



**Beschreibung**

**[0001]** Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Ermitteln einer Anzahl von Prozessparameterwerten in einem Spritzgussprozess innerhalb einer Spritzform (im Folgenden auch Werkzeug genannt). Zu diesen Prozessparameterwerten können beispielsweise bestimmte Prozesskennzahlen wie die Position einer Fließfront oder die Fließfrontgeschwindigkeit der Schmelze in der Form während des Spritzgussprozesses zählen, aber auch weitere maschinenunabhängige Prozessparameter wie die Viskosität, die Scherspannung oder dergleichen.

**[0002]** Üblicherweise wird während eines Spritzgussprozesses die Spritzgießanlage unter Nutzung einer Druckkurve gesteuert. Hierzu wird üblicherweise ein Drucksignal innerhalb einer Spritzgießmaschine in Abhängigkeit von der Zeit oder der Schneckenposition aufgenommen, wozu z. B. ein Messaufnehmer genutzt werden kann, der beispielsweise am Ende der Schnecke kurz vor der Düse angeordnet ist, aus der das Spritzgussmaterial bzw. die Schmelze in die Form eingespritzt wird. Alternativ oder zusätzlich kann der Druck auch indirekt gemessen werden, z. B. über den Hydraulikdruck eines Einspritzzylinders oder bei Verwendung eines Elektromotors über die Stromaufnahme, das Drehmoment oder dergleichen. Es wird dann versucht, über diese Kurve den Einspritzprozess zu regeln, beispielsweise so die Maschine zu steuern, dass die Kurve innerhalb einer vorgegebenen Hüllkurve bleibt, indem zu jedem Zeitpunkt ein Soll-Drucksignal oder zumindest ein bestimmter maximaler Druck vorgegeben wird.

**[0003]** Ein Verfahren zum Steuern der Bewegung oder des Drucks in eine nicht-linearen Spritzgießmaschine wird zum Beispiel in der DE 602 24 967 T2 beschrieben, wobei mithilfe eines Modells zukünftige Zustände der Spritzgießmaschine simuliert werden und die Maschine in Abhängigkeit eines Fehlers zwischen den so geschätzten zukünftigen Zuständen und den künftigen Soll-Zuständen gesteuert wird.

**[0004]** Ebenso wird in der JP H09-272 145 A eine Simulation eines Einspritzprozesses vorgeschlagen.

**[0005]** Gemäß der DE 10 2014 014 172 A1 wird mithilfe der Druckkurve der Siegelpunkt bestimmt. Dies ist der Zeitpunkt, zudem das Material im dünnsten Querschnitt der Spritzform soweit erstarrt ist, das kein Materialfluss mehr möglich ist.

**[0006]** In der US 2004 / 0 256 755 A1 wird vorgeschlagen, auf Basis von Informationen über den Querschnitt der Spritzform die unterschiedlichen Einspritzgeschwindigkeiten für bestimmte Volumenabschnitte in der Form zu berechnen und diese Informationen wiederum für die Steuerung der Einspritzgeschwindigkeit zu verwenden.

**[0007]** Um zum einen die Qualität noch besser kontrollieren oder steuern zu können und zum anderen mit einem bestimmten Werkzeug leichter die Spritzgießmaschine wechseln zu können, beispielsweise bei Standortwechsel einer Produktion, wäre es wünschenswert, maschinenunabhängige Messkennzahlen bzw. Prozessparameterwerte ermitteln zu können, die für den Spritzgussprozess im Werkzeug charakteristisch sind. Hierzu können Drucksensoren und/oder Temperatursensoren direkt in der Kavität der Spritzform angebracht werden. Dies wird z.B. in der DE 10 2008 038 930 A1 vorgeschlagen. Mit Hilfe eines solchen Sensors kann beispielsweise festgestellt werden, zu welchem Zeitpunkt die Schmelzefront (auch Fließfront genannt) am Sensor ankommt. Sind verschiedene derartige Punkte im Werkzeug bekannt, kann daraus die Fließfrontgeschwindigkeit bestimmt werden. Daraus können wiederum die Viskosität, die Schergeschwindigkeit und die Schubspannung für das jeweilige Spritzgussmaterial in dem betreffenden Werkzeug berechnet werden. Wird die Spritzgießmaschine dann gewechselt, könnten prinzipiell diese Werte wieder verwendet werden, um den Spritzgussprozess mit dem betreffenden Werkzeug an der neuen Maschine zu optimieren. Ein Nachteil ist hierbei jedoch, dass jedes Werkzeug bzw. jede Kavität im Werkzeug mit entsprechenden Sensoren ausgestattet werden muss, was die Werkzeuge extrem teuer macht.

**[0008]** Es ist eine Aufgabe der vorliegenden Erfindung, ein in Bezug auf diesen Stand der Technik einfacheres und kostengünstigeres Verfahren zum Ermitteln einer Anzahl von Prozessparameterwerten in einem Spritzgussprozess innerhalb einer Spritzform und eine entsprechende Einrichtung hierfür zu schaffen.

**[0009]** Diese Aufgabe wird durch ein Verfahren gemäß Patentanspruch 1 sowie durch eine Prozessparameterwert-Ermittlungseinrichtung nach Patentanspruch 14 gelöst.

**[0010]** Bei dem erfindungsgemäßen Verfahren werden zunächst geometrische Daten der Spritzform und/oder eines Formteils, welches in der Spritzform herzustellen ist, ermittelt. Dabei ist es im Prinzip egal, ob die geometrischen Daten des Formteils oder der Spritzform verwendet werden. Sofern geometrische Daten der Spritzform verwendet werden, geht es hierbei selbstverständlich immer um die geometrischen Daten der Kavität in

der Spritzform, d. h. also letztlich wieder um die geometrischen Abmessungen des Formteils, da die geometrischen Daten der Kavität nur geringfügig größer als die des Formteils sind. Daher lassen sich die geometrischen Daten der Spritzform in die geometrischen Daten des Formteils umrechnen und umgekehrt.

**[0011]** Unter Nutzung der geometrischen Daten wird dann eine (theoretische) virtuelle formteilspezifische Druckkurve ermittelt. Wie später noch erläutert wird, kann dies z. B. durch eine analytische Berechnung oder numerisch erfolgen, beispielsweise mittels einer Simulation. Diese formteilspezifische Druckkurve definiert dabei jeweils den Druck über einer „virtuellen“ Zeit, die die Einspritzzeit bzw. Maschinenzeit bezogen auf einen bestimmten Startzeitpunkt und/oder eine (virtuelle) Aktorposition repräsentiert. Dieser Startzeitpunkt kann beispielsweise so definiert sein, dass die Schmelzefront in den Angusskanal eintritt oder die Formteilanschnittstelle in der Kavität passiert oder dergleichen. Eine Aktorposition repräsentiert beispielsweise die Position einer Schnecke oder eines anderen Aktors in der Spritzgießanlage, mittels der in die Spritzform eingespritzt wird.

**[0012]** Auf Basis dieser virtuellen formteilspezifischen Druckkurve wird dann ein formteilspezifisches Ereignismuster ermittelt. Dieses formteilspezifische Ereignismuster umfasst eine Mehrzahl von singulären virtuellen Ereignissen, die mit charakteristischen Ereignisstellen der Formteilgeometrie verknüpft sind. Den virtuellen Ereignissen sind dabei jeweils zumindest eine relative Zeitinformation und/oder eine virtuelle Aktorposition sowie zumindest ein Positionsdatum zugeordnet. Im Prinzip repräsentiert die Zeitinformation auch die Position des Aktors der Spritzgießanlage, welcher das Spritzgussmaterial aus der Spritzgießanlage in die Spritzform drückt. Da der Aktor gesteuert wird und jede Position des Aktors mit einer bestimmter Zeit verknüpft ist, ist die Aufnahme oder Zuordnung der Aktorposition zu einem Ereignis gleichbedeutend mit der jeweiligen Zeit.

**[0013]** Ein Positionsdatum ist eine Ortsangabe, die eine Position einer Schmelzefront bzw. Fließfront des Spritzgussmaterials in der Spritzform definiert. Dabei kann es sich um eine einfache Positionsangabe handeln, wenn z. B. nur ein eindimensionaler Fließweg betrachtet werden soll. Prinzipiell kann es sich aber auch um eine ganze Schar von Positionsdaten handeln, die definieren, wo sich die Schmelzefront innerhalb der Kavität des Werkzeugs befindet, beispielsweise um alle Positionsdaten einer Vielzahl von Punkten auf der Schmelzefront, bei einer FEM-Simulation beispielsweise der Knotenpunkte auf der Schmelzefront. Die Zeitinformation und das Positionsdatum können gemeinsam ggf. mit weiteren Parametern auch in einem Ereignisvektor für jedes einzelne Ereignis festgehalten werden.

**[0014]** Unter einem „singulären“ Ereignis ist hierbei ein einzelnes zeitliches Ereignis zu verstehen, das auftritt, wenn die Schmelzefront eine bestimmte charakteristische Ereignisstelle innerhalb der Kavität erreicht. Üblicherweise liegen nämlich auf dem Fließweg in der Kavität der Form Veränderungen der Formteilgeometrie vor, insbesondere des Fließwegquerschnitts, wie z. B. Verjüngungen, Vergrößerungen, Kanten, Ecken, Rundungen, Fließhindernisse etc. Diese signifikanten Geometrieänderungen führen bei Durchströmen der Schmelze zu einer signifikanten Veränderung des Verhaltens bezüglich der Druckkurve. Daher werden diese Stellen als „Ereignisstellen“ bezeichnet und das Eintreffen bzw. Durchschreiten dieser Ereignisstelle durch die Fließfront als „singuläres Ereignis“. Solche singulären Ereignisse können auch in Form von eng aneinander liegenden Ereignisgruppen auftreten, welche eine Anzahl von in sehr kurzen Zeitabständen bzw. Aktorpositionsabständen hintereinander auftretenden Ereignissen umfassen. Die beim Durchschreiten des Fließwegs auftretende Abfolge von Ereignissen bildet dann das Ereignismuster, welches für die Spritzform charakteristisch ist wie eine Art „Fingerabdruck“. Dabei ist es durchaus möglich, dass sich, wenn die Form z. B. verschiedene Fließwege aufweist, mehrere Teil-Ereignismuster zu einem Gesamt-Ereignismuster überlagern, wobei jedes Ereignismuster einem bestimmten Fließweg zugeordnet sein kann. Die Ermittlung eines formteilspezifischen Ereignismusters im Sinne der Erfindung kann daher sowohl die Erfassung bzw. Ermittlung des Gesamt-Ereignismusters als auch nur die Ermittlung eines oder mehrerer Teil-Ereignismuster entlang bestimmter Fließwege umfassen.

**[0015]** Außerdem wird für das erfindungsgemäße Verfahren ein realer Spritzgussprozess unter Nutzung der betreffenden Spritzform durchgeführt. Während dieses Spritzgussprozesses wird eine Mess-Druckkurve ermittelt. Diese Mess-Druckkurve kann bei herkömmlichen Spritzgießanlagen direkt in der Maschine, beispielsweise durch einen Druckaufnehmer im Schneckenraum, oder durch eine indirekte Druckmessung über hydraulischen Druck am Einspritzzylinder oder Messung von Parametern des Einspritzmotors etc., Dehnungsmessstreifen oder anderem erfolgen. Prinzipiell ist es auch möglich, hierzu zusätzliche Messsensoren in der Spritzform zu verwenden, dies ist aber nicht erforderlich.

**[0016]** Auf Basis dieser realen Messdruck-Kurve für den durchgeführten Spritzgussprozess kann dann in ähnlicher Weise wie bei der Ermittlung des formteilspezifischen Ereignismusters auf Basis der virtuellen formteilspezifischen Druckkurve nun auch ein Mess-Ereignismuster ermittelt werden. Das Mess-Ereignismuster weist eine Mehrzahl von singulären Mess-Ereignissen auf, denen wieder zumindest eine Zeitinformation und/oder

Aktorposition zugeordnet ist, d. h. beispielsweise eine bestimmte Spritzgießzeit bzw. Maschinenzeit seit Beginn des Spritzgussprozesses oder ein ähnlicher Startpunkt. Auch hier können die Spritzgießzeit bzw. Maschinenzeit und/oder die Aktorposition ggf. auch gemeinsam mit weiteren Parametern in einem Ereignisvektor für das Messereignis hinterlegt werden.

**[0017]** Es werden dann virtuelle Ereignisse des formteilspezifischen Ereignismusters zu Mess-Ereignissen des Mess-Ereignismusters zugeordnet. Wie später noch erläutert wird, kann dies z. B. durch ein Vergleichen der jeweiligen Ereignismuster erfolgen oder indem das formteilspezifische Ereignismuster im Mess-Ereignismuster gesucht wird oder dergleichen. Dabei ist zu beachten, dass die Muster zu diesem Zeitpunkt nicht zwingend identisch sein müssen, wenn beispielsweise das ermittelte formteilspezifische Ereignismuster nur einen bestimmten Fließweg oder nur bestimmte Ausschnitte aus dem Fließweg berücksichtigt, und das Mess-Ereignismuster beispielsweise einen größeren Bereich für weitere Fließwege abdeckt. Ebenso müssen die absoluten Zeiten zwischen den Ereignissen eines Ereignismusters nicht übereinstimmen. Entscheidend ist jedoch, dass wie bei einem Fingerabdruck im formteilspezifischen Ereignismuster und im Mess-Ereignismuster charakteristische Ereignisse mit einer identischen Abfolge und auch passenden relativen Zeiten zueinander zu finden sind. Verschiedene Möglichkeiten der Zuordnung von virtuellen Ereignissen des formteilspezifischen Ereignismusters zu den passenden Mess-Ereignissen des Mess-Ereignismusters werden später noch erläutert.

**[0018]** Auf Basis der den virtuellen Ereignissen zugeordneten Positionsdaten und den Zeitinformationen und/oder Aktorpositionen, welche den diesen virtuellen Ereignissen jeweils zugeordneten Messereignissen zugeordnet sind, lassen sich dann die gewünschten Prozessparameterwerte ableiten.

**[0019]** Im Rahmen der Erfindung wird also nicht versucht, einfach die Druckkurven einer Simulation und eines realen Einspritzprozesses aneinander anzupassen und daraus die gewünschten Daten zu ermitteln. Dies wäre zwar theoretisch möglich, ist in der Praxis aber äußerst schwierig, wenn nicht sogar – insbesondere bei komplizierteren Formen – unmöglich. Stattdessen wird darauf abgezielt, ein charakteristisches Ereignismuster wie eine Art Fingerabdruck durch eine entsprechende Analyse der Mess-Druckkurve wiederzufinden und somit eine Zuordnung zu ermöglichen, wann die Schmelzefront bestimmte Ereignisstellen innerhalb der Spritzform passiert. Es hat sich herausgestellt, dass durch die Analyse der Druckkurven zur Ermittlung des charakteristischen Ereignismusters und die Zuordnung der Ereignismuster zueinander eine sehr sichere Zuordnung möglich ist, welche das Verfahren erheblich vereinfacht.

**[0020]** Dabei muss nicht zwingend die oben beschriebene Reihenfolge eingehalten werden, sondern prinzipiell könnten beispielsweise auch erst die Messdaten aufgezeichnet werden und anschließend könnte eine Simulation erfolgen. In den meisten Fällen erfolgt aber erst eine Berechnung des formteilspezifischen Ereignismusters, da ja dieses immer wieder zum Vergleich mit den Mess-Ereignismustern herangezogen werden kann.

**[0021]** Eine Prozessparameterwert-Ermittlungseinrichtung, welche für das erfindungsgemäße Verfahren eingesetzt werden kann, benötigt zum einen eine erste Schnittstelle zum Ermitteln von geometrischen Daten der Spritzform und/oder des Formteils. Bei dieser Schnittstelle kann es sich um eine Benutzerschnittstelle handeln, über die ein Bediener die erforderlichen Daten eingeben kann, oder eine andere Schnittstelle, über die beispielsweise CAD-Daten übernommen werden, oder dergleichen.

**[0022]** Weiterhin wird eine Druckkurvenermittlungseinheit benötigt, welche ausgebildet ist, um eine virtuelle formteilspezifische Druckkurve eines Spritzgussprozesses unter Nutzung der geometrischen Daten zu ermitteln. Hierbei kann es sich beispielsweise auch um eine Simulationseinheit handeln, welche z. B. eine FEM-Simulation durchführt, um die Druckkurve numerisch zu ermitteln.

**[0023]** Des Weiteren wird eine (erste) Musterermittlungseinheit benötigt, die ausgebildet ist, um ein formteilspezifisches Ereignismuster auf Basis der virtuellen formteilspezifischen Druckkurve zu ermitteln. Dieses formteilspezifische Ereignismuster weist, wie oben erläutert, eine Mehrzahl von singulären virtuellen Ereignissen auf, denen jeweils wieder eine relative Zeitinformation und/oder eine virtuelle Aktorposition sowie ein Positionsdatum zugeordnet sind.

**[0024]** Außerdem wird eine weitere Schnittstelle zur Erfassung einer Mess-Druckkurve während eines realen Spritzgussprozesses an einer Spritzgießanlage unter Nutzung der Spritzform benötigt. Diese zweite Schnittstelle kann ein Messsensor sein, der die Druckkurve aufnimmt, aber auch eine Schnittstelle, die von anderen Messsensoren oder aus der weiteren Maschinensteuerung die benötigten Messwerte oder die fertige Kurve übernimmt.

**[0025]** Es wird weiterhin eine Musterermittlungseinheit benötigt, die ausgebildet ist, um ein Mess-Ereignismuster auf Basis der Mess-Druckkurve zu ermitteln, wobei das Mess-Ereignismuster eine Mehrzahl von singulären Mess-Ereignissen aufweist, denen zumindest eine Zeitinformation und/oder Aktorposition zugeordnet ist, wie dies oben erläutert wurde. Bei dieser Musterermittlungseinheit kann es sich um die erste Musterermittlungseinheit handeln, die auch das formteilspezifische Ereignismuster auf Basis der virtuellen formteilspezifischen Druckkurve ermittelt. Es kann aber auch eine separate (zweite) Musterermittlungseinheit vorhanden sein.

**[0026]** Außerdem wird eine Zuordnungseinheit benötigt, die ausgebildet ist, um virtuelle Ereignisse des formteilspezifischen Ereignismusters zu Mess-Ereignissen des Mess-Ereignismusters zuzuordnen.

**[0027]** Schließlich wird eine Auswertungseinheit benötigt, die ausgebildet ist, um Prozessparameterwerte auf Basis der den virtuellen Ereignissen zugeordneten Positionsdaten und den Zeitinformationen und/oder Aktorpositionen, die den diesen virtuellen Ereignissen jeweils zugeordneten Messereignissen zugeordnet sind, abzuleiten.

**[0028]** Die einzelnen Komponenten der Prozessparameterwert-Ermittlungseinrichtung können dabei vorzugsweise, zumindest teilweise, in Form von Software realisiert sein. Dies betrifft insbesondere die Druckkurvenermittlungseinheit, die Musterermittlungseinheit, die Zuordnungseinheit und die Auswertungseinheit. Alle diese Komponenten können in Form von Softwaremodulen, welche entsprechend zusammenarbeiten, auf einer eigenen Rechneinheit, beispielsweise einer CPU, oder auf einer Rechneinheit der bereits vorhandenen Steuerung der Spritzgießanlage realisiert sein. Auch die Schnittstellen können ganz oder zumindest teilweise in Form von Software realisiert sein, je nachdem, um welche Art von Schnittstellen es sich handelt, beispielsweise ob fertige Daten von einem anderen Softwaremodul übernommen werden sollen oder ob eine Eingabe durch einen Benutzer erforderlich ist oder Messdaten aufgenommen werden müssen. Grundsätzlich ist es aber auch möglich, einzelne oder alle Komponenten in Form von Hardware auszubilden, beispielsweise die einzelnen Module als FPDAs oder dergleichen. Es wird an dieser Stelle explizit darauf hingewiesen, dass die Komponenten der Prozessparameterwert-Ermittlungseinrichtung auch räumlich auf verschiedenen Einrichtungen verteilt sein können und dabei insbesondere, wie dies bereits erwähnt wurde, auch Ressourcen oder Komponenten von bereits vorhandenen Steuereinrichtungen, Überwachungseinheiten oder sonstigen Einrichtungen der Spritzgießanlage mitverwendet werden können.

**[0029]** Mit Hilfe einer solchen Prozessparameterwert-Ermittlungseinrichtung kann auch eine erfindungsgemäße Spritzgießanlage aufgebaut werden, welche neben der Prozessparameterwert-Ermittlungseinrichtung die üblichen Komponenten aufweist, insbesondere eine Spritzgießdüse, einen Aktor, beispielsweise eine Schnecke oder dergleichen, um Spritzgussmaterial aus der Spritzgießdüse in eine an die Spritzgießanlage angeschlossene Spritzform einzuspritzen, sowie eine Steuereinrichtung zur Ansteuerung des Aktors. Die Prozessparameterwert-Ermittlungseinrichtung kann dabei beispielsweise ganz oder teilweise Teil der Steuereinrichtung sein. Es wird an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass unter dem Begriff „steuern“ im Folgenden auch der Begriff „regeln“ zu fassen ist, wobei eine Regelung als eine Form der Steuerung mit einer Rückkopplung eines Werts, auf den geregelt werden soll, verstanden wird.

**[0030]** Das erfindungsgemäße Verfahren kann besonders bevorzugt in einem Verfahren zur Steuerung einer Spritzgießanlage eingesetzt werden. Hierbei werden mit dem erfindungsgemäßen Verfahren bestimmte Prozessparameterwerte, also beispielsweise die genannten Prozesskennzahlen wie Fließfrontgeschwindigkeit, Fließfrontposition sowie die maschinenunabhängigen Prozessparameter für einen ersten Spritzgussprozess mit einer Spritzform ermittelt. Die dabei ermittelten Prozessparameterwerte werden dann wiederum als Eingangswerte, insbesondere als Soll-Parameterwerte, in einer Steuereinrichtung der Spritzgießanlage für einen weiteren Spritzgussprozess mit dieser Spritzform verwendet.

