewünschte Gestalt zu bringen.

[0052] Die Komponenten des Werkzeugs **14** können konstruiert werden unter Verwendung von herkömmli-

chen Materialien, insbesondere Werkzeugstahl oder Tungsten-Karbid. In der vorliegenden Erfindung Implementierung ist das Werkzeug dazu ausgestaltet, den Rohling **12** in die Bodenfläche einer Getränkedose zu verformen. Fachleuten wird bewusst sein, dass die vorliegende Erfindung nicht auf dieses Beispiel beschränkt ist, da sie zum Ausgestalten von Werkzeug für eine große Bandbreite von fertigen Produkten und Bauteilen mit verschiedenen Größen und Gestalten verwendet werden kann.

[0053] Die vorliegende Erfindung schafft ein neues Berechnungsmodell zum Simulieren der Formung und des Flusses von Materialien, insbesondere von Rohlingen aus einer Metallmaterialbahn wie beispielsweise des Rohlings **12**. Dieses Modell kann dann verwendet werden, um das Werkzeug optimal auszugestalten und Materialspezifikationen (wie beispielsweise die Dicke des Rohlings) auszuwählen.

[0054] Wie oben erwähnt, verwenden herkömmliche Analysetechniken die Finite-Elemente-Analyse, um die Plastizität und Formbarkeit zu modellieren. Die vorliegende Erfindung verbessert diese Techniken durch Einschließen von anisotropen Eigenschaften des Rohlings in ein Finite-Elemente-Modell. Das neue Berechnungsmodell erzielt diesen Effekt durch Entkoppeln der anisotropen Berechnungen von der FEA, wie noch beschrieben wird. Das Ergebnis ist ein Modell, das nicht nur eng mit experimentell erzeugten Daten übereinstimmt, sondern das auch viel weniger Berechnungszeit (CPU Zeit) benötigt, um bis zum Ende durchzulaufen, als herkömmliche Modelle, die das Ausbilden einer anisotropen Materialbahn simulieren, und daher ist das Modell auch viel kostengünstiger in der Durchführung.

[0055] Gemäß einer beispielhaften Implementierung der vorliegenden Erfindung ist eine Materialpunktsimulatorberechnung von der FEA entkoppelt, wodurch ein isotropes FEA Plastizitätsmodell die Anisotropie aufnehmen kann. wie oben erwähnt, ist es das Ziel der FEA, die Antwort eines Produkts auf externe Belastungen vorhersagen zu können, welche oft zu mechanischer Instabilität und einem Durchschnappen oder Wölben führen. Wenn eine validierte Leistungsvorhersage oder Verhaltensvorhersage erforderlich ist, muss ein Formmodell vor dem Leistungs- oder Verhaltensmodell durchlaufen, um das Dünnenwerden des Metalls, Stufen der Kaltverfestigung und verbleibende Belastungen vor dem Aufbringen der Leistungstestlast zu berechnen.

[0056] Für sowohl das Formmodell als auch das Leistungsmodell, die zusammen die FEA bilden, ist die Auswahl der geeigneten Beschreibung des Materialverhaltens sehr wichtig für die Vorhersagefähigkeit der FEA. Gemäß einer beispielhaften Implementierung der vorliegenden Erfindung ist eine Materialpunktsimulator-(MPS)Berechnung entkoppelt von der FEA, wodurch ein isotropes (von Mises) Plastizitätsmodell die Materialanisotropie erfassen kann.

[0057] MPS Berechnungen erfordern experimentelle Messungen der kristallographischen Textur und zumindest einer Belastungsbeanspruchungskurve, die verwendet werden, um das Härtungsgesetz in dem MPS zu kalibrieren. Der so kalibrierte MPS berechnet einen Satz von Belastungsbeanspruchungskurven für verschiedene Beanspruchungswege, die bei Formvorgängen normalerweise vorliegen. Dieser Satz von Kurven wird wohl definierte obere und untere Grenzen haben.

[0058] Daher liegt die geeignete Kurve für jeden spezifizierten Beanspruchungsweg zwischen zwei wohldefinierten Grenzen. Die FEA Berechnungen erfordern eine Definition der Geometrie und des Weges des Werkzeugs (im allgemeinen erzielt durch ein geeignetes CAD Paket), das Vermaschen des Werkzeugs und des Rohlings (beispielsweise der zu einem Bauteil zu verformenden Materialbahn), die Definition der Grenzbedingungen zwischen dem Werkzeug und dem Rohling und insbesondere die Zuweisung einer Material-Belastungsbeanspruchungskurve zu jedem Element.

