

(12) **Österreichische Patentanmeldung**

(21) Anmeldenummer: A 50339/2020
(22) Anmeldetag: 20.04.2020
(43) Veröffentlicht am: 15.11.2021

(51) Int. Cl.: **B29C 45/76** (2006.01)
G05B 19/418 (2006.01)

(56) Entgegenhaltungen:
DE 102013016914 A1
WO 2016177513 A1
EP 3520987 A1
US 10201918 B1
US 9555571 B1

(71) Patentanmelder:
ENGEL AUSTRIA GmbH
4311 Schwertberg (AT)

(72) Erfinder:
Paterno Simon Ing.
8051 Graz (AT)
Willhelm Bernd
8321 St. Margarethen an der Raab (AT)
St John Robert
8020 Graz (AT)
Ebinger Lars Ing.
8053 Graz (AT)

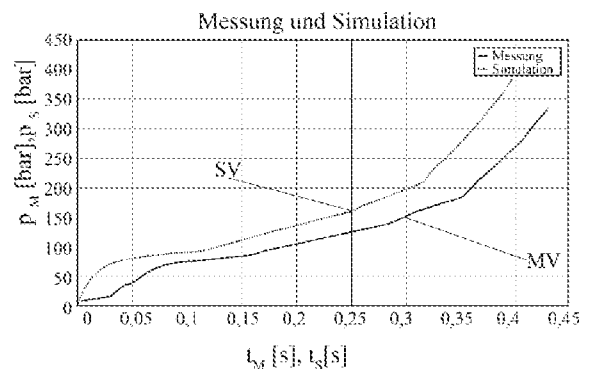
(74) Mag. Dr. Paul Torggler, Dipl.-Ing. Dr. Stephan Hofinger, Mag. Dr. Markus Gangl, MMag. Dr. Christoph Maschler, Dipl.-Ing. (FH) Dr. Bernhard Hechenleitner, Dipl.-Phys. Dr. Almar Lercher
6020 Innsbruck (AT)

(54) **Verfahren und Computerprogrammprodukt zum Abgleichen einer Simulation mit dem real durchgeführten Prozess**

(57) Verfahren zum Abgleichen einer Simulation eines mit einer Formgebungsmaschine durchzuführenden Prozesses mit dem real durchgeführten Prozess, wobei im Rahmen der Simulation zumindest ein Simulationsverlauf (SV) einer für den Prozess charakteristischen Größe, insbesondere ein simulierter Druckverlauf, berechnet wird, beim real durchgeführten Prozess zumindest ein Messverlauf (MV) der charakteristischen Größe, insbesondere ein gemessener Druckverlauf, gemessen wird, erste ausgezeichnete Punkte ($P_{S,i}$) der Kurve des zumindest einen Simulationsverlaufs (SV) und zweite ausgezeichnete Punkte ($P_{M,i}$) der Kurve des zumindest einen Messverlaufs (MV) bestimmt werden, die ersten ausgezeichneten Punkte ($P_{S,i}$) und die zweiten ausgezeichneten Punkte ($P_{M,i}$) einander zumindest teilweise zugeordnet werden, aus Koordinaten ($t_{S,i}$, $t_{M,i}$, $p_{S,i}$, $p_{M,i}$) der einander zumindest teilweise zugeordneten ersten ausgezeichneten Punkte ($P_{S,i}$) und zweiten ausgezeichneten Punkte

($P_{M,i}$) zumindest ein Änderungsparameter (k_p , Δt) für die Simulation und/oder den Prozess berechnet wird und die Simulation und/oder der Prozess auf Basis des zumindest einen Änderungsparameters (k_p , Δt) geändert und erneut durchgeführt wird.

Fig. 2



1
Zusammenfassung

Verfahren zum Abgleichen einer Simulation eines mit einer Formgebungsmaschine durchzuführenden Prozesses mit dem real durchgeführten Prozess, wobei im Rahmen der Simulation zumindest ein Simulationsverlauf (SV) einer für den Prozess charakteristischen Größe, insbesondere ein simulierter Druckverlauf, berechnet wird, beim real durchgeführten Prozess zumindest ein Messverlauf (MV) der charakteristischen Größe, insbesondere ein gemessener Druckverlauf, gemessen wird, erste ausgezeichnete Punkte ($P_{S,i}$) der Kurve des zumindest einen Simulationsverlaufs (SV) und zweite ausgezeichnete Punkte ($P_{M,i}$) der Kurve des zumindest einen Messverlaufs (MV) bestimmt werden, die ersten ausgezeichneten Punkte ($P_{S,i}$) und die zweiten ausgezeichneten Punkte ($P_{M,i}$) einander zumindest teilweise zugeordnet werden, aus Koordinaten ($t_{S,i}$, $t_{M,i}$, $p_{S,i}$, $p_{M,i}$) der einander zumindest teilweise zugeordneten ersten ausgezeichneten Punkte ($P_{S,i}$) und zweiten ausgezeichneten Punkte ($P_{M,i}$) zumindest ein Änderungsparameter (k_p , Δt) für die Simulation und/oder den Prozess berechnet wird und die Simulation und/oder der Prozess auf Basis des zumindest einen Änderungsparameters (k_p , Δt) geändert und erneut durchgeführt wird.

(Fig. 2)

Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren zum Abgleichen einer Simulation eines mit einer Formgebungsmaschine durchzuführenden Prozesses mit dem real durchgeführten Prozess sowie ein Computerprogrammprodukt zum Abgleichen einer Simulation eines mit einer Formgebungsmaschine durchzuführenden Prozesses mit dem real durchgeführten Prozess.

Formgebungsmaschinen können Spritzgießmaschinen, Spritzpressen, Pressen und dergleichen sein.

Im Folgenden wird der Stand der Technik anhand von Spritzgießprozessen als Beispiel für mit Formgebungsmaschinen durchzuführende Prozesse zusammengefasst. Analoge Schlussfolgerungen gelten für allgemeine mit Formgebungsmaschinen durchzuführende Prozesse.

Bekannt ist das Durchführen von Simulationen, die das Einspritzen eines thermoplastischen Kunststoffes in eine Formkavität abbilden, beispielsweise um Einstellungen der Spritzgießmaschine festzulegen oder zu verbessern.

Dabei tritt die Problematik auf, dass sich die Ergebnisse der Simulation von dem real durchgeführten Spritzgießprozess mitunter erheblich unterscheiden. Dafür gibt es im Stand der Technik verschiedene Lösungsansätze. Ein Beispiel wäre in der AT 519096 A1 der Anmelderin offenbart, wobei verschiedene Simulationen durchgeführt werden und später ein Abgleich zwischen den realen Gegebenheiten an der Formgebungsmaschine und den Simulationsergebnissen durchgeführt wird.

Auch ein direkter Abgleich der Simulation mit einem real durchgeführten Spritzgießzyklus ist an und für sich bekannt. Beispielsweise wird dieser Abgleich in der US 2002/0188375 A1 von Hand durchgeführt.

Ein vollständig automatisierbares Verfahren wird in der noch unveröffentlichten Österreichischen Patentanmeldung A 50885/2019 der Anmelderin beschrieben. Dabei werden entweder der Simulationsverlauf oder der Messverlauf transformiert,

um eine Quantifizierung der Abweichung zu erhalten, die dann in weiterer Folge für die reproduzierbare und zuverlässige Anpassung der Simulation verwendet werden kann.

Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es, eine Möglichkeit anzugeben, mit der die Simulation eines mit einer Formgebungsmaschine durchzuführenden Prozesses und der real durchgeführte Prozess reproduzierbar – und vorzugsweise zumindest teilautomatisierbar – abgeglichen werden können.

Hinsichtlich des Verfahrens wird diese Aufgabe mit den Merkmalen des Anspruchs 1 gelöst, nämlich indem

- im Rahmen der Simulation zumindest ein Simulationsverlauf einer für den Prozess charakteristischen Größe, insbesondere ein simulierter Druckverlauf, berechnet wird,
- beim real durchgeführten Prozess zumindest ein Messverlauf der charakteristischen Größe, insbesondere ein gemessener Druckverlauf, gemessen wird,
- erste ausgezeichnete Punkte der Kurve des zumindest einen Simulationsverlaufs und zweite ausgezeichnete Punkte der Kurve des zumindest einen Messverlaufs bestimmt werden,
- die ersten ausgezeichneten Punkte und die zweiten ausgezeichneten Punkte einander zumindest teilweise zugeordnet werden,
- aus Koordinaten der einander zumindest teilweise zugeordneten ersten ausgezeichneten Punkte und zweiten ausgezeichneten Punkte zumindest ein Änderungsparameter für die Simulation und/oder den Prozess berechnet wird und
- die Simulation und/oder der Prozess auf Basis des zumindest einen Änderungsparameters geändert und erneut durchgeführt wird.

Hinsichtlich des Computerprogramms wird die Aufgabe durch Befehle gelöst, die einen ausführenden Computer dazu veranlassen,

- zumindest einen Simulationsverlauf zumindest einer für den Prozess charakteristischen Größe, insbesondere einen simulierten Druckverlauf, im

Rahmen einer Simulation zu berechnen oder von einer separaten Simulation entgegenezunehmen,

- zumindest einen Messverlauf der zumindest einen charakteristischen Größe, insbesondere einen gemessenen Druckverlauf, aus dem realen Prozess entgegenezunehmen,
- erste ausgezeichnete Punkte der Kurve des zumindest einen Simulationsverlaufs und zweite ausgezeichnete Punkte der Kurve des zumindest einen Messverlaufs zu bestimmen,
- die ersten ausgezeichneten Punkte und die zweiten ausgezeichneten Punkte einander zumindest teilweise zuzuordnen,
- aus Koordinaten der einander zugeordneten ersten ausgezeichneten Punkte und zweiten ausgezeichneten Punkte zumindest einen Änderungsparameter für die Simulation und/oder den Prozess zu berechnen und
- entweder die Simulation und/oder den Prozess auf Basis des zumindest einen Änderungsparameters zu ändern und erneut durchzuführen
- oder Ausgabeanweisungen auszugeben, die beinhalten, dass die Simulation und/oder der Prozess erneut durchzuführen ist und welche Änderungen an der Simulation und/oder dem Prozess auf Basis des zumindest einen Änderungsparameters durchzuführen sind.

Bei den ersten ausgezeichneten Punkten und den zweiten ausgezeichneten Punkten der Kurven des zumindest einen Simulationsverlaufs und des zumindest einen Messverlaufs handelt es sich um Punkte, die anhand von Merkmalen dieser Kurven bestimmbar sind. Es kann sich dabei beispielsweise um „Knicke“ in der Kurve oder Wende- oder Sattelpunkte sowie Minima oder Maxima handeln. Diese Punkte sind also durch diese Eigenschaften „ausgezeichnet“ oder erkennbar.

Zu erwähnen ist, dass es an und für sich bekannt ist, den zumindest einen Messverlauf und den zumindest einen Simulationsverlauf nach solchen Punkten zu durchsuchen und die Punkte einander zuzuordnen, siehe WO 2016/177513 A1. Dort werden die Punkte aber nur zum Ermitteln von Positionen der Fließfront innerhalb des realen Spritzgießwerkzeugs verwendet und ein erneutes Durchführen der Simulation ist nicht vorgesehen.

Ein zentraler Aspekt der Erfindung ist, dass in den Koordinaten der ersten ausgezeichneten Punkte und der zweiten ausgezeichneten Punkte tatsächlich viel mehr Informationen vorhanden sind, als in der WO 2016/177513 A1 ausgenutzt werden, und zwar bis zum Punkt, dass die Simulation erfindungsgemäß zum Angleichen an den realen Prozess gezielt angepasst werden kann (oder anders herum: der Prozess an die Simulation). „Gezielt“ bedeutet in diesem Fall, dass die erfindungsgemäßen (als Zahlenwerte berechenbaren) Änderungsparameter die Abweichung zwischen dem zumindest einen Simulationsverlauf und dem zumindest einen Messverlauf quantifizieren können, was natürlich eine genauere Anpassung der Simulation an den Prozess erlaubt.

Anders formuliert, können Änderungsparameter erfindungsgemäß aus den Koordinaten der ersten ausgezeichneten Punkte und der zweiten ausgezeichneten Punkte (als Wert) berechnet werden, um die Simulation so anzupassen, dass das Simulationsergebnis im Wesentlichen dem realen Prozess entspricht oder zumindest näher am realen Prozess liegt. Die Änderungsparameter können alternativ oder zusätzlich dazu verwendet werden, den Prozess so anzupassen, dass das Messergebnis im Wesentlichen dem Simulationsergebnis entspricht oder zumindest näher an diesem liegt.

Der zumindest eine Messverlauf und/oder der zumindest eine Simulationsverlauf kann aus einer Vielzahl von einzelnen berechneten und/oder gemessenen Punkten bestehen, die in ihrer Gesamtheit einen Verlauf bilden, was natürlich eine an und für sich bekannte Vorgehensweise ist. Es ist aber prinzipiell auch denkbar, „lückenlose“ Verläufe – beispielsweise grafisch – zu definieren.

Die ersten ausgezeichneten Punkte und die zweiten ausgezeichneten Punkte können durch an und für sich bekannte Maßnahmen aus dem zumindest einen Simulationsverlauf und dem zumindest einen Messverlauf bestimmt werden, bspw. unter Anwendung des Ramer-Douglas-Peucker-Algorithmus.

Die Zuordnung der ersten ausgezeichneten Punkte und der zweiten ausgezeichneten Punkte zueinander kann in einem einfachen Beispiel im Wesentlichen durch die Reihenfolge der ausgezeichneten Punkte gegeben sein. Für den Fall, dass sich die Anzahl der ausgezeichneten Punkte für den Simulationsverlauf und den Messverlauf unterscheiden, können verschiedene Verfahren angewendet werden, um die Zuordnung zu erreichen. Beispiele dazu werden später angeführt.

Im Rahmen der Erfindung werden die ersten ausgezeichneten Punkte und die zweiten ausgezeichneten Punkte einander zumindest teilweise zugeordnet. Die teilweise Zuordnung kann sich beispielsweise daraus ergeben, dass – wie erwähnt – weniger erste ausgezeichnete Punkte als zweite ausgezeichnete Punkte (oder umgekehrt) vorhanden sind.

Im Rahmen des vorliegenden Dokuments wird unter „Zuordnen“ und „Zuordnung“ jeweils verstanden, dass es sich auch um ein teilweises Zuordnen oder eine teilweise Zuordnung im Sinne der Erfindung handeln kann, sofern nicht explizit anders angegeben.

Insbesondere bei einem Spritzgießprozess als Formgebungsprozess kann als für den Prozess (oder einen Teilprozess davon) charakteristische Größe zumindest eines der folgenden verwendet werden: ein Spritzdruck (Einspritzdruck), ein Formmassendruck, ein Schmelzedruck, ein Forminnendruck, eine Forminnentemperatur, eine Formmassentemperatur, eine Einspritzgeschwindigkeit, ein Antriebsmoment, eine Einspritzarbeit, eine Werkzeugatmung, ein realer Volumenstrom.

Mittels der erfindungsgemäßen Simulation können natürlich auch andere Größen als die charakteristische Größe berechnet werden oder es kann mehr als eine charakteristische Größe berechnet werden. Entsprechende Größen wären Drücke, Temperaturen, Viskositäten, Kompressionsmodule (oder Kompressibilitäten), Scherraten und dergleichen.

Grundsätzlich kann das erfindungsgemäße Verfahren nach der Simulation und nach dem realen Prozess (oder zumindest eines Zyklus desselben) durchgeführt werden.

In diesem Zusammenhang ist zu erwähnen, dass die Reihenfolge der erfindungsgemäßen Verfahrensschritte nur durch die Logik vorgegeben ist und nicht durch die Reihenfolge in den unabhängigen Ansprüchen. Beispielsweise kann durchaus zuerst der reale Prozess und dann die Simulation durchgeführt werden oder umgekehrt.

Wie bereits erwähnt, können unter Formgebungsmaschinen beispielsweise Spritzgießmaschinen, Spritzpressen, Pressen und dergleichen verstanden werden. Dementsprechend kann die Erfindung für jeden Prozess verwendet werden, für den eine entsprechende Simulationsvariante vorhanden ist. Darunter fallen beispielsweise Schäumverfahren, Mehrkomponentenspritzguss, Duroplast-Formgebungsverfahren, Silikon-Formgebungsverfahren, Elastomer-Formgebungsverfahren, Coinjektionsverfahren, Spritzprägen, variotherme Temperierung, reaktive Verfahren und dergleichen.

Die mit diesen Prozessen verarbeiteten Materialien werden auch als Formmasse bezeichnet. Die Formmasse kann bevorzugt ein thermoplastischer Kunststoff sein, der Formgebungsprozess kann bevorzugt ein Spritzgießprozess sein. Bei Spritzgießprozessen können aber durchaus Zusätze, wie Fasern, Gase oder Pulver, als Beladungen zum Kunststoff hinzugeben werden.

Allgemein kann beim gemäß der Erfindung zu behandelnden Prozess, der mit einer Formgebungsmaschine durchzuführen ist, aber nicht nur thermoplastischer Kunststoff verwendet werden. Beispielsweise reaktive Formmassen oder auch gewisse Keramiken können verwendet werden. Allgemein werden die Materialien, die beim Prozess so verwendet werden, als Formmassen bezeichnet.

Die für den Prozess charakteristische Größe kann insbesondere für einen Teilprozess des Prozesses charakteristisch sein. Beim Beispiel eines

Spritzgießprozesses kann es sich beispielsweise um eine für den Einspritzvorgang charakteristische Größe handeln.

Beim Abgleich zwischen der Simulation und dem realen Prozess ist natürlich nicht zu verstehen, dass die Simulationsergebnisse nach dem Abgleich exakt der Wirklichkeit entsprechen sollen, weil dies aufgrund von stets vorhandenen Ungenauigkeiten aus Messungen und Näherungen natürlich unmöglich wäre. Vielmehr ist der reale Prozess im Gegensatz zum virtuellen oder simulierten Prozess zu sehen, der im Rahmen der (Computer-)Simulation virtuell berechnet wird. Gemeint ist also einerseits der „echte“ Prozess und andererseits dessen näherungsweise Berechnung.