**[0031]** Besonders vorteilhaft kann das erfindungsgemäße Verfahren auch in einem Verfahren zur Visualisierung eines Spritzgussprozesses in einer Spritzform in einer Spritzgießanlage eingesetzt werden. Hierbei wird wiederum mit Hilfe des erfindungsgemäßen Verfahrens zumindest die Position der Fließfront in Abhängigkeit von der jeweils aktuellen Einspritzzeit und/oder einer Aktorposition ermittelt. Diese Fließfront kann dann auf einer Anzeigeeinrichtung virtuell innerhalb einer virtuellen Spritzform und/oder eines virtuellen Formteils bzw. einer virtuellen Formteilgeometrie dargestellt werden. Hierzu kann die Prozessparameterwert-Ermittlungseinrichtung bzw. eine damit gekoppelte Benutzerschnittstelle mit einer geeigneten Visualisierungseinrichtung ausgestattet sein. Dabei kann die Position der Fließfront vorzugsweise dynamisch in einer Animation, beispielsweise als Film oder Slideshow (als einzelne Bilder) oder dergleichen, ausgegeben werden. Besonders bevorzugt ist es dabei, wenn der Bediener zu bestimmten Positionen der Fließfront Steuerbefehle für nachfolgende Spritzgussprozesse eingeben kann. Mit anderen Worten, der Bediener kann sich in der Animation, z.B. dem

Film oder der Slideshow, jeweils den Verlauf der Fließfront in Abhängigkeit beispielsweise der Maschinenzeit und/oder einer Aktorposition anzeigen lassen, kann die Animation zu einem bestimmten Zeitpunkt bzw. einem bestimmten Bild anhalten und Steuerbefehle eingeben, die dann der jeweiligen Spritzgusszeit bzw. Aktorposition zugeordnet werden. Bei einem nachfolgenden Spritzgussprozess erfolgt die Steuerung der Spritzgießanlage bzw. des Aktors gemäß diesen neuen Steuerbefehlen. Beispielsweise könnte der Bediener festlegen, dass genau dann, wenn die Schmelzefront an einer bestimmten Ereignisstelle eintrifft oder diese passiert hat, die Einspritzgeschwindigkeit, d. h. die Vorschubgeschwindigkeit, erhöht oder erniedrigt wird.

**[0032]** Der Bediener hat so die Möglichkeit, sehr schnell den Spritzgussprozess zu optimieren. Beispielsweise könnte er an einem zunächst erzeugten Formteil, an dessen Geometrie ja die einzelnen Ereignisstellen sichtbar sind, mögliche Fehlstellen feststellen und entsprechende Steuerbefehle zu diesen Ereignisstellen, welche, wie gesagt, mit einer bestimmten Einspritzzeit und/oder einer Aktorposition verknüpft sind, eingeben, um die Fehlstellen bei einem nachfolgenden Spritzgussprozess auszugleichen. Auf diese Weise ist eine erheblich schnellere Optimierung eines Spritzgussprozesses möglich und Ausschuss wird vermieden.

**[0033]** Weitere besonders vorteilhafte Ausgestaltungen und Weiterbildungen der Erfindung ergeben sich aus den abhängigen Ansprüchen sowie der nachfolgenden Beschreibung, wobei die Patentansprüche einer bestimmten Kategorie auch gemäß den abhängigen Ansprüchen einer anderen Kategorie weitergebildet sein können und Merkmale verschiedener Ausführungsbeispiele zu neuen, nicht explizit dargestellten Ausführungsbeispielen kombiniert werden können.

**[0034]** Soweit dies möglich ist, wird der Volumenstrom während des Spritzgussprozesses bei der Ermittlung der Mess-Druckkurve konstant gehalten. Ebenso wird vorzugsweise der Volumenstrom bei der Ermittlung der virtuellen formteilspezifischen Druckkurve als konstant angenommen. In diesem Fall ist automatisch sichergestellt, dass sich die relativen zeitlichen Abstände zwischen den Ereignissen des charakteristischen Musters bzw. „Fingerabdrucks“ nicht verändern können. Insbesondere aber dann, wenn es aus Gründen des Einspritzprozesses sinnvoll ist, den Volumenstrom zu verändern, beispielsweise die Vorschubgeschwindigkeit des Aktors (z. B. der Schnecke) zu variieren, d. h. im Falle eines variablen Volumenstroms während des Spritzgussprozesses, wird eine dabei ermittelte Mess-Druckkurve zunächst in eine fiktive, zeitkorrigierte Mess-Druckkurve umgerechnet. Dies erfolgt unter Nutzung von Daten über die Volumenstromvariation bzw. die Steuerdaten der Spritzgießanlage während des Spritzgussprozesses. Diese zeitkorrigierte Mess-Druckkurve entspricht dann einer Mess-Druckkurve, wie sie gemessen worden wäre, wenn während des ganzen Zeitraums der Volumenstrom konstant gehalten worden wäre. Insofern kann diese fiktive, zeitkorrigierte Mess-Druckkurve auch als variationsbereinigte Mess-Druckkurve bezeichnet werden. Auf Basis dieser zeitkorrigierten Mess-Druckkurve wird das Mess-Ereignismuster ermittelt. Dies ermöglicht dann den Vergleich bzw. die Zuordnung zu den Ereignissen im virtuellen formteilspezifischen Ereignismuster, welches ja unter Annahme eines konstanten Volumenstroms ermittelt wurde. Es wird an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass es aber prinzipiell auch möglich ist, ebenso bei der Simulation einen variablen Volumenstrom anzunehmen, d. h. prinzipiell könnte bei einem genau bekannten variablen Volumenstrom während der Messung auch entsprechend der Volumenstrom während einer Simulation variiert werden. Auch in diesem Fall ist wieder ein Vergleich der Ereignismuster möglich. Lediglich der Vollständigkeit halber wird darauf hingewiesen, dass auch eine mit einem angenommenen variablen Volumenstrom ermittelte virtuelle formteilspezifische Druckkurve entsprechend der Mess-Druckkurve korrigiert werden kann bzw. in eine virtuelle Druckkurve mit konstantem Volumenstrom umgerechnet werden kann.

**[0035]** Wie bereits eingangs erwähnt, machen sich die Ereignisstellen, die ja in der Regel aus einer Geometrieänderung der Kavität resultieren, durch überproportionale Änderungen des Druckgradienten bemerkbar. Daher werden vorzugsweise die virtuellen Ereignisse des charakteristischen Ereignismusters auf Basis der zeitlichen Änderung der Steigung der virtuellen formteilspezifischen Druckkurve bestimmt. Ebenso werden vorzugsweise die Messereignisse des Mess-Ereignismusters auf Basis der zeitlichen Änderung der Steigung der Mess-Druckkurve bestimmt.

**[0036]** Bei einem besonders bevorzugten Verfahren wird die formteilspezifische Druckkurve zeitlich differenziert (1. Ableitung) und die virtuellen Ereignisse werden dann mit Hilfe einer Flankenanalyse der zeitlich differenzierten formteilspezifischen Druckkurve ermittelt. In entsprechender Weise kann auch die Mess-Druckkurve zeitlich differenziert werden und die Messereignisse werden mit Hilfe einer Flankenanalyse der zeitlich differenzierten Mess-Druckkurve ermittelt. Im Rahmen dieser Flankenanalyse werden jeweils die Steigungen innerhalb der differenzierten Druckkurve analysiert. Beispielsweise kann immer dann, wenn ein besonders starker Anstieg in der differenzierten Druckkurve auftritt, geprüft werden, wo die Tangente der Anstiegsflanke sich mit der Tangente des vorherigen Abschnitts vor der Flanke schneidet. Dieser zeitliche Punkt kann als Zeitpunkt

des jeweiligen Ereignisses definiert werden. Zur Durchführung der Differenzierung der Druckkurven sowie für die Flankenanalyse kann auf bereits bekannte Software zurückgegriffen werden, wie beispielsweise OriginPro oder Matlab. Weiter bevorzugt können alternativ oder zusätzlich zur Flankenanalyse die virtuellen Ereignisse auch mit Hilfe einer Peakanalyse der zeitlich differenzierten formteilspezifischen Druckkurve ermittelt werden, wobei auch die Peakhöhe berücksichtigt werden kann. Ebenso wäre auch eine Analyse der Wendepunkte möglich, um die die virtuellen Ereignisse zu finden.

**[0037]** Vorzugsweise wird zur Ermittlung des Mess-Ereignismusters eine Mehrzahl von Messereignissen zwischen dem Zeitpunkt des Eintritts der Schmelze in eine Formteilanschnittstelle (im Englischen „Gate“ genannt) der Kavität der Spritzform und einem Ende der Formfüllungsphase der Spritzform ermittelt. Unter „Formfüllungsphase“ ist hier der Zeitraum vom Beginn der Füllung der Spritzform, d. h. in dem Moment, wo die Schmelzefront die Formteilanschnittstelle erreicht, bis zum Beginn der sogenannten „volumetrischen Füllphase“ zu verstehen, d. h. bis die Schmelzefront das Fließwegende der Kavität erreicht hat und in der Regel auf eine druckgeregelte Nachdruckphase umgeschaltet wird. Durch eine Mehrzahl von Messereignissen im Ereignismuster, die in diesen zeitlichen Bereich fallen, ist eine besonders gute Zuordnung der charakteristischen Ereignismuster möglich. Besonders bevorzugt wird sogar nur der zeitliche Bereich der Mess-Druckkurve herangezogen, der während dieser Formfüllungsphase der Spritzform ermittelt wird. Entsprechend reicht es dann aus, auch nur diesen Teil der formteilspezifischen virtuellen Druckkurve zu berechnen bzw. zu simulieren. Prinzipiell ist es natürlich auch möglich, einen größeren zeitlichen Bereich zu verwenden, insbesondere zu einem früheren Zeitpunkt zu beginnen und beispielsweise den Startpunkt auf den Eintritt der Schmelzefront in den Angusskanal abzustellen oder dergleichen.

**[0038]** Wie bereits eingangs erwähnt, ist es prinzipiell möglich, für die Ermittlung der Mess-Druckkurve auch Messwerte von Sensoren innerhalb einer Spritzform heranzuziehen. Vorzugsweise erfolgt aber die Ermittlung der Mess-Druckkurve während des Spritzgussprozesses mittels einer Auswertung von Mess- und Einstellwerten von außerhalb der Spritzform, d. h. mit den Mitteln, die an einer herkömmlichen Spritzgießanlage ohnehin vorhanden sind. Besonders bevorzugt erfolgt dabei die Messung der Mess-Druckkurve sogar ausschließlich durch die Mess- und Einstellwerte von außerhalb der Spritzform, d. h. es werden keine Messwerte verwendet, die von Sensoren gemessen werden, die in der Kavität der Spritzform angeordnet sind.

**[0039]** Die virtuelle formteilspezifische Druckkurve wird insbesondere bei komplizierteren Formteilen bevorzugt unter Nutzung einer numerischen Simulation ermittelt. Hierzu kann handelsübliche FEM-Simulationssoftware verwendet werden, beispielsweise Autodesk Moldflow, Cadmold oder Moldex3D.

**[0040]** Die Zuordnung von virtuellen Ereignissen des formteilspezifischen Ereignismusters zu Messereignissen des Mess-Ereignismusters kann bei einer bevorzugten Variante mit Hilfe eines beliebigen Mustererkennungsverfahrens, insbesondere Bilderkennungsverfahrens durchgeführt werden. Unter Bilderkennungsverfahren sind insbesondere auch Bildregistrierungsverfahren oder sonstige Matching-Verfahren zu verstehen, die dazu dienen, beispielsweise Bilder und/oder biometrische Daten wie Fingerabdrücke etc. zu analysieren und wiederum anderen entsprechenden Bildern oder biometrischen Daten zuzuordnen. Dabei kann also auch auf herkömmliche Software zurückgegriffen werden, die beispielsweise als Basis auch für andere Mustererkennungsaufgaben, insbesondere Bilderkennungsaufgaben, Bildregistrierungsaufgaben oder sonstige Matching-Aufgaben von Fingerabdrücken oder anderen Mustern herangezogen werden kann.

**[0041]** Bei einem bevorzugten Verfahren wird versucht, zur Zuordnung von virtuellen Ereignissen des formteilspezifischen Ereignismusters zu Messereignissen des Mess-Ereignismusters in einem iterativen Verfahren das formteilspezifische Ereignismuster und das Mess-Ereignismuster zumindest teilweise (virtuell) in Überdeckung zu bringen. Dabei können zwischen den verschiedenen Iterationsschritten das formteilspezifische Ereignismuster und/oder das Mess-Ereignismuster nach definierten Regeln zeitlich skaliert und/oder relativ zueinander verschoben werden, um eine Anpassung zu erreichen. Zusätzlich oder alternativ können auch virtuelle Ereignisse des formteilspezifischen Ereignismusters und/oder Messereignisse des Mess-Ereignismusters zwischen verschiedenen Iterationsschritten nach den bestimmten Regeln eliminiert werden, um so einzelne Ereignisse für dieses Überdeckungs- bzw. Matching-Verfahren herauszunehmen, die nicht in das jeweils andere Muster hineinpassen. Ein typisches Beispiel hierfür ist, wenn das virtuelle formteilspezifische Ereignismuster so ermittelt wurde, dass der Startzeitpunkt zum Durchtritt der Schmelzefront durch die Formteilanschnittstelle gewählt ist, aber die Mess-Druckkurve den Eintritt der Schmelzefront in den Angusskanal mit als Ereignis enthält. In diesem Fall würde das Mess-Ereignismuster mehrere singuläre Ereignisse aufweisen, bevor ein Mess-Ereignismuster-Abschnitt auftritt, welcher dem formteilspezifischen virtuellen Ereignismuster entspricht.

**[0042]** Es sei an dieser Stelle noch einmal darauf hingewiesen, dass es prinzipiell auch möglich ist, mehrere virtuelle formteilspezifische Ereignismuster, beispielsweise für verschiedene Fließwege und/oder mehrere Kavitäten in einer komplexen Form, einem Mess-Ereignismuster zuzuordnen.

**[0043]** Mit dem erfindungsgemäßen Verfahren können verschiedene Prozessparameterwerte ermittelt werden. Besonders bevorzugt umfassen die zu ermittelnden bzw. die in dem Verfahren letztlich ermittelten Prozessparameter für den realen Spritzgussprozess die Position der Fließfront in Abhängigkeit von der jeweils aktuellen Einspritzzeit und/oder einer Aktorposition. Ebenso bevorzugt umfassen die Prozessparameterwerte Fließfrontgeschwindigkeiten in der Spritzform. Diese können dann, wie bereits oben erwähnt, in geeigneter Weise visualisiert werden.

**[0044]** Ganz besonders bevorzugt umfassen die Prozessparameterwerte zudem auch maschinenunabhängige Prozessparameterwerte, wie sie bisher nur mit Verfahren ermittelt werden können, bei denen Sensoren in der Kavität des Werkzeugs angeordnet sind. Besonders bevorzugt handelt es sich hierbei um zumindest eine der folgenden rheologischen Größen:

- Schergeschwindigkeit,
- Schmelzeviskosität,
- Wandschubspannung.

**[0045]** Bei einem ganz besonders bevorzugten Steuerungsverfahren werden gerade diese Größen bei einem Spritzgussprozess, der akzeptable bzw. am besten optimale Ergebnisse liefert, als Soll-Größen hinterlegt und dem Werkzeug zugeordnet. Wird später wieder ein Spritzgussprozess mit diesem Werkzeug gefahren, kann auf genau diese Sollgrößen geregelt werden, unabhängig davon, ob inzwischen die Spritzgießanlage gewechselt wurde oder nicht oder ob sich andere äußere Parameter, wie Temperatur etc., geändert haben. Hierzu wird zunächst ein Test-Spritzgussprozess mit bestimmten Startparameterwerten für den einzuhaltenden Druck oder die Vorschubgeschwindigkeit des Aktors etc. über der Zeit vorgegeben, d. h. der Volumenstrom in Abhängigkeit von der Zeit. Es werden dann mit Hilfe des erfindungsgemäßen Verfahrens eine oder mehrere dieser rheologischen Größen während des durchgeführten Spritzgussprozesses ermittelt. Anschließend können die Steuerparameter an der Spritzgießanlage so geändert werden, dass in den nachfolgenden Spritzgussprozessen wieder diese rheologischen Größen innerhalb der Kavität des Werkzeugs erreicht werden. Auf diese Weise kann erheblich schneller als bisher der Spritzgussprozess optimiert und unnötiger Ausschuss vermieden werden.

**[0046]** Die Erfindung wird im Folgenden unter Hinweis auf die beigefügten Figuren anhand von Ausführungsbeispielen noch einmal näher erläutert. Dabei sind in den verschiedenen Figuren gleiche Komponenten mit identischen Bezugsziffern versehen. Die Figuren sind in der Regel nicht maßstäblich. Es zeigen:

**[0047]** Fig. 1 eine schematische Darstellung eines Ausführungsbeispiels des erfindungsgemäßen Verfahrens zur Ermittlung von Prozessparameterwerten;

**[0048]** Fig. 2 eine schematische Darstellung eines 1-dimensionalen Fließwegs für eine Stufenplatte und einer zugehörigen schematisierten Druckanstiegskurve;

**[0049]** Fig. 3 einen numerisch berechneten Druckverlauf für die Stufenplatte aus Fig. 2 mit einem Angussystem;

**[0050]** Fig. 4 eine schematische Kurve des über der Zeit differenzierten Druckverlaufs aus Fig. 3;

**[0051]** Fig. 5 eine schematische Darstellung eines Ausführungsbeispiels einer erfindungsgemäßen Spritzgießanlage;

**[0052]** Fig. 6 eine perspektivische Darstellung eines ersten Formteils in Form einer Stufenplatte mit einem Angussystem;

**[0053]** Fig. 7 eine simulierte (virtuelle) Druckkurve für das Formteil gemäß Fig. 6;

**[0054]** Fig. 8 den in Fig. 7 markierten Ausschnitt der simulierten Druckkurve (oben) und die simulierte Druckkurve differenziert nach der Zeit (unten);

**[0055]** Fig. 9 eine reale Mess-Druckkurve für das Formteil gemäß Fig. 6;

- [0056]** Fig. 10 den in Fig. 9 markierten Ausschnitt der (geglätteten) Mess-Druckkurve (oben) und die Mess-Druckkurve differenziert nach der Zeit (unten);
- [0057]** Fig. 11 ein virtuelles Ereignismuster (obere Reihe) aus der Analyse der simulierten (virtuellen) Druckkurve nach Fig. 8 und ein Mess-Ereignismuster (untere Reihe) aus der Analyse der Mess-Druckkurve nach Fig. 10;
- [0058]** Fig. 12a mit Fig. 12b ein Beispiel für ein Flussdiagramm zur Zuordnung von Ereignissen eines virtuellen Ereignismusters zu Ereignissen eines Mess-Ereignismusters;
- [0059]** Fig. 13 das virtuelle Ereignismuster (obere Reihe) und das Mess-Ereignismuster (untere Reihe) aus Fig. 11 nach der Zuordnung;
- [0060]** Fig. 14 eine schematische Darstellung einer Benutzerschnittstelle mit einer Visualisierung einer Fließfront in dem Formteil gemäß Fig. 6 und darunter eine Darstellung der bei Einspritzprozess verwendeten Einspritzgeschwindigkeitsfunktion;
- [0061]** Fig. 15 eine perspektivische Darstellung eines ersten Formteils in Form eines Stapelbausteins;
- [0062]** Fig. 16 eine simulierte (virtuelle) Druckkurve für das Formteil gemäß Fig. 15;
- [0063]** Fig. 17 den in Fig. 16 markierten Ausschnitt der simulierten Druckkurve (oben) und die simulierte Druckkurve differenziert nach der Zeit (unten);
- [0064]** Fig. 18 eine reale Mess-Druckkurve für das Formteil gemäß Fig. 15;
- [0065]** Fig. 19 den in Fig. 18 markierten Ausschnitt der (geglätteten) Mess-Druckkurve (oben) und die Mess-Druckkurve differenziert nach der Zeit (unten);
- [0066]** Fig. 20 ein virtuelles Ereignismuster (mittlere Reihe) aus der Analyse der virtuellen Druckkurve nach Fig. 17 und ein Mess-Ereignismuster (untere Reihe) aus der Analyse der Mess-Druckkurve nach Fig. 19 sowie das virtuelle Ereignismuster (obere Reihe) nach einer Anpassung an das Mess-Ereignismuster;
- [0067]** Fig. 21 eine schematische Darstellung der Visualisierung einer Fließfront in dem Formteil gemäß Fig. 15 an einer ersten Ereignisstelle;
- [0068]** Fig. 22 eine schematische Darstellung der Visualisierung einer Fließfront in dem Formteil gemäß Fig. 15 an einer zweiten Ereignisstelle;
- [0069]** Fig. 23 eine schematische Darstellung der Benutzerschnittstelle gemäß Fig. 14 mit einer Visualisierung der Fließfrontgeschwindigkeit in dem Formteil gemäß Fig. 6 und darunter einer Darstellung der bei Einspritzprozess verwendeten Einspritzgeschwindigkeitsfunktion;
- [0070]** Fig. 24 eine schematische Darstellung der Benutzerschnittstelle mit einer Visualisierung der Fließfrontgeschwindigkeit in dem Formteil wie in Fig. 23 jedoch nun nach einem geänderten Vorschlag für die Einspritzgeschwindigkeitsfunktion.
- [0071]** Fig. 1 zeigt ein Flussdiagramm für eine bevorzugte Variante des Verfahrens zur Ermittlung der Prozessparameterwerte. Im Schritt 1.I werden zunächst die Geometriedaten des Formteils oder der Spritzform vollständig erfasst. Beispielsweise können sie bereits in maschinenlesbarer Form, z. B. als Step-Datei, vorliegen, die dann übernommen werden kann. In gleicher Weise können im Schritt 1.II zusätzlich zur Formteilgeometrie auch die Geometriedaten des Angussystems miterfasst werden. Dies muss nicht zwingend in zwei verschiedenen Schritten geschehen, sondern ist prinzipiell auch in einem Schritt möglich.
- [0072]** Im Schritt 1.III wird dann auf Basis dieser Geometriedaten die virtuelle formteilspezifische Druckkurve (der virtuellen Schmelze bzw. Spritzgussmasse, daher auch „Massedruckkurve“ genannt), d. h. der zum Füllen der Kavität benötigte bzw. am Anschnitt oder am Anguss rechnerisch ermittelte Druck über der (virtuellen) Einspritzzeit mit konstantem Volumenstrom des Spritzgussmaterials gerechnet. Im Folgenden wird davon ausgegangen, dass das Spritzgussmaterial eine Kunststoffschmelze ist. Diese Berechnung erfolgt vorzugsweise numerisch mit einer FEM (Finite-Elemente-Methode). Mit geeigneter bekannter Software, wie beispielsweise

Autodesk Moldflow, können hierzu die Formteilgeometrie und ggf. die Geometriedaten des Angusssystems vernetzt und der Druckverlauf während der Formfüllung berechnet werden. Dabei bilden einzelne Elemente ein FEM-Netz mit Knotenpunkten an den Verknüpfungen.