[0059] Der letzte Schritt kann gemäß dieser Erfindung in zwei Arten erfolgen: vor dem Laufenlassen der Finite-Elemente-Analyse oder während der Analyse selbst. Für den ersten Fall kann die geeignete Belastungsbeanspruchungskurve für ein Element oder eine Gruppe von Elementen durch Überprüfen und Verstehen der allgemeinen Natur der Zusammenwirkung des Werkzeugs mit dem Rohling zugewiesen werden oder durch Durchführen einer isotropen Analyse (vor der gewünschten FEA), um den Beanspruchungsweg für jedes Element oder jede Gruppe von Elementen zu bestimmen und so eine Zuordnung der geeigneten Belastungsbeanspruchungswege zu ermöglichen.

[0060] Alternativ kann die Zuordnung der geeigneten Belastungsbeanspruchungskurve bei jedem konvergierten Schritt erneuert werden oder in regelmäßigen Abständen von konvergierten Schritten, während der Analyse durch in Beziehung setzen des momentanen plastischen Beanspruchungstensors für jedes Element mit einem der zuvor definierten Sätze von Belastungsbeanspruchungskurven. Das eben genannte Verfahren des Entkoppelns der Materialanisotropie von der FEA ist in **Fig. 3** zusammengefasst.

[0061] Das neue Berechnungsmodell der vorliegenden Erfindung kann mit dem beispielhaften Computersystem **30** der **Fig. 4** durchgeführt werden. Ein solches System wird zumindest eine zentrale Verarbeitungseinheit, CPU, mit einer geeigneten Menge an Random Access Memory (RAM) aufweisen und Speicherkapazität wie beispielsweise Festplatten oder Magnetbänder, IO Einrichtungen zur Verbindung mit Peripheriegeräten wie beispielsweise Bildschirmen und Druckern.

[0062] Das System kann ein Stand-alone-System sein, wie beispielsweise eine einzelne Arbeitsstation oder ein einzelner PC, oder es kann auch aus einem Satz von vernetzten CPUs **32** einschließlich eines Servers **34** bestehen (im allgemeinen mit mehrfachen CPUs) und einer Anzahl von einzelnen Arbeitsstationen oder PCs,

die verbunden sind über ein Ethernet oder ein Lichtleiternetzwerk. Die MPS- und FEA-Berechnungen können mit Software durchgeführt werden, die in den CPUs des Netzwerkes installiert ist, unter Verwendung von entweder Computercodes von dritten Parteien (beispielsweise HKS Inc. Abaqus oder LSTC LS-Dyna, aber nicht darauf beschränkt) oder bestimmte eigens entwickelte Codes.

[0063] Wie oben erwähnt, wird das hierin beschriebene neue Berechnungsmodell verwendet, um Formvorgänge, die Werkzeugausgestaltung und die Produktleistungsfähigkeit zu optimieren. Dieser Vorgang ist allgemein in **Fig. 5** dargestellt. Ein bestimmtes Werkzeugdesign für einen bestimmten Artikel wird zunächst vorgeschlagen (**50**). Der in **Fig. 3** beschriebene Vorgang, durchgeführt auf dem in **Fig. 4** beschriebenen Computersystem, wird dann auf das ursprüngliche Design angewandt (**52**). Der "virtuelle" Artikel, dessen Herstellung simuliert wird, wird dann hinsichtlich der Produktleistung analysiert (**54**). Wenn das Produkt die Spezifizierungen nicht erfüllt (**56**), müssen das Werkzeug und sein Verfahren oder seine Arbeitsweise neu ausgestaltet werden (**58**).

[0064] Wenn beispielsweise mit Bezug auf das Werkzeug **14** der **Fig. 2**, wenn der Kuppelumkehrdruck des "virtuellen" Blechdosenbodens, hergestellt durch die Formsimulation und bestimmt durch die Leistungsanalyse, zu gering wäre, könnte die Geometrie des Domer Plug und/oder die Bewegung des Stempels verändert werden, und die vollständige FEA könnte wiederholt werden. Die Schritte **50** bis **58** werden so oft wie nötig wiederholt, bis ein zufriedenstellendes Design entstanden ist. Ein wesentlicher Teil des Vorgangs ist die Validierung von Modellvorhersagen gegen ein (normalerweise das ursprüngliche) Design einer Prototyp-Komponente.