Unter Simulationen im Sinne der Erfindung sind Computersimulationen zu verstehen, die mittels eines mathematischen Modells physikalische und/oder chemische Vorgänge nachbilden, die beim zu betrachtenden Prozess auftreten. Es bestehen im Sinne der Erfindung aber keine Beschränkungen, wie einfach oder komplex diese Modelle zu sein haben. D.h. es bestehen keine prinzipiellen Einschränkungen dahingehend, wie „realistisch“ oder genau die Simulationen die Realität abbilden. Insbesondere können die Simulationen – neben der ohnehin vorhandenen Berechnungsungenauigkeit – Näherungen und analytische Teilberechnungen aufweisen.

Ebenso wenig müssen die Simulationen den gesamten Prozess abbilden. Insbesondere bei Spritzgießprozessen kann beispielsweise nur der Füllvorgang (Einspritzvorgang) simuliert werden. Natürlich ist es ebenso denkbar, auch den im Wesentlichen vollständigen Prozess zu simulieren, in dem beispielsweise auch das Maschinenverhalten inkludiert sein kann.

Es ist ein Vorteil der Erfindung, dass auch Abweichungen zwischen Simulation und realem Prozess erkannt und/oder kompensiert werden können, die durch Simulieren nur eines Teilprozesses des Prozesses entstehen.

Die Anwendung von Simulationssoftware, sei es zur Auslegung von Kunststoffartikeln und dazugehörigen Werkzeugen, der Fehlerbehebung oder der Optimierung von Prozessen im Bereich des Spritzgießens und damit verbundenen anderen Verfahren, wird seit Jahren immer mehr und wird sich auch in Zukunft weiter steigern.

Neben den vielen Vorteilen, die Simulationen mit sich bringen (z.B. Kostenersparnis beim Werkzeugbau, da Fehler/Probleme im Vorhinein schon behoben werden können oder der Zeitersparnis bei der Fehlersuche bei einem bestehenden Werkzeug), muss man beachten, dass eine Simulation die Realität nur zum Teil richtig abbilden kann. Umso genauer die Simulationsmodelle (Geometrie, Materialmodelle, Start- und Randbedingungen etc.) dabei gestaltet werden, umso besser können sie auch die Realität wiedergeben. Daher besteht das Ziel darin die Simulation so genau wie möglich zu modellieren, damit man mit den berechneten Simulationswerten so nahe wie möglich an die Messwerte eines realen Prozesses gelangt.

Das ist leider nicht immer möglich, da z.B. gewisse Geometrien (Heißkanal, Düse, Schneckenorraum) und Einstellungen bzw. Informationen (Massetemperatur, Reibungsverluste, Kompressionsentlastung, Verhalten der Rückstromsperre etc.) von und an der Maschine etc. nicht vorhanden sind und zum Beispiel Materialmodelle, die in den Simulationen verwendet werden, nicht zu 100 % richtig das reale Materialverhalten abbilden (Materialien auch des gleichen Typs unterscheiden sich von Charge zu Charge oder Materialparameter sind für ein bestimmtes Material nicht in der Simulation hinterlegt).

Daher wird es bei den Ergebnissen einer durchgeführten Simulation, welche mit bereits vorhandenen Daten, Wissen und Einstellungen modelliert wurde, im Normalfall zu Abweichungen zum realen Prozess kommen.

Sind die Ergebnisse (d.h. der für den Prozess charakteristischen Größen, wie bspw. Drücke, Temperaturen etc.) von Simulation und realem Prozess vorhanden, werden die Simulationsergebnisse gemäß der Erfindung abgeglichen. Das bedeutet, dass

man versucht das Simulationsmodell so anzupassen, dass bei einer erneuten Durchführung der veränderten Simulationen die gleichen (oder zumindest angenäherte) Ergebnisse wie im realen Prozess erhalten werden. Das kann z.B. geschehen indem man Einspritzprofile, Massetemperaturen, Materialmodelle, Geometrien etc. im Simulationsmodell verändert. Wie man bemerkt, können sehr viele Parameter für einen Abgleich von Simulation und realem Prozess angepasst werden. Das Problem in diesem Fall ist, dass nicht bekannt ist welche Parameter in welcher Höhe angepasst werden müssen, damit ein ausreichender Abgleich erhalten wird. Insbesondere mit dem freien Auge des Bedieners, wie dies im Stand der Technik vorgesehen ist, erhält man dabei natürlich ungenaue und nicht reproduzierbare Ergebnisse.

Bis heute ist es üblich, dass in diesem Fall z.B. Parameterstudien mit sehr vielen verschiedenen Varianten unterschiedlicher Parameterkombinationen mit sich verändernden Werten durchgeführt werden. Mit Zufall bzw. auch gewisser Systematik kann dann mit einer bestimmten Parameterkombination ein Abgleich erreicht werden. Der Nachteil hierbei ist, dass sehr viele Simulationen oder Versuche durchgeführt werden müssen, bis ein ausreichender Abgleich erzielt werden kann, und zusätzlich ist es schwierig eine Aussage darüber treffen zu können, warum welche Parameter in welcher Höhe in der Simulation bzw. im Prozess für den Abgleich verändert werden mussten.

Die Verbesserung dieser Problematik ist eine weitere Leistung der Erfindung.

Bevor zusätzliche Parameterstudien nach dem Trial & Error Verfahren durchgeführt werden müssen, um die richtigen Parametereinstellungen der Simulation zu finden, kann man auf einen Schlag mithilfe der erfindungsgemäßen Berechnung der Änderungsparameter die Simulation im nächstfolgenden Schritt dementsprechend anpassen (oder analog den Prozess an die Simulation) und muss nicht unzählige Simulationen starten oder Versuche durchführen. Das spart Zeit und Aufwand und man kann durch die berechneten Änderungsparameter genaue Aussagen darüber treffen, was in der Simulation im Vergleich zum realen Prozess nicht richtig abgebildet wurde.

Durch das Wissen der bestimmten Änderungsparameter können z.B. Materialmodelle oder die dazugehörigen Materialparameter im Simulationsmodell verändert werden. Das ist ein großer Vorteil, da erstens von vielen Materialien keine ausreichenden Materialparameterdaten vorhanden sind und zweites sich Materialdaten von einem Materialtyp von Charge zu Charge unterscheiden können. Durch ein Anpassen des Materialmodells kann diese Abweichung effektiv ausgeglichen werden.

Oft sind Daten des Totvolumens bei einem Simulationsmodell nicht modelliert oder es können die Auswirkungen des Totvolumens nicht richtig bestimmt werden, da die hierfür benötigten Daten nicht vorhanden oder nur unvollständig vorhanden sind. Mit den richtigen Änderungsparametern können auch diese Abweichungen zwischen Simulation und realem Prozess quantifiziert und dann dementsprechend die Simulation abgeglichen werden.

Ebenso ist es mit der Erfindung möglich die Randbedingungen (d.h. bspw. Einstellungen der Formgebungsmaschine) des Prozesses so anzupassen, dass die Messung (also der zumindest eine Messverlauf) möglichst genau mit der Simulation (d.h. dem zumindest einen Simulationsverlauf) übereinstimmt. Anders formuliert, können in der Simulation nicht berücksichtigte Randbedingungen durch eine Anpassung von Randbedingungen des Prozesses kompensiert werden, was zu einer besseren Übereinstimmung zwischen Simulation und Experiment (d.h. dem realen an der Formgebungsmaschine durchgeführten Prozess) führen kann.

Folgende Randbedingungen könnten bspw. im Prozess für eine bessere Übereinstimmung zwischen Simulation und Prozess verändert werden:

- Die Massetemperatur (direkt oder indirekt über Veränderung der Heißkanaltemperatur, der eingestellten Zylindertemperaturen und/oder der Werkzeugtemperatur) anpassen um z.B. gemessene und berechnete Drücke besser abzugleichen.

- Veränderung der Materialzusammensetzung um besser den verwendeten Materialmodellparametern in der Simulation zu entsprechen.
- Vorlauftemperaturen, Durchflüsse und/oder Temperaturdifferenzen für die Werkzeugtemperierung können an die simulierten Werte angenähert werden.
- Die Nachdruckhöhe und Nachdruckzeit können entsprechend dem Unterschied zwischen simulierten bzw. gemessenen Verzug des Bauteils verändert werden. Zusätzlich kann die Nachdruckhöhe bspw. mit einem Faktor, der sich aus der Division von simulierten und gemessenen Forminnendrücken ergibt, angepasst werden.
- Der Dosierhub, Umschaltzeitpunkt und/oder die Kompressionsentlastung können so gewählt werden, dass das Einspritzvolumen besser mit der Simulation übereinstimmt.
- Das Einspritzvolumenstromprofil kann, z.B. um die Gesamteinspritzzeit aus der Simulation im realen Prozess zu erreichen etc., angepasst werden.

Schutz begehrt wird ebenfalls für eine Formgebungsmaschine, welche zum Durchführen der erfindungsgemäßen Verfahren eingerichtet ist.

Hierfür können verschiedene Sensoren vorhanden sein, um die für den Prozess charakteristischen Größen und ggf. weitere Größen zu messen. Diese können mit einer zentralen Maschinensteuerung der Formgebungsmaschine verbunden oder verbindbar sein. Auf dieser Maschinensteuerung können die erfindungsgemäßen Verfahren softwaretechnisch implementiert sein, d.h. die zentrale Maschinensteuerung kann den Computer darstellen, worauf das erfindungsgemäße Computerprogrammprodukt zur Ausführung gebracht werden kann.

Der ausführende Computer kann alternativ auch fern von der Formgebungsmaschine angeordnet sein und über eine Datenfernübertragungsverbindung mit verschiedenen Elementen der Formgebungsmaschine in Verbindung stehen, bspw. in Form eines so angebundenen Computer-Servers. Letztlich kann der Computer auch durch verteiltes Rechnen realisiert sein, d.h. die Funktionen der Steuer- und/oder Regeleinheit sind dann durch eine Vielzahl von Rechenprozessen realisiert, die an

verschiedenen Computern unabhängig von der Position der Formgebungsmaschine laufen können.

Alle in Bezug auf das erfindungsgemäße Verfahren beschriebenen und beanspruchten Aspekte können auch beim Computerprogrammprodukt gemäß der Erfindung vorgesehen sein oder als solches oder Teil eines solchen implementiert sein.

In einer besonders bevorzugten Ausführungsform ist die automatische Durchführung der erfindungsgemäßen Verfahren vorgesehen oder, anders ausgedrückt, sind die erfindungsgemäßen Computerprogrammprodukte zum automatischen Durchführen der entsprechenden Befehle konzipiert. Aber auch eine manuelle oder teilautomatisierte Realisierung der Erfindung ist natürlich denkbar.

Die Simulation kann aus Teilsimulationen bestehen oder es können für ein Simulationsergebnis mehrere Simulationen des physikalischen und/oder chemischen Prozesses durchgeführt werden, deren Ergebnisse kombiniert werden können.

Weitere vorteilhafte Ausführungen der Erfindung sind in den abhängigen Ansprüchen definiert.

Bereits erwähnt wurde, dass die ersten ausgezeichneten Punkte und/oder die zweiten ausgezeichneten Punkte unter Anwendung des an sich bekannten Ramer-Douglas-Peucker-Algorithmus bestimmt werden können.

Mittels dieses Algorithmus kann eine Menge von Punkten (die einen Verlauf bilden) reduziert werden, sodass der gegebene Verlauf gegebenenfalls unter Vorgabe gewisser Kriterien durch die reduzierte Punktmenge trotzdem noch (bis zu einem gewissen vorgebbaren Grad) den ursprünglichen Verlauf widerspiegeln.

Beispiele für Bedingungen, die vorgegeben werden können, um sicherzustellen, dass der Verlauf dabei nur in gewissen Grenzen verfälscht wird wären zumindest eines der folgenden: einen Toleranzbereich um den ursprünglichen Verlauf, eine

Maximalanzahl an reduzierten Punkten, eine Mindeststrecke zwischen reduzierten Punkten, maximaler normierter Fehler der Abstandsquadrate zwischen den Ausgangspunkten und reduzierten Punkten.

Es kann vorgesehen sein, dass die mithilfe des Ramer-Douglas-Peucker-Algorithmus reduzierte Punktmenge (des zumindest einen Simulationsverlaufs und/oder des zumindest einen Messverlaufs) durch Anwenden zumindest eines zusätzlichen Kriteriums weiter reduziert wird, um die ersten ausgezeichneten Punkte und/oder die zweiten ausgezeichneten Punkte zu erhalten.

Im Rahmen dieses Kriteriums oder unabhängig vom Ramer-Douglas-Peucker-Algorithmus können die ersten ausgezeichneten Punkte und/oder die zweiten ausgezeichneten Punkte beispielsweise danach bestimmt werden, ob Verbindungslinien zu angrenzenden Punkten des zumindest einen Simulationsverlaufs beziehungsweise des zumindest einen Messverlaufs einen Winkel einschließen, der um einen vorgegebenen Winkelbetrag – bevorzugt um 5° oder mehr, besonders bevorzugt um 10° oder mehr – von 180° abweicht.

Zusammenfassend kann zumindest eine der folgenden Bedingungen und/oder Kriterien beim Bestimmen der ersten ausgezeichneten Punkte und/oder der zweiten ausgezeichneten Punkte verwendet werden:

- eine Maximalanzahl an reduzierten Punkten und/oder ausgezeichneten Punkten,
- eine Mindeststrecke zwischen den Punkten der reduzierten Punktmenge,
- ein maximaler normierter Fehler der Abstandsquadrate zwischen den ursprünglichen Datenpunkten des Messverlaufs (MV) und/oder des Simulationsverlaufs (SV) einerseits und den Punkten der reduzierten Punktmenge andererseits,
- Überschreiten und/oder Erreichen eines Schwellwerts durch die charakteristische Größe (beispielsweise in Form einer Druckschwelle),
- Ausschließen eines vorgegebenen Teilbereichs des Prozesses, wobei der Teilbereich durch absolute oder relative Grenzen gegeben ist.

Der vorgegebene Teilbereich kann, wie erwähnt durch absolute Grenzen gegeben sein (bspw. 15 ms nach Beginn des Einspritzvorgangs). Relative Grenzen können sich durch einen Anteil des gesamten Prozesses (bspw. Weglassen der ersten 10% eines Einspritzvorgangs bezogen auf die Zeit oder eine Zeit-äquivalente Größe) oder durch Erreichen einer gewissen Situation im Prozess (bspw. doppelter Hub einer Einspritzbewegung, der erfahrungsgemäß benötigt wird, bis die Rückstromsperre geschlossen ist) ergeben.

Alternativ oder zusätzlich kann Flankenanalyse (unter Bildung der ersten Ableitung des zumindest einen Simulationsverlaufs und/oder des zumindest einen Messverlaufs), eine Analyse von Wendepunkten (unter Bildung der zweiten Ableitung des zumindest einen Simulationsverlaufs und/oder des zumindest einen Messverlaufs) und/oder eine Analyse von Minima und/oder Maxima des zumindest einen Simulationsverlaufs und/oder des zumindest einen Messverlaufs zum Bestimmen der ersten ausgezeichneten Punkte und/oder der zweiten ausgezeichneten Punkte verwendet werden.

Bevor die ersten ausgezeichneten Punkte und/oder die zweiten ausgezeichneten Punkte bestimmt werden, können der zumindest eine Simulationsverlauf und/oder der zumindest einen Messverlauf

- gefiltert werden, um ein dem zumindest einen Simulationsverlauf und/oder dem zumindest einen Messverlauf überlagertes Rauschen herauszufiltern, und/oder
- skaliert, insbesondere normiert, werden (bspw. um Winkelbeziehungen vergleichbar oder anwendbar zu machen), wobei die reduzierte Punktmenge und/oder die ersten ausgezeichneten Punkte und/oder die zweiten ausgezeichneten Punkte anschließend wieder zurück-skaliert werden können.

Die ersten ausgezeichneten Punkte und die zweiten ausgezeichneten Punkte können einander zumindest teilweise zugeordnet werden, indem

- für alle möglichen verschiedenen Zuordnungsmöglichkeiten der ersten ausgezeichneten Punkte zu den zweiten ausgezeichneten Punkten die

ersten ausgezeichneten Punkte und/oder die zweiten ausgezeichneten Punkte so skaliert und/oder verschoben werden, dass jeweils zwei der ersten ausgezeichneten Punkte und der zweiten ausgezeichneten Punkte im Wesentlichen aufeinanderliegen,

- anhand zumindest eines der folgenden jeweils zumindest eine Kennzahl für die Güte der jeweiligen Zuordnungsmöglichkeit berechnet wird: Parameter der Skalierung, Parameter der Verschiebung, (Koordinaten-) Differenzen der – gegebenenfalls skalierten und/oder verschobenen – ersten ausgezeichneten Punkte von den – gegebenenfalls skalierten und/oder verschobenen – zweiten ausgezeichneten Punkten,
- jene Zuordnungsmöglichkeit ausgewählt wird, deren zumindest eine Kennzahl eine beste Güte der Zuordnung anzeigt.

Für die Berechnung der zumindest einen Kennzahl kann beispielsweise zumindest eines der folgenden herangezogen werden (vorzugsweise in Form von (Fehler-) Quadraten):

- Parameter aus der Skalierung und/oder dem Verschieben (Offset) zum Aufeinanderlegen der jeweils zwei Punkte der ersten ausgezeichneten Punkte und der zweiten ausgezeichneten Punkte und/oder
- (Koordinaten-) Differenzen der – gegebenenfalls skalierten und/oder verschobenen – ersten ausgezeichneten Punkte von den – gegebenenfalls skalierten und/oder verschobenen – zweiten ausgezeichneten Punkten

Grundsätzlich können natürlich auch andere, aus dem Stand der Technik bekannte Verfahren verwendet werden, um die Zuordnung der ersten ausgezeichneten Punkte und der zweiten ausgezeichneten Punkte zu erreichen.

Das erfindungsgemäße Verfahren kann auch auf Ergebnisse der erneut durchgeführten Simulation und/oder auf Messungen beim erneut durchgeführten Prozess angewendet werden, wobei dies bevorzugt solange wiederholt wird, bis eine Simulationsabweichung zwischen dem zumindest einen Simulationsverlauf und dem zumindest einen Messverlauf gemäß einem vorgegebenen Kriterium klein genug ist.