**[0073]** Der zum Füllen der Kavität benötigte Druck kann z. B. wie folgt berechnet werden: Gemäß Gleichung von Hagen-Poiseuille

$$\Delta p = \frac{12 \cdot \dot{V} \cdot \eta}{b \cdot h^3} \cdot L \quad (1)$$

ist der Druckverlust  $\Delta p$  zum Füllen eines Fließwegabschnittes mit rechteckigem Querschnitt eine Funktion der Querschnittsfläche  $b \cdot h$  des jeweiligen Schmelzkanals ( $b$  ist die Breite,  $h$  die Höhe) innerhalb der Kavität sowie des Volumenstroms  $\dot{V}$ , der Fließweglänge  $L$  und der Schmelzeviskosität  $\eta$ . Üblicherweise sind Kunststoffschmelzen strukturviskos, d. h. die Viskosität ist wiederum eine Funktion der Schergeschwindigkeit und somit des Volumenstroms und der Temperatur  $T$ . Die rechnerische Ermittlung des gesamten Druckverlusts, der bei vollständiger Füllung der Kavität entsteht, kann durch „Abschreiten“ des Fließwegs der Kunststoffschmelze vom Anspritzpunkt bis zum Fließwegende (also während der sog. Einspritzphase) bei konstantem Volumenstrom erfolgen.

**[0074]** Auf dem Fließweg liegen Veränderungen der Formteilgeometrie bzw. des Fließwegquerschnitts vor. Solche Veränderungen können z. B. Verengungen, Aufweitungen, Kanten, Ecken, Rundungen oder Fließhindernisse sein. Trifft die Kunststoffschmelze auf eine solche Veränderung, liegt ein „Ereignis“ vor, welches sich in der Druckkurve bemerkbar macht. Diese Stellen werden daher im Rahmen der Erfindung auch „Ereignisstellen“ genannt.

**[0075]** Das Prinzip lässt sich am besten anhand eines einfachen Beispiels erläutern. Hierzu wird auf **Fig. 2** verwiesen. In diesem Beispiel beschreibt der Fließweg von der Anspritzung bis zum Ende einen geradlinigen Pfad (eindimensionaler Fließweg) entlang einer Stufenplatte mit zwei Stufen als Formteil **1**. In einem solchen Fall wäre die Bestimmung des Druckverlusts beispielsweise auch analytisch möglich. Dazu kann die Formteilgeometrie in berechenbare Grundgeometrieabschnitte zerlegt werden. Diese können dann einzeln gemäß Gleichung (1) berechnet werden.

**[0076]** In **Fig. 2** ist oben die Geometrie entlang des geradlinigen eindimensionalen Fließwegs dargestellt, wie sie sich vom großen Querschnitt zum kleinen Querschnitt hin verjüngt. Durch Aneinanderfügen der Druckverluste in den Einzelabschnitten generiert sich der Gesamtdruckverlustverlauf über den gesamten Fließweg und über die Füllzeit  $t$ . Auf dem Fließweg finden hier genau drei Ereignisse zu Zeiten  $t_{s1}$ ,  $t_{s2}$ ,  $t_{s3}$  statt, nämlich genau dann, wenn die Schmelzefront an die Ereignisstellen  $F_1$ ,  $F_2$ ,  $F_3$ , nämlich die beiden Stufen und das Ende der Form, trifft. Wie in **Fig. 2** unten zu sehen ist, ändert sich an jeder Ereignisstelle  $F_1$ ,  $F_2$  mit einer Verengung die Steigung des Druckgradienten  $\Delta p$ .

**[0077]** Da die Schmelze weitestgehend inkompressibel ist, müssen zur Erfüllung der Kontinuitätsgleichung bei Änderung des Volumenstroms an der Maschine die Ereignisse im umgekehrten Verhältnis zur Höhe der Änderung stattfinden. Wird der Volumenstrom beispielsweise gemäß

$$\dot{V}' = f \cdot \dot{V} \quad (2)$$

geändert (wobei  $f$  ein beliebiger Faktor ist), so würde bei einem Füllvorgang mit  $n$  solchen Ereignissen das  $i$ -te Ereignis  $E_i$  also an der Position  $L_i(x_i, y_i, z_i)$  zum Zeitpunkt

$$t_i = \frac{1}{f} \cdot t_i \quad (3)$$

stattfinden. Dabei wurde hier davon ausgegangen, dass die Position bzw. Stelle nicht nur eindimensional, sondern in drei Dimensionen definiert ist, was normalerweise bei einem nicht eindimensionalen Fließweg der Fall ist.

**[0078]** Eine solche rein analytische Berechnung über Abschnitte entlang des Fließwegs lässt sich prinzipiell auch an etwas komplizierteren Bauteilen durchführen, beispielsweise, wenn noch weitere Stufen oder andere Verengungen oder Erweiterungen eingebaut sind. Bei komplizierteren Formen, insbesondere mehrdimensionalen Formteilen, wird stattdessen besser eine numerische Berechnung mit Hilfe eines FEM-Programms

durchgeführt. Wird beispielsweise ein Formteil in der Mitte angespritzt und füllt sich dann über verschiedene Fließwege, kann die Berechnung des Druckverlusts entlang jedes dieser Fließwege mit Hilfe eines solchen FEM-Programms erfolgen. Dabei wird ausgehend z.B. vom Anspritzpunkt ein zwei- oder dreidimensionales Füllbild erzeugt, das den simulierten Fließfrontverlauf über die Zeit darstellt. Die Diskreditierungsdichte kann über die Elementgröße des FEM-Netzes vorgegeben werden. An jedem einzelnen Knotenpunkt können dann durch das Programm der Druck, die Druckgradienten, die Temperaturen etc. über der Zeit berechnet werden.

**[0079]** Fig. 3 zeigt als Beispiel eine numerisch mit einem solchen Programm berechnete Druckkurve  $p_S$ . Aufgetragen ist hier der Druck  $p$  über der Zeit  $t$  in willkürlichen Einheiten ([a.u.]). Eine derartige Druckkurve kann auch während eines Einspritzprozesses direkt an der Einspritzanlage als reale Druckkurve bzw. Massedruckkurve der realen Schmelze bzw. Spritzgussmasse gemessen werden.

**[0080]** Im Rahmen des erfindungsgemäßen Verfahrens wird aus einer solchen berechneten Druckkurve  $p_S$  für das jeweilige Formteil dann im Schritt **1.IV** (siehe Fig. 1) ein formteilspezifisches Ereignismuster  $M_S$  ermittelt. Die Ereignisse können dabei aufgefunden werden, indem zunächst die Druckkurve  $p_S$  nach der Zeit differenziert wird. Die Genauigkeit hängt dabei von der Diskreditierungsdichte der numerischen Berechnungen (z.B. Elementgröße) und der Auflösung der Differentiation ab.

**[0081]** In Fig. 4 ist hierzu die differenzierte Druckkurve  $dp_S$  der Druckkurve  $p_S$  aus Fig. 3 dargestellt (wieder in willkürlichen Einheiten). Wie aus Fig. 4 sehr gut zu sehen ist, lässt sich der Zeitpunkt eines oder mehrerer der berechneten Ereignisse  $E_{S1}$ ,  $E_{S2}$ ,  $E_{S3}$ , welche hier zu den Ereignisstellen  $F_1$ ,  $F_2$ ,  $F_3$  des eindimensionalen Fließwegs passen, durch eine Flankenanalyse des Kurvenverlaufs der differenzierten Druckverlaufskurve  $dp_S$  ermitteln. Beispielsweise werden hierzu einfach die Tangenten der ansteigenden Flanken ermittelt, und die Schnittpunkte der Tangenten der Flanken mit den Tangenten der davorliegenden, weniger stark ansteigenden Abschnitte bestimmen jeweils die Zeitpunkte  $t_{S1}$ ,  $t_{S2}$ ,  $t_{S3}$  der drei Ereignisse  $E_{S1}$ ,  $E_{S2}$ ,  $E_{S3}$ . Wie hier zu sehen ist, entsprechen diese zeitlichen Abstände der Ereignisse bei einem eindimensionalen Fließweg den relativen räumlichen Abständen der Ereignisstellen.

**[0082]** Durch Überlagerung mit der Formteilgeometrie kann somit jedem einzelnen Ereignis  $E_{S1}$ ,  $E_{S2}$ ,  $E_{S3}$  die berechnete Position der Schmelzefront zugeordnet werden. In einem Finite-Elemente-Netz können Ereignisse einem oder mehreren Knotenpunkten zugeordnet werden, die auf der Schmelzefront oder ihr am nächsten liegen. Dabei kann jedes Ereignis  $E_{Si}$  als Vektor  $E_{Si}$  ( $t_{Si}$ ,  $p_{Si}$ ,  $x_{Si}$ ,  $y_{Si}$ ,  $z_{Si}$ ,  $h_{Si}$ ) dargestellt werden, der neben dem Ereigniszeitpunkt  $t_{Si}$  weitere Komponenten beinhaltet, wie insbesondere die Position der Schmelzefront in allen drei Raumrichtungen, den berechneten Druckverlust an dieser Stelle und ggf. auch die Geometriedaten des Schmelzekanals an der berechneten Stelle, beispielsweise die Höhe  $h_{s,i}$  des Kanals.

**[0083]** Trägt man einfach nur die Zeitpunkte der einzelnen Ereignisse über der Zeit auf, beispielsweise in Form von Punkten, wie dies später u.a. noch anhand von Fig. 11 gezeigt wird, ergibt sich ein formteilspezifisches Ereignismuster, d. h. ein individuelles und eindeutiges Muster wie ein Fingerabdruck für das jeweilige Formteil. Dieses Muster beschreibt eine relative zeitliche (und auch räumliche) Anordnung aller berechneten Ereignisse beim Voranschreiten der Kunststoffschmelze von der Anspritzung bis zum Fließwegende und lässt sich abhängig vom jeweiligen Volumenstrom, der bei der Berechnung angenommen wurde, stauchen oder strecken.

**[0084]** Das formteilspezifische Ereignismuster  $M_S$  kann dann zusammen mit den Geometriedaten in einem Parametersatz bzw. Kenndatensatz in Form einer maschinenlesbaren Datei zusammengefasst werden (siehe Schritt **1.V** in Fig. 1) und in die Steuereinrichtung (im Folgenden auch Maschinensteuerung genannt) der Spritzgießanlage eingelesen werden. Liegt eine FEM-Berechnung vor, kann der Parametersatz zusätzliche Daten wie das FEM-Netz und den berechneten Füllverlauf des Einspritzvorgangs beinhalten.

**[0085]** Moderne Spritzgießanlagen sind in der Lage, Einstellparameter wie Temperaturen, Drücke und Geschwindigkeiten in engen Grenzen zu regeln. Die Maschinensteuerung vergleicht dabei die eingestellten Parameter mit den gemessenen Daten und wirkt anschließend auf die in der Anlage verbauten bzw. externen Stellglieder. Häufig wird dabei auf einen konstanten Druck oder auf einen konstanten Volumenstrom geregelt oder es wird z. B. einer vorgegebenen Volumenstrom-Funktion gefolgt. Bei dieser Regelung wird also der Volumenstrom als Soll-Größe verwendet.

**[0086]** In Fig. 1 ist die Steuereinrichtung **18** nur als ein einfacher Block dargestellt, aus dem Daten übernommen bzw. an den Daten übergeben werden. Fig. 5 zeigt ein vereinfachtes schematisches Bild einer steuer- bzw. regelbaren Spritzgießanlage **10**. Dabei kann es sich, abgesehen von der veränderten Steuereinrichtung **18**, um eine herkömmliche Spritzgießanlage **10** handeln.

**[0087]** Diese weist hier in üblicher Weise einen Zylinder **13** auf, in welchem eine Schnecke **14** als Aktor **14** angeordnet ist. In den Zylinder **13** kann Spritzgussmaterial durch Schraubbewegungen der Schnecke **14** zugeführt werden. An ihrem unteren Ende ist die Schnecke **14** mit einem Einspritzkolben **12** verbunden, der hydraulisch bewegt werden kann. Ebenso könnte aber auch ein Elektromotor zum Einspritzen genutzt werden. An einer Messeinrichtung **11** kann der Hydraulikdruck gemessen werden. Wenn der Hydraulikdruck erhöht wird, wird der Einspritzkolben **12** nach vorne ausgefahren und somit die Schnecke **14** im Zylinder **13** nach vorne gepresst und Spritzgussmaterial aus der Düse **16** in die Kavität der hier sehr grob dargestellten Spritzform **1F** eingepresst. Dabei kann auch an der Düse mittels eines Messensors **15** der Druck der Kunststoffschmelze unmittelbar gemessen werden. Über eine weitere Messeinrichtung **17** kann jederzeit die Position des Aktors **14** bzw. der Schnecke **14** und deren Geschwindigkeit bestimmt werden.

**[0088]** Angesteuert werden die verschiedenen Komponenten bzw. Aktoren durch eine Steuereinrichtung **18**, welche ein Terminal bzw. eine Benutzerschnittstelle **30** mit einer Anzeigeeinrichtung **31** bzw. Bildschirm (siehe **Fig. 14**), vorzugsweise in Form eines Touch-Displays, und gegebenenfalls einem Bedienpanel **36** (mit weiteren Armaturen wie einem Drehsteller **38** (bzw. Einstellrad) und einer Tastatur **39**) aufweist und neben anderen üblichen Komponenten, die in einer solchen Maschinensteuerung vorhanden sind, auch eine erfindungsgemäße Prozessparameter-Ermittlungseinrichtung **20** umfasst, deren wesentlichsten Teile hier grob schematisch eingezeichnet sind. Die weiteren Komponenten der Steuereinrichtung **18** sowie der Spritzgießanlage sind dem Fachmann im Prinzip bekannt und brauchen daher hier nicht im Detail erläutert zu werden.

**[0089]** Die Prozessparameter-Ermittlungseinrichtung **20** umfasst hier zum einen eine erste Schnittstelle **21**, über die beispielsweise die Geometriedaten des Formteils übernommen werden können. Diese Daten werden dann an eine Druckkurven-Ermittlungseinheit **22** weitergeleitet, welche den zuvor anhand der **Fig. 1** erläuterten Verfahrensschritt **1.III** durchführt und beispielsweise in einer FEM-Simulation eine Druckkurve  $p_S$  für das jeweilige Formteil berechnet. Die Druckkurve  $p_S$  kann dann an eine Ereignismuster-Ermittlungseinheit **23a** übergeben werden, welche gemäß dem im Zusammenhang mit **Fig. 1** erläuterten Schritt **1.IV** das formteilspezifische Ereignismuster  $M_S$  aus der virtuellen Druckkurve  $p_S$  ermittelt.

**[0090]** Über eine weitere Schnittstelle **24** kann außerdem eine Mess-Druckkurve  $p_M$  übernommen werden, beispielsweise durch Auslesen des Sensors **11** zur Messung des Hydraulikdrucks, oder direkt durch Auslesen des Sensors **15** im Schmelzkanal, d. h. direkt des Schmelzedrucks. Diese Mess-Druckkurve  $p_m$  kann an die Muster-Ermittlungseinheit **23b** übergeben werden, welche in analoger Weise ein Mess-Ereignismuster  $M_m$  aus der Mess-Druckkurve  $p_m$  ermittelt, beispielsweise ebenfalls durch Differenzierung und Flankenanalyse, wie dies oben für die simulierte Druckkurve  $p_S$  beschrieben wurde. Die beiden Muster-Ermittlungseinheiten **23a**, **23b** können dabei auch als eine gemeinsame Muster-Ermittlungseinheit ausgebildet sein, welche einfach nur mit den jeweiligen Eingangsdaten  $p_S$ ,  $p_m$  gefüttert wird und entsprechende Ereignismuster  $M_S$ ,  $M_m$  liefert.

**[0091]** Die Schnittstellen **21**, **24** können die Daten jeweils beispielsweise auch über ein übliches Interface **19** der Steuereinrichtung **18** erhalten, über das ein externer Datenaustausch zu anderen Rechneinheiten, Speichern etc. möglich ist, welches aber auch die Daten von Sensoren **11**, **15** der Spritzgießanlage selbst übernehmen kann.

**[0092]** Die Messung der Mess-Druckkurve  $p_m$  mit Hilfe der Steuereinrichtung **18** ist in **Fig. 1** als Block **1.VI** dargestellt. Die dabei erhaltene Mess-Druckkurve  $p_m$  kann dann optional im Schritt **1.VII** noch korrigiert werden, beispielsweise, wenn während der Messung der Volumenstrom nicht konstant gehalten, sondern gemäß einer bestimmten Steuerungsregel verändert wurde. Mit Hilfe der Daten über die Veränderung des Volumenstroms ist dann eine Umrechnung in eine zeitkorrigierte Mess-Druckkurve  $p_{mk}$  möglich, welche einer Mess-Druckkurve bei konstantem Volumenstrom entsprechen würde. Um aus den einzelnen Werten des Drucks über der Zeit die Mess-Druckkurve  $p_m$  (bzw. die zeitkorrigierte Mess-Druckkurve  $p_{mk}$ ) zu erzeugen, könnte die Prozessparameter-Ermittlungseinrichtung auch eine (nicht dargestellte) separate weitere Druckkurven-Ermittlungseinheit aufweisen. Grundsätzlich könnten diese Druckkurven aber auch schon an anderer Stelle in der Steuereinrichtung berechnet werden und als komplette Druckkurven über die Schnittstelle **24** übergeben werden.

**[0093]** Im Schritt **1.VIII** wird dann auf Basis der Mess-Druckkurve bzw. optional der zeitkorrigierte Mess-Druckkurve  $p_{mk}$  das Mess-Ereignismuster  $M_m$  erzeugt. Dies erfolgt in der Muster-Ermittlungseinheit **23b**.

**[0094]** Sowohl das formteilspezifische Ereignismuster  $M_S$  als auch das Mess-Ereignismuster  $M_m$  werden dann an eine Zuordnungseinheit **25** übergeben, welche beispielsweise den Schritt **1.IX** (siehe **Fig. 1**) durchführt. Hier wird versucht, die Ereignismuster  $M_S$ ,  $M_m$  oder zumindest Teile davon gegeneinander abzugleichen, um so die einzelnen Ereignisse der beiden Ereignismuster  $M_S$ ,  $M_m$  einander zuzuordnen. In der Regel wird versucht,

die virtuellen Ereignisse des formteilspezifischen Ereignismusters  $M_S$  jeweils den Mess-Ereignissen des Mess-Ereignismusters  $M_m$  zuzuordnen, wie dies später noch erläutert wird.

**[0095]** Sind die Ereignisse einander zugeordnet, so kann dann in einem weiteren Schritt **1.X** die Schmelzefrontposition den jeweiligen Ereignissen zugeordnet werden. Im Schritt **1.XI** kann dann auf Basis der Zeitpunkte, zu denen diese Ereignisse eintraten, die Fließfrontgeschwindigkeit ermittelt werden, und schließlich können im Schritt **1.XII** auch maschinenunabhängige Kenngrößen wie beispielsweise die Schergeschwindigkeit etc. berechnet werden. Dies wird später noch erläutert. All diese Schritte **1.X**, **1.XI**, **1.XII** können beispielsweise in der Auswerteeinheit **26** durchgeführt werden. Die ermittelten Daten, insbesondere die Prozessparameterwerte in Abhängigkeit von der Einspritzzeit und/oder Aktorposition, können von der Auswerteeinheit **26** an eine Anzeigen-Ansteuerungseinrichtung **27** übergeben werden, die die Anzeigeeinrichtung **31** der Benutzerschnittstelle **30** entsprechend ansteuert, um die Prozessparameterwerte, insbesondere die Position der Fließfront SF und/oder Fließfrontgeschwindigkeiten, in der Spritzform **1F** anzuzeigen.

**[0096]** Sinnvollerweise werden bei genau der Parametereinstellung der Spritzgießanlage, welche die beste Formteilqualität liefert, die maschinenunabhängigen Größen sowie vorzugsweise auch die anderen Größen, wie Fließfrontgeschwindigkeiten etc., als Referenzliste abgelegt. Dies ist im Schritt **1.XIV** dargestellt. Beispielsweise können alle relevanten Größen als Komponenten auch in den bereits oben erwähnten Ereignisvektor zurückgeschrieben und dann in einem Kenndatensatz abgelegt werden. Bei einem Maschinenwechsel können dann diese Komponenten als Soll-Größen dienen. Durch Rückrechnung lassen sich die neuen Einstellungs- werte der Maschinenparameter wie der Volumenstromverlauf und/oder der Druckverlauf etc. bestimmen und entsprechend die Maschine regeln. Bei einer solchen Regelung werden dann in einem Schritt **1.XIII** die im letzten Spritzgussvorgang im Schritt **1.XII** ermittelten Größen mit der Referenzliste der Kenngrößen, die im Schritt **1.XIV** abgelegt wurden, verglichen und dann entsprechende Steuerbefehle an die Spritzgießanlage bzw. deren Steuerkomponenten, die für die Einstellung der Aktoren verantwortlich sind, übermittelt.

**[0097]** Die Fließfrontgeschwindigkeit  $v_i$  der Schmelze kann dabei gemäß

$$v_i = \frac{x_{Si+1} - x_{Si}}{t_{mi+1} - t_{mi}} \quad (4)$$

berechnet werden, wobei  $x_{Si}$  und  $x_{Si+1}$  die Positionsdaten des  $i$ -ten bzw.  $(i + 1)$ -ten Ereignisses repräsentieren soll, wie sie von den virtuellen Ereignissen bekannt sind, und  $t_{mi}$  bzw.  $t_{mi+1}$  jeweils die Maschinenzeit ist, zu der die dem jeweiligen virtuellen Ereignis zugeordneten Mess-Ereignisse aufgetreten sind, d.h. die Position erreicht wurde.