[0065] Diese Validierung schafft das Vertrauen, dass das Modell wirklich sowohl den Formvorgang als auch den Leistungsvorgang korrekt simuliert. Modifikationen am Werkzeug und am Formvorgang können dann mit einem vernünftigen Grad an Vertrauen durchgeführt werden. Wenn der in **Fig. 5** beschriebene Optimierungsvorgang vollendet ist, kann das Produktionswerkzeug hergestellt werden (**60**).

[0066] Obwohl die Erfindung mit Bezug auf bestimmte Ausführungsformen beschrieben worden ist, soll diese Beschreibung nicht in einem beschränkenden Sinn verstanden werden. Verschiedene Modifikationen der offenbarten Ausführungsformen sowie alternative Ausführungsformen der Erfindung werden Fachleuten mit Bezug auf die Beschreibung der Erfindung einfallen.

[0067] Beispielsweise könnte die vorliegende Erfindung, während sich die eben erfolgte Beschreibung auf Metallmaterialbahnen bezieht, auch verwendet werden, um die Verformung und Formbarkeit von nichtmetallischen Materialien vorherzusagen. Es wird daher in Betracht gezogen, dass solche Modifikationen gemacht werden können, ohne dass der Bereich der vorliegenden Erfindung verlassen wird, wie er in den anliegenden Ansprüchen definiert ist.

## GEWERBLICHE ANWENDBARKEIT

[0068] Das Verfahren, das die vorliegende Erfindung verkörpert, kann in der Material verarbeitenden Industrie verwendet werden.

## Patentansprüche

1. Verfahren zur Herstellung eines Artikels (**60**), mit den folgenden Schritten:

- (a) Erzeugen eines Rohlings (**12**) aus einem Material mit anisotropen mechanischen Eigenschaften;
- (b) Ausgestalten von Werkzeug (**14**) zur Herstellung des Artikels durch Vorhersagen des Flusses und der Verformung des Rohlings mittels einer Formanalyse (**52**), bei welcher eine isotrope Finite Elemente-Analyse (isotrope FEA) des Rohlings zusammen mit einer separaten entkoppelten Analyse der anisotropen Verformungseigenschaften des Rohlings verwendet wird; und
- (c) Ausformen des Artikels aus dem Rohling unter Verwendung des im Schritt (b) ausgestalteten Werkzeugs.

2. Verfahren nach Anspruch 1, wobei der Rohling im wesentlichen flach ist und aus gewalztem Blech mit anisotropen mechanischen Eigenschaften ausgebildet ist.

3. Verfahren nach Anspruch 2, wobei das gewalzte Blech ein Metallblech (**10**) ist und wobei die Formanalyse den Schritt des Berechnens der Antwort einer kleinen Menge des Rohlings unter Verwendung der Kristallplastizitätstheorie beinhaltet.

4. Verfahren nach Anspruch 3, wobei die Formanalyse die folgenden Schritte beinhaltet:

- Darstellen des Rohlings und des Werkzeugs durch Netze mit mehreren Elementen;
- Definieren eines Satzes von Beanspruchungs-Belastungs-Kurven abhängig von der Anisotropie des Rohlings unter Verwendung eines Materialpunktsimulators mit Kristallplastizität;
- Zuordnen einer geeigneten Beanspruchungsbelastungskurve aus dem Satz zu jedem Element des Rohlings;

und

Durchführen einer Finite Elemente-Analyse, um das Verhalten des Artikels und sein Verhalten nach dem Verhalten zu simulieren.

5. Verfahren nach Anspruch 4, wobei der Schritt des Definierens einer Beanspruchungsbelastungskurve für jedes Element den Schritt des Zuordnens einer Kurve zu jedem Element beinhaltet, die zwischen einer oberen Grenzkurve und einer unteren Grenzkurve liegt.

6. Verfahren nach Anspruch 5, wobei der Schritt des Zuordnens einem gegebenen Element eine bestimmte Kurve zuordnet, die aus einem Satz von vorher definierten Kurven ausgewählt ist, auf der Grundlage eines Belastungswegs des jeweiligen Wegs.