Folgende wären Beispiele für Kriterien, die zum Abbrechen der so gestarteten Schleife verwendet werden können:

- Es könnte zum Beispiel ein Grenzwert für den zumindest einen Änderungsparameter selbst verwendet werden, da dieser die Abweichung quantifiziert. D.h. die Simulation bzw. der Prozess ist dann gut genug, wenn der zumindest eine Änderungsparameter in einen gewissen Wertebereich fällt. Zusätzlich kann gewichtet werden, dass beispielsweise bei höheren Drücken eine bessere Übereinstimmung als bei niedrigen Drücken notwendig ist und umgekehrt.
- Es können Flächen unter den Simulationsverläufen und den Messverläufen und/oder Maximalwerte derselben verglichen werden.
- Es kann ein Toleranzband für die Abweichung des Simulationsverlaufs vom Messverlauf (oder umgekehrt) festgelegt werden, innerhalb dessen die Simulation im Rahmen des Kriteriums als gut genug klassifiziert wird.

Selbstverständlich können auch sämtliche (inklusive und/oder exklusive) Kombinationen dieser Kriterien herangezogen werden.

Die Grenzwerte und/oder Toleranzen können so gewählt werden, dass

- sich in Bezug auf ein Volumen der Formmasse ein Unterschied von weniger 10 %, bevorzugt 5 % und besonders bevorzugt 1 %, ergibt oder
- sich in Bezug auf einen Druck der Formmasse ein Unterschied von weniger als 20 %, bevorzugt weniger als 10 % und besonders bevorzugt weniger als 1 %, ergibt.

Der zumindest eine Änderungsparameter kann ein Ausmaß einer zeitlichen Verschiebung zwischen den einander zugeordneten ersten ausgezeichneten Punkten und zweiten ausgezeichneten Punkten betreffen, wobei die zeitliche Verschiebung insbesondere durch ein unbekanntes Volumen der in der Formgebungsmaschine vorhandenen Formmasse hervorgerufen wird. Anders ausgedrückt, kann die Zuordnung der ersten ausgezeichneten Punkte und der zweiten ausgezeichneten Punkte dazu verwendet werden, eine zeitliche Verschiebung zwischen dem Simulationsverlauf und dem Messverlauf zu bestimmen.

Die Simulation kann dann geändert werden, indem auf Basis des zumindest einen Änderungsparameters für das Ausmaß der zeitlichen Verschiebung ein für die Simulation vorgegebenes Einspritzvolumen (bspw. in Form eines Füllvolumens) und/oder ein für die Simulation vorgegebener Einspritzvolumenstrom (bspw. in Form eines Füllvolumenstroms) geändert wird.

Bei einer Verschiebung entlang einer Zeitachse – oder äquivalent: entlang einer Aktuatorposition für einen Einspritzvorgang – kann insbesondere das Einspritzvolumen oder der Einspritzvolumenstrom zwischen Simulation und realem Prozess nicht zusammenpassen, weil das Maschinenverhalten in vielen Fällen von der Simulation nicht erfasst wird und ein nicht korrekter Einspritzvolumenstrom oder ein nicht korrektes Einspritzvolumen als Ausgangspunkt für die Simulation verwendet wird. Das kann mit der vorliegenden Erfindung – vorzugsweise automatisiert oder teilautomatisiert – erkannt und korrigiert werden.

Soll alternativ oder zusätzlich der Prozess (bspw. durch Verändern der Einstellungen der Formgebungsmaschine) an die Simulation angepasst werden, kann beispielsweise der Dosierhub geändert werden, um das Einspritzvolumen des Prozesses an jenes, das in der Simulation verwendet wurde/wird, anzugleichen.

Der zumindest eine Änderungsparameter kann ein Ausmaß einer Skalierung derjenigen Koordinaten der einander zugeordneten ersten ausgezeichneten Punkte und zweiten ausgezeichneten Punkte betreffen, welche der charakteristischen Größe entsprechen. Verkürzt ausgedrückt, kann der Änderungsparameter also das Ausmaß der Skalierung der zumindest einen charakteristischen Größe oder der (ersten und/oder zweiten) ausgezeichneten Punkte betreffen.

D.h. die Skalierung kann beispielsweise eine Multiplikation der charakteristischen Größe mit dem zumindest einen Änderungsparameter als Faktor sein.

Die Simulation kann dann geändert werden, indem auf Basis des zumindest einen Änderungsparameters für das Ausmaß der Skalierung ein für die Simulation vorgegebener Materialparameter geändert wird.

In vielen Fällen liegen einem nicht korrekt skalierten Simulationsergebnis ein Materialmodell oder Materialparameter zugrunde, die nicht genau genug die Realität widerspiegeln. Auch das kann durch die Erfindung – vorzugsweise automatisiert oder teilautomatisiert – erkannt und korrigiert werden.

Ein Cross-WLF-Modell und/oder ein 2-Domänen Tait pvT Modell kann als Materialmodell für die Simulation verwendet werden. Auf das Cross-WLF-Modell wird etwas weiter unten exemplarisch eingegangen. Das Tait pvT Modell beruht auf der folgenden Zustandsgleichung:

$$v(T, p) = v_0(T) \left[1 - C \ln \left(1 + \frac{p}{B(T)} \right) \right] + v_t(T, p)$$

Eine detaillierte Beschreibung der Parameter und der enthaltenen Funktionen kann der einschlägigen Literatur entnommen werden.

Eine Skalierungsabweichung zwischen dem zumindest einen Simulationsverlauf und dem zumindest einen Messverlauf könnte alternativ oder zusätzlich auch beispielsweise durch eine Änderung der Massetemperatur im realen Prozess kompensiert werden. Denn beispielsweise durch eine höhere Massetemperatur stellt sich eine geringere Viskosität in der Formmasse ein (analog: höhere Viskosität bei geringerer Formmassentemperatur), was sich in einer geringeren oder größeren Progressivität (d.h. der zumindest eine Messverlauf steigt langsamer bzw. schneller an) der charakteristischen Größe in Form des Spritzdrucks äußert.

Der zumindest ein Änderungsparameter kann als statistische Kenngröße, insbesondere arithmetisches Mittel, der Koordinaten der einander zugeordneten ersten ausgezeichneten Punkte und zweiten ausgezeichneten Punkte berechnet werden. Statt eines arithmetischen Mittels können natürlich auch beliebige andere statistische Kenngrößen, wie beispielsweise ein Median, verwendet werden.

Anstatt durch einfache statistische Funktionen können die Änderungsparameter auf Basis der Koordinaten der ersten und zweiten ausgezeichneten Punkte auch beispielsweise durch Optimierungsalgorithmen oder Regressionsmethoden oder beliebige sonstige funktionale Zusammenhänge errechnet werden.

Der zumindest eine Änderungsparameter kann in einer Datenbank gespeichert und beim Simulieren und/oder Einstellen eines separaten Prozesses verwendet werden.

Beim Einsatz der Erfindung können nämlich wertvolle Daten gesammelt werden, die effektiv zum weiteren Verbessern von Simulationen von Prozessen und beim Auffinden von Einstellungen für eine Vielzahl von Formgebungsmaschinen und damit durchgeführten Prozessen verwendet werden können (Schwarmintelligenz). D.h. die generierten Daten können in zentralen und/oder dezentralen Datenbanken (on premise, cloud) gesammelt werden und so weiterverwendet werden. Konkrete Beispiele für Aspekte von Simulationen, die mittels der generierten Daten verbessert werden können, wären Modelle für das Schließverhalten von Rückstromsperrern oder Materialmodelle, die dann aus erweiterten Materialdatenbanken gespeist werden können.

Beim Bestimmen der ersten ausgezeichneten Punkte und/oder der zweiten ausgezeichneten Punkte können mehrere Simulationsverläufe und/oder mehrere Messverläufe berücksichtigt werden. Dafür können beispielsweise Mittelwerte über die Messverläufe und/oder die Simulationsverläufe gebildet werden, die dann als Basis für die Bestimmung der ersten ausgezeichneten Punkte und/oder der zweiten ausgezeichneten Punkte herangezogen werden können. Alternativ oder zusätzlich können erste ausgezeichnete Punkte und/oder zweite ausgezeichnete Punkte für jeden der Simulationsverläufe und/oder Messverläufe einzeln bestimmt werden und dann Mittelwerte verwendet werden, um die finalen ausgezeichneten Punkte zu bestimmen. Statt Mittelwerten können natürlich auch Mediane oder andere statistische Kenngrößen verwendet werden.

Ebenso können auch mehrere Simulationen und mehrere Messungen mit verschiedenen Randbedingungen gleichzeitig betrachtet und erste ausgezeichnete

Punkte und/oder zweite ausgezeichnete Punkte für jeden der Simulationsverläufe und/oder Messverläufe einzeln bestimmt werden, um die Abhängigkeiten von diesen Randbedingungen bei der Berechnung der Änderungsparameter berücksichtigen zu können.

Der zumindest eine Simulationsverlauf und/oder der zumindest eine Messverlauf kann mittels eines Zeitindex oder eines Positionsindex eines beim Prozess eingesetzten Aktuators, insbesondere einer Plastifizierschnecke, parametrisiert werden.

Als solcher Index (beispielsweise „X-Achse“ des Verlaufs) sind im allgemeinsten Fall beliebige Größen des Prozesses verwendbar, die mit dem Fortschritt des Prozesses korrelieren. Weitere bevorzugte Beispiele sind: ein Volumen der Formmasse innerhalb eines bestimmten Bereichs (beispielsweise innerhalb der Formgebungskavität bei einem Spritzgießprozess), ein Volumenstrom (beispielsweise in die Formgebungskavität hinein), (Soll- oder Istwert) eine Aktuatorposition, eine Aktuatorgeschwindigkeit (bspw. der Schnecke), eine (repräsentative oder mittlere) Scherrate.

Das heißt, dass beispielsweise der zumindest eine Messverlauf dann aus Wertepaaren mit einem Indexparameter und einem Wert der für den Formgebungsprozess charakteristischen Größe bestehen kann (analog für den zumindest einen Simulationsverlauf möglich).

Statt einem Zeitparameter kann auch eine Aktuatorposition eines beim Formgebungsprozess verwendeten Aktuators verwendet werden. Beim Beispiel eines Spritzgießprozesses kann beispielsweise der Weg verwendet werden, den die Schnecke (oder ein anderweitiger Einspritzkolben) beim Einspritzen zurücklegt, was auch als Schneckenvorschub bezeichnet wird. Da die Bewegung des Aktuators gemeinhin über ein Profil vorgegeben wird, wären die angesprochenen Verläufe und Positionen zwischen einer Zeitindexierung und einer Positionsindexierung des Aktuators umrechenbar.

Werden die Bewegungen des Aktuators in der Simulation nicht miterfasst, können trotzdem analoge Parameter verwendet werden, da in der Simulation Rand- und/oder Anfangsbedingungen vorgegeben werden müssen, um den Prozess abzubilden. Beispielsweise ein Einspritzvolumenstromprofil kann über virtuelle Aktuatorpositionen definiert werden, die Entsprechungen zu den Aktuatorpositionen im realen Prozess darstellen.

Alternativ können die Aktuatorpositionen aus dem realen Prozess verwendet werden, um einen Volumenindex zu definieren, der dem Einspritzvolumenstromprofil für die Simulation entspricht und als Zeitindex verwendet werden kann. Den Volumenindex aus der Simulation und dem realen Prozess genau abzugleichen, ist eine weitere Leistung der Erfindung.

Weitere Vorteile und Einzelheiten der Erfindung ergeben sich aus den Figuren sowie der dazugehörigen Figurenbeschreibung. Dabei zeigen:

- Fig. 1 ein Beispiel eines Spritzgießteils samt Anguss, Düse, Messflansch und Teil des Schneckenorraums, das als Beispiel zur Verdeutlichung der Erfindung herangezogen wird,
- Fig. 2 einen Messverlauf und einen Simulationsverlauf für den Beispiel-Formgebungsprozess in einem Diagramm,
- Fig. 3 den Messverlauf alleine in einem Diagramm,
- Fig. 4 bis 6 drei Diagramme zur Veranschaulichung des Bestimmens der zweiten ausgezeichneten Punkte,
- Fig. 7 den Simulationsverlauf alleine in einem Diagramm,
- Fig. 8 bis 10 drei Diagramme zur Veranschaulichung des Bestimmens der ersten ausgezeichneten Punkte,
- Fig. 11 bis 13 drei Diagramme zur Veranschaulichung von Füllzuständen beim Füllen der Kavität zum Formen des Spritzgießteils aus Fig. 1,
- Fig. 14 und 15 zwei Diagramme zur Verdeutlichung einer Zuordnung der ersten ausgezeichneten Punkte und der zweiten ausgezeichneten Punkte zueinander in einem ersten Beispiel,

- Fig. 16 und 17 zwei Diagramme zur Verdeutlichung einer Anpassung des in der Beispiel-Simulation verwendeten Einspritzvolumenstromprofils,
- Fig. 18 und 19 zwei Simulationsergebnisse nach jeweils einem erfindungsgemäßen Abgleich und den dazugehörigen Messverlauf,
- Fig. 20 bis 32 Diagramme zur Verdeutlichung eines allgemeinen Algorithmus zum Zuordnen der ersten ausgezeichneten Punkte und der zweiten ausgezeichneten Punkte in einem zweiten Beispiel.

Die folgenden Ausführungsbeispiele betreffen einen Einspritzprozess als Teilprozess eines Spritzgießprozesses. Als für diesen Prozess charakteristische Größe wurde ein Einspritzdruck gewählt. Der beispielhafte Simulationsverlauf SV und der beispielhafte Messverlauf MV ist also jeweils ein Druckverlauf. Selbstverständlich funktioniert die Erfindung analog für andere mit einer Formgebungsmaschine durchgeführte Prozesse.

In allen Diagrammen (bis auf die Figuren 1, 11 bis 13 sowie 16 und 17) ist daher die „Y-Achse“ der Druck in der realen oder simulierten Formmasse (als für den Formgebungsprozess charakteristische Größe), bezeichnet als Koordinaten $p_{M,i}$ oder $p_{S,i}$ für gemessene und simulierte Drücke. Die „X-Achse“ ist ein Zeitparameter (Koordinaten $t_{S,i}$ und $t_{M,i}$), um die zeitliche Entwicklung der charakteristischen Größe zu erfassen.

Genauso gut könnte man die Zeit allerdings mithilfe äquivalenter Volumen V_m und V_s parametrieren. Das heißt, man könnte die Zeit durch eine (bekannte, beim Simulationsverlauf SV gegebenenfalls virtuelle) Schneckenbewegung parametrieren und über den bekannten Durchmesser des Massezylinders in ein äquivalentes Volumen umrechnen.

Fig. 1 zeigt ein Beispiel für ein Formteil (in Form eines Buchstabens „F“) samt Anguss, Düse, Messflansch und Teil des Schneckenorraums, das in einem Spritzgießprozess gemäß der Erfindung herzustellen und dessen Herstellung gemäß der Erfindung zumindest teilweise zu simulieren ist.

Fig. 2 zeigt eine gemessene (Messverlauf MV) sowie dazu eine simulierte Druckkurve (Simulationsverlauf SV), wobei als Start- und Randbedingungen Werte aus dem realen Spritzprozess für die Simulation verwendet worden sind. Man kann die Abweichung leicht erkennen. Beide Kurven stimmen nicht überein, da z.B. Materialparameter, die in der Simulation verwendet werden nicht mit den Eigenschaften des real gespritzten Materials übereinstimmen, oder weil in der Simulation z.B. die Kompressionsentlastung sowie das Verhalten der Rückstromsperre nicht berücksichtigt wurde.

Es ist zu erkennen, dass der in Fig. 2 dargestellte Simulationsverlauf SV aus einer Vielzahl von einzelnen Datenpunkten besteht, die zusammen einen Verlauf darstellen. Die Zahl der Datenpunkte beim Messverlauf MV ist so groß, dass dies in der Darstellung des Messverlaufs MV nicht mehr erkennbar ist.

Fig. 3 zeigt den Messverlauf MV aus Fig. 2 für sich alleine. Mit freiem Auge ist zu erkennen, dass der Messverlauf Knicke aufweist, welche ein Beispiel für zweite ausgezeichnete Punkte $P_{M,i}$ im Sinn der Erfindung sind. Die Knicke können damit zusammenhängen, dass eine Formmassenfront auf Hindernisse im Angussystem oder in der Formgebungskavität trifft oder dass sich der von der Formgebungsmaschine stammende Volumenstrom aus anderen Gründen schnell ändert.

Nachfolgend wird das reproduzierbare und (teil-) automatisierbare Auffinden der ersten ausgezeichneten Punkte $P_{S,i}$ und der zweiten ausgezeichneten Punkte $P_{M,i}$ beschrieben, wobei i jeweils als Index zum Nummerieren der Punkte dient.

Vor dem Auffinden der ausgezeichneten Punkte kann der Messverlauf MV und/oder der Simulationsverlauf SV zuerst gefiltert werden, wobei dies im Rahmen der Erfindung nicht absolut notwendig ist. Als Filter kann z.B. der an sich bekannte Savitzky-Golay-Filter verwendet werden. Ein Filter kann dazu dienen, Rauschen im Signal herausfiltern zu können, welches in den meisten Fällen für das Auffinden von ausgezeichneten Punkten nicht benötigt wird.

Danach kann mit an und für sich bekannten Algorithmen ein Messverlauf MV (siehe Fig. 3), der z.B. aus 10000 aufgezeichneten Datenpunkten besteht, auf eine geringere Anzahl an Messpunkten reduziert werden. Im vorliegenden Ausführungsbeispiel wurde der Ramer-Douglas-Peucker-Algorithmus (RDP-Algorithmus) verwendet. Das Ergebnis ist in Fig. 4 dargestellt, wobei zwischen den einzelnen Punkten der reduzierten Punktmenge Verbindungslinien eingezeichnet sind.

Der Messverlauf MV mit der hohen Anzahl von Datenpunkten wird dabei nur soweit reduziert, dass die reduzierte Punktmenge in einem gewissen Toleranzbereich um den ursprünglichen Messverlauf MV liegt. Diesen Toleranzbereich und gegebenenfalls anschließende weitere Bedingungen (dazu später mehr) können Fachleute je nach Anwendung und Belieben wählen.