**[0098]** Ebenso lässt sich zwischen zwei Ereignissen auch wie folgt die Massedruckerhöhung bestimmen:

$$\Delta p_i = p_{mi+1} - p_{mi} \quad (5)$$

**[0099]** Dabei sind  $p_{mi}$  und  $p_{mi+1}$  die gemessenen Druckwerte zu den zum  $i$ -ten bzw.  $(i + 1)$ -ten Ereignis gehörenden Zeiten  $t_{mi}$  bzw.  $t_{mi+1}$ .

**[0100]** Aus diesen berechneten Komponenten, Fließfrontgeschwindigkeit und Massedruckerhöhung, können dann die maschinenunabhängigen rheologischen Größen wie die Wandschubspannung  $\tau_i$ , die Schergeschwindigkeit  $\dot{\gamma}_i$  und die Schmelzeviskosität  $\eta_i$  abgeleitet werden. Dies erfolgt beispielsweise bei rechteckigem Fließkanalquerschnitt gemäß den Gleichungen:

$$\tau_i = \frac{\Delta p_i \cdot h_{Si}}{2 \cdot (x_{Si+1} - x_{Si})} \quad (6)$$

$$\dot{\gamma}_i = 0,722 \cdot \frac{6 \cdot v_i}{h_{Si}} \quad (7)$$

$$\eta_i = \frac{\Delta p_i \cdot h_{Si}^2}{12 \cdot (x_{Si+1} - x_{Si}) \cdot v_i} \quad (8)$$

**[0101]** Dabei ist  $h_{Si}$  die Fließkanalhöhe an der Position  $x_{Si}$ . Für andere Geometrien gelten ähnliche Gleichungen, die dem Fachmann bekannt sind.

**[0102]** In Kombination mit dem erfindungsgemäßen Verfahren kann die Spritzgießanlage also wie ein Rheometer verwendet werden, welches in Echtzeit rheologische Informationen an- und zwischen den Ereignisstellen der Formteilgeometrie liefert.

**[0103]** Um die Genauigkeit des beschriebenen Verfahrens zu erhöhen, können vorzugsweise die Positionsdaten und weitere Daten (beispielsweise Komponenten des Ereignisvektors) zwischen zwei Ereignissen  $E_{m,i+j}$ ,  $E_{m,i+j+1}$  analytisch oder numerisch approximiert werden. Liegt eine FEM Berechnung vor, kann dabei insbesondere jedem Knotenpunkt ein vollständiger Satz von Daten, insbesondere Komponenten des Ereignisvektors, zugewiesen werden.

**[0104]** Die Hinterlegung der Referenzliste kann auch dazu genutzt werden, um die Anlage zu regeln, wenn sich während des Spritzgießbetriebs durch Störgrößen wie z. B. äußere Temperatureinflüsse oder veränderte Materialviskosität Betriebsbedingungen ändern. Dann kann durch geeignete Regemaßnahmen die Parametereinstellung der Maschine korrigiert werden, indem die genannten maschinenunabhängigen rheologischen Größen beispielsweise als Soll-Größen für die Korrektur verwendet werden.

**[0105]** Es wird an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass sämtliche Schritte des Verfahrens nach **Fig. 1** in der Steuereinrichtung **18** selbst durchgeführt werden können, aber nicht zwingend müssen. Insbesondere bietet es sich an, die Simulation bzw. Berechnung des formteilspezifischen Ereignismusters  $M_S$  gemäß den Schritten **1.I** bis **1.IV** auf einer besonders leistungsfähigen externen Rechneinrichtung und beispielsweise alle anderen Schritte in der Steuereinrichtung **18** durchzuführen.

**[0106]** Im Folgenden wird das Auffinden eines formteilspezifischen Ereignismusters innerhalb eines Mess-Ereignismusters noch einmal am Beispiel eines Spritzgussvorgangs für ein Formteil **1'** in Form einer Stufenplatte erläutert. Die Geometrie dieser Stufenplatte sowie die Geometrie des Angussystems bzw. Angusskanals sind in einer perspektivischen Darstellung in **Fig. 6** dargestellt. Hier sind auch wieder die drei Ereignisstellen  $F_1$ ,  $F_2$ ,  $F_3$ , nämlich Stufen  $F_1$ ,  $F_2$  sowie das Ende  $F_3$ , des Formteils **1'** dargestellt.

**[0107]** Es handelt sich hierbei um eine dreistufige Platte mit einem Querschnittsverhältnis an den Stufen von  $H_1$  (größte Höhe) =  $2 \times H_2 = 4 \times H_3$  (kleinste Höhe  $H_3 = 1$  mm). Die Grundfläche beträgt  $120 \times 60$  mm. Die CAD-Geometrie wurde als Step-Datei (.stp) übernommen und das FEM-Netz wurde mit Autodesk Moldflow generiert. Dabei wurde eine Elementgröße von 1 mm in einem 3D-Volumenmodell mit acht Schichten über der Wandstärke verwendet. Das Angussystem umfasst eine Angussstange, welche hier in **Fig. 6** nach unten weist, sowie einen Schwalbenschwanz am größten Querschnitt. Dieses Angussystem wurde in der numerischen Analyse zur Berechnung der formteilspezifischen Druckkurve mit berechnet. In der Berechnung wurde von einer Werkzeugtemperatur von  $30^\circ\text{C}$  und einer Massetemperatur von  $250^\circ\text{C}$  ausgegangen, der Volumenstrom wurde bei  $15 \text{ cm}^3/\text{s}$  konstant gehalten. Es wurde angenommen, dass es sich bei dem Material um ein ABS-Terluran GP-22 handelt. Bei 98 % Füllung wurde simuliert auf Nachdruck umgeschaltet.

**[0108]** **Abb. 7** zeigt die hierbei ermittelte virtuelle bzw. simulierte Druckkurve  $p_S$  (die Darstellung erfolgt wieder in willkürlichen Einheiten). Gestrichelt dargestellt ist ein Fenster, das markiert, welcher Teil der Druckkurve  $p_S$  tatsächlich für die weitere Analyse verwendet wurde. Es ist nämlich sinnvoll, nur einen Teil der Druckkurve  $p_S$  zu verwenden, vorzugsweise den Teil bis zum Ende der Formfüllungsphase, d. h. bis die Schmelzefront erstmals das Fließwegende der Kavität der Spritzform erreicht.

**[0109]** In **Fig. 8** ist noch einmal dieser Ausschnitt der Druckkurve  $p_S$  in einer gemeinsamen Grafik mit der darunter angeordneten differenzierten Druckkurve  $dp_S$  dargestellt. Die Zeit ist hierbei in s angegeben und der Druck jeweils in MPa. In der unten dargestellten differenzierten Druckkurve ist auch bereits die Flankenanalyse symbolisiert, durch die insgesamt vier signifikante Ereignisse  $E_{S1}$ ,  $E_{S2}$ ,  $E_{S3}$ ,  $E_{S4}$  zu vier verschiedenen Zeitpunkten  $t_{S1}$ ,  $t_{S2}$ ,  $t_{S3}$ ,  $t_{S4}$  identifiziert wurden. Diese Zeiten  $t_{S1}$ ,  $t_{S2}$ ,  $t_{S3}$ ,  $t_{S4}$  sind wie erläutert auf den virtuellen Ablauf des Einspritzvorgangs bezogen. Sofern später eine tatsächliche Einspritzung in dieses Werkzeug erfolgt und die dabei gemessene Mess-Druckkurve in entsprechender Weise differenziert und mit einer Flankenanalyse analysiert wird, sollte ein passendes Muster darin zu finden sein, wobei dieses Muster dadurch charakterisiert ist, dass es wieder eine ähnliche oder im Wesentlichen gleiche Abfolge von Ereignissen mit ähnlichen oder im Wesentlichen gleichen relativen Abständen zueinander aufweist, sofern der Volumenstrom während der Messung konstant gehalten wurde. Dabei kann es durchaus sein, dass zusätzliche Ereignisse im Muster auftreten.

**[0110]** Um das erfindungsgemäße Verfahren zu testen, wird dann ein Spritzgießversuch durchgeführt, wobei ein Formteil, wie es in **Fig. 6** dargestellt ist, mit exakt demselben Angussystem hergestellt wurde. Für diesen Spritzgießversuch wurde eine Spritzgießanlage Typ Battenfeld HM 800 mit 30 mm Schneckendurchmesser verwendet. Es wurde eine geschwindigkeitsgeregelt Einspritzung mit einem konstanten Volumenstrom von  $15 \text{ cm}^3/\text{s}$  durchgeführt, d. h. entsprechend der zuvor durchgeführten Simulation. Auch die Einstellparameter und das Material wurden wie bei der Simulation gewählt. Die Massedruckmessung, d. h. die Messung des Drucks im Spritzgussmaterial, erfolgte mittels eines im Schneckenorraum, d. h. in der Maschinendüse, eingesetzten Massedruckaufnehmers. Die hierbei ermittelte Mess-Druckkurve  $p_m$  ist in **Fig. 9** dargestellt (wieder zunächst in willkürlichen Einheiten). Auch hier ist ein Fenster eingezeichnet, das symbolisiert, welcher Bereich der Druckkurve  $p_m$  für die Analyse dann verwendet wurde.

**[0111]** **Fig. 10** zeigt analog zu der **Fig. 8** für die simulierte Messung oben eine Grafik der Mess-Druckkurve  $p_m$  und darunter die nach der Zeit  $t$  differenzierte Mess-Druckkurve  $dp_m$ . Der Maschinendruck ist hierbei in bar angegeben, ebenso bei der ersten Ableitung, und die Zeit in s. Es gibt hier insgesamt sechs Ereignisse  $E_{m1}$ ,  $E_{m2}$ ,  $E_{m3}$ ,  $E_{m4}$ ,  $E_{m5}$ ,  $E_{m6}$ , welche zu den Zeitpunkten  $t_{m1}$ ,  $t_{m2}$ ,  $t_{m3}$ ,  $t_{m4}$ ,  $t_{m5}$ ,  $t_{m6}$  auftreten.

**[0112]** In **Fig. 11** sind noch einmal das formteilspezifische Ereignismuster  $M_S$ , welches anhand von **Fig. 8** ermittelt wurde, und das Mess-Ereignismuster  $M_m$ , welches anhand von **Fig. 10** ermittelt wurde, als Punktescharen in zwei Reihen übereinander dargestellt. Wie hier zu sehen ist, hat das formteilspezifische Ereignismuster  $M_S$  vier Ereignisse  $E_{S1}$ ,  $E_{S2}$ ,  $E_{S3}$ ,  $E_{S4}$  und das Mess-Ereignismuster  $M_m$  sechs Ereignisse  $E_{m1}$ ,  $E_{m2}$ ,  $E_{m3}$ ,  $E_{m4}$ ,  $E_{m5}$ ,  $E_{m6}$ . Diese Punktescharen sind jeweils über der Zeitachse  $t$  aufgetragen. Die Ereignisse treten zu unterschiedlichen absoluten Zeiten auf, jedoch sollte sich das formteilspezifische Ereignismuster  $M_S$  im Mess-Ereignismuster  $M_m$  wiederfinden lassen, wenn das formteilspezifische Ereignismuster  $M_S$  entsprechend zeitlich skaliert, d. h. verzerrt und verschoben, wird.

**[0113]** So können die simulierten Ereignisse des formteilspezifischen Ereignismusters  $M_S$  innerhalb einer vorgegebenen Fehlerschranke  $\psi$  bestimmten Mess-Ereignissen des Mess-Ereignismusters  $M_m$  zugeordnet werden. Eine einfache Möglichkeit hierzu bietet die lineare Analyse bzw. ein iteratives Matching-Verfahren, wie es nachfolgend anhand des Flussdiagramms in den **Fig. 12a** und **Fig. 12b** (in Zusammenschau) erläutert wird, wobei die Anschlussstellen zwischen den **Fig. 12a** und **Fig. 12b** im Flussdiagramm mit a, b, c, d bezeichnet sind.

**[0114]** Das Verfahren startet im Schritt **12.I**. Im Schritt **12.II** erfolgt zunächst eine Initialisierung der Variablen  $j$ ,  $i$  und  $f_k$ . Die Variable  $j$  wird zunächst auf 0 gesetzt. Diese Variable könnte man als „Verschiebeindex“ bezeichnen, welcher festlegt, um wie viele Ereignisse das formteilspezifische Ereignismuster  $M_S$  gegenüber dem Mess-Ereignismuster  $M_m$  verschoben wird, um eine optimale Anpassung zu erreichen. Eine außerdem in der Iteration benötigte Laufvariable  $i$  wird auf 1 gesetzt. Schließlich wird als Variable ein Skalierungs- oder Streckungsfaktor  $f_k$ , welcher in festgelegten Inkrementen (z.B. von 0,01), von einem zuvor definierten Minimalwert (z.B. 0,1) und Maximalwert (z.B. 10) laufen kann, auf einen Startwert  $f_{\text{start}}$  (beispielsweise den Minimalwert) festlegt. Dieser Skalierungsfaktor  $f_k$  gibt an, um wieviel die Zeitachse des formteilspezifischen Ereignismusters  $M_S$  gegenüber dem Mess-Ereignismusters  $M_m$  gestreckt bzw. skaliert wird.

**[0115]** Im Rahmen des iterativen Verfahrens werden dann mehrere Iterationsschleifen durchlaufen.

**[0116]** Eine innere Schleife, welche die Schritte **12.III** bis **12.VII** umfasst, bezieht sich auf die Laufvariable  $i$ , welche von 1 bis  $n$  läuft.  $n$  ist hier die Anzahl der Ereignisse des formteilspezifischen Ereignismusters  $M_S$ . Für jede Streckung wird in dieser Schleife aus dem formteilspezifischen Ereignismuster ein neues gestrecktes Muster berechnet und dieses versucht, mit dem Mess-Ereignismuster in Überdeckung zu bringen.

**[0117]** Hierzu werden im Schritt **12.III** zwei benachbarte virtuelle bzw. simulierte Ereignisse  $E_{S,i}$ ,  $E_{S,i+1}$ , des formteilspezifischen Ereignismusters mit dem aktuellen Skalierungsfaktor  $f_k$  multipliziert. Im Schritt **12.IV** wird dann die zeitliche Differenz der skalierten virtuellen Ereignisse  $E_{k,i}$ ,  $E_{k,i+1}$ , gebildet und ebenso die Differenz der Mess-Ereignisse  $E_{m,i+j}$ ,  $E_{m,i+j+1}$ , des Mess-Ereignismusters berechnet. Hierbei gibt  $i$  den Laufindex des virtuellen Ereignisses an und  $j$  den Indexwert, um den das formteilspezifische Ereignismuster gegenüber dem Mess-Ereignismuster bereits in einer übergeordneten Schleife (siehe Schritt **12.XIII**) verschoben wurde. Im ersten Durchlauf mit  $j = 0$  sind die Indizes der simulierten Ereignisse und der Mess-Ereignisse also identisch, d.h. das formteilspezifische Ereignismuster wird so verschoben, dass das erste virtuelle Ereignis auf dem ersten Mess-Ereignis liegt. Bei  $j = 1$  wird das formteilspezifische Ereignismuster dann so verschoben, dass das erste virtuelle Ereignis auf dem zweiten Mess-Ereignis liegt u.s.w.

**[0118]** Weiter wird dann jeweils im Schritt **12.V** die Abweichung  $S_{k,i}$  zwischen den zuvor berechneten Zeitabständen im formteilspezifischen Ereignismuster und Mess-Ereignismuster ermittelt. Im Schritt **12.VI** wird geprüft, ob die Schleife bereits für alle  $n$  Ereignisse  $E_{S,i}$  durchlaufen wurde, und ansonsten (Abzweig „no“) wird im Schritt **12.VII** der Wert von  $i$  um 1 erhöht und die innere Schleife erneut durchlaufen. Wurden für den aktuellen Skalierungswert  $f_k$  alle Abweichungen  $S_{k,i}$  für die einzelnen Ereignisabstände berechnet (Abzweig „y“), so wird daraus im Schritt **12.VIII** eine Gesamtabweichung  $S_k$  gemäß

$$S_k = \left| \sum_{i=1}^n S_{k,i} \right| \quad (9)$$

berechnet.

**[0119]** Im Schritt **12.IX** wird dann geprüft, ob bereits der maximale Skalierungsfaktor  $f_{\max}$  erreicht wurde, und ansonsten (Abzweig „no“) wird im Schritt **12.X** der Skalierungsfaktor  $f_k$  um den Wert  $\Delta f$  inkrementiert und die gesamte Schleife erneut durchlaufen. Ansonsten (Abzweig „y“) wird im Schritt **12.XI** der minimal erreichte Abweichungswert  $S_{\min,k}$  aller in den vorherigen Schleifendurchläufen ermittelten Abweichungswerte  $S_k$  ermittelt.

**[0120]** Da häufig die Anzahl der simulierten virtuellen Ereignisse ungleich der Anzahl der Messereignisse ist, werden wie erläutert durch den Index  $j$  in einer weiter übergeordneten Iterationsschleife das Ereignismuster jeweils um ein Ereignis weitergeschoben und dann noch einmal sämtliche Streckungen bzw. Skalierungen durchgeführt, um zu schauen, ob hier eine bessere Überdeckung erreicht wird. Hierzu erfolgt im Schritt **12.XII** die Prüfung, ob bereits alle möglichen Verschiebungen  $j$  durchlaufen wurden.  $m$  ist dabei die Anzahl der Messereignisse. Ansonsten (Abzweig „no“) wird im Schritt **12.XIII** der Wert von  $j$  um 1 erhöht und der Skalierungsfaktor  $f_k$  auf den Wert  $f_{\text{start}}$  und der Wert  $i$  wieder auf 1 re-initialisiert. Andernfalls (Abzweig „y“) wird im Schritt **12.XIV** wieder der minimale Abweichungswert  $S_{\min}$  aller in den vorherigen Schleifendurchläufen ermittelten Abweichungswerte  $S_{\min,k}$  ermittelt.

**[0121]** Dann wird im Schritt **12.XV** geprüft, ob letztendlich die Gesamtabweichung  $S_{\min}$  unter einer vorgegebenen Fehlerschranke  $\psi$  liegt. Ist dies nicht der Fall (Abzweig „no“), wird im Schritt **12.XVI** ein einzelnes Ereignis eliminiert und der gesamte Prozess in der äußersten Schleife erneut durchlaufen. Zusätzlich zu einer Verschiebung können hier nämlich auch einzelne oder mehrere Ereignisse eliminiert werden, insbesondere Ereignisse aus dem mittleren Bereich des Mess-Ereignismusters, aber auch des formteilspezifischen Ereignismusters. Dabei ist zu beachten, dass eine zuvor erläuterte Verschiebung letztlich ja einer Eliminierung der ersten und letzten Ereignisse für den Vergleich der Ereignismuster gleichkommt, so dass meist keine Eliminierung erforderlich ist. Falls dies nötig ist, könnte aber die äußere Schleife beliebig oft durchlaufen werden, wobei immer andere Ereignisse oder sogar mehrere Ereignisse ausgeschlossen werden, so lange, bis letztendlich die Gesamtabweichung  $S_{\min}$  unter der Fehlerschranke  $\psi$  liegt. In diesem Fall wird das Zuordnungsverfahren im Schritt **12.XVII** beendet (Abzweig „y“) und die jeweiligen Ereignisse können als korrekt zugeordnet angesehen werden. Wird auch nach Durchlauf aller möglichen Kombinationen oder nach einer definierten Anzahl von Durchläufen und/oder bei Ablauf einer Maximalzeit immer noch keine Gesamtabweichung  $S_{\min}$  unter der Fehlerschranke  $\psi$  erreicht, kann z. B. ein Warnhinweis an einen Bediener ausgegeben werden.

**[0122]** Fig. 13 zeigt diesen Zustand für das Mess-Ereignismuster  $M_m$  und das formteilspezifische Ereignismuster  $M_S$  gemäß Fig. 11. Wie man hier sieht liegen die simulierten Ereignisse  $E_{S,i}$  mit den gemessenen Ereignissen  $E_{m,i+j}$  für  $j = 1$  innerhalb einer vorgegebenen Fehlerschranke passend übereinander ( $E_{S1}$  passt zu  $E_{m2}$ ,  $E_{S2}$  passt zu  $E_{m3}$  usw.). Dass hier noch weitere Ereignisse am Anfang und am Ende des Mess-Ereignismusters  $M_m$  zu finden sind, liegt daran, dass innerhalb der Mess-Druckkurve  $p_m$  ein größerer Bereich vermessen wurde, als dies zuvor simuliert wurde.

**[0123]** Es wird an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass zusätzlich oder alternativ anstelle des formteilspezifischen virtuellen Ereignismusters auch das Mess-Ereignismuster zeitlich skaliert und/oder verschoben werden könnte oder im virtuellen Ereignismuster einzelne Ereignisse eliminiert werden können.

**[0124]** In Fig. 14 ist dargestellt, wie die Lage der Schmelzfront SF der Kunststoffschmelze KS im Formteil **1'** bzw. in der Kavität der Spritzform **1'** auf einer Anzeigeeinrichtung **31** visualisiert werden kann. Dies ist ohne weiteres möglich, da ja aufgrund des erfindungsgemäßen Verfahrens bekannt ist, wann die Schmelzefront bzw. Fließfront SF die einzelnen Ereignisstellen erreicht und aufgrund der ermittelten Fließfrontgeschwindigkeit berechnet werden kann, wann die Fließfront zu welchem Zeitpunkt welchen Ort zwischen den Ereignisstellen erreicht.

**[0125]** Daher kann, wie in **Fig. 14** gezeigt, beispielsweise das Formteil **1'** einfach in einer geeigneten – z. B. durchsichtigen – Darstellung und die Ausbreitung der Schmelze darin visualisiert werden.