7. Verfahren nach Anspruch 5, wobei der Schritt des Zuordnens einem gegebenen Element eine bestimmte Kurve zuordnet, die durch Interpolieren zwischen zwei Kurven aus einem vorher bestimmten Satz von Kurven erhalten wird, und zwar auf der Grundlage eines momentan wiederberechneten Belastungswegs des jeweiligen Elements.

8. Computersystem (**30**) mit einer Speichereinrichtung und einer mit der Speichereinrichtung verbundenen Bearbeitungseinheit (**32**), wobei Programmmittel in der Speichereinrichtung gespeichert sind und von der Bearbeitungseinheit ausführbar sind, um den Strom und die Verformung eines Rohlings (**12**) aus einem Material mit anisotropen Verformungseigenschaften vorherzusagen, und zwar unter Verwendung einer Formanalyse (**52**), bei welcher eine isotrope Finite Elemente-Analyse (isotrope FEA) des Rohlings zusammen mit einer separaten, entkoppelten Analyse der anisotropen Verformungseigenschaften des Rohlings verwendet wird.

9. Computersystem nach Anspruch 8, wobei das Programmmittel die Antwort einer kleinen Menge des Rohlings unter Verwendung der Kristallplastizitätstheorie berechnet.

10. Computersystem nach Anspruch 9, wobei das Programmmittel weiter (i) den Rohling als Netz mit mehreren Elementen darstellt, (ii) einen Belastungsweg für jedes Element durch Finite Elemente-Analyse (FEA) vorhersagt, (iii) eine Beanspruchungsbelastungskurve für jedes Element durch Durchführen einer Materialpunktsimulatorberechnung (MPS) für jedes Element unter Verwendung seines jeweiligen Belastungswegs definiert, und (iv) eine weitere FEA für die Elemente durchführt, und zwar unter Verwendung der jeweiligen Beanspruchungsbelastungskurve für jedes Element.

11. Computersystem nach Anspruch 10, wobei das Programmmittel weiter eine Beanspruchungsbelastungskurve für jedes Element definiert, indem es jedem Element eine Kurve zuordnet, die zwischen einer oberen Grenzkurve und einer unteren Grenzkurve liegt.

12. Computersystem nach Anspruch 11, wobei das Programmmittel die untere Beanspruchungs-/Belastungs-Grenzkurve jedem der mehreren Elemente zuordnet.

13. Computersystem nach Anspruch 11, wobei das Programmmittel einem gegebenen Element weiter eine bestimmte Kurve zuordnet, die aus einem Satz von vorher definierten Kurven ausgewählt ist, und zwar auf der Basis des Belastungswegs des jeweiligen Elements.

14. Computersystem nach Anspruch 11, wobei das Programmmittel einem gegebenen Element weiter eine bestimmte Kurve zuordnet, die durch Interpolieren zwischen zwei Kurven aus einem vorher bestimmten Satz von Kurven erhalten wird, und zwar auf der Grundlage eines momentan wieder berechneten Belastungswegs des jeweiligen Elements.

15. Computerprogrammprodukt mit einem von einem Computer lesbaren Speichermedium und mit Programmmitteln, die in dem Speichermedium gespeichert sind, um den Strom und die Verformung eines Rohlings (**12**) aus einem Material mit anisotropen Verformungseigenschaften vorherzusagen, und zwar unter Verwendung einer Formanalyse (**52**), bei welcher eine isotrope Finite Elemente-Analyse (isotrope FEA) des Rohlings zusammen mit einer separaten, entkoppelten Analyse der anisotropen Verformungseigenschaften des Rohlings verwendet wird.

16. Computerprogrammprodukt nach Anspruch 15, wobei das Programmmittel die Antwort einer kleinen Menge des Rohlings unter Verwendung der Kristallplastizitätstheorie berechnet.

17. Computerprogrammprodukt nach Anspruch 16, wobei das Programmmittel weiter (i) den Rohling als Netz mit mehreren Elementen darstellt, (ii) eine Belastungsweg für jedes Element durch Finite Elemente-Analyse (FER) vorhersagt, (iii) eine Beanspruchungsbelastungskurve für jedes Element durch Durchführen einer Materialpunktsimulatorberechnung (MPS) für jedes Element unter Verwendung seines jeweiligen Belastungswegs definiert, und (iv) eine weitere FEA für die Elemente durchführt, und zwar unter Verwendung der jeweiligen Beanspruchungsbelastungskurve für jedes Element.