Fachleute können, beispielsweise je nachdem ob viele oder wenige reduzierte Punkte gewünscht sind, die Bedingungen für den Algorithmus festlegen, wobei einige wenige Experimente durchgeführt werden können, wenn sehr spezifische Anforderungen an die reduzierte Punktmenge gestellt werden.

Durch das Anwenden des Algorithmus erhält man daher eine reduzierte Punktmenge des Messverlaufs MV, die aus unterschiedlichen Knicken (die reduzierte Punktmenge) besteht. Diese Knicke stehen für Punkte wobei sich z.B die Steigung signifikant geändert haben könnte (was natürlich auf den Reduzierungsalgorithmus und dessen Toleranzeinstellungen ankommt).

Im hier vorgestellten konkreten Ausführungsbeispiel wurde der Ramer-Douglas-Peucker-Algorithmus auf das Messsignal (also den Messverlauf aus den Fig. 2 und 3) angewendet. Dabei wurde der Messverlauf MV zuerst auf der X-Achse sowie auf der Y-Achse jeweils auf 1 normiert und dann der RDP-Algorithmus darauf angewandt. Dabei kann die Toleranz, wie weit der reduzierte Messverlauf von dem ursprünglichen Messverlauf abweichen darf, grundsätzlich frei gewählt werden. Es kann aber empfehlenswert sein, wenn die Toleranz in einem Bereich zwischen 0,1 %

und 5 % liegt. Für dieses Ausführungsbeispiel wurde eine Toleranz von 1,5 % gewählt. Das Ergebnis des Algorithmus ist in Fig. 4 dargestellt, wobei die erwähnte Normierung auf 1 der beiden Achsen wieder rückgängig gemacht wurde, d. h. zurückskaliert wurde. Diese Rückskalierung kann auch nach dem Anwenden zusätzlicher Bedingungen und/oder Kriterien durchgeführt werden (siehe unten).

Der neue reduzierte Messverlauf MV – also die reduzierte Punktmenge – wurde dabei auf insgesamt 9 Messpunkte und daraus folgend auf 7 Knicke reduziert (d. h. die Randpunkte fallen weg, weil für diese keine Knickwinkel wie nachfolgend beschrieben werden können).

Vor, während oder anschließend an das Anwenden des Algorithmus können noch weitere Bedingungen eingeführt werden, um die reduzierte Punktmenge weiter einzuschränken. Alternativ kann die aus dem Algorithmus erhaltene reduzierte Punktmenge direkt als die zweiten ausgezeichneten Punkte $P_{M,i}$ verwendet werden.

Weitere (Neben-) Bedingungen zum Reduzieren der Punktmenge können beispielsweise sein:

- eine Maximalanzahl an reduzierten Punkten oder ausgezeichneten Punkten,
- eine Mindeststrecke zwischen reduzierten Punkten, und/oder
- ein maximaler normierter Fehler der Abstandsquadrate zwischen Ausgangspunkten (also den ursprünglichen Datenpunkten des Messverlaufs MV) und reduzierten Punkten.

Wie bereits erwähnt, können anschließend an die Anwendung des Algorithmus, gegebenenfalls samt zusätzlicher (Neben-) Bedingungen, weitere Kriterien für die tatsächliche Auswahl der zweiten ausgezeichneten Punkte $P_{M,i}$ herangezogen werden.

Ein Beispiel für ein weiteres Kriterium zum (weiteren) Reduzieren der Punktmenge wäre, dass ein Punkt aus dem reduzierten Verlauf erst als ein ausgezeichneter Punkt aufgenommen wird, wenn z.B. der Winkel zwischen zwei Geraden

(Verbindungslinien) eines Knicks (eines Punktes der reduzierten Punktmenge) eine gewissen Größe besitzt.

Dafür kann man für jeden der sieben Knicke (Punkte der mittels des RDP-Algorithmus reduzierten Punktmenge) den Winkel zwischen den zwei Verbindungslinien, welche mit Vektoren $\vec{vec1}$ und $\vec{vec2}$ beschrieben werden können, berechnen. Die Winkel zwischen den Vektoren können mittels der folgenden Formel berechnet werden.

$$\alpha = \frac{\arccos[(\vec{vec1} * \vec{vec2}) / (|\vec{vec1}| * |\vec{vec2}|)]}{2 * \pi} * 360^\circ$$

Dabei bezeichnet α den Winkel zwischen zwei Vektoren $\vec{vec1}$ und $\vec{vec2}$. Mit dieser Formel können sämtliche Winkel für alle Knicke aus dem reduzierten Verlauf berechnet werden. Dafür werden für jeden Knick die zwei Vektoren $\vec{vec1}$ und $\vec{vec2}$ die den Knick beschreiben berechnet und dann der Winkel, mithilfe der obigen Formel, zwischen den zwei Vektoren berechnet.

Hier kann das Kriterium eingeführt werden, dass ein sich aus der Reduzierung ergebender Punkt erst bei einer gewissen Größe, z.B. unter 170° (oder bei Verwendung anderer Formeln äquivalent über 190°), des Winkels zwischen zwei Vektoren als einer der zweiten ausgezeichneten Punkte $P_{M,i}$ verwendet wird.

Bevor die Winkelberechnung durchgeführt wird, sollte der Messverlauf MV sowohl auf der X-Achse als auch der Y-Achse normiert werden. Werden anschließend die Winkel der Knicke berechnet und für jeden Knick im Diagramm der zugehörige Winkel eingetragen, erhält man das Diagramm aus Fig. 5, wobei für jeden der Punkte aus der reduzierten Punktmenge der berechnete Winkel (Knickwinkel) und die entsprechenden Verbindungslinien eingezeichnet sind.

Durch Anwenden des oben angesprochenen Kriteriums, dass der Winkel bei einem Knick kleiner als 170° zwischen den Vektoren zu sein hat, fällt in diesem Beispiel der letzte Punkt als ausgezeichneter Punkt weg.

Im vorliegenden Ausführungsbeispiel wurde an dieser Stelle die Normierung wieder rückgängig gemacht, d. h. wieder zurückskaliert.

Des Weiteren soll der Anfangsbereich nicht mit in die Analyse zur Findung von ausgezeichneten Punkten aufgenommen werden, da es sich hier um den Bereich handelt, in dem die Rückstromsperre schließt. Die Simulation weicht (mit heutiger Simulationssoftware) in diesem Anfangsbereich vom Messverlauf MV ab, da bei der Simulation angenommen wird, dass die Rückstromsperre vor dem Einspritzprozess zu 100% geschlossen ist und sich daher ein anderer Druckverlauf im Vergleich zur Messung ergibt.

Diesbezüglich kann als Kriterium z.B. angesetzt werden, dass man den Druckverlauf erst ab einer gewissen Druckschwelle (z.B. ab 80 bar) und/oder ab einer gewissen Zeit (z.B. 75 ms) nach Einspritzbeginn für die Analyse benutzt. Weitere Möglichkeiten für zusätzliche oder alternative weitere Kriterien wären zum Beispiel, dass man die ersten 10 % (auf die Zeit und/oder Schneckenposition bezogen) nach Einspritzbeginn wegfällen lässt oder dass man bei Kenntnis über den benötigten Hub, bis zum Schließen der Rückstromsperre, z.B. den doppelten Hub des benötigten Hubs als Kriterium ansetzt. Außerdem könnte man z.B. den Bereich bis zu dem Zeitpunkt, in dem ein gewisser eingeregelter Einspritzvolumenstrom erreicht wurde, ausschließen.

Setzt man im vorliegenden Ausführungsbeispiel als zweites Kriterium eine Druckschwelle von 80bar an, ergeben sich die in Fig. 6 dargestellten zweiten ausgezeichnete Punkte $P_{M,i}$ für den Messverlauf MV.

Das Auffinden der ersten ausgezeichneten Punkte $P_{S,i}$ aus dem Simulationsverlauf SV geschieht in diesem Ausführungsbeispiel vollständig analog zur in Verbindung mit den Figuren 3 bis 6 beschriebenen Vorgehensweise, wozu noch auf die Figuren 7 bis 10 verwiesen wird. D.h. alle Maßnahmen, die in Verbindung mit den Figuren 3 bis 6 beschrieben wurden, sind auch im Ausführungsbeispiel nach den Figuren 7 bis 10 vorgesehen.

Alternativ könnten die ausgezeichneten Punkte beispielsweise auch mit Flankenanalyse oder ähnlichen Analysen von Ableitungen aufgefunden werden.

Das Resultat sind die ersten ausgezeichneten Punkte $P_{S,i}$ und die zweiten ausgezeichneten Punkte $P_{M,i}$, die in Fig. 14 gemeinsam dargestellt sind. Die Koordinaten der ersten ausgezeichneten Punkte $P_{S,i}$ werden mit $(t_{S,i}, p_{S,i})$ und diejenigen der zweiten ausgezeichneten Punkte $P_{M,i}$ werden mit $(t_{M,i}, p_{M,i})$ bezeichnet.

Die ausgezeichneten Punkte können im Rahmen des vorliegenden Spritzgießprozesses beispielsweise als jene Zeitpunkte interpretiert werden, bei denen eine Fließfront abrupte Änderungen des Widerstands gegen die Ausbreitung erfährt (quasi auf Hindernisse trifft). Aus der durchgeführten Simulation und deren Berechnungsergebnissen sowie den oben bestimmten ersten ausgezeichneten Punkten $P_{S,i}$, können Visualisierungen erzeugt werden, welche diese Situationen veranschaulichen. Dies ist in den Figuren 11, 12 und 13 dargestellt, wobei

- Fig. 11 die Situation zum Zeitpunkt $t_{S,1}$ des ersten ausgezeichneten Punktes $P_{S,1}$, wobei die Fließfront vom Anguss her kommend auf die eigentliche Formkavität trifft,
- Fig. 12 die Situation zum Zeitpunkt $t_{S,2}$ des ersten ausgezeichneten Punktes $P_{S,2}$, wobei die Fließfront auf ein erstes Ende der Kavität trifft, und
- Fig. 13 die Situation zum Zeitpunkt $t_{S,3}$ des ersten ausgezeichneten Punktes $P_{S,3}$, wobei die Fließfront auf ein zweites Ende der Kavität trifft,

darstellen.

In diesem Ausführungsbeispiel ist es zumindest für menschliche Beobachter offensichtlich, wie die jeweils drei ersten ausgezeichneten Punkte $P_{S,i}$ und zweiten ausgezeichneten Punkte $P_{M,i}$ einander zugeordnet werden sollten (siehe Fig. 15). Für weniger offensichtliche Fälle, wie sie in der Realität selbstverständlich auftreten werden, ist weiter unten eine reproduzierbare Vorgehensweise zum Auffinden der „korrekten“ Zuordnung beschrieben.

Auch wenn die Zuordnung der ersten ausgezeichneten Punkte $P_{S,i}$ und der zweiten ausgezeichneten Punkte $P_{M,i}$ korrekt geschehen ist, fallen diese Punkte natürlich nicht aufeinander, d.h. es gibt Abweichungen, welche mittels der (Zeit- und Druck-) Koordinaten $(t_{S,i}, p_{S,i})$ und $(t_{M,i}, p_{M,i})$ erfasst werden können.

Zu erwähnen ist, dass im vorliegenden Ausführungsbeispiel ein kartesisches Koordinatensystem verwendet wurde. Natürlich könnte die Erfindung prinzipiell auch mit einem beliebigen anderen Koordinatensystem realisiert werden.

Erfindungsgemäß wird mittels der Koordinaten ein Änderungsparameter für die Simulation berechnet. Zwei verschiedene Beispiele für Änderungsparameter, die für die Anpassung der Simulation an den real durchgeführten Prozess verwendet werden können, werden im Folgenden angeführt.

Zunächst wird die zeitliche Verschiebung, die zwischen den ersten ausgezeichneten Punkten $P_{S,i}$ und den zweiten ausgezeichneten Punkte $P_{M,i}$ besteht, behandelt. Diese kann mit einem in der Simulation nicht korrekt modellierten Einspritzvolumenstrom in Zusammenhang stehen.

Quantifiziert und kompensiert werden kann dies, indem zunächst das arithmetische Mittel der zeitlichen Abweichungen zwischen den einander zugeordneten Punkten der ersten ausgezeichneten Punkte $P_{S,i}$ und der zweiten ausgezeichneten Punkte $P_{M,i}$ berechnet wird:

$$\Delta t = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_{M,i} - t_{S,i}$$

Statt des arithmetischen Mittelwerts könnten natürlich auch beliebige andere statistische Kenngrößen, wie beispielsweise der Median, verwendet werden. Ebenfalls schon erwähnt wurde, dass statt eines Zeitindexes eine äquivalente Größe, wie beispielsweise ein Verfahrrhub oder Verfahrvolumen einer Plastifizierschnecke oder eines anderen Aktuators, verwendet werden kann.

Auf Basis des Änderungsparameters Δt kann das in der Simulation modellierte Einspritzvolumenstromprofil angepasst werden. Das ursprüngliche Einspritzvolumenstromprofil ist in diesem Ausführungsbeispiel im Wesentlichen konstant und in Fig. 16 dargestellt.

Mithilfe der durchschnittlichen zeitlichen Verschiebung Δt kann dieses Einspritzvolumenstromprofil so angepasst werden, dass die zeitliche Abweichung zwischen Simulationsverlauf und Messverlauf verringert wird, indem man z.B. in der Simulation das ursprüngliche Einspritzvolumenstromprofil aus Fig. 16, welches mit Volumenstrom über Zeit eingetragen wird, nicht ab 0 s sondern erst ab Δt starten lässt und vom ursprünglichen Profil die Werte vom Startpunkt bis Δt wegfallen lässt, was in Fig. 17 dargestellt ist.

Sollte es sich um kein konstantes Einspritzvolumenstromprofil, sondern beispielsweise um ein Profil mit Rampen etc. handeln, ist es zu empfehlen, bei der Berechnung des Änderungsparameters die unterschiedlichen Einspritzvolumenströme durch entsprechende Umrechnungsfaktoren zu kompensieren.

Sollte die Plastifizierschnecke in der Simulation modelliert sein, kann auch die Position – beispielsweise über ein Positions- oder Geschwindigkeitsprofil – der Plastifizierschnecke entsprechend angepasst werden.

Wird die Simulation mit dem in Fig. 17 dargestellten geänderten Einspritzvolumenstromprofil erneut durchgeführt, ergibt sich ein geänderter Simulationsverlauf SV2, der zusammen mit dem ursprünglichen Messverlauf MV in Fig. 18 dargestellt ist.

Alternativ oder zusätzlich zu dieser Anpassung der Simulation kann auch der Prozess geändert werden. D.h. es könnte beispielsweise der Dosierhub geändert werden, sodass das Einspritzvolumen während des Prozesses dem in der Simulation verwendeten entspricht. Selbstverständlich sind auch Mischformen denkbar, wobei

sowohl der Dosierhub als auch das in der Simulation modellierte Einspritzvolumenstromprofil in jeweils konsistentem Ausmaße geändert wird.

In Fig. 18 ist zu erkennen, dass die beiden Kurven zeitlich gut zusammenpassen (d.h. die zeitliche Abweichung zwischen den Knicken bzw. den ausgezeichneten Punkten von Messverlauf MV und Simulationsverlauf SV stark verringert wurde), aber in Richtung der y-Achse noch unterschiedlich skalieren. D.h. die Drücke $p_{s,i}$ in der Simulation sind zwar relativ zueinander konsistent, haben aber nicht die richtigen Absolutwerte, was aus einem nicht korrekten Materialmodell herrühren kann, weil bspw. in der Simulation verwendete Materialparameter nicht der Realität entsprechen.

Deshalb wird, wie nachstehend beschrieben, die Simulation auch noch so geändert, dass der in der Simulation berechnete Druck (als für den Prozess charakteristische Größe) besser den tatsächlich gemessenen Druck abbildet.

Im vorliegenden Ausführungsbeispiel wurde für die Simulation ein Cross-WLF-Modell für die Materialsimulation verwendet. Das Cross-WLF-Modell gibt die Schmelzeviskosität η der Formmasse wie folgt an:

$$\eta = \frac{\eta_0}{1 + \left(\frac{\eta_0 \dot{\gamma}}{\tau^*}\right)^{1-n}}$$

Dabei bezeichnen:

- η die Schmelzeviskosität in Pa*s,
- η_0 die Null-Scherviskosität in Pa*s,
- $\dot{\gamma}$ die Schergeschwindigkeit (Einheit 1/s),
- τ^* die kritische Schubspannung beim Übergang zur Strukturviskosität, und
- n einen Exponent, der das strukturviskose Verhalten bei hohen Scherraten beschreibt.

Die Null-Scherviskosität wird durch die folgende Gleichung angegeben:

$$\eta_0 = D_1 \exp \left[- \frac{A_1(T - T^*)}{A_2 + (T - T^*)} \right]$$

Im Folgenden wird erklärt, wie dieses Modell angepasst wird, sodass die Simulation mit dem realen Prozess abgeglichen werden kann.

Zunächst wird aus den Druck-Koordinaten $p_{S,i}$ und $p_{M,i}$ der ersten und zweiten ausgezeichneten Punkte $P_{S,i}$ und $P_{M,i}$ ein Faktor kp wie folgt bestimmt:

$$kp = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{p_{M,i}}{p_{S,i}}$$

N entspricht dabei der Anzahl der ersten und zweiten ausgezeichneten Punkte $P_{S,i}$ und $P_{M,i}$ und es wird somit das arithmetische Mittel der Quotienten aus $p_{M,i}$ (gemessener Druck beim i -ten zweiten ausgezeichneten Punkt $P_{M,i}$ im Messverlauf MV) durch $p_{S,i}$ (simulierter/berechneter Druck beim i -ten ersten ausgezeichneten Punkt $P_{S,i}$ im Simulationsverlauf SV) berechnet.

Zu bemerken ist, dass im Unterschied zur WO 2016/177513 A1 auf diese Weise auch die Koordinaten $p_{S,i}$ und $p_{M,i}$, d.h. also die simulierten und gemessenen Drücke, oder allgemeiner die simulierte und berechnete charakteristische Größe, auch tatsächlich weiterverwendet werden.

Stattdessen könnte kp natürlich auch hier über einen Median oder eine beliebige andere statistische Kenngröße definiert werden.