**[0126]** In **Fig. 14** ist hierzu ein Beispiel für ein Terminal **30** bzw. eine Benutzerschnittstelle **30** der Spritzgießmaschine dargestellt, welche neben einem Bildschirm **31** als Anzeigeeinrichtung, hier in Form eines Touchdisplays, auch ein Bedienpanel **36** mit mechanischen Bedienelementen **37, 38, 39, 40** aufweist. Auf dem Touchdisplay **31** ist hier in zwei oberen nebeneinanderliegenden Anzeigebereichen **32a, 32b** jeweils die Lage der Fließfront der Kunststoffschmelze im Formteil **1'** visualisiert, wobei unterschiedliche Ansichten möglich sind. So erfolgt in **Fig. 14** im Anzeigebereich **32a** oben links die Darstellung des virtuellen Formteils **1'** mit der darin visualisierten Ausbreitung der Fließfront SF perspektivisch und im Bildschirmbereich **32b** rechts daneben in einer Draufsicht von oben. Vorzugsweise kann der Bediener durch Berühren des Bildschirms in dem jeweiligen Bereich auch die Ansicht drehen und wenden. Die unterschiedlichen Anzeigebereiche **32a, 32b** können, wie später noch erläutert, auch dazu dienen, die Ausbreitung der Kunststoffschmelze KS im Formteil **1'** unter unterschiedlichen Bedingungen darzustellen.

**[0127]** Unterhalb dieser virtuellen Darstellung der Ausbreitung der Kunststoffschmelze KS im Formteil **1'** befinden sich weitere Anzeigebereiche **33a, 33b**. Im Anzeigebereich **33b** ist als Beispiel ein Diagramm eines Prozesssteuerparameters dargestellt, hier konkret der Einspritzgeschwindigkeit  $v$  (in mm/s) bzw. Vorschubgeschwindigkeit des Aktors bzw. der Schnecke **14** über der Aktorposition  $s$  (in mm). Auf dem darüber liegenden Anzeigebereich **33a** wird die Position der Schnecke innerhalb des Zylinders noch einmal visualisiert.

**[0128]** Unter dem Anzeigebereich **33b** mit dem Diagramm befinden sich weitere virtuelle Bedienelemente **34, 35**, hier links ein Bedienfeld **34**, um die dynamische Visualisierung des Spritzgussprozesses bzw. der Formfüllung einzustellen. Wie oben erläutert, erfolgt die Darstellung der Formfüllung ja vorzugsweise in Form einer Animation, z.B. in Form eines Films bzw. einer Slideshow. Im Bedienfeld **34** befinden sich entsprechende Bedienelemente, um die Animation zu stoppen, wieder zu starten, langsam vor- und zurückzulaufen oder schnell vor- und zurückzulaufen. Daneben befindet sich ein virtueller Schieberegler **35**, mit dem beispielsweise eine Position der Schmelzefront schnell angesprungen werden kann. Vorzugsweise ist es möglich, dass der Bediener mit Hilfe des Diagramms im Anzeigebereich **33b** auch die Vorschubgeschwindigkeit  $v$  in Abhängigkeit von der Aktorposition  $s$  ändern kann. Dies wäre beispielsweise bei einem Touchscreen möglich, indem der Bediener einfach mit dem Finger die Kurve variiert. Alternativ könnten aber auch weitere, insbesondere virtuelle, Einstellregler oder dergleichen vorhanden sein, die eine genauere Einstellung an der jeweiligen Aktorposition ermöglichen, um so die Funktion zu verändern. Die so veränderte Funktion entspricht dann also nicht mehr der Funktion, wie sie bei der Durchführung eines vorherigen Spritzgussprozesses oder eines simulierten Spritzgussprozesses verwendet wurde, der gerade visualisiert wird, sondern einer „Wunschkurve“, die dann als Prozesssteuerungsparameterfunktion für einen nachfolgenden Spritzgussprozess gespeichert werden kann. Dies wird später noch anhand der **Fig. 23** und **Fig. 24** erläutert.

**[0129]** Eine alternative Möglichkeit, möglichst genau die Position der dargestellten Fließfront SF einzustellen, um dann an dieser Stelle beispielsweise einen Prozesssteuerparameter zu variieren, wird durch die mechanischen Bedienelemente des Bedienpanels **36** zur Verfügung gestellt. Hierzu zählt u. a. ein Drehsteller **37** in Form eines Rads, mit dem eine sehr genaue Einstellung möglich ist und bildweise die Schmelzefront SF verstellt werden kann. Im Zentrum dieses Drehstellers **36** befindet sich hier ein Drückschalter **37**. Wird dieser gedrückt, kann beispielsweise die Position an dieser Stelle festgehalten werden. Einem solchen Drückschalter **37** kann aber auch eine andere Funktion zugewiesen werden.

**[0130]** Daneben befindet sich hier eine Tastatur **39**. Vorzugsweise kann es sich hierbei um eine numerische Tastatur handeln, um einen Wert einzustellen. Außerdem umfasst diese Tastatur hier auch eine Art Enter-Taste **40**. Diese kann beispielsweise mit der Funktion belegt werden, dass eine eingestellte Prozesssteuerparameterfunktion, beispielsweise die zuvor eingestellte Funktion für die Einspritzgeschwindigkeit  $v$  in Abhängigkeit von der Aktorposition  $s$ , für die Steuerung eines nachfolgenden Spritzgussprozesses übernommen wird, d. h. diese Funktion als Soll-Funktion gespeichert wird.

**[0131]** **Fig. 15** zeigt ein weiteres Formteil **1''**, mit dem ein weiterer Versuch zur Überprüfung des erfindungsgemäßen Verfahrens durchgeführt wurde.

**[0132]** Das Formteil **1''** ist hier ein Stapelbaustein mit einer konstanten Wandstärke von 1,5 mm. Die Grundfläche beträgt  $160 \times 75$  mm. Auch hier wurde mit Autodesk Moldflow ein FEM-Netz generiert, wobei eine Elementgröße von 1,5 mm in einem 3D-Volumenmodell mit vier Schichten über Wandstärke angenommen wurde. Die gesamte CAD-Geometrie wurde wieder als Step-Datei (.stp) zur Verfügung gestellt. Dieser Stapelbaustein

wurde zentral an der Unterseite über einem Stangenanguss angespritzt. Das Angusssystem war dabei nicht Teil der numerischen Analyse bzw. Simulation. Auch hier wurden als Simulationsdaten für die FEM-Berechnung wieder eine Werkzeugtemperatur von 30°C, eine Massetemperatur von 250°C, der Volumenstrom als 25 cm<sup>3</sup>/s und als Material wieder ABS-Terluran GP-22 angenommen. Die simulierte Umschaltung auf Nachdruck erfolgte auch hier bei 98 % Füllung.

**[0133]** Fig. 16 zeigt eine mit diesem Verfahren numerisch berechnete, also simulierte Massedruckkurve, wobei wieder der für die spätere Analyse ausgewählte Bereich gestrichelt eingezeichnet ist. Fig. 17 zeigt dann wieder diesen ausgewählten Teil der simulierten Druckkurve (oben) und darunter die nach der Zeit differenzierte Druckkurve mit der Flankenanalyse. Hier wurden insgesamt drei besondere Ereignisse  $E_{S1}$ ,  $E_{S2}$ ,  $E_{S3}$  ermittelt.

**[0134]** Entsprechend wurde dann ein echter Spritzgießversuch durchgeführt, wobei die gleiche Spritzgießanlage wie beim ersten Versuch mit der einfachen Stufenplatte verwendet wurde. Es wurde auch hier eine geschwindigkeitsgeregelt Einspritzung mit einem Volumenstrom von 25 cm<sup>3</sup>/s entsprechend dem simulierten Volumenstrom durchgeführt, und auch die anderen Einstellparameter wurden wie bei der virtuelle Einspritzung gewählt.

**[0135]** Fig. 18 zeigt die dabei ermittelte Druckkurve, wieder mit dem darin markierten ausgewählten Bereich für die weitere Analyse, und in Fig. 19 ist wieder oben dieser ausgewählte Bereich der Druckkurve und darunter die nach der Zeit differenzierte Druckkurve mit der Flankenanalyse dargestellt. Auch hier wurden wie bei der Simulation bei einer Flankenanalyse drei Ereignisse  $E_{m1}$ ,  $E_{m2}$ ,  $E_{m3}$  gefunden.

**[0136]** In Fig. 20 sind noch einmal über der Zeit  $t$  das Mess-Ereignismuster  $M_m$  (untere Reihe) und das virtuelle formteilspezifische Ereignismuster  $M_S$  (mittlere Reihe) dargestellt. Darüber ist in einer oberen Reihe ein formteilspezifisches Ereignismuster  $M_S'$  aufgetragen, welches aus dem ursprünglichen formteilspezifischen Ereignismuster  $M_S$  erzeugt wurde, indem dieses lediglich so verschoben wurde, dass sich die jeweils ersten Ereignisse überdecken, und mit einem Streckungsfaktor  $f_k = 0,90$  (mit  $f_{\text{start}} = 0,1$  und Streckungsinkrement  $\Delta f = 0,01$ ) zeitlich skaliert die geringste Abweichung liefert. Dies zeigt, wie die virtuellen Ereignisse des formteilspezifischen simulierten Ereignismusters  $M_S$  den Messereignissen des Mess-Ereignismusters  $M_m$  innerhalb der vorgegebenen Fehlerschranke zugeordnet werden können.

**[0137]** Anhand der zugeordneten Ereignisse konnte wieder das Eintreffen der Schmelzfront an den bestimmten Ereignisstellen im Formteil **1'** und darauf basierend dann auch die Fließfrontgeschwindigkeit der Schmelzfront ermittelt werden. Mit Hilfe dieser Daten war es dann möglich, den gesamten Einspritzvorgang in Abhängigkeit von der Maschinenzeit bzw. Einspritzzeit und/oder der Aktorposition zu visualisieren.

**[0138]** Hierzu sind in den Fig. 21 und Fig. 22 zwei Beispielbilder dargestellt. Fig. 21 zeigt dabei das Eintreffen der Schmelzfront an der ersten Mess-Ereignisstelle. Dies ist dann der Fall, wenn die Schmelzfront an der Unterseite des Bausteins nach unten herausragende Wandabschnitte erreicht. Fig. 22 zeigt das Eintreffen der Schmelzfront an der zweiten Mess-Ereignisstelle, nämlich dann, wenn die Schmelzfront einen konkaven Ausschnitt an der einen Schmalseite des Bausteins erreicht. Auch zu diesem Zeitpunkt gibt es eine signifikante Änderung im Druckverlauf.

**[0139]** Diese Visualisierungen zeigen eindrucksvoll, wie sich mit Hilfe des erfindungsgemäßen Verfahrens die Formfüllung (Schmelzposition) in Abhängigkeit von der Maschinenzeit bzw. Einspritzzeit und/oder der Aktorposition darstellen lässt und die dabei ermittelten Prozessparameterwerte und Visualisierungen auch dafür genutzt werden können, um Spritzgussprozesse schneller als bisher zu optimieren.

**[0140]** Wie eine schnelle Optimierung des Spritzgussprozesses mit Hilfe der Visualisierung möglich ist, wird noch einmal anhand des Beispiels aus Fig. 14 mit Hilfe der nachfolgenden Fig. 23, Fig. 24 erläutert. Diese zeigen jeweils wieder das Terminal **30** und das Display **31** mit der Visualisierung der Formfüllung in der einfachen Spritzform **1'** gemäß Fig. 6. Die Anzeigebereiche **32a**, **32b**, **33a**, **33b** sind im Display **31** wieder in ähnlicher Weise belegt wie bei dem in Fig. 14 erläuterten Beispiel. Auch befinden sich auf dem Bildschirm **31** hier die gleichen Bedienelemente **34**, **35**. Weiterhin ist auch das Bedienpanel **36** mit den mechanischen Bedienelementen in der gleichen Form aufgebaut.

**[0141]** Hier hat der Bediener jedoch im Anzeigebereich **32a** die virtuelle Darstellung der Spritzform **1'** so eingestellt, dass sie ebenfalls die Spritzform von oben zeigt. Außerdem sind hier in Form von unterschiedlichen Graustufen die unterschiedliche Schmelzefrontgeschwindigkeiten bzw. Fließfrontgeschwindigkeiten innerhalb des virtuellen Formteils **1'** markiert. Wie hier deutlich zu sehen ist, nimmt mit unterschiedlichen Wandstärken

des Formteils **1'**, d. h. immer dann, wenn die Schmelzefront im Formteil eine niedrigere Wandstärke passiert, die Fließfrontgeschwindigkeit zu, da die Vorschubgeschwindigkeit  $v$  der Schnecke in Abhängigkeit von der Schneckenposition  $s$  konstant und somit auch der Volumenstrom konstant ist, wie dies in dem Diagramm im Anzeigebereich **33b** dargestellt ist. Dies ist jedoch ggf. gar nicht wünschenswert. Eine mögliche Optimierungsstrategie bei der Prozesseinstellung wäre, wenn die Fließfrontgeschwindigkeit über den gesamten Fließweg konstant wäre.

**[0142]** Um dies zu erreichen, kann der Bediener mit Hilfe des Diagramms im Anzeigebereich **33b** und der Bedienelementen des Bedienpanels **36** an genau definierten Aktorpositionen, welche genau den Positionen entsprechen, an denen die Fließfront jeweils einen neuen Abschnitt innerhalb der Spritzform bzw. des Formteils **1'** erreicht (d. h. an den Ereignisstellen) die Vorschubgeschwindigkeit  $v$  herabgesetzt. Anschließend kann er mit dieser vorgegebenen Vorschubgeschwindigkeitsfunktion, wie sie nun im Anzeigebereich **33b** in **Fig. 24** dargestellt ist, zunächst eine Simulation des Spritzgussprozesses durchführen. Das Ergebnis dieser Simulation bzw. numerischen Berechnung kann dann im Bildschirmabschnitt **32b** dargestellt werden, so dass eine genaue Gegenüberstellung des Ergebnisses des vorherigen Spritzgussprozesses und des zu erwartenden neuen Spritzgussprozesses visualisiert wird (siehe **Fig. 24**).

**[0143]** Der Bediener kann also sofort sehen, dass die Fließfrontgeschwindigkeit nun im ganzen Formteil **1'** konstant sein wird, was durch die gleichmäßig graue Darstellung zu erkennen ist. Anschließend kann der Bediener auf den Enter-Knopf **40** im Bedienpanel **36** drücken und somit die eingestellte Prozesssteuerparameterfunktion, nämlich hier die im Anzeigebereich **33b** dargestellte, optimierte Funktion der Vorschubgeschwindigkeit  $v$  in Abhängigkeit von der Schneckenposition  $s$ , übernehmen und damit den nächsten Spritzgussprozess durchführen.

**[0144]** Eine Optimierung – z. B. eine Einstellung einer möglichst konstanten Fließfrontgeschwindigkeit über den gesamten Fließweg – kann auch automatisch erfolgen. Hierbei kann ein Algorithmus z.B. in Abhängigkeit einer vorgewählten konstanten Fließfrontgeschwindigkeit das passende Geschwindigkeitsprofil des Aktors (Einspritzgeschwindigkeitsprofil) berechnen und die Steuerung des Aktors kann dann entsprechend dem berechneten Einspritzgeschwindigkeitsprofil erfolgen. Auch hier kann der Bediener ggf. auf Knopfdruck die automatische Berechnung auswählen.

**[0145]** Bei den obigen bevorzugten Ausführungsbeispielen waren keine speziellen Messeinrichtungen innerhalb der Kavität der Spritzform erforderlich, da auf geschickte Weise mit Hilfe der Ereignismuster die Fließfrontposition innerhalb des Formteils und damit auch alle weiteren gewünschten Prozessparameterwerte ermittelbar waren.

**[0146]** Es wird abschließend noch einmal darauf hingewiesen, dass es sich bei den vorhergehend detailliert beschriebenen Vorrichtungen lediglich um Ausführungsbeispiele handelt, welche vom Fachmann in verschiedenster Weise modifiziert werden können, ohne den Bereich der Erfindung zu verlassen. Insbesondere ist die Erfindung – auch wenn hier als Beispiele jeweils Spritzformen bzw. Werkzeuge mit einer Kavität verwendet wurden – in gleicher oder analoger Weise auch an Spritzformen mit mehreren Kavitäten (jeweils für ein Formteil) nutzbar, die z.B. auch über einen gemeinsamen Einspritzkanal gekoppelt sein können. Wenn alle Kavitäten identisch sind, reicht es unter Umständen aus, die Simulation nur für eine einzelne der Kavitäten durchzuführen, um ein charakteristisches formteilspezifisches Ereignismuster für das betreffende Werkzeug zu ermitteln, welches später dann einem Mess-Ereignismuster zugeordnet werden kann. Auch die Einstellung, welche Parameter jeweils visualisiert werden, ist beliebig. So besteht beispielsweise auch die Möglichkeit, die (wie ja ausführlich dargelegt) über die Fließfrontgeschwindigkeit und Druckerhöhung zwischen den Ereignisstellen berechenbaren Prozessparameter Viskosität und/oder Schergeschwindigkeit und/oder Schubspannung am bzw. im Formteil zu visualisieren, z. B. im Anzeigebereich **32a** bzw. als Vorschau im Anzeigebereich **32b** darzustellen. Weiterhin schließt die Verwendung der unbestimmten Artikel „ein“ bzw. „eine“ nicht aus, dass die betreffenden Merkmale auch mehrfach vorhanden sein können. Ebenso schließen die Begriffe „Einheit“ und „Modul“ nicht aus, dass diese auch aus mehreren, gegebenenfalls auch räumlich getrennten, Untereinheiten bestehen.

### Patentansprüche

1. Verfahren zum Ermitteln einer Anzahl von Prozessparameterwerten in einem Spritzgussprozess innerhalb einer Spritzform (**1F**) umfassend  
– Ermitteln von geometrischen Daten der Spritzform (**1F**) und/oder eines Formteils (**1, 1', 1''**), welches in der Spritzform (**1F**) herzustellen ist,

- Ermitteln einer virtuellen formteilspezifischen Druckkurve ( $p_S$ ) eines Spritzgussprozesses unter Nutzung der geometrischen Daten,
- Ermitteln eines formteilspezifischen Ereignismusters ( $M_S$ ) auf Basis der virtuellen formteilspezifischen Druckkurve ( $p_S$ ), wobei das formteilspezifische Ereignismuster ( $M_S$ ) eine Mehrzahl von singulären, mit charakteristischen Ereignisstellen ( $F_1, F_2, F_3, \dots$ ) der Formteilgeometrie verknüpften virtuellen Ereignissen ( $E_{S1}, E_{S2}, E_{S3}, \dots$ ) umfasst, denen jeweils zumindest eine relative Zeitinformation ( $t_{S1}, t_{S2}, t_{S3}, \dots$ ) und/oder virtuelle Aktorposition sowie zumindest ein Positionsdatum zugeordnet ist, welches eine Position einer Schmelzfront (SF) des Spritzgussmaterials (KS) in der Spritzform (**1F**) definiert,
- Durchführen eines Spritzguss-Prozesses unter Nutzung der Spritzform (**1F**) und Ermittlung einer Mess-Druckkurve ( $p_m$ ) während des Spritzguss-Prozesses,
- Ermitteln eines Mess-Ereignismusters ( $M_m$ ) auf Basis der Mess-Druckkurve ( $p_m$ ), wobei das Mess-Ereignismuster ( $M_m$ ) eine Mehrzahl von singulären Mess-Ereignissen ( $E_{m1}, E_{m2}, E_{m3}, \dots$ ) aufweist, denen jeweils zumindest eine Zeitinformation ( $t_{m1}, t_{m2}, t_{m3}, \dots$ ) und/oder Aktorposition zugeordnet ist,
- Zuordnung von virtuellen Ereignissen ( $E_{S1}, E_{S2}, E_{S3}, \dots$ ) des formteilspezifischen Ereignismusters ( $M_S$ ) zu Mess-Ereignissen ( $E_{m1}, E_{m2}, E_{m3}, \dots$ ) des Mess-Ereignismusters ( $M_m$ ),
- Ableiten von Prozessparameterwerten auf Basis der den virtuellen Ereignissen ( $E_{S1}, E_{S2}, E_{S3}, \dots$ ) zugeordneten Positionsdaten und den Zeitinformationen ( $t_{m1}, t_{m2}, t_{m3}, \dots$ ) und/oder Aktorpositionen, welche den diesen virtuellen Ereignissen ( $E_{S1}, E_{S2}, E_{S3}, \dots$ ) jeweils zugeordneten Mess-Ereignissen ( $E_{m1}, E_{m2}, E_{m3}, \dots$ ) zugeordnet sind.

2. Verfahren nach Anspruch 1, wobei im Falle eines variablen Volumenstroms während des Spritzguss-Prozesses eine dabei ermittelte Mess-Druckkurve ( $p_m$ ) in eine zeitkorrigierte Mess-Druckkurve ( $p_{mf}$ ) umgerechnet wird, auf deren Basis dann das Mess-Ereignismuster ( $M_m$ ) ermittelt wird.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, wobei die virtuellen Ereignisse ( $E_{S1}, E_{S2}, E_{S3}, \dots$ ) des charakteristischen Ereignismusters ( $M_S$ ) auf Basis der zeitlichen Änderung der Steigung der virtuellen formteilspezifischen Druckkurve ( $p_S$ ) bestimmt werden und/oder wobei die Mess-Ereignisse ( $E_{m1}, E_{m2}, E_{m3}, \dots$ ) des Mess-Ereignismusters ( $M_m$ ) auf Basis der zeitlichen Änderung der Steigung der Mess-Druckkurve ( $p_m$ ) bestimmt werden.

4. Verfahren nach Anspruch 3, wobei die formteilspezifische Druckkurve ( $p_S$ ) und/oder die Mess-Druckkurve ( $p_m$ ) zeitlich differenziert werden und die virtuellen Ereignisse ( $E_{S1}, E_{S2}, E_{S3}, \dots$ ) bzw. Mess-Ereignisse ( $E_{m1}, E_{m2}, E_{m3}, \dots$ ) mit Hilfe einer Flankenanalyse ermittelt werden.

5. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, wobei zur Ermittlung des Mess-Ereignismusters ( $M_m$ ) eine Mehrzahl von Mess-Ereignissen ( $E_{m1}, E_{m2}, E_{m3}, \dots$ ) zwischen dem Zeitpunkt des Eintritts in eine Formteilanschnittstelle der Spritzform (**1F**) und einem Ende einer Formfüllungsphase der Spritzform (**1F**) ermittelt werden.

6. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, wobei die Ermittlung der Mess-Druckkurve ( $p_m$ ) während des Spritzguss-Prozesses mittels einer Auswertung von Mess- und/oder Einstellwerten von außerhalb der Spritzform (**1F**) erfolgt.

7. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, wobei die virtuelle formteilspezifische Druckkurve ( $p_S$ ) unter Nutzung einer FEM-Simulation und/oder numerischen Berechnung ermittelt wird.

8. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, wobei zur Zuordnung von virtuellen Ereignissen ( $E_{S1}, E_{S2}, E_{S3}, \dots$ ) des formteilspezifischen Ereignismusters ( $M_S$ ) zu Mess-Ereignissen ( $E_{m1}, E_{m2}, E_{m3}, \dots$ ) des Mess-Ereignismusters ( $M_m$ ) ein Mustererkennungsverfahren, vorzugsweise ein Bilderkennungsverfahren, genutzt wird.

9. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, wobei zur Zuordnung von virtuellen Ereignissen ( $E_{S1}, E_{S2}, E_{S3}, \dots$ ) des formteilspezifischen Ereignismusters ( $M_S$ ) zu Mess-Ereignissen ( $E_{m1}, E_{m2}, E_{m3}, \dots$ ) des Mess-Ereignismusters ( $M_m$ ) in einem iterativen Verfahren das formteilspezifische Ereignismuster ( $M_S$ ) und das Mess-Ereignismuster ( $M_m$ ) zumindest teilweise in Überdeckung gebracht werden und dabei zwischen verschiedenen Iterationsschritten nach definierten Regeln

- das formteilspezifische Ereignismuster ( $M_S$ ) und/oder das Mess-Ereignismuster ( $E_{m1}, E_{m2}, E_{m3}, \dots$ ) zeitlich skaliert und/oder

- das formteilspezifische Ereignismuster ( $M_S$ ) und/oder das Mess-Ereignismuster ( $E_{m1}, E_{m2}, E_{m3}, \dots$ ) relativ zueinander verschoben

und/oder

– virtuelle Ereignisse ( $E_{S1}$ ,  $E_{S2}$ ,  $E_{S3}$ , ...) des formteilspezifischen Ereignismusters ( $M_S$ ) und/oder Mess-Ereignisse ( $E_{m1}$ ,  $E_{m2}$ ,  $E_{m3}$ , ...) des Mess-Ereignismusters ( $M_m$ ) eliminiert werden.

10. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, wobei die zu ermittelnden Prozessparameterwerte die Position der Fließfront (SF) in Abhängigkeit von der jeweils aktuellen Einspritzzeit und/oder einer Aktorposition und/oder Fließfrontgeschwindigkeiten in der Spritzform (**1F**) umfassen.

11. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, wobei die Prozessparameterwerte maschinenunabhängige Prozessparameterwerte umfassen, vorzugsweise zumindest eine der folgenden rheologischen Größen:

- Schergeschwindigkeit
- Schmelzeviskosität
- Wandschubspannung.

12. Verfahren zur Steuerung einer Spritzgießanlage (**10**), wobei mit einem Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche zumindest eine Anzahl von Prozessparameterwerten für einen ersten Spritzgussprozess mit einer Spritzform (**1F**) ermittelt werden und die Prozessparameterwerte als Eingangswerte, insbesondere als Soll-Parameterwerte, in einer Steuereinrichtung (**18**) der Spritzgießanlage (**10**) für einen weiteren Spritzgussprozess mit dieser Spritzform (**1F**) verwendet werden.

13. Verfahren zur Visualisierung eines Spritzgussprozesses in einer Spritzform (**1F**), wobei mit Hilfe eines Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 11 zumindest die Position der Fließfront (SF) in Abhängigkeit von der jeweils aktuellen Einspritzzeit und/oder einer Aktorposition ermittelt wird und auf einer Anzeigeeinrichtung (**31**) innerhalb einer virtuellen Spritzform und/oder eines virtuellen Formteils (**1'**, **1''**) dargestellt wird.

14. Prozessparameterwert-Ermittlungseinrichtung (**20**) zum Ermitteln einer Anzahl von Prozessparameterwerten in einem Spritzgussprozess innerhalb einer Spritzform (**1F**) umfassend

- eine erste Schnittstelle (**21**) zum Ermitteln von geometrischen Daten der Spritzform (**1F**) und/oder eines Formteils (**1**, **1'**, **1''**), welches in der Spritzform (**1F**) herzustellen ist,
- eine Druckkurvenermittlungseinheit (**22**), welche ausgebildet ist, um eine virtuelle formteilspezifische Druckkurve ( $p_S$ ) eines Spritzgussprozesses unter Nutzung der geometrischen Daten zu ermitteln,
- eine Musterermittlungseinheit (**23a**), welche ausgebildet ist, um ein formteilspezifisches Ereignismuster ( $M_S$ ) auf Basis der virtuellen formteilspezifischen Druckkurve ( $p_S$ ) zu ermitteln, wobei das formteilspezifische Ereignismuster ( $M_S$ ) eine Mehrzahl von singulären, mit charakteristischen Ereignisstellen ( $F_1$ ,  $F_2$ ,  $F_3$ , ...) der Formteilgeometrie verknüpften virtuellen Ereignissen ( $E_{S1}$ ,  $E_{S2}$ ,  $E_{S3}$ , ...) umfasst, denen jeweils zumindest eine relative Zeitinformation ( $t_{S1}$ ,  $t_{S2}$ ,  $t_{S3}$ , ...) und/oder virtuelle Aktorposition sowie zumindest ein Positionsdatum zugeordnet ist, welches eine Position einer Schmelzfront (SF) des Spritzgussmaterials (KS) in der Spritzform (**1**, **1'**, **1''**) definiert,
- eine zweite Schnittstelle (**24**) zur Erfassung einer Mess-Druckkurve während eines Spritzguss-Prozesses an einer Spritzgießanlage (**10**) unter Nutzung der Spritzform,
- eine Musterermittlungseinheit (**23b**), welche ausgebildet ist, um ein Mess-Ereignismuster ( $M_m$ ) auf Basis der Mess-Druckkurve ( $p_m$ ) zu ermitteln, wobei das Mess-Ereignismuster ( $M_m$ ) eine Mehrzahl von singulären Mess-Ereignissen ( $E_{m1}$ ,  $E_{m2}$ ,  $E_{m3}$ , ...) aufweist, denen zumindest eine Zeitinformation ( $t_{m1}$ ,  $t_{m2}$ ,  $t_{m3}$ , ...) und/oder Aktorposition zugeordnet ist,
- eine Zuordnungseinheit (**25**), welche ausgebildet ist, um virtuelle Ereignisse ( $E_{S1}$ ,  $E_{S2}$ ,  $E_{S3}$ , ...) des formteilspezifischen Ereignismusters ( $M_S$ ) zu Mess-Ereignissen ( $E_{m1}$ ,  $E_{m2}$ ,  $E_{m3}$ , ...) des Mess-Ereignismusters ( $M_m$ ) zuzuordnen,
- eine Auswertungseinheit (**26**), welche ausgebildet ist, um Prozessparameterwerte auf Basis der den virtuellen Ereignissen ( $E_{S1}$ ,  $E_{S2}$ ,  $E_{S3}$ , ...) zugeordneten Positionsdaten und den Zeitinformationen ( $t_{m1}$ ,  $t_{m2}$ ,  $t_{m3}$ , ...) und/oder Aktorpositionen, welche den diesen virtuellen Ereignissen ( $E_{S1}$ ,  $E_{S2}$ ,  $E_{S3}$ , ...) jeweils zugeordneten Mess-Ereignissen ( $E_{m1}$ ,  $E_{m2}$ ,  $E_{m3}$ , ...) zugeordnet sind, abzuleiten.

15. Spritzgießanlage (**10**) mit einer Spritzgießdüse (**16**), einem Aktor (**14**), um Spritzgussmaterial (KS) aus der Spritzgießdüse (**16**) in eine an die Spritzgießanlage (**10**) angeschlossene Spritzform (**1F**) einzuspritzen, eine Steuereinrichtung (**18**) zur Ansteuerung des Aktors (**14**) und einer Prozessparameterwert-Ermittlungseinrichtung (**20**) nach Anspruch 14.