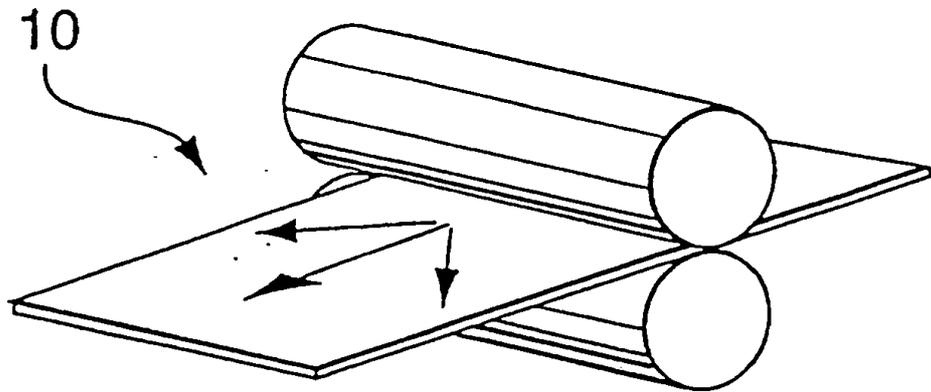
18. Computerprogrammprodukt nach Anspruch 17, wobei das Programmmittel weiter eine Beanspruchungsbelastungskurve für jedes Element definiert, indem es jedem Element eine Kurve zuordnet, die zwischen einer oberen Grenzkurve und einer unteren Grenzkurve liegt.

19. Computerprogrammprodukt nach Anspruch 18, wobei das Programmmittel die untere Beanspruchungs/Belastungs-Grenzkurve jedem der mehreren Elemente zuordnet.

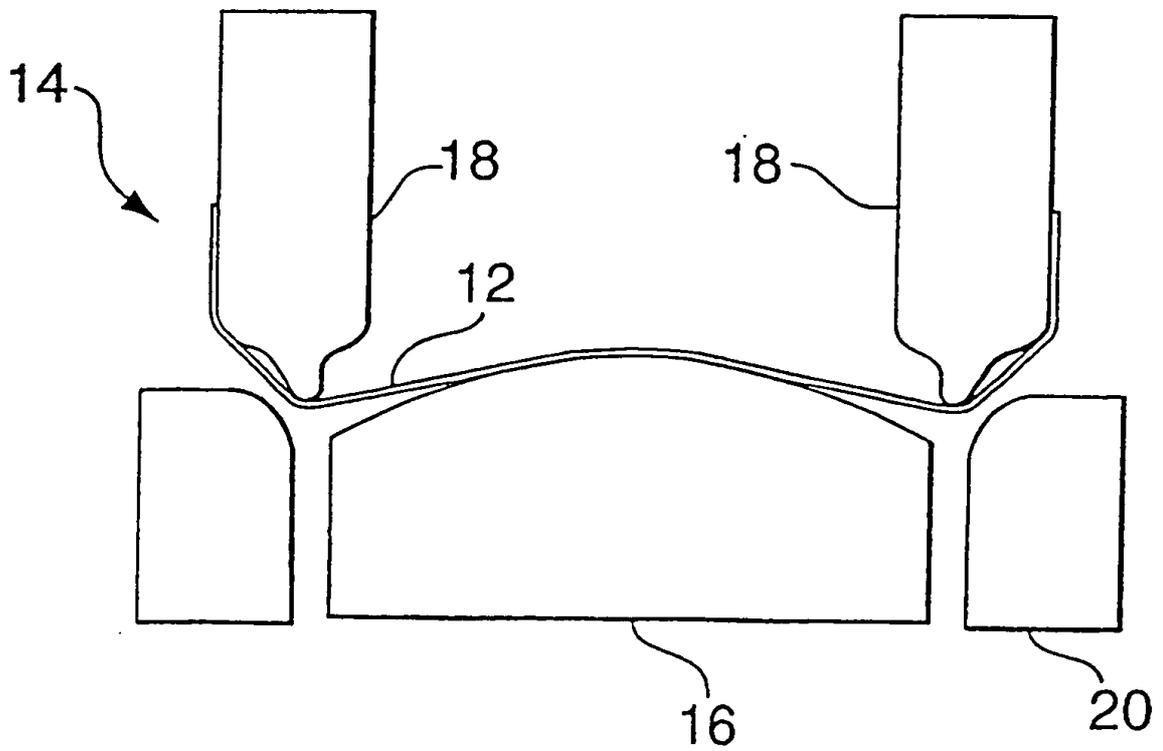
20. Computerprogrammprodukt nach Anspruch 18, wobei das Programmmittel einem gegebenen Element weiter eine bestimmte Kurve zuordnet, die aus einem Satz von vorher definierten Kurven ausgewählt ist, und zwar auf der Basis des Belastungswegs des jeweiligen Elements.