Mithilfe des Druckskalierungsparameterwerts kp kann die Simulation so angepasst werden, dass die Druckabweichung zwischen Simulation und Messung verringert wird. In diesem Fall kann man z.B. die Materialparameter im Cross WLF Modell auf Basis des Parameters kp anpassen.

Im vorliegenden Ausführungsbeispiel wird das Cross-WLF-Modell durch Vorgabe neuer Parameter D_1' und $\tau^{*'}$ unter Verwendung des Änderungsparameterwerts für k_p angepasst und definiert durch

$$D_1' = D_1 \times k_p$$

und

$$\tau^{*' } = \tau^* \times k_p .$$

Führt man die Simulation erneut durch, wobei dieses geänderte Materialmodell und die zeitliche Anpassung des Einspritzvolumenstromprofils, das in Verbindung mit Fig. 16 und Fig. 17 beschrieben wurde, berücksichtigt werden, erhält man einen erneut geänderten Simulationsverlauf SV3, welcher zusammen mit dem ursprünglichen Messverlauf MV in Fig. 19 dargestellt ist. Es ist offensichtlich, dass der erneut geänderte Simulationsverlauf SV3 sehr gut mit dem ursprünglichen Messverlauf MV übereinstimmt und über weite Teile der Kurven gar nicht vom Messverlauf MV unterscheidbar ist. (Selbstverständlich würde sich auch die Druck-Skalierung entsprechend verbessern, wenn nur das Materialmodell angepasst wird und das Einspritzvolumenstromprofil beibehalten würde.)

Es wurde also ein effektiver Abgleich zwischen der tatsächlichen Messung und der Simulation herbeigeführt, ohne eine Vielzahl von Simulationen durchführen zu müssen.

Die abweichende Skalierung des (gegebenenfalls geänderten) Messverlaufs MV und des (gegebenenfalls geänderten) Simulationsverlaufs (siehe bspw. Fig. 18) könnte auch durch Ändern des Prozesses ausgeglichen werden. Bspw. indem die Formmassentemperatur verringert wird, kann die Viskosität der Formmasse erhöht werden. Dadurch wird der Druck p_M schneller steigen, was eine Annäherung des (gegebenenfalls geänderten) Messverlaufs MV an den (gegebenenfalls geänderten) Simulationsverlauf SV bewirkt.

Die zeitliche Verschiebung bzw. die Skalierung des Drucks sind nur zwei Beispiele. Natürlich sind ebenso kompliziertere Berechnungen auf Basis der zueinander zugeordneten ersten und zweiten ausgezeichneten Punkte möglich. So könnte zum

Beispiel der Unterschied des Totvolumens (also das durch die Schneckenbewegung nicht zugängliche Schmelzevolumen in Flansch, Düse bzw. Heißkanal) zwischen Simulation und Messung aus diesen Punkten heraus gerechnet werden.

Ebenso können auch mehrere Simulationen und mehrere Messungen mit verschiedenen Randbedingungen gleichzeitig betrachtet werden um die Abhängigkeiten von diesen Randbedingungen bei der Berechnung der Änderungsparameter berücksichtigen zu können. Solche Randbedingungen können beispielsweise eine Masstemperatur, eine Werkzeugtemperatur oder alle sonstigen in der Simulation berücksichtigten Parameter sein.

Anstatt durch ein arithmetisches Mittel können die Änderungsparameter auf Basis der ersten und zweiten ausgezeichneten Punkte auch beispielsweise durch Optimierungsalgorithmen oder Regressionsmethoden errechnet werden.

Es ist offensichtlich, dass eine so abgeglichene Simulation beim Einstellen des Spritzgießprozesses – oder allgemein bei mit Formgebungsmaschinen durchgeführten Prozessen – äußerst hilfreich sein kann.

Im Folgenden wird nun darauf eingegangen, wie die ersten ausgezeichneten Punkte $P_{S,i}$ und die zweiten ausgezeichneten Punkte $P_{M,i}$ reproduzierbar einander zugeordnet werden können.

Im dafür hier vorgestellten Beispiel nehmen wir an, dass in der Simulation vier erste ausgezeichnete (Simulations-) Punkte (kurz: P_S) und in der Messung sechs zweite ausgezeichnete (Mess-) Punkte (kurz: P_M) gefunden wurden, wobei die Indices i der Einfachheit halber nur noch notiert werden, wenn das für das Verständnis notwendig ist. Die Punkte für dieses Beispiel sind im Diagramm in Fig. 20 dargestellt.

Ohne Beschränkung der Allgemeinheit werden mit dem vorgestellten Vorgehen die vier ersten ausgezeichneten Punkte P_S aus dem Simulationsverlauf SV auf die vier „idealen“ aus den insgesamt sechs möglichen zweiten ausgezeichneten Punkte P_M aus dem Messverlauf MV zugeordnet. Umgekehrt, das heißt wenn mehr erste

ausgezeichnete Punkte P_S als zweite ausgezeichnete Punkte P_M vorliegen würden, wäre das natürlich auch möglich. Typischerweise kann aber davon ausgegangen werden, dass man in der Messung mehr ausgezeichnete Punkte als in der Simulation erhalten wird, da in den meisten realen Fällen gewisse Geometrien wie z.B. Schneckenraum, Düse etc. in der Simulation nicht modelliert werden, sich aber im Messverlauf MV niederschlagen.

Grundsätzlich wird folgendermaßen vorgegangen:

- 1.) Im ersten Schritt wird davon ausgegangen, dass die Anzahl k der ersten ausgezeichneten Punkte P_S aus dem Simulationsverlauf SV kleiner ist als die Anzahl n der zweiten ausgezeichneten Punkte P_M aus dem Messverlauf MV. Das heißt letztendlich, dass k erste ausgezeichnete Punkte P_S aus dem Simulationsverlauf SV auf n zweite ausgezeichnete Punkte P_M aus dem Messverlauf MV (wobei prinzipiell $n > k$ zweite ausgezeichnete Punkte P_M vorhanden wären) zugeordnet werden.
- 2.) Es werden die k ersten ausgezeichneten Punkte P_S aus dem Simulationsverlauf SV immer mit n zweiten ausgezeichneten Punkten P_M aus dem Messverlauf MV verglichen. Dabei werden alle möglichen Kombinationen bei der Auswahl von k ersten ausgezeichneten Punkten P_S aus n zweiten ausgezeichneten Punkten P_M aus dem Messverlauf MV überprüft. In unserem Beispiel werden also die möglichen Kombinationen von vier aus sechs Punkten ohne Rücksicht auf die Reihenfolge überprüft.

Mit der folgenden bekannten Formel aus der Kombinatorik kann die Anzahl der möglichen Zuordnungen der vier P_S auf die sechs P_M berechnet werden.

$$\frac{n!}{(n-k)! * k!} = \frac{6!}{(6-4)! * 4!} = 15$$

15 mögliche Kombinationen der Zuordnung von vier P_S zu sechs vorhandenen P_M sind demnach möglich. In der folgenden Tabelle sind die möglichen Kombinationen aufgelistet, wie die vier P_S auf die sechs P_M (siehe Fig. 20) zugeordnet werden können.

Kombination	$P_{M,1}$	$P_{M,2}$	$P_{M,3}$	$P_{M,4}$	$P_{M,5}$	$P_{M,6}$
1	X	X	X	X		
2		X	X	X	X	
3			X	X	X	X
4	X		X	X	X	
5	X			X	X	X
6		X		X	X	X
7	X	X		X	X	
8	X	X			X	X
9	X	X		X		X
10	X	X	X		X	
11	X	X	X			X
12		X	X		X	X
13		X	X	X		X
14	X		X	X		X
15	X		X		X	X

Es werden nun alle 15 möglichen Kombinationen überprüft und es wird diejenige Kombination ausgesucht, bei der die ersten ausgezeichneten Punkte P_S aus dem Simulationsverlauf und die zweiten ausgezeichneten Punkte P_M aus dem Messverlauf MV am besten zueinander zugeordnet sind, was das gesuchte Ergebnis ist.

Um das Vorgehen verständlich erklären zu können, wird es im Folgenden beispielhaft bei den Kombinationen 1 und 12 aus der obigen Tabelle angewandt.

Bei Kombination 1 werden die ersten vier ausgezeichneten Punkte ($P_{M,1}$, $P_{M,2}$, $P_{M,3}$ und $P_{M,4}$) aus dem Messverlauf MV verwendet.

Zunächst wird der erste vorkommende ausgezeichnete Punkt $P_{S,1}$ des Simulationsverlaufs SV mit einem Offset (Vektor mit X-Anteil α_x und Y-Anteil α_y) auf

den ersten ausgezeichneten Punkt $P_{M,1}$ des Messverlaufs MV verschoben (siehe Fig. 21).

Die restlichen ausgezeichneten Punkte $P_{S,i}$ mit i gleich 2, 3 und 4 aus dem Simulationsverlauf SV werden um den gleichen Offset verschoben (siehe Fig. 22). Das Ergebnis ist in Fig. 23 dargestellt, wobei die zwei jeweils ersten der ersten ausgezeichneten Punkte $P_{S,1}$ und der zweiten ausgezeichneten Punkte $P_{M,1}$ übereinander liegen. Die restlichen ausgezeichneten Punkte aus dem Simulationsverlauf SV wurden um den Offset verschoben.

Unter Verweis auf Fig. 24 werden als nächstes die Koordinatendifferenzen Δt_M und Δp_M zwischen dem zweiten ausgezeichneten Punkt $P_{M,4}$ (mit Index 4) und dem entsprechenden für Kombination 1 relevanten zweiten ausgezeichneten Punkt $P_{M,1}$ (Index 1) aus dem Messverlauf MV und die entsprechenden Koordinatendifferenzen Δt_S und Δp_S zwischen dem ersten ausgezeichneten Punkt $P_{S,4}$ (Index 4) und dem ersten ausgezeichneten Punkt $P_{S,1}$ mit Index 1 aus dem Simulationsverlauf SV berechnet.

Daraus werden dann Skalierungsparameter k_x und k_y mit folgenden Formeln berechnet.

$$k_x = \frac{\Delta t_M}{\Delta t_S} \text{ und } k_y = \frac{\Delta p_M}{\Delta p_S}$$

Anschließend werden für die drei zweiten ausgezeichneten Punkte $P_{S,2}$, $P_{S,3}$ und $P_{S,4}$ jeweils die Koordinatendifferenzen in x- sowie y-Richtung zum zweiten ausgezeichneten Punkt $P_{S,1}$ mit Index 1 berechnet. Im Rahmen einer Umskalierung werden dann für jeden der drei Punkte $P_{S,2}$, $P_{S,3}$ und $P_{S,4}$ die berechnete x-Koordinatendifferenz mit dem Skalierungsparameter k_x sowie die berechnete y-Koordinatendifferenz mit dem Skalierungsparameter k_y multipliziert (und jeweils mit den Koordinaten $t_{S,1}$ und $p_{S,1}$ addiert). Diese neu entstandenen Koordinaten werden als Koordinaten für gemäß der Umskalierung verschobene Punkte $P_{S,2}$, $P_{S,3}$ und $P_{S,4}$ verwendet. Es ergibt sich dann das Diagramm aus Fig. 25, wobei jeweils die ersten und zweiten ausgezeichneten Punkte $P_{S,i}$ und $P_{M,i}$ mit Indices 1 und 4 aus dem

Messverlauf MV und dem Simulationsverlauf SV übereinander liegen. Die anderen ausgezeichneten Punkte aus Simulation und Messung können sich (und werden sich in der Regel) unterscheiden.

Jetzt werden die Differenzen ($\Delta x_i, \Delta y_i$) in x- sowie y-Richtung der jeweils in der gleichen Reihenfolge vorkommenden ausgezeichnete Punkte aus dem Simulationsverlauf SV und dem Messverlauf MV berechnet (siehe Fig. 26). D.h. der erste ausgezeichnete Punkt $P_{S,2}$ (mit Index 2) wird mit dem zweiten ausgezeichneten Punkt $P_{M,2}$ (ebenfalls Index 2) aus der gewählten Kombination (Kombination 1 in diesem Fall) von ausgezeichneten Punkten aus dem Messverlauf verglichen (im Sinne einer Koordinatendifferenz-Berechnung) und dementsprechend wird hier auch $P_{S,3}$ mit $P_{M,3}$ verglichen. Falls bspw. $P_{M,2}$ nicht in Kombination 1 enthalten wäre, würde gemäß der Reihenfolge einfach $P_{M,3}$ verwendet werden, wenn dieser in der entsprechenden Kombination vorhanden ist.

Aus dem berechneten Offset (o_x, o_y), den Skalierungsparametern k_x und k_y und den Differenzen ($\Delta x_i, \Delta y_i$) kann eine Kennzahl f (oder mehrere Kennzahlen) als Gütekriterium für die Übereinstimmung der zueinander zugeordneten Punkte in Kombination 1 als Funktion $f(\Delta x_i, \Delta y_i, k_x, k_y, o_x, o_y)$ berechnet werden. Die Berechnung dieser Kennzahl kann analog für jede der 15 möglichen Kombinationen durchgeführt werden. Die unterschiedlichen Parameter können dabei durch Gewichtungsfaktoren unterschiedlich gewichtet werden.

Die Kennzahl könnte z.B. folgendermaßen berechnet werden:

$$f(\Delta x_i, \Delta y_i, k_x, k_y, o_x, o_y) = g_1 \sum_{i=1}^k (\Delta x_i^2 + \Delta y_i^2) + g_2 \left((k_x - 1)^2 + (k_y - 1)^2 \right) + g_3 (o_x^2 + o_y^2)$$

g_1, g_2 und g_3 sind die Gewichtungsfaktoren. Setzt man z.B. $g_1=1$ und $g_2=g_3=0$ ergibt sich für die Berechnung der Kennzahl folgende kürzere Formel:

$$f(\Delta x_i, \Delta y_i) = \sum_{i=1}^k (\Delta x_i^2 + \Delta y_i^2)$$

Das Vorgehen zum Zuordnen der ausgezeichneten Punkte wird anhand von Kombination 12 aus der obigen Tabelle noch ein weiteres Mal erläutert. In diesem Fall handelt es sich um die Kombination mit der besten Übereinstimmung bei der Zuordnung (also die „ideale“ Kombination mit der besten Güte der Zuordnung).

Bei dieser Kombination 12 werden die zweiten ausgezeichneten Punkte $P_{M,2}$, $P_{M,3}$, $P_{M,5}$ und $P_{M,6}$ (d.h. mit Indices 2, 3, 5 und 6) aus dem Messverlauf MV und selbstverständlich alle ersten ausgezeichneten Punkte $P_{S,i}$ mit Indices 1 bis 4 für die Zuordnung verwendet (siehe Fig. 20).

Zunächst wird der erste ausgezeichnete Punkt $P_{S,1}$ mit Index 1 des Simulationsverlaufs SV mit einem Offset auf den zweiten ausgezeichneten Punkt $P_{M,2}$ mit Index 2 des Messverlaufs MV verschoben (siehe Fig. 27).

Die restlichen für Kombination 12 relevanten ersten ausgezeichneten Punkte $P_{S,i}$ aus dem Simulationsverlauf SV werden um den gleichen Offset verschoben, was in Fig. 28 verdeutlicht ist.

Es ergibt sich das Diagramm aus Fig. 29, wobei $P_{M,2}$ aus dem Messverlauf MV und $P_{S,1}$ aus dem Simulationsverlauf SV übereinander liegen und die drei restlichen ersten ausgezeichneten Punkte $P_{S,i}$ aus dem Simulationsverlauf SV um den Offset verschoben worden sind.

Wie in Fig. 30 verdeutlicht ist, werden als nächstes die Koordinatendifferenzen Δt_M und Δp_M zwischen dem zweiten ausgezeichneten Punkt $P_{M,6}$ (Index 6) und dem zweiten ausgezeichneten Punkt $P_{M,2}$ (mit Index 2) aus dem Messverlauf MV sowie die Koordinatendifferenzen Δt_S und Δp_S zwischen dem ersten ausgezeichneten Punkt $P_{S,4}$ (Index 4) und dem ersten ausgezeichneten Punkt $P_{S,1}$ (Index 1) aus dem Simulationsverlauf SV berechnet (analog zu wie in Verbindung mit Fig. 24 beschrieben).

Danach werden die Skalierungsparameter k_x und k_y mit den bereits bekannten folgenden Formeln berechnet.

$$k_x = \frac{\Delta t_M}{\Delta t_S} \text{ und } k_y = \frac{\Delta p_M}{\Delta p_S}$$

Analog zu wie in Verbindung mit Fig. 25 beschrieben, werden für die drei zweiten ausgezeichneten Punkte $P_{S,2}$, $P_{S,3}$ und $P_{S,4}$ jeweils die Koordinatendifferenzen in x- sowie y-Richtung zum zweiten ausgezeichneten Punkt $P_{S,1}$ mit Index 1 berechnet. Im Rahmen einer Umskalierung werden dann für jeden der drei Punkte $P_{S,2}$, $P_{S,3}$ und $P_{S,4}$ die berechnete x-Koordinatendifferenz mit dem Skalierungsparameter k_x sowie der berechnete y-Koordinatendifferenz mit dem Skalierungsparameter k_y multipliziert (und jeweils mit den Koordinaten $t_{S,1}$ und $p_{S,1}$ addiert). Diese neu entstandenen Koordinaten werden als Koordinaten für gemäß der Umskalierung verschobene Punkte $P_{S,2}$, $P_{S,3}$ und $P_{S,4}$ verwendet. Es ergibt sich dann das Diagramm aus Fig. 31, wobei jeweils die ausgezeichneten Punkte $P_{S,1}$ und $P_{M,2}$ sowie $P_{S,4}$ und $P_{M,6}$ übereinander liegen. Die anderen ausgezeichneten Punkte aus Simulation und Messung können sich (und werden sich in der Regel) unterscheiden.

Jetzt werden die Differenzen (Δx_i , Δy_i) in x- sowie y-Richtung der jeweils in der gleichen Reihenfolge vorkommenden ausgezeichnete Punkte aus dem Simulationsverlauf SV und dem Messverlauf MV berechnet (siehe Fig. 32 in Analogie zu Fig. 26). D.h. $P_{S,2}$ wird mit Punkt $P_{M,3}$ aus der gewählten Kombination (Kombination 12 in diesem Fall) verglichen (im Sinne einer Koordinatendifferenz-Berechnung) und dementsprechend wird auch $P_{S,3}$ mit $P_{M,5}$ verglichen. Wie erwähnt, sind die Parameter (Δx_i , Δy_i) für ein besseres Verständnis im Diagramm aus Fig. 32 eingezeichnet.