Es folgen 25 Seiten Zeichnungen



Fig 2

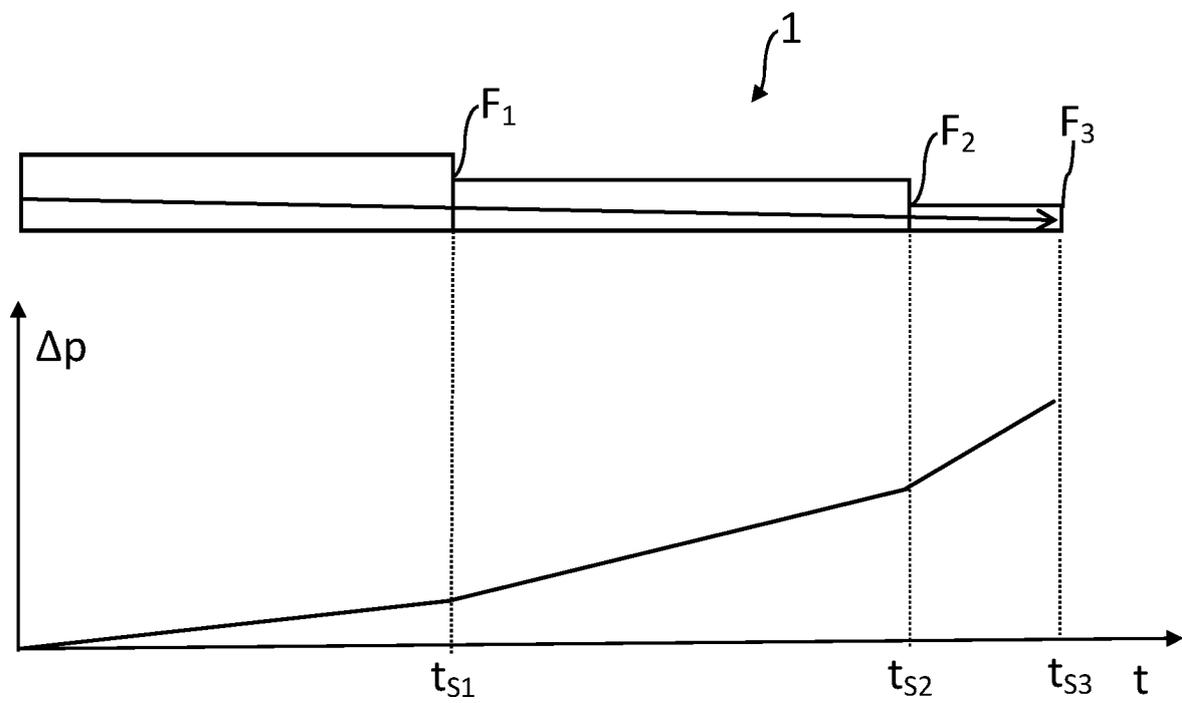


Fig 3

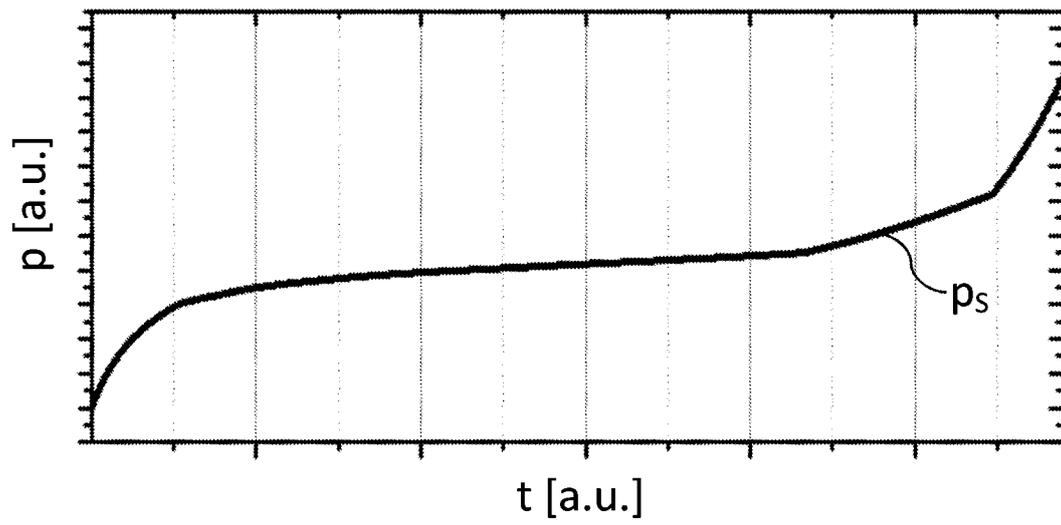


Fig 4

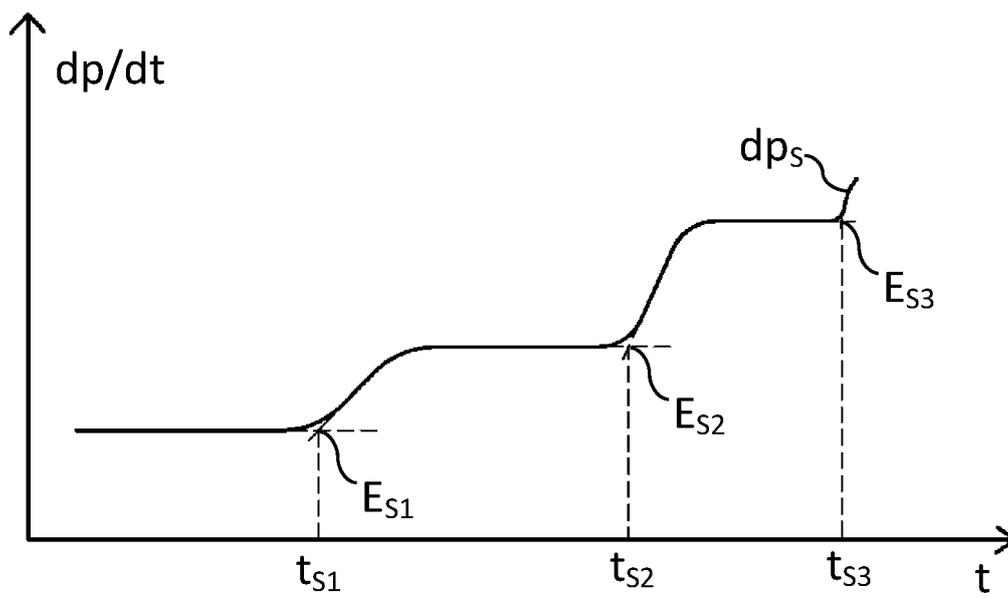


Fig 5

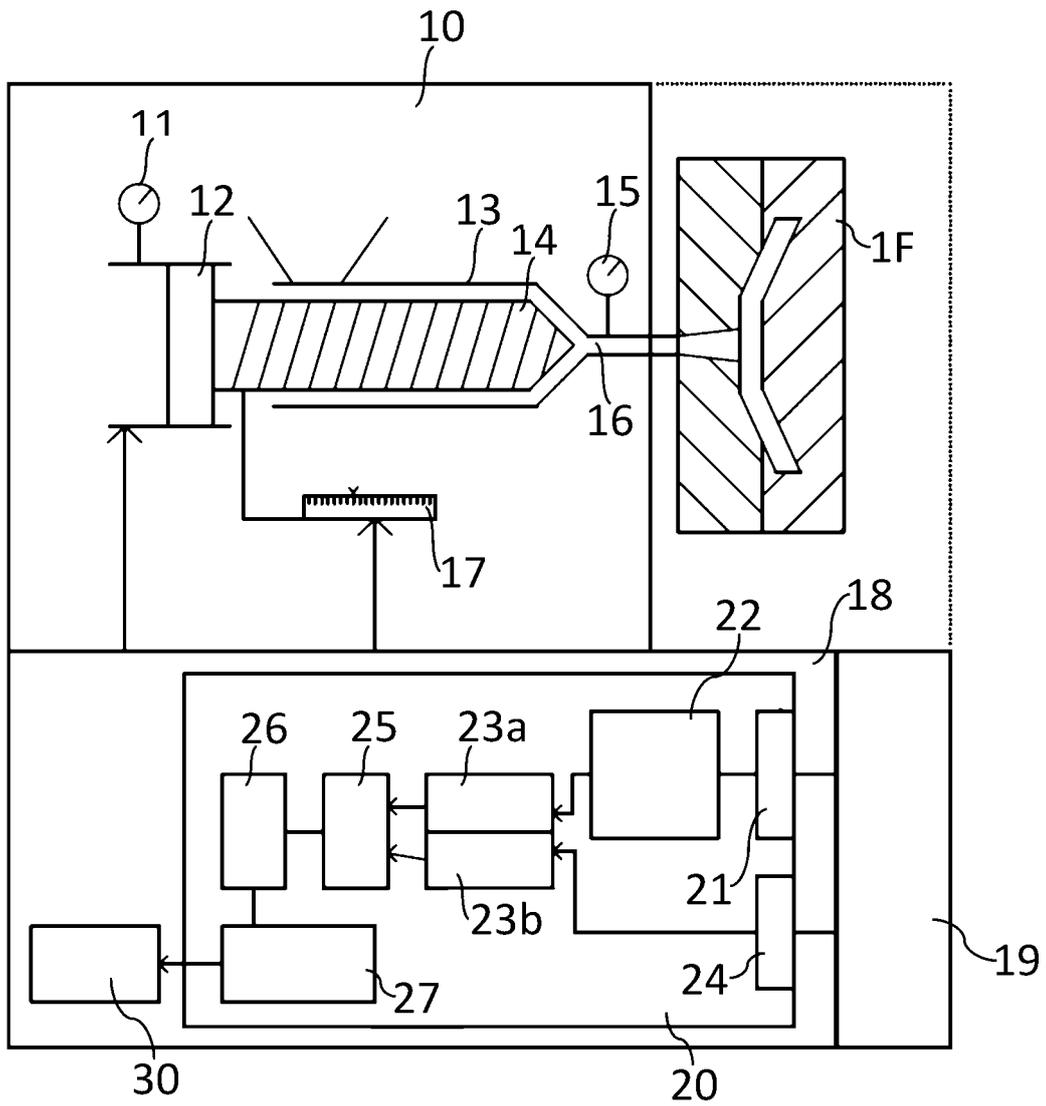


Fig 6

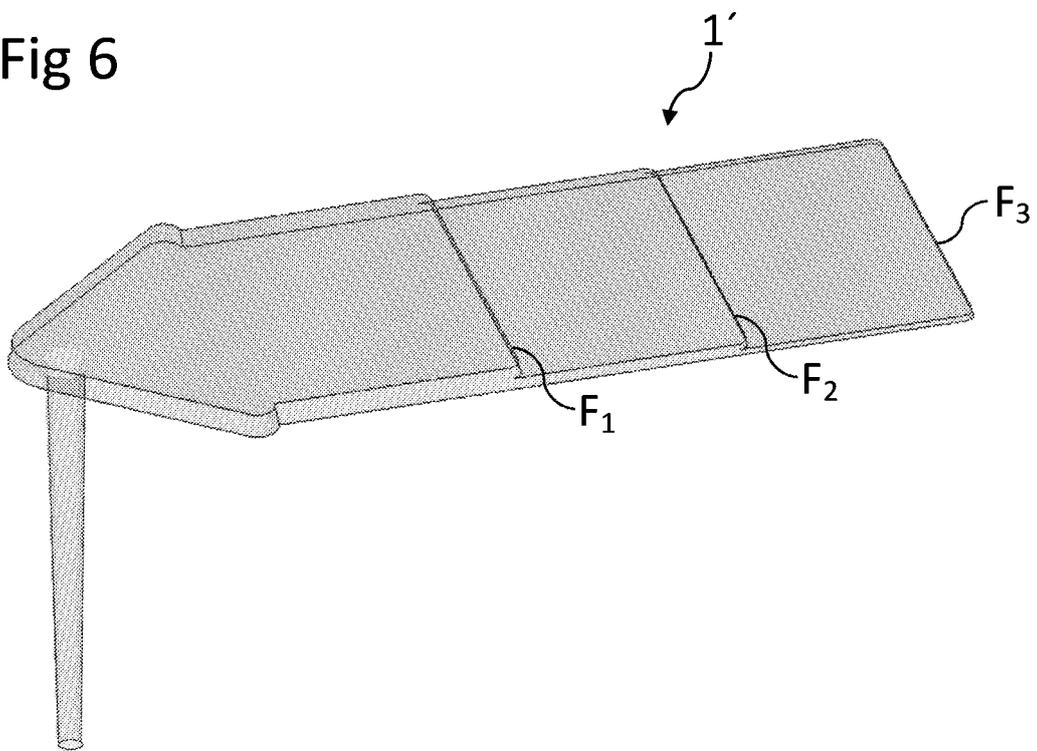


Fig 7

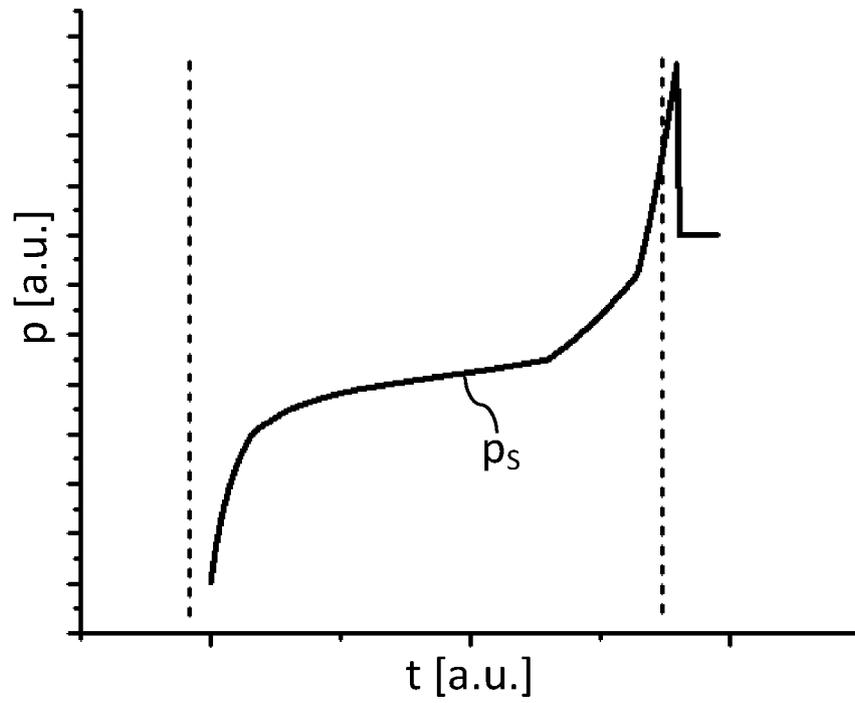


Fig 8

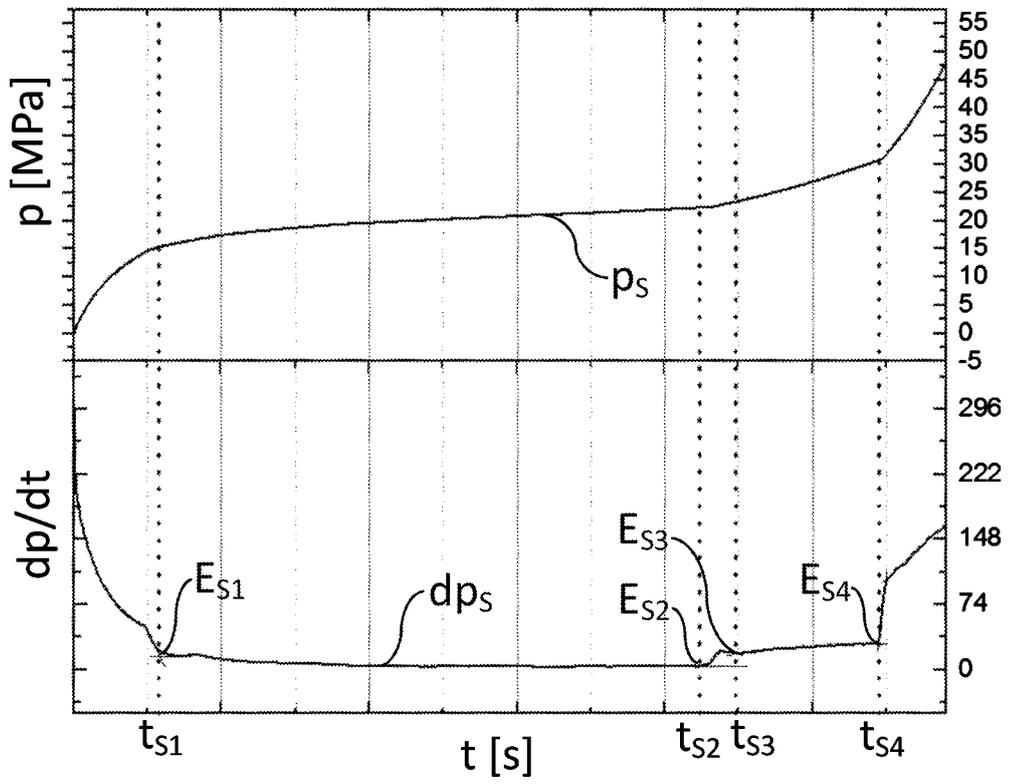


Fig 9

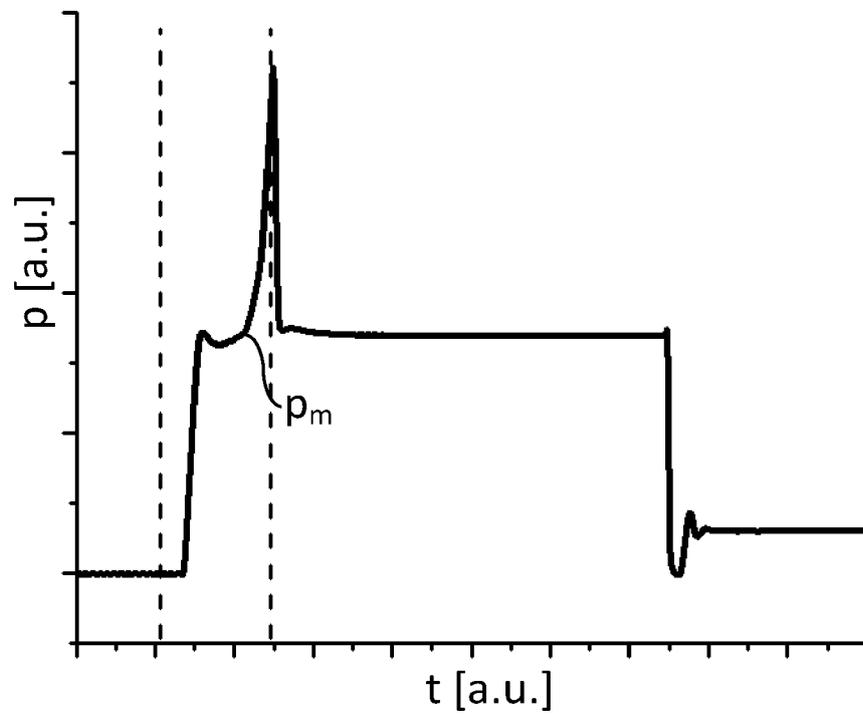


Fig 10

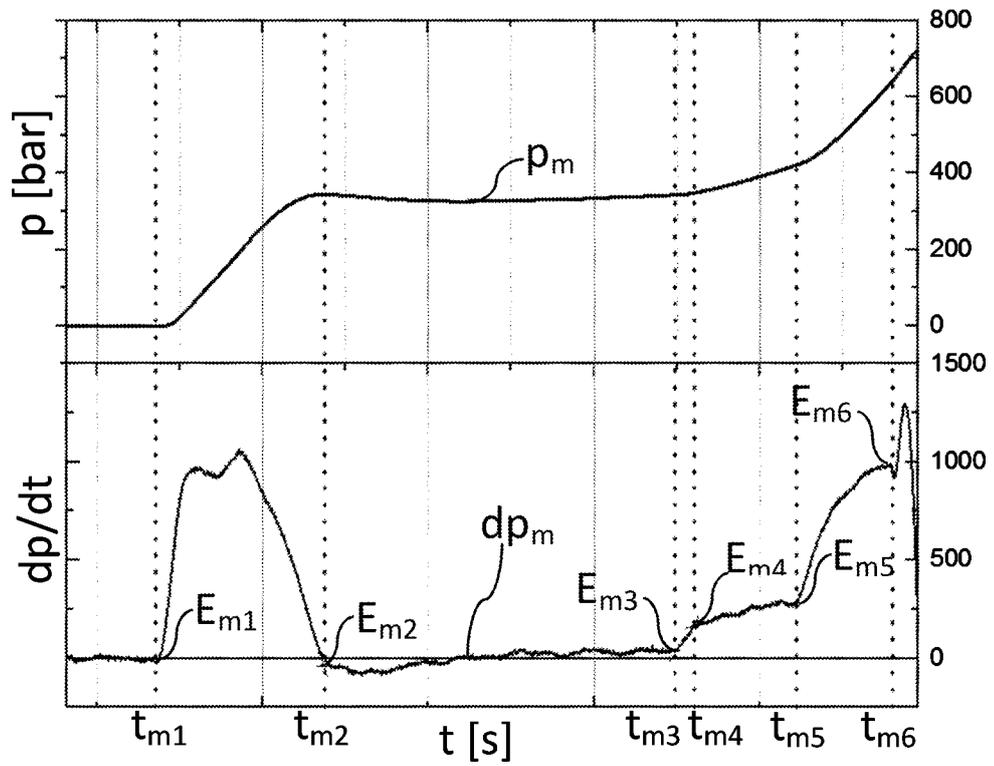


Fig 11

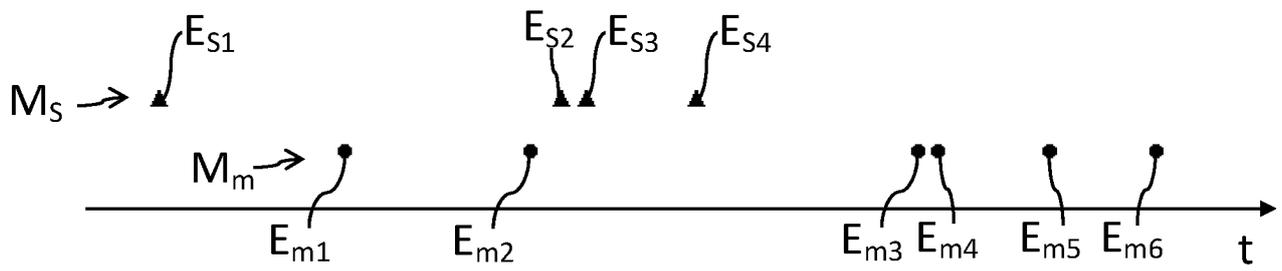


Fig 12a

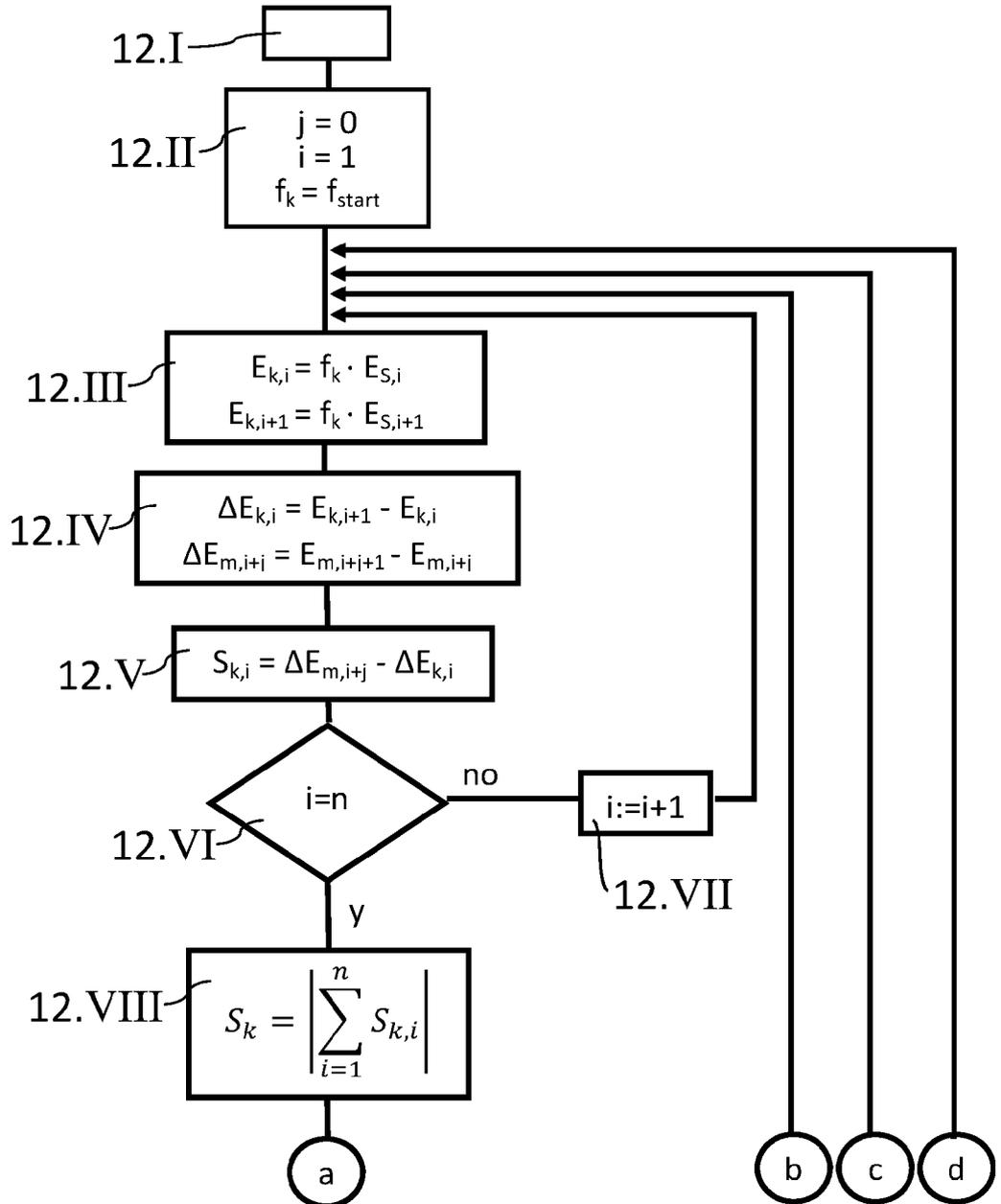


Fig 12b