21. Computerprogrammprodukt nach Anspruch 18, wobei das Programmmittel einem gegebenen Element weiter eine bestimmte Kurve zuordnet, die durch Interpolieren zwischen zwei Kurven aus einem vorher bestimmten Satz von Kurven erhalten wird, und zwar auf der Grundlage eines momentan wieder berechneten Belastungswegs des jeweiligen Elements.

Es folgen 4 Blatt Zeichnungen



**FIG. 1**



**FIG. 2**

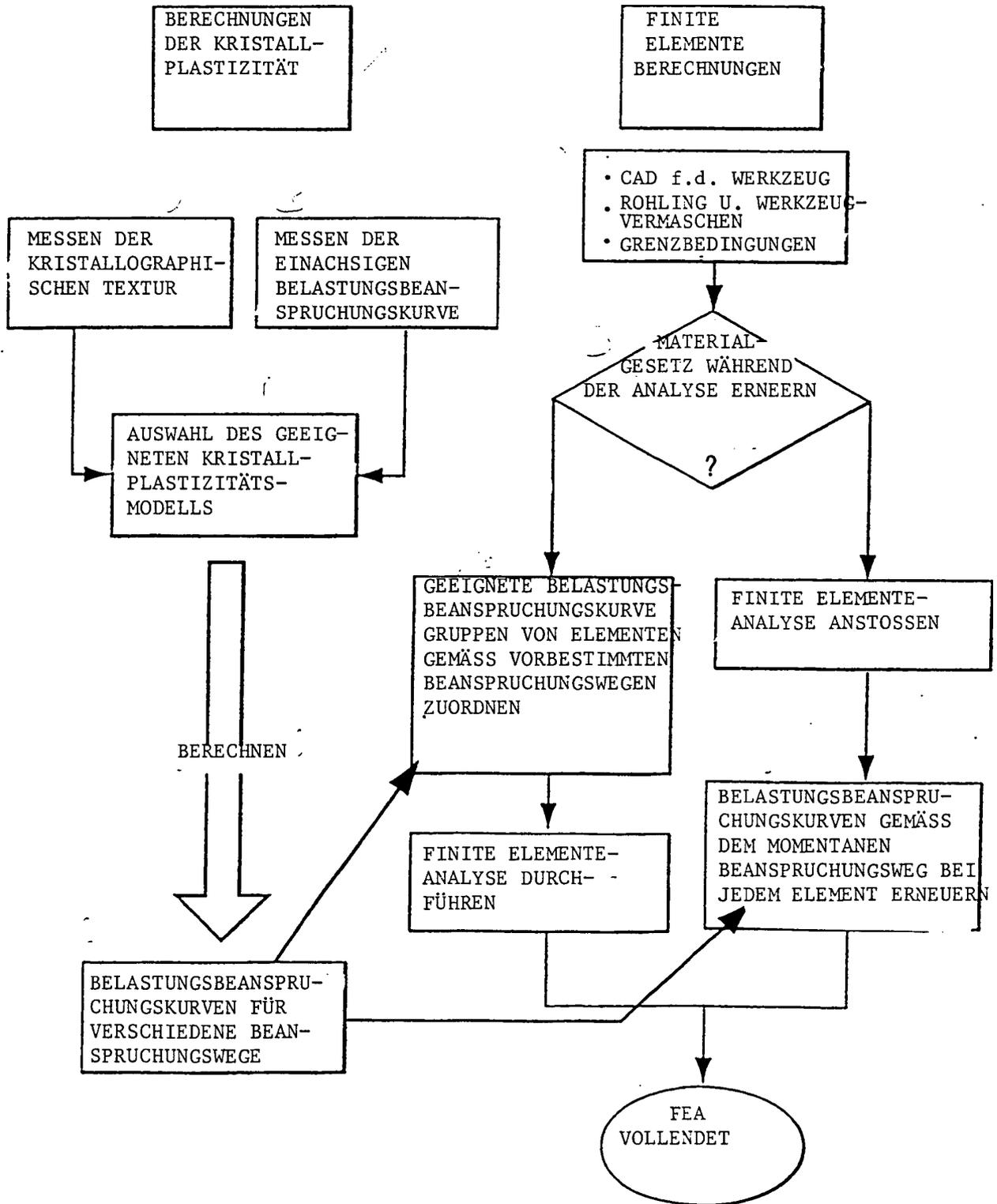
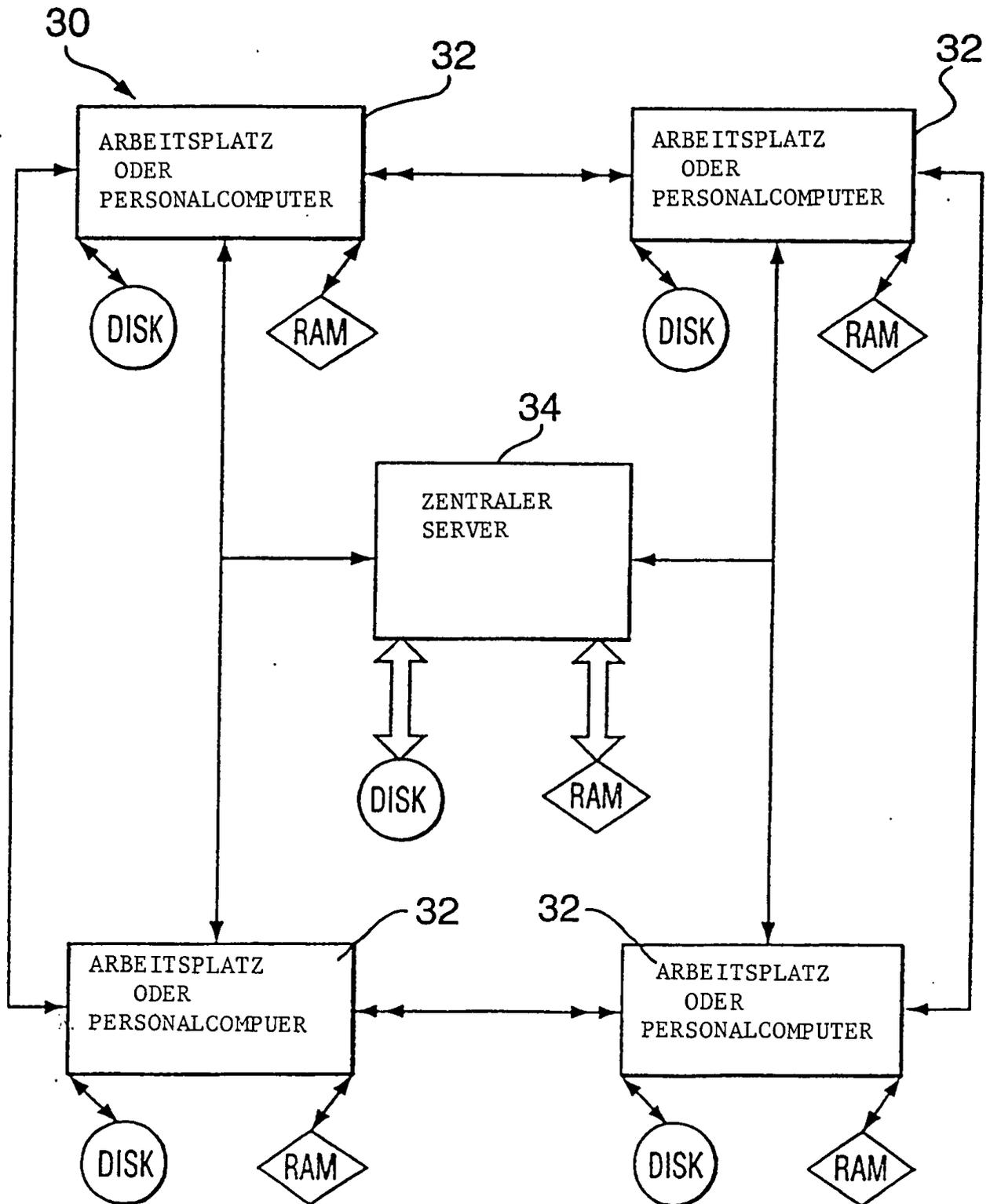