Auch in diesem Fall kann die gleiche Kennzahl für die Übereinstimmung der in Kombination 12 einander zugeordneten Punkte als Funktion $f(\Delta x_i, \Delta y_i, k_x, k_y, o_x, o_y)$ berechnet werden (siehe oben). Mit der gleichen Gewichtung der Parameter $g_1=1$ und $g_2=g_3=0$ kann man bei diesem Beispiel leicht erkennen, dass die Differenzen

$(\Delta x_i, \Delta y_i)$ weit niedriger als in der vorher beschriebenen Kombination 1 ausfallen (vergleiche Fig. 26 mit Fig. 32).

Würde man mit diesem Vorgehen alle 15 Kombinationen durchgehen, würde man zu dem Schluss kommen, dass die Kombination 12 die beste Übereinstimmung / Güte – d.h. die niedrigste Kennzahl f – generiert und kann dementsprechend die Zuordnung der ersten ausgezeichneten Punkte $P_{S,i}$ mit den Indices 1, 2, 3 und 4 aus dem Simulationsverlauf SV zu den zweiten ausgezeichneten Punkten $P_{M,i}$ mit den Indices 2, 3, 5 und 6 aus dem Messverlauf MV (in dieser Reihenfolge, also 1->2, 2->3, 3->5 und 4->6) durchführen.

Selbstredend können statt den ersten ausgezeichneten Punkten $P_{S,i}$ auch die zweiten ausgezeichneten Punkte $P_{M,i}$ gemäß dem beschriebenen Vorgehen verschoben und umskaliert werden, ohne dass sich die auf Basis der ermittelten Kennzahlen bestimmte Kombination mit der besten Güte der Zuordnung ändern würde.

Ein Vorteil der beschriebenen Vorgehensweise zum Zuordnen der ersten ausgezeichneten Punkte $P_{S,i}$ und der zweiten ausgezeichneten Punkte $P_{M,i}$ liegt darin, dass sie als Algorithmus bspw. als Teil eines Computerprogramms implementiert werden kann.

In den oben angegebenen Formeln für die Änderungsparameter k_p und Δt kann es selbstverständlich vorteilhaft sein, nur über jene Indices i zu summieren, die tatsächlich in derjenigen Kombination (im hiesigen Beispiel für das allgemeine Vorgehen zum Erarbeiten der Zuordnung wäre das Kombination 12) auftreten, für welche die beste (hier niedrigste) Kennzahl ermittelt wurde.

Innsbruck, am 20. April 2020

Patentansprüche

1. Verfahren zum Abgleichen einer Simulation eines mit einer Formgebungsmaschine durchzuführenden Prozesses mit dem real durchgeführten Prozess, wobei
 - im Rahmen der Simulation zumindest ein Simulationsverlauf (SV) einer für den Prozess charakteristischen Größe, insbesondere ein simulierter Druckverlauf, berechnet wird,
 - beim real durchgeführten Prozess zumindest ein Messverlauf (MV) der charakteristischen Größe, insbesondere ein gemessener Druckverlauf, gemessen wird,
 - erste ausgezeichnete Punkte ($P_{S,i}$) der Kurve des zumindest einen Simulationsverlaufs (SV) und zweite ausgezeichnete Punkte ($P_{M,i}$) der Kurve des zumindest einen Messverlaufs (MV) bestimmt werden,
 - die ersten ausgezeichneten Punkte ($P_{S,i}$) und die zweiten ausgezeichneten Punkte ($P_{M,i}$) einander zumindest teilweise zugeordnet werden,
 - aus Koordinaten ($t_{S,i}$, $t_{M,i}$, $p_{S,i}$, $p_{M,i}$) der einander zumindest teilweise zugeordneten ersten ausgezeichneten Punkte ($P_{S,i}$) und zweiten ausgezeichneten Punkte ($P_{M,i}$) zumindest ein Änderungsparameter (k_p , Δt) für die Simulation und/oder den Prozess berechnet wird und
 - die Simulation und/oder der Prozess auf Basis des zumindest einen Änderungsparameters (k_p , Δt) geändert und erneut durchgeführt wird.

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die ersten ausgezeichneten Punkte ($P_{S,i}$) und/oder die zweiten ausgezeichneten Punkte ($P_{M,i}$) unter Anwendung des Ramer-Douglas-Peucker-Algorithmus bestimmt werden, wobei vorzugsweise zumindest ein zusätzliches Kriterium verwendet wird, um eine durch den Ramer-Douglas-Peucker-Algorithmus reduzierte Punktmenge weiter zu reduzieren, um die ersten ausgezeichneten Punkte ($P_{S,i}$) und/oder die zweiten ausgezeichneten Punkte ($P_{M,i}$) zu erhalten.

3. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die ersten ausgezeichneten Punkte ($P_{S,i}$) und/oder die zweiten ausgezeichneten Punkte ($P_{M,i}$) danach bestimmt werden, ob Verbindungslinien zu angrenzenden Punkten des Simulationsverlaufs (SV) beziehungsweise des Messverlaufs (MV) einen Winkel einschließen, der um einen vorgegebenen Winkelbetrag – bevorzugt um 5° oder mehr, besonders bevorzugt um 10° oder mehr – von 180° abweicht.

4. Verfahren nach Anspruch 2 oder 3, dadurch gekennzeichnet, dass zumindest eine der folgenden Bedingungen und/oder Kriterien beim Bestimmen der ersten ausgezeichneten Punkte ($P_{S,i}$) und/oder der zweiten ausgezeichneten Punkte ($P_{M,i}$) verwendet werden:
 - eine Maximalanzahl an reduzierten Punkten und/oder ausgezeichneten Punkten ($P_{S,i}$, $P_{M,i}$),
 - eine Mindeststrecke zwischen den Punkten der reduzierten Punktmenge,
 - ein maximaler normierter Fehler der Abstandsquadrate zwischen den ursprünglichen Datenpunkten des Messverlaufs (MV) und/oder des Simulationsverlaufs (SV) einerseits und den Punkten der reduzierten Punktmenge andererseits,
 - Überschreiten und/oder Erreichen eines Schwellwerts durch die charakteristische Größe,
 - Ausschließen eines vorgegebenen Teilbereichs des Prozesses, wobei der Teilbereich durch absolute oder relative Grenzen gegeben ist.

5. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die ersten ausgezeichneten Punkte ($P_{S,i}$) und die zweiten ausgezeichneten Punkte ($P_{M,i}$) einander zumindest teilweise zugeordnet werden, indem
 - für alle möglichen verschiedenen Zuordnungsmöglichkeiten der ersten ausgezeichneten Punkte ($P_{S,i}$) zu den zweiten ausgezeichneten Punkten ($P_{M,i}$) die ersten ausgezeichneten Punkte ($P_{S,i}$) und/oder die zweiten ausgezeichneten Punkte ($P_{M,i}$) so skaliert und/oder verschoben werden, dass jeweils zwei der ersten ausgezeichneten Punkte ($P_{S,i}$) und der zweiten ausgezeichneten Punkte ($P_{M,i}$) im Wesentlichen aufeinanderliegen,

- anhand zumindest eines der folgenden jeweils zumindest eine Kennzahl für die Güte der jeweiligen Zuordnungsmöglichkeit berechnet wird: Parameter der Skalierung, Parameter der Verschiebung, Koordinatendifferenzen der – gegebenenfalls skalierten und/oder verschobenen – ersten ausgezeichneten Punkte ($P_{S,i}$) von den – gegebenenfalls skalierten und/oder verschobenen – zweiten ausgezeichneten Punkten ($P_{M,i}$),
 - jene Zuordnungsmöglichkeit ausgewählt wird, deren zumindest eine Kennzahl eine beste Güte der Zuordnung anzeigt.
6. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass ein Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5 auf Ergebnisse der erneut durchgeführten Simulation und/oder auf Messungen beim erneut durchgeführten Prozess angewendet wird, wobei dies bevorzugt solange wiederholt wird, bis eine Simulationsabweichung zwischen dem zumindest einen Simulationsverlauf (SV) und dem zumindest einen Messverlauf (MV) gemäß einem vorgegebenen Kriterium klein genug ist.
7. Verfahren nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, dass die durch das erneute Anwenden des Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 5 gestartete Schleife abgebrochen wird, wenn
- Werte des zumindest einen Änderungsparameters (k_p , Δt) einen ersten vorgegebenen Grenzwert erreichen und/oder unterschreiten und/oder
 - Differenzen – insbesondere Betragsdifferenzen – aus Flächen unter dem zumindest einen Simulationsverlauf (SV) und dem zumindest einen Messverlauf (MV) einen zweiten vorgegebenen Grenzwert erreichen und/oder unterschreiten und/oder
 - der zumindest eine Simulationsverlauf (SV) zumindest teilweise – vorzugsweise vollständig – innerhalb eines vorgegebenen ersten Toleranzbands um den zumindest einen Messverlauf (MV) verläuft und/oder
 - der zumindest eine Messverlauf (MV) zumindest teilweise – vorzugsweise vollständig – innerhalb eines vorgegebenen zweiten Toleranzbands um den zumindest einen Simulationsverlauf (SV) verläuft.

8. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass der zumindest eine Änderungsparameter (Δt) ein Ausmaß einer zeitlichen Verschiebung zwischen den einander zugeordneten ersten ausgezeichneten Punkten ($P_{S,i}$) und zweiten ausgezeichneten Punkten ($P_{M,i}$) betrifft, wobei die zeitliche Verschiebung insbesondere durch ein unbekanntes Volumen der in der Formgebungsmaschine vorhandenen Formmasse hervorgerufen wird.
9. Verfahren nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, dass die Simulation geändert wird, indem auf Basis des zumindest einen Änderungsparameters (Δt) für das Ausmaß der zeitlichen Verschiebung ein für die Simulation vorgegebenes Einspritzvolumen und/oder ein für die Simulation vorgegebener Einspritzvolumenstrom geändert wird.
10. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass der zumindest eine Änderungsparameter (k_p) ein Ausmaß einer Skalierung derjenigen Koordinaten ($p_{S,i}$, $p_{M,i}$) der einander zugeordneten ersten ausgezeichneten Punkte ($P_{S,i}$) und zweiten ausgezeichneten Punkte ($P_{M,i}$) betrifft, welche der charakteristischen Größe entsprechen.
11. Verfahren nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, dass die Simulation geändert wird, indem auf Basis des zumindest einen Änderungsparameters (k_p) für das Ausmaß der Skalierung ein für die Simulation vorgegebener Materialparameter geändert wird.
12. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass der zumindest ein Änderungsparameter (k_p , Δt) als statistische Kenngröße, insbesondere arithmetisches Mittel, der Koordinaten ($t_{S,i}$, $t_{M,i}$, $p_{S,i}$, $p_{M,i}$) der einander zumindest teilweise zugeordneten ersten ausgezeichneten Punkte ($P_{S,i}$) und zweiten ausgezeichneten Punkte ($P_{M,i}$) berechnet wird.

13. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass ein Cross-WLF-Modell und/oder ein 2-Domänen Tait pvT Modell als Materialmodell für die Simulation verwendet wird.
14. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass der zumindest eine Änderungsparameter (k_p , Δt) in einer Datenbank gespeichert wird und beim Simulieren und/oder Einstellen eines separaten Prozesses verwendet wird.
15. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass beim Bestimmen der ersten ausgezeichneten Punkte ($P_{S,i}$) und/oder der zweiten ausgezeichneten Punkte ($P_{M,i}$) mehrere Simulationsverläufe (SV) und/oder mehrere Messverläufe (MV) berücksichtigt werden.
16. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass der zumindest eine Simulationsverlauf (SV) und/oder der zumindest eine Messverlauf (MV) mittels eines Zeitindexes oder eines Positionsindexes eines beim Prozess eingesetzten Aktuators, insbesondere einer Plastifizierschnecke, parametrisiert werden.
17. Formgebungsmaschine, welche zum Durchführen eines Verfahrens nach einem der vorhergehenden Ansprüche eingerichtet ist.
18. Computerprogrammprodukt zum Abgleichen einer Simulation eines mit einer Formgebungsmaschine durchzuführenden Prozesses mit dem real durchgeführten Prozess, mit Befehlen, die einen ausführenden Computer dazu veranlassen,
 - zumindest einen Simulationsverlauf (SV) zumindest einer für den Prozess charakteristischen Größe, insbesondere einen simulierten Druckverlauf, im Rahmen einer Simulation zu berechnen oder von einer separaten Simulation entgegenzunehmen,
 - zumindest einen Messverlauf (MV) der zumindest einen charakteristischen Größe, insbesondere einen gemessenen Druckverlauf, aus dem realen Prozess entgegenzunehmen,

- erste ausgezeichnete Punkte ($P_{S,i}$) der Kurve des zumindest einen Simulationsverlaufs (SV) und zweite ausgezeichnete Punkte ($P_{M,i}$) der Kurve des zumindest einen Messverlaufs (MV) zu bestimmen,
- die ersten ausgezeichneten Punkte ($P_{S,i}$) und die zweiten ausgezeichneten Punkte ($P_{M,i}$) einander zumindest teilweise zuzuordnen,
- aus Koordinaten ($t_{S,i}$, $t_{M,i}$, $p_{S,i}$, $p_{M,i}$) der einander zumindest teilweise zugeordneten ersten ausgezeichneten Punkte ($P_{S,i}$) und zweiten ausgezeichneten Punkte ($P_{M,i}$) zumindest einen Änderungsparameter (k_p , Δt) für die Simulation und/oder den Prozess zu berechnen und
- entweder die Simulation und/oder den Prozess auf Basis des zumindest einen Änderungsparameters (k_p , Δt) zu ändern und erneut durchzuführen
- oder Ausgabeanweisungen auszugeben, die beinhalten, dass die Simulation und/oder der Prozess erneut durchzuführen ist und welche Änderungen an der Simulation und/oder am Prozess auf Basis des zumindest einen Änderungsparameters (k_p , Δt) durchzuführen sind.