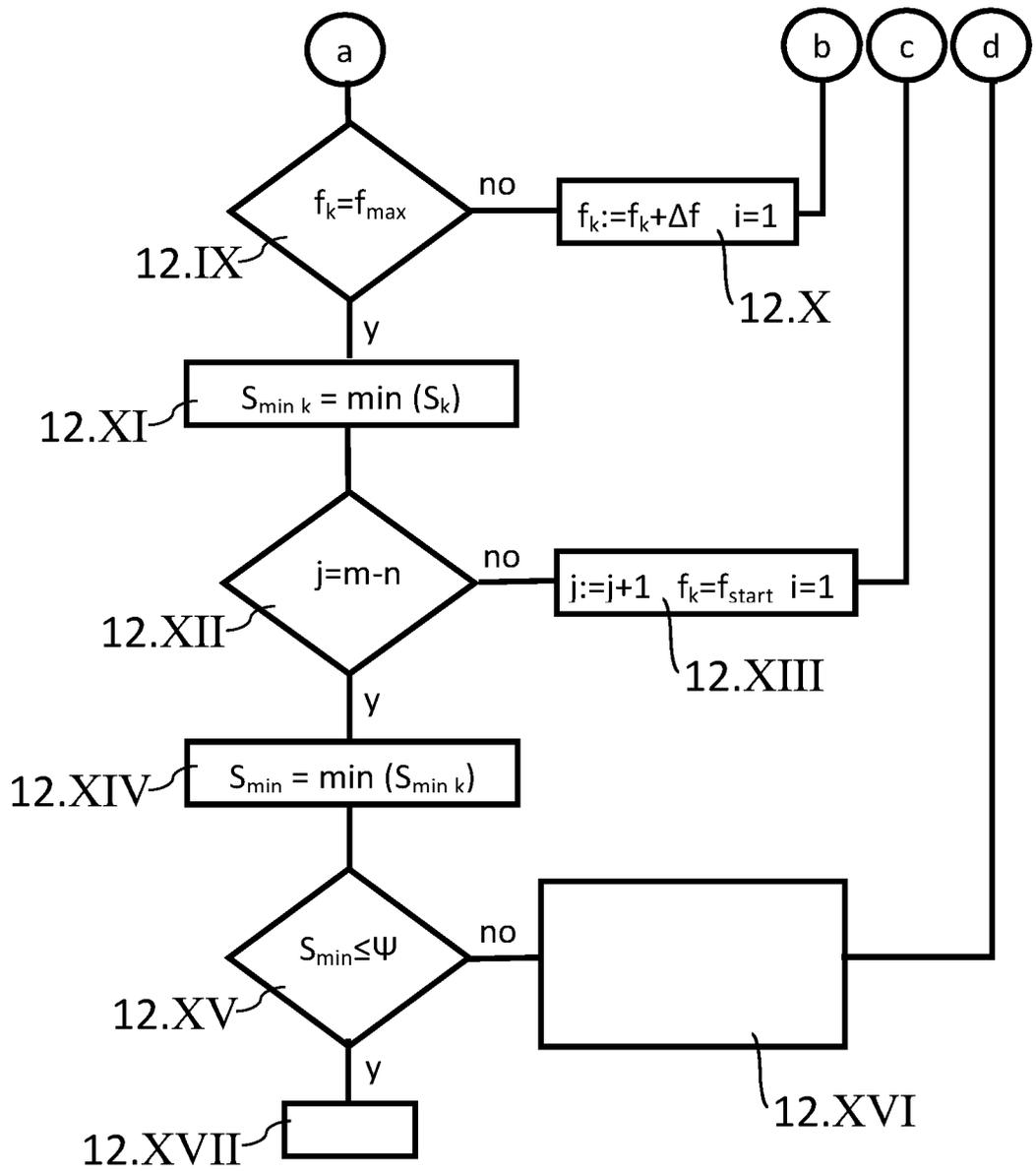


Fig 13

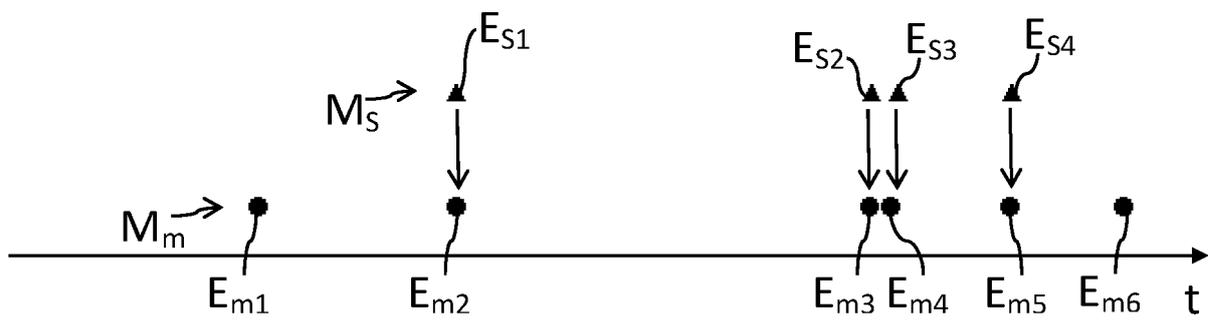


Fig 14

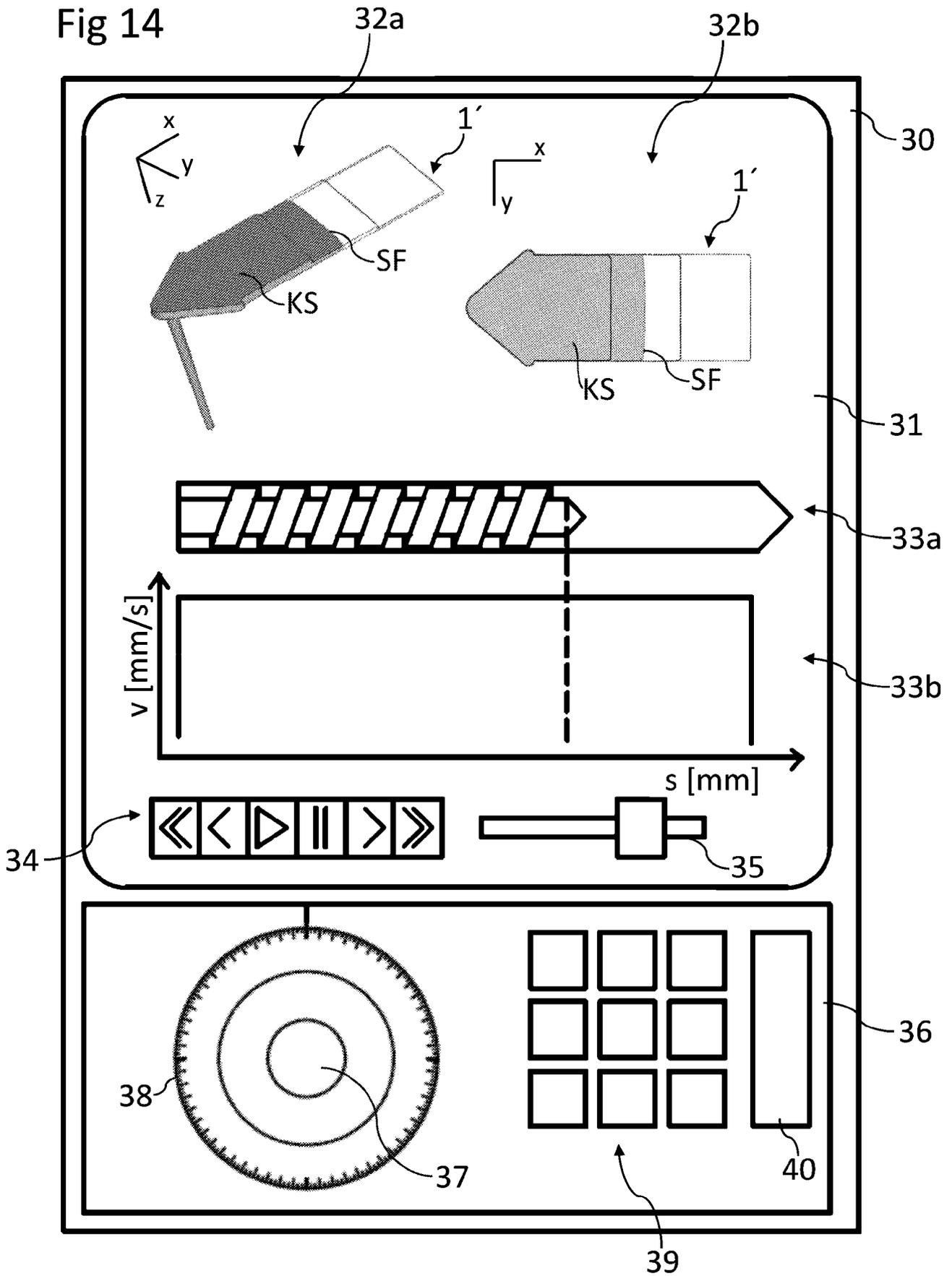


Fig 15

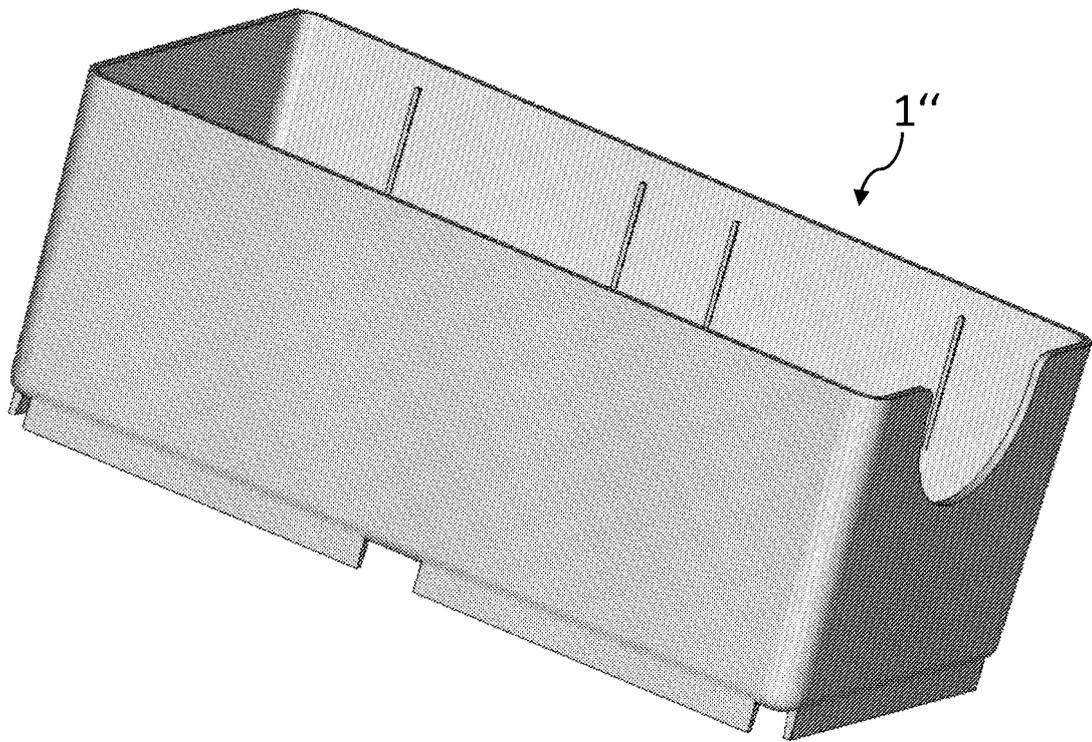


Fig 16

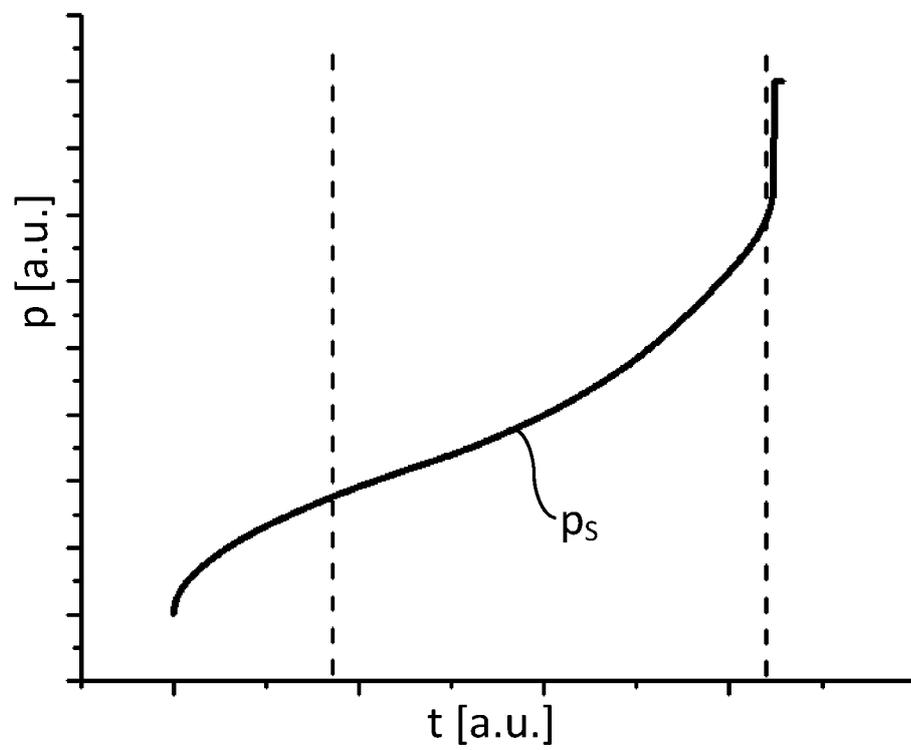


Fig 17

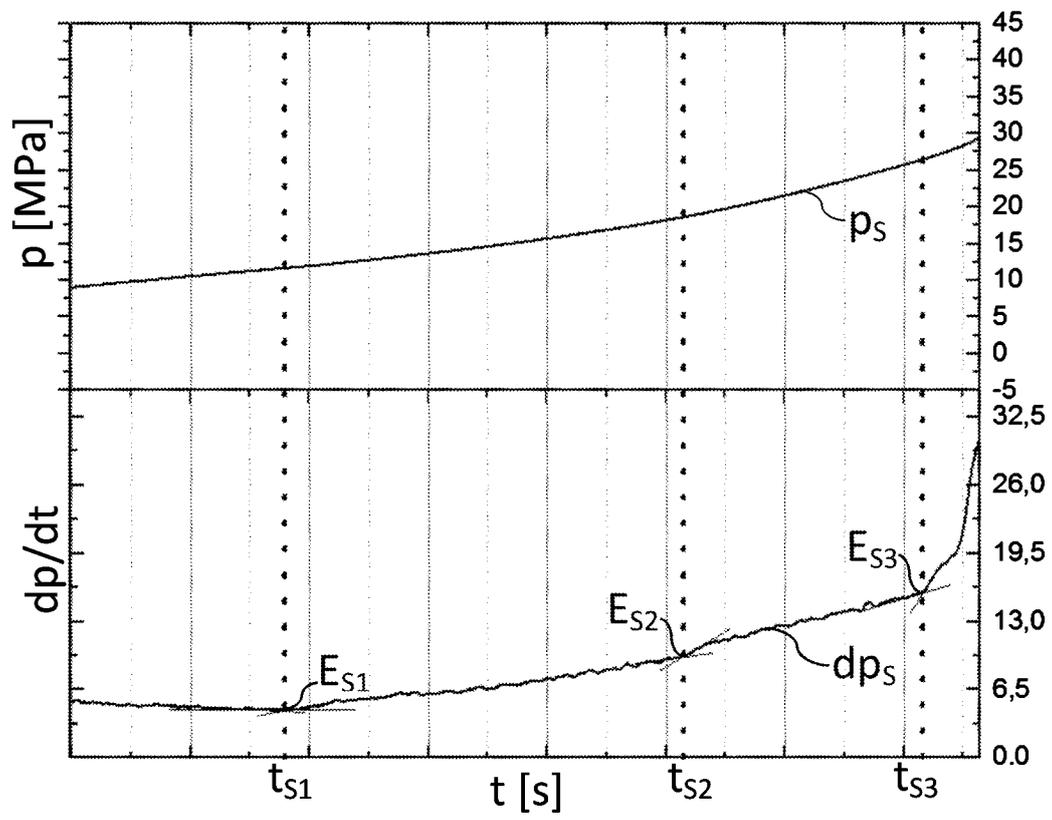


Fig 18

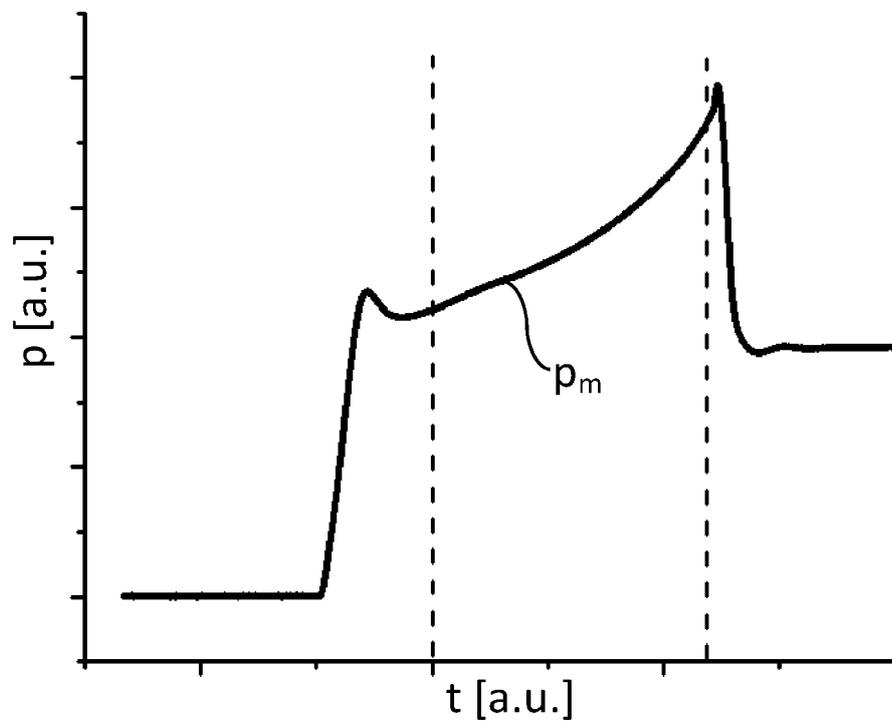


Fig 19

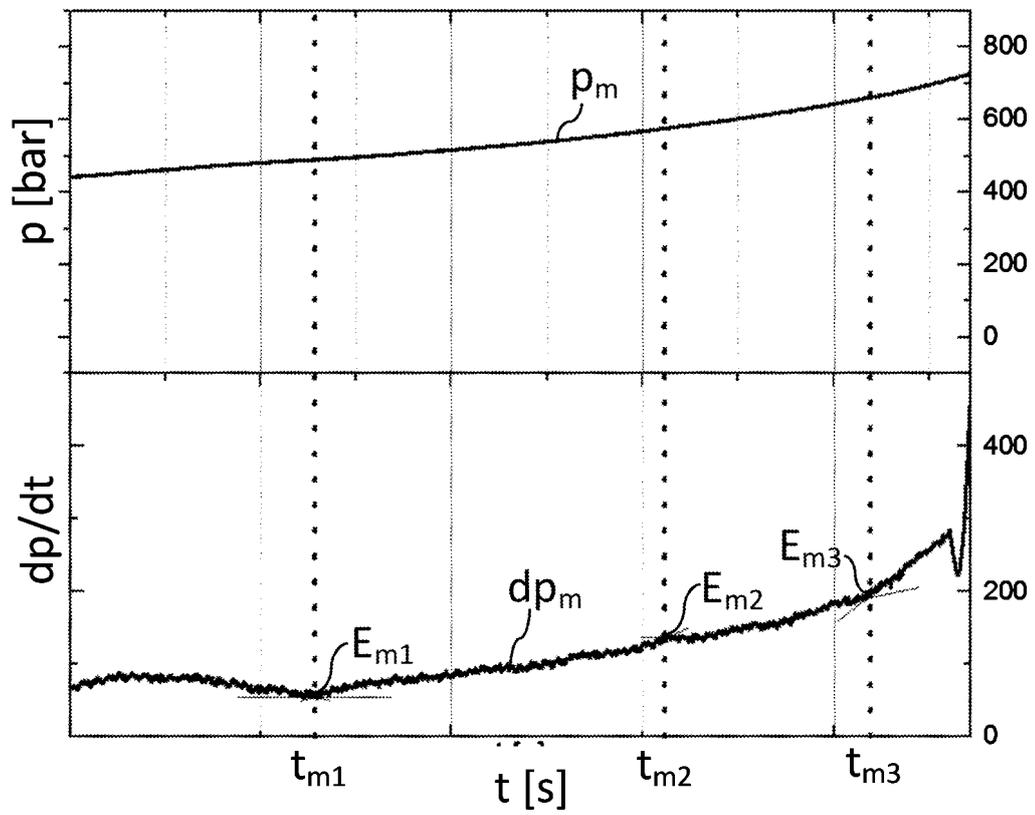


Fig 20

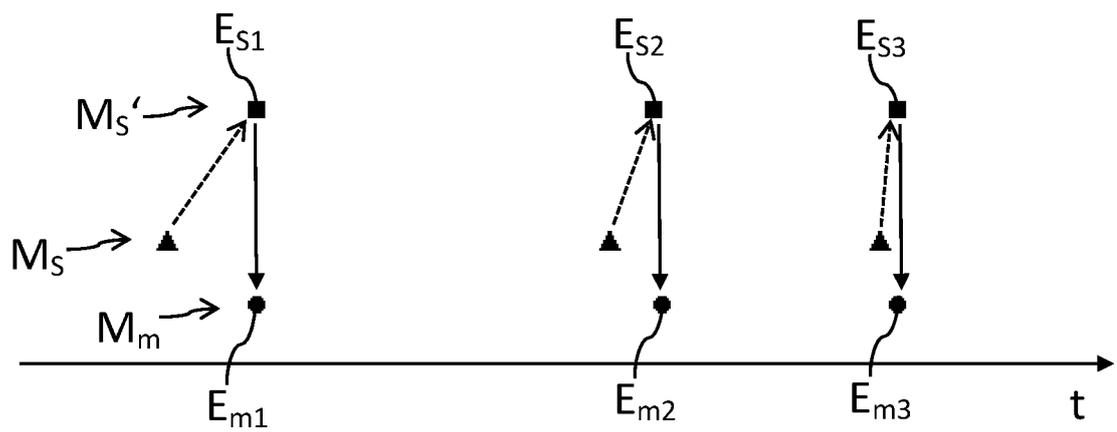


Fig 21

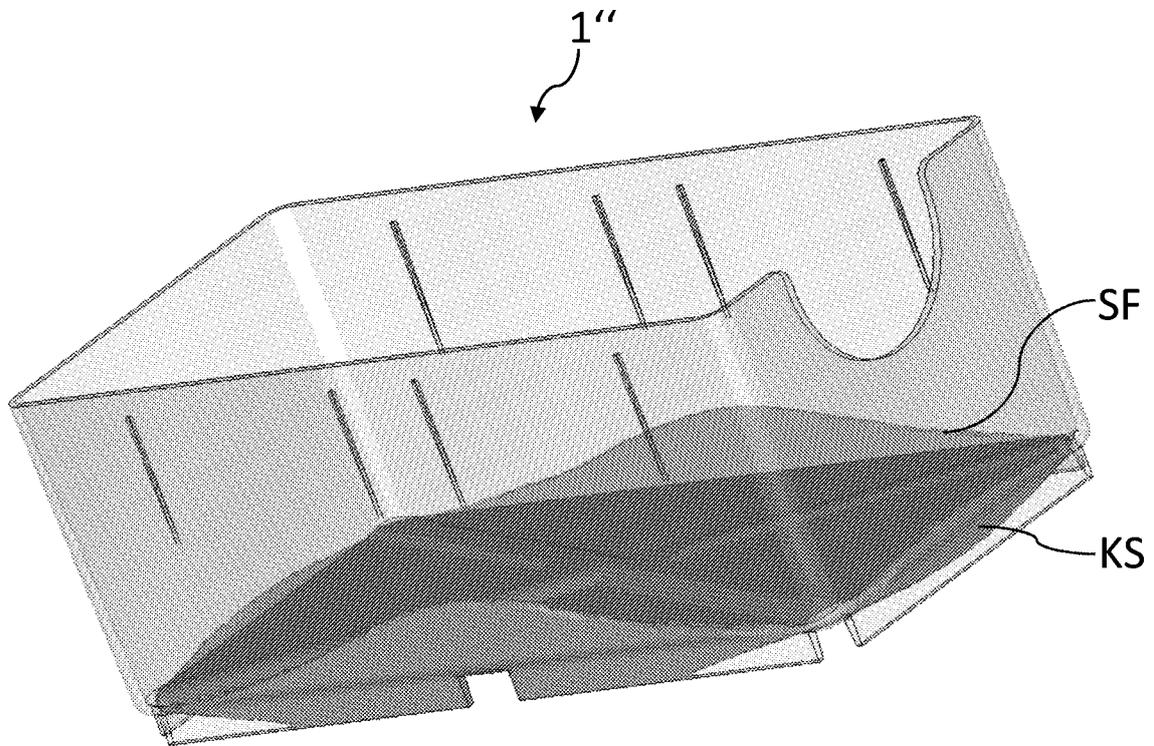


Fig 22

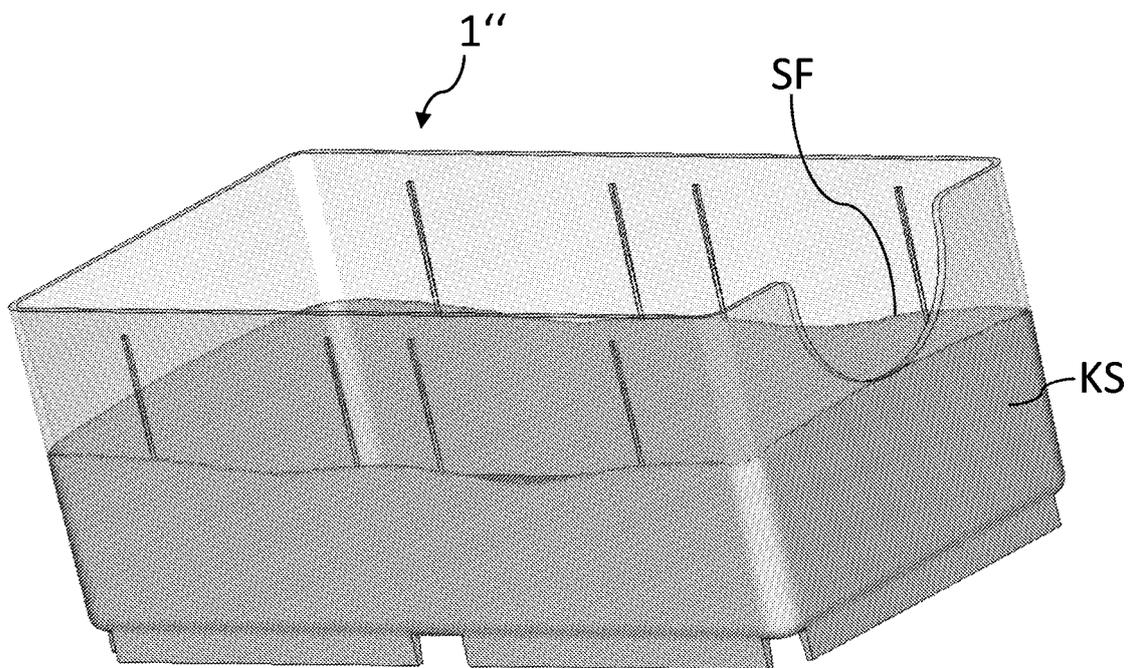


Fig 23

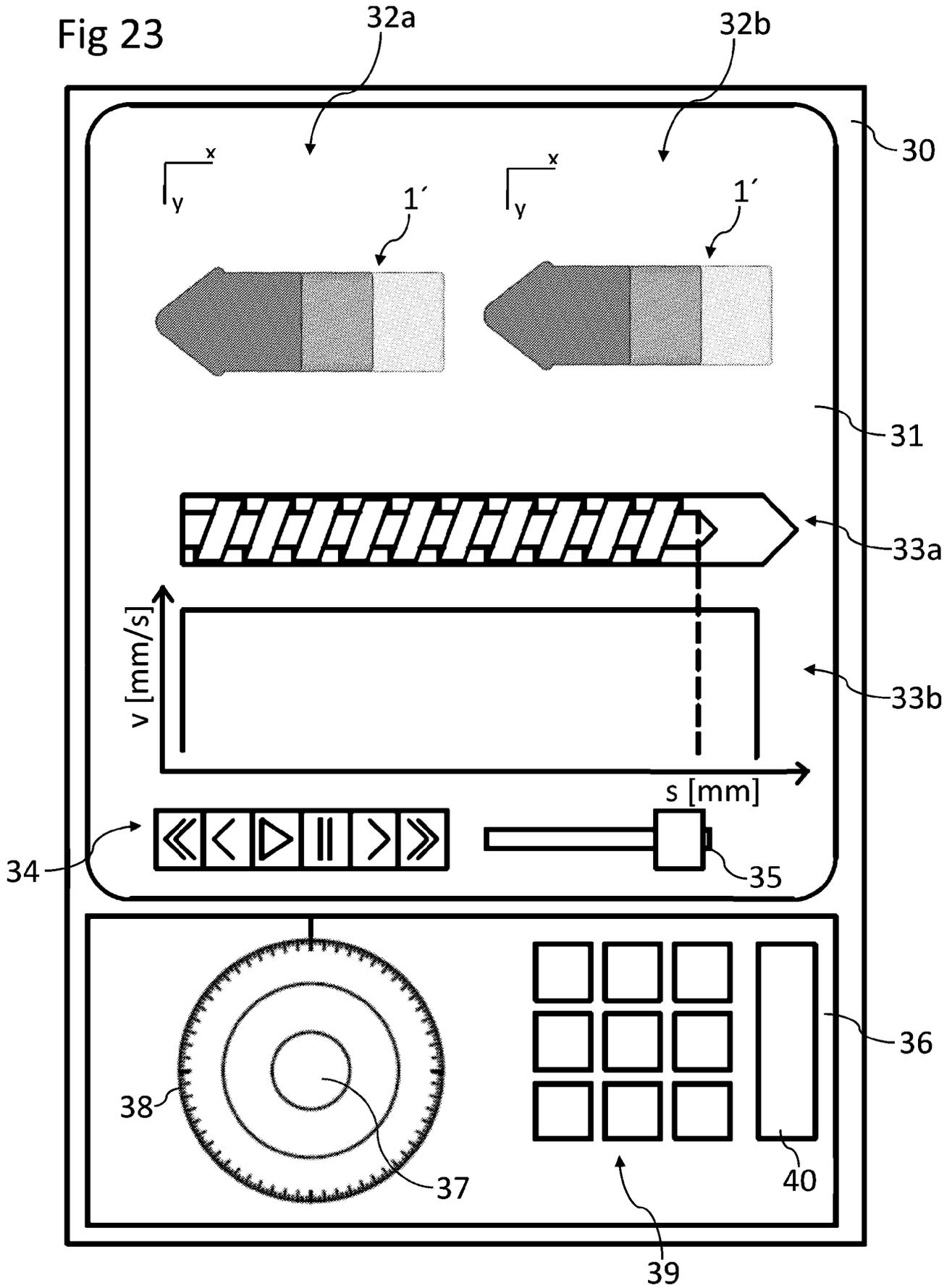


Fig 24