FIG. 3



**FIG. 4**

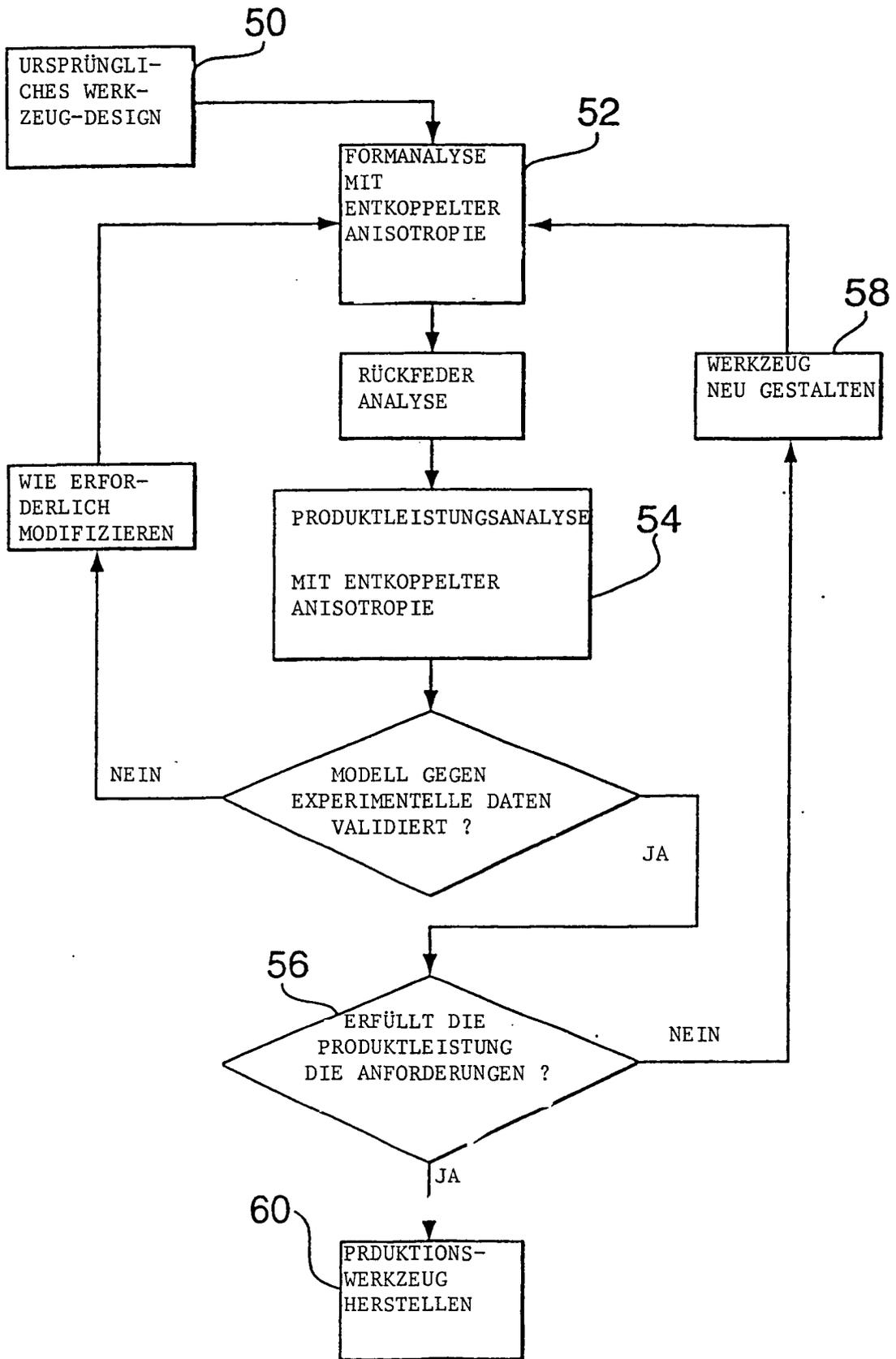


FIG. 5