Innsbruck, am 20. April 2020

Fig. 1

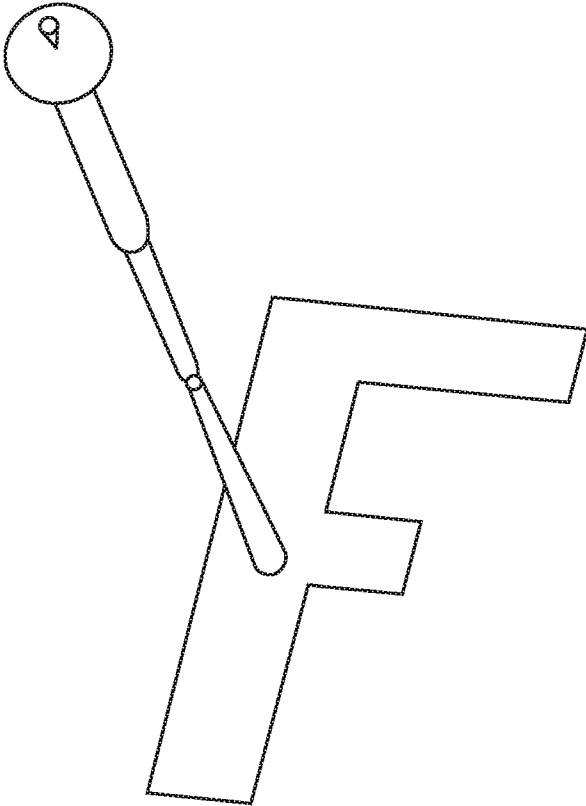


Fig. 2

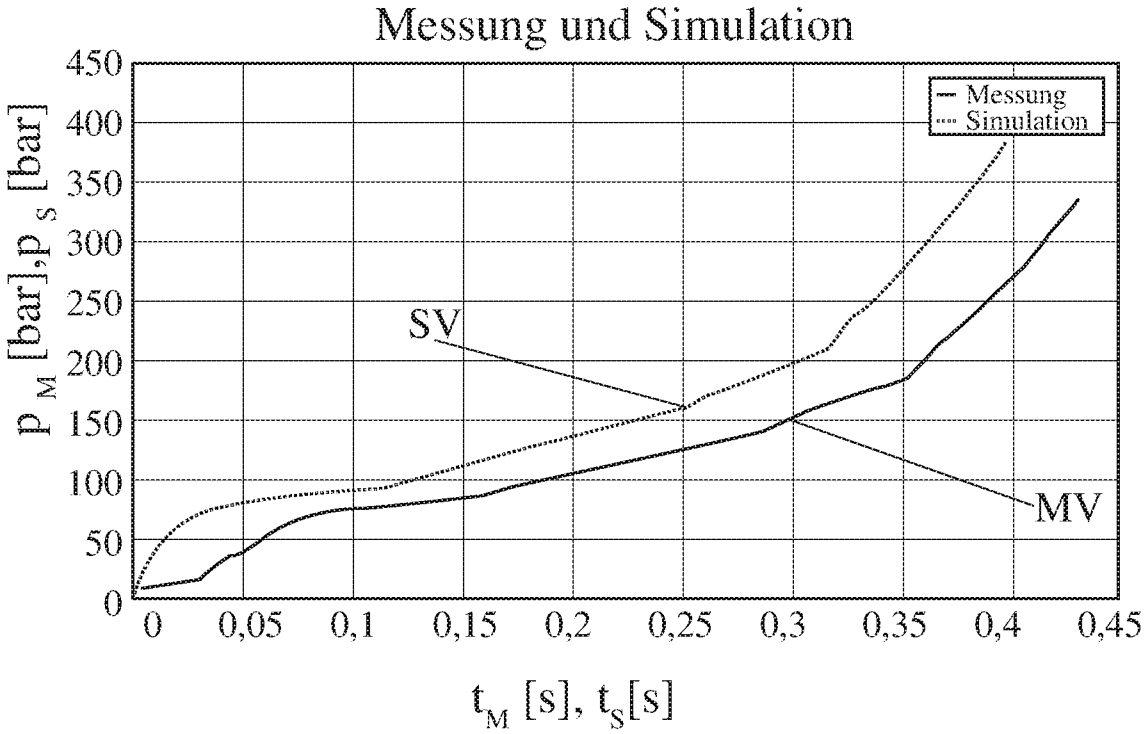


Fig. 3

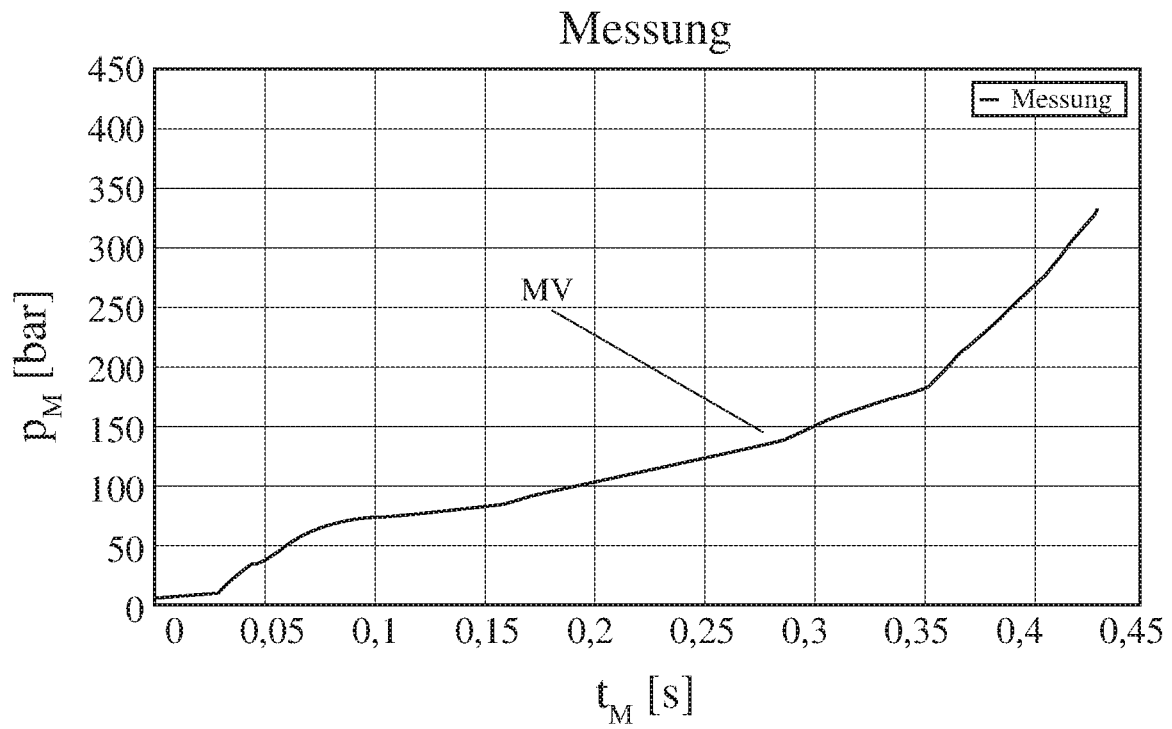


Fig. 4

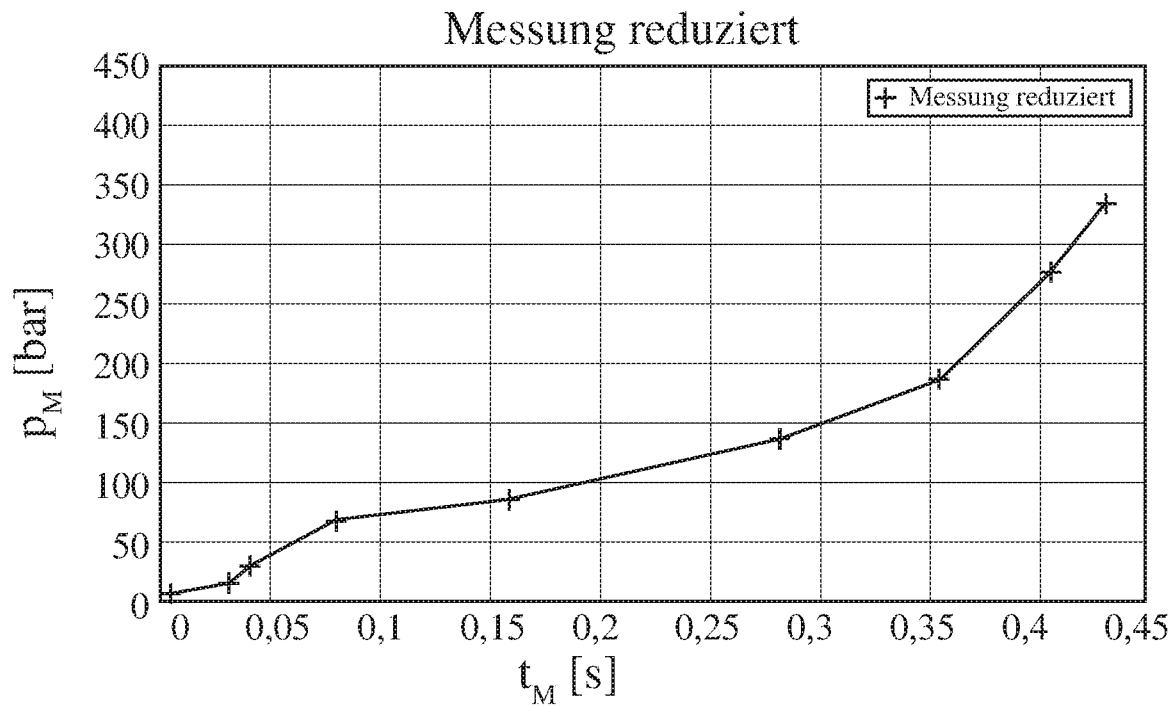


Fig. 5

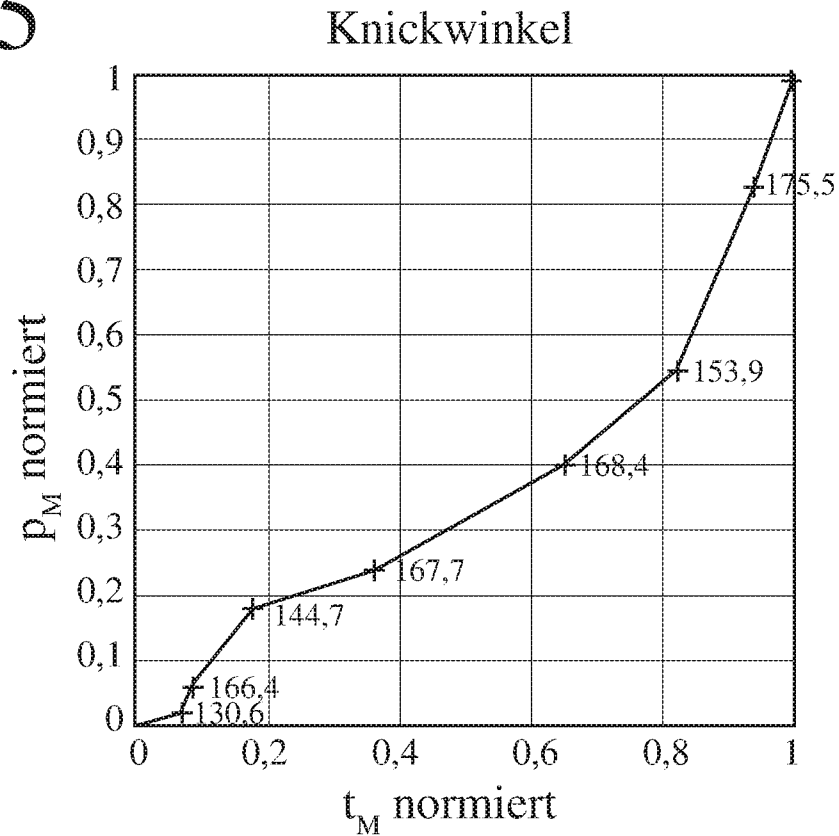


Fig. 6

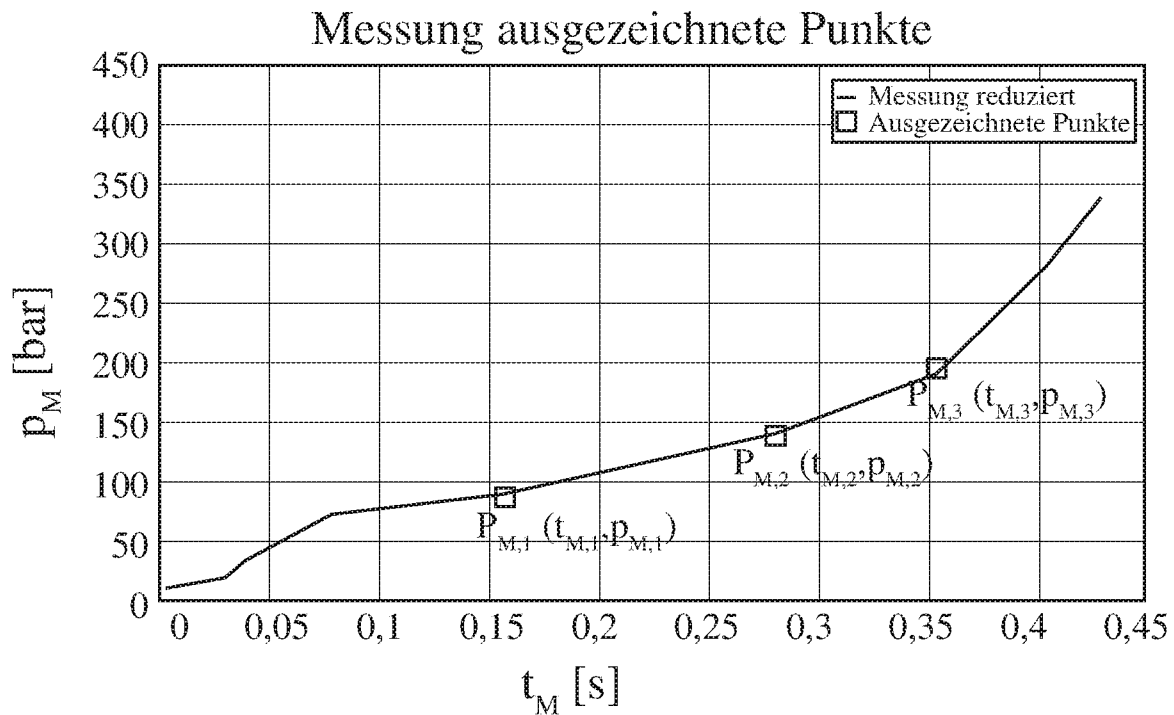


Fig. 7

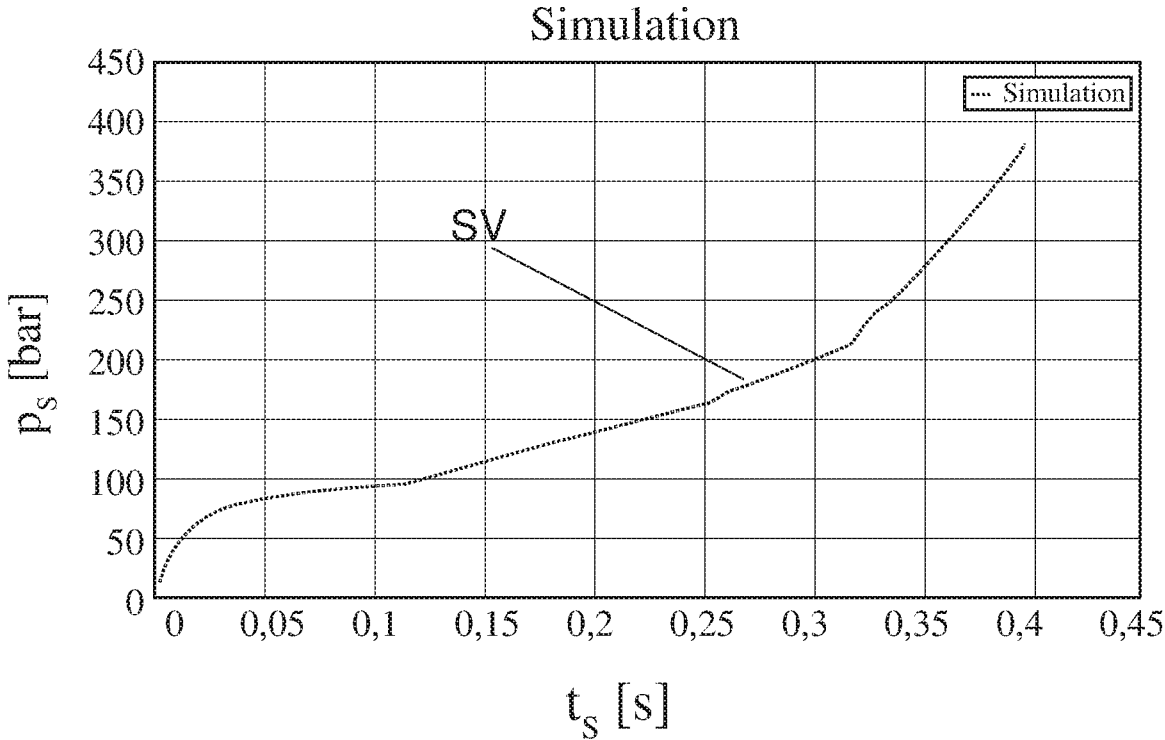


Fig. 8

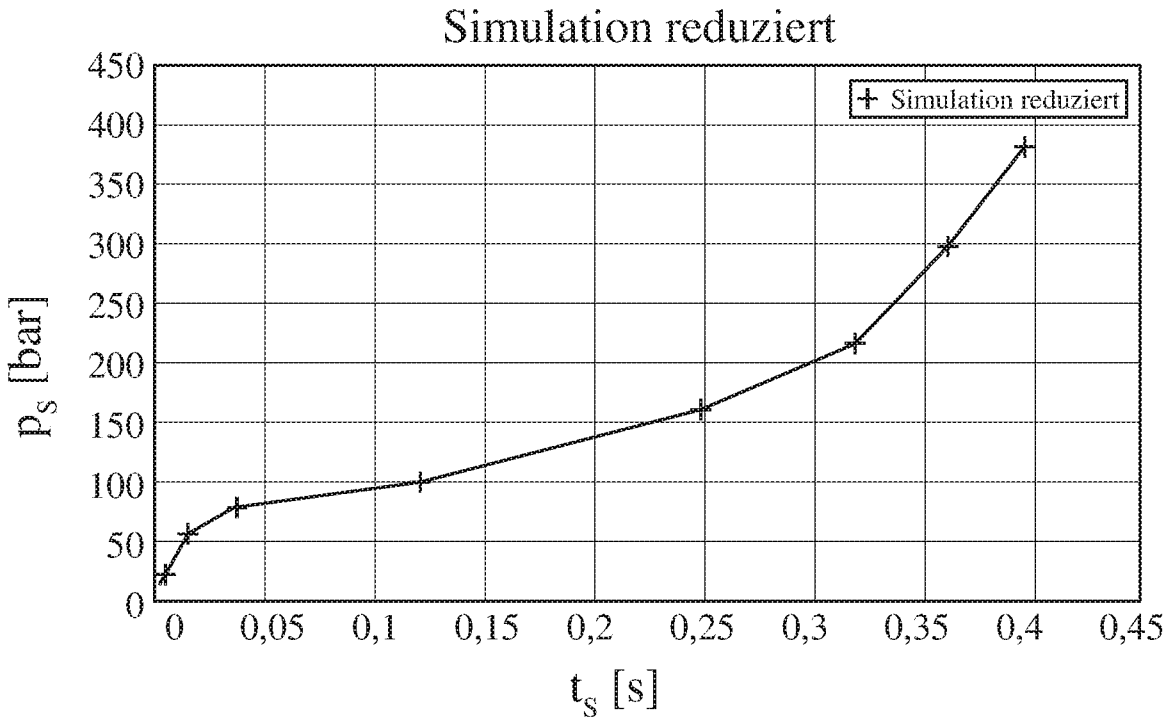


Fig. 9

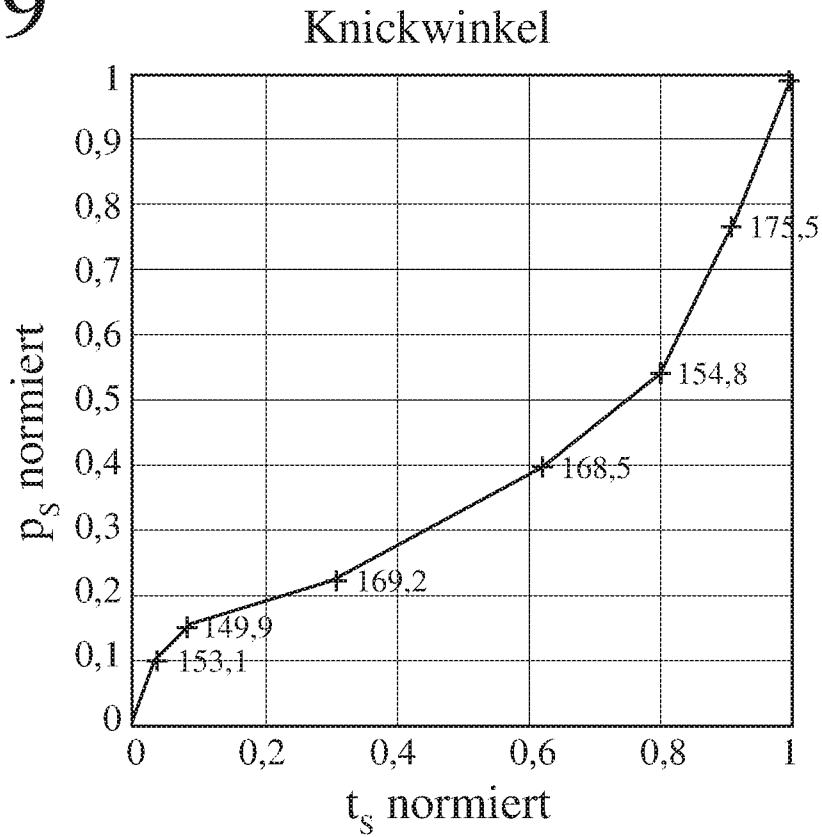


Fig. 10

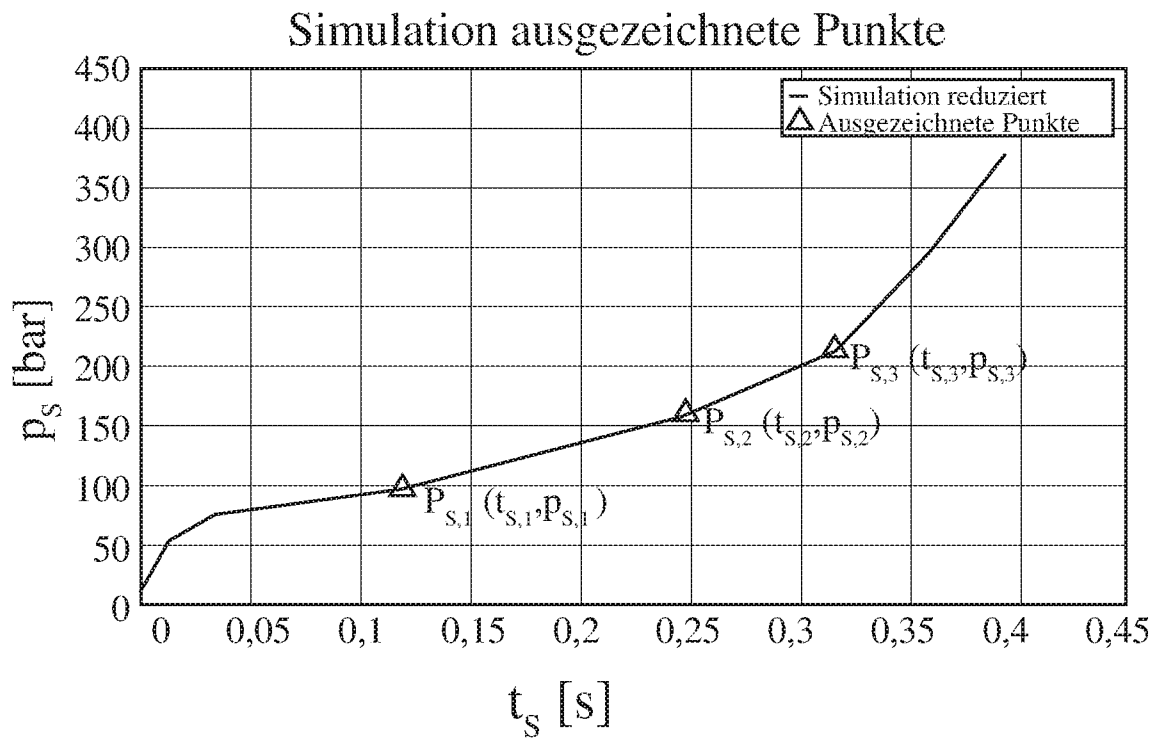


Fig. 11

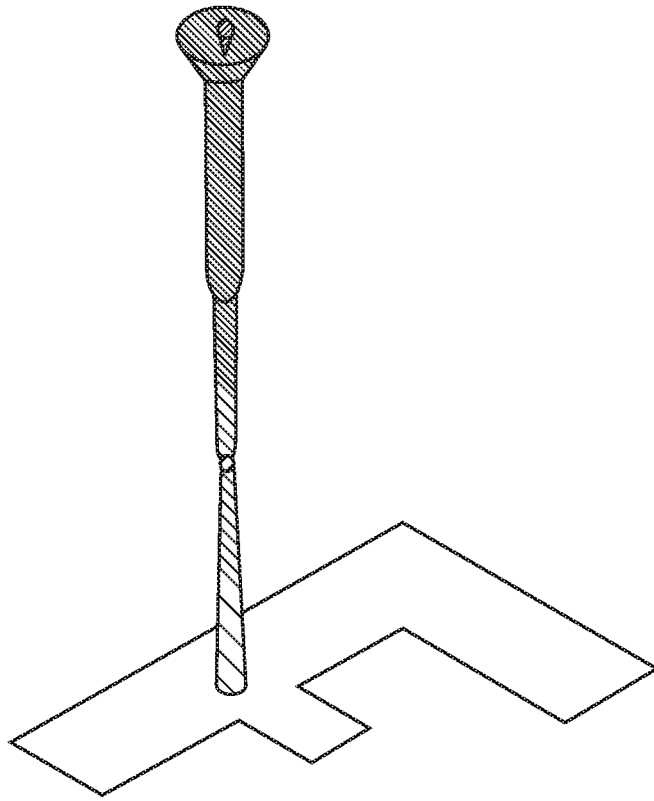


Fig. 12

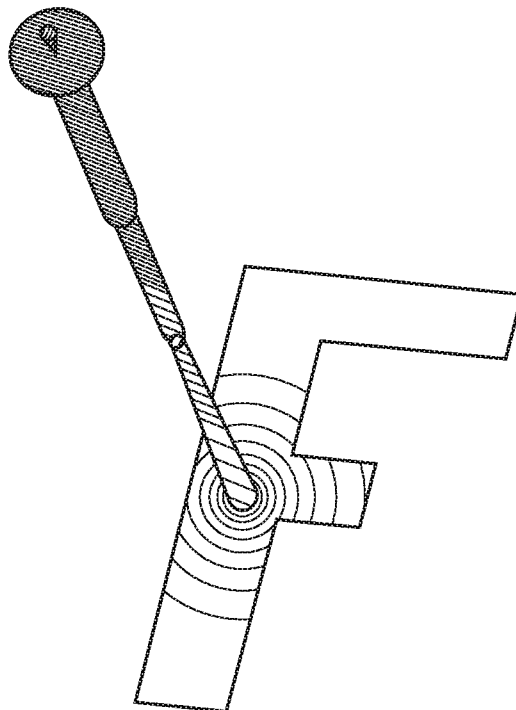


Fig. 13

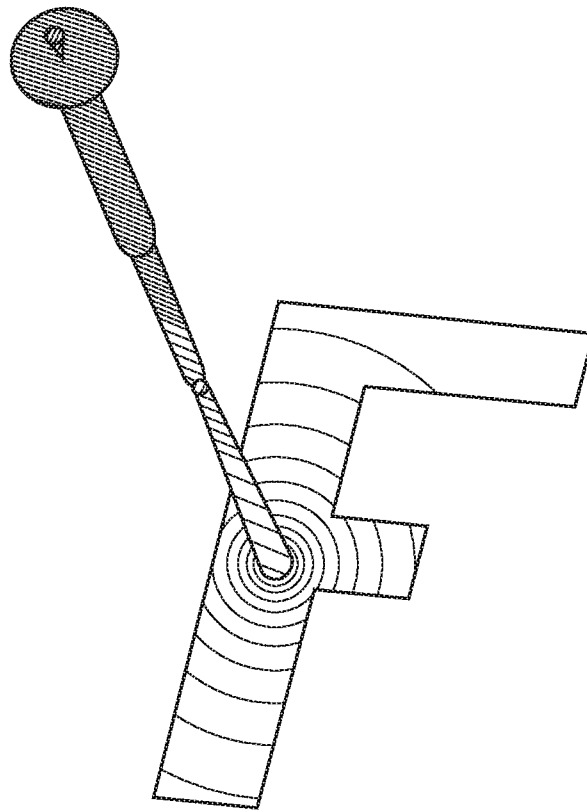


Fig. 14

Zuordnung ausgezeichnete Punkte von
Messung und Simulation

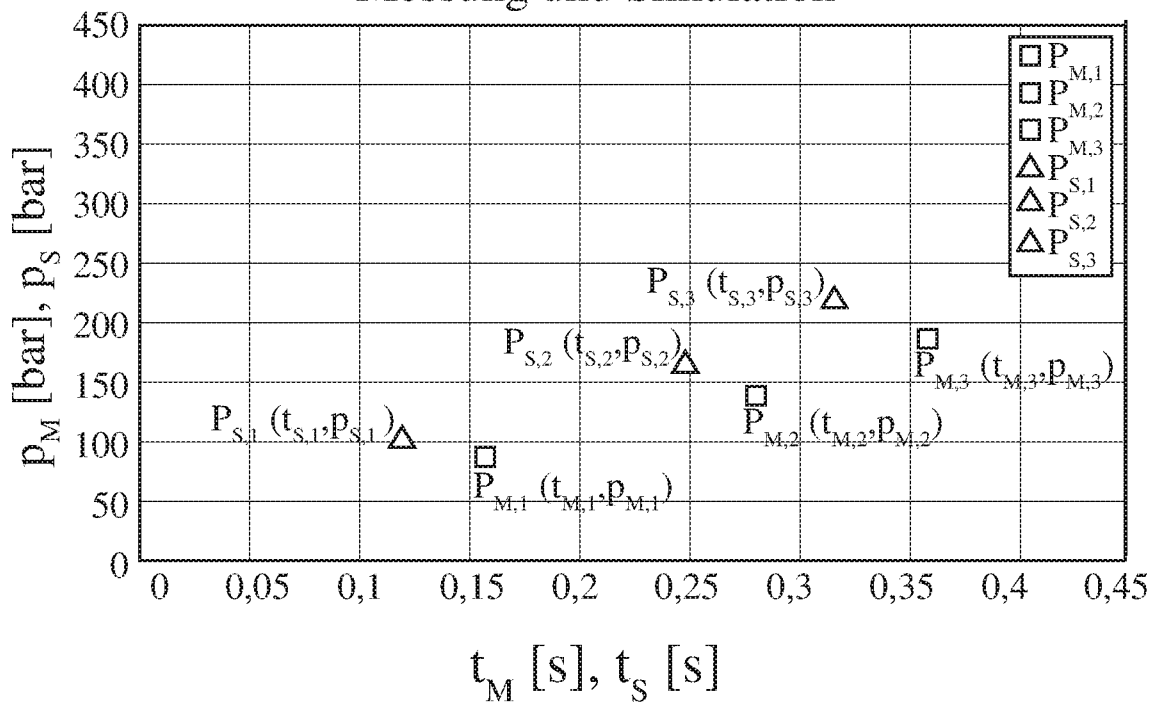


Fig. 15 Zuordnung ausgezeichnete Punkte von
Messung und Simulation

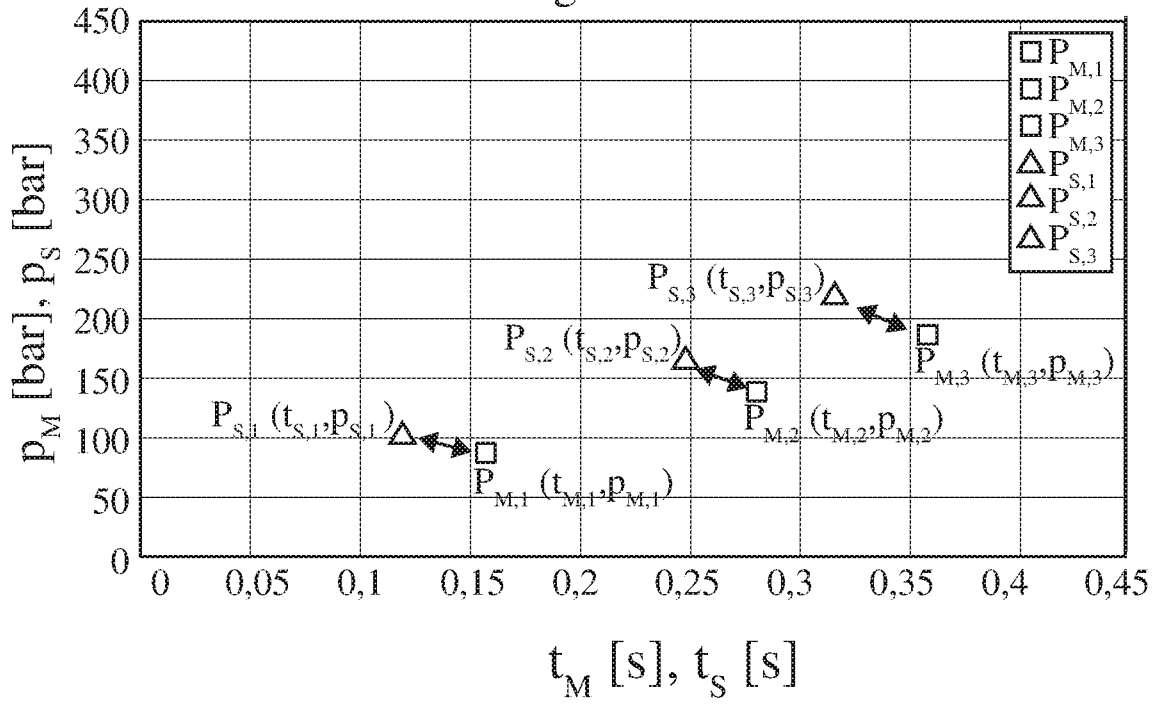


Fig. 16

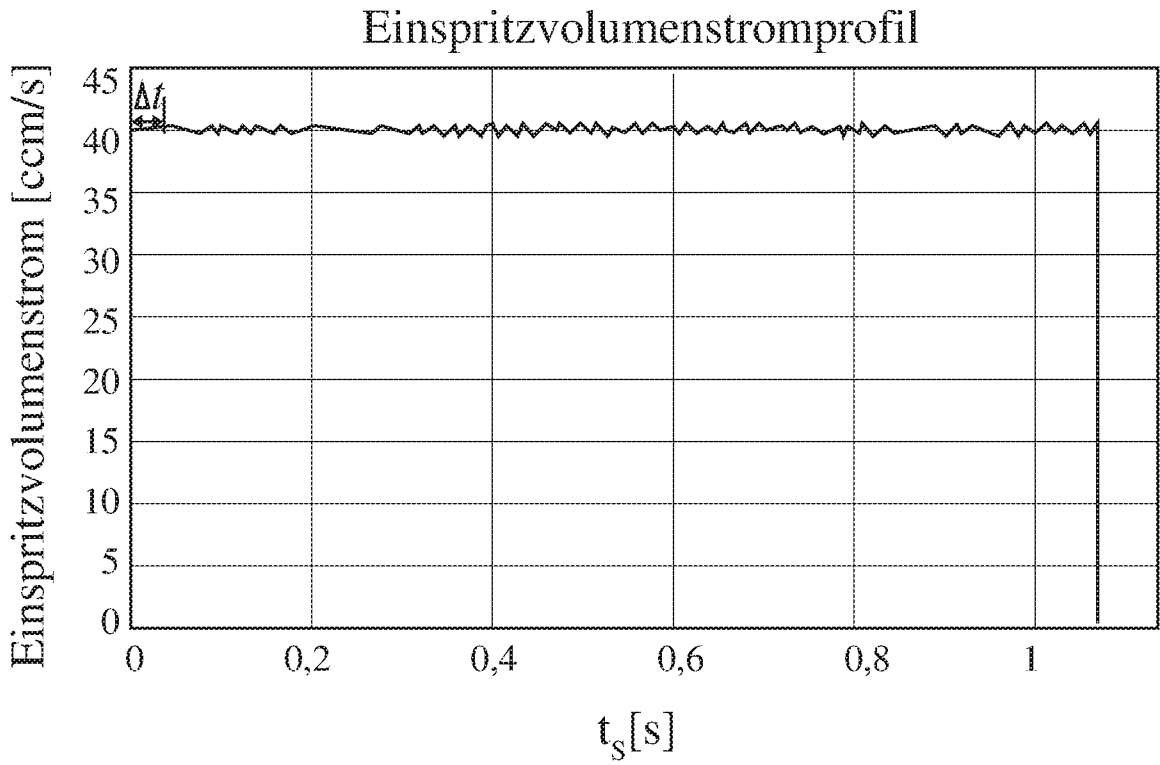


Fig. 17 Einspritzvolumenstromprofil
angepasst

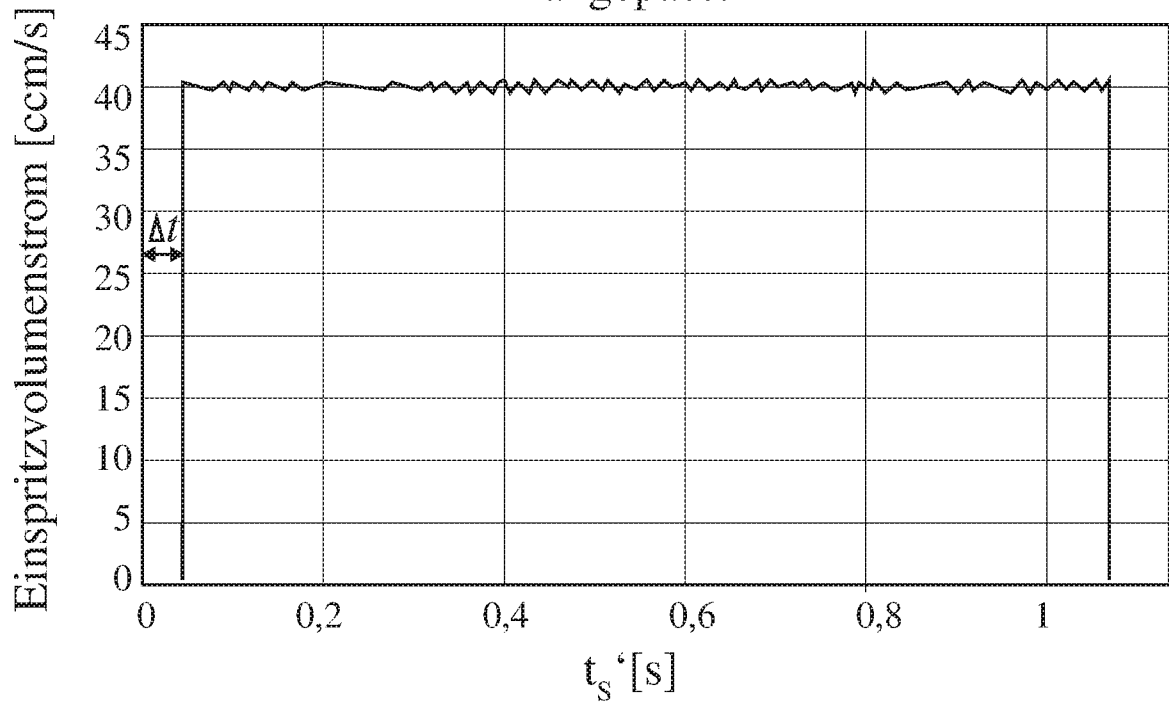


Fig. 18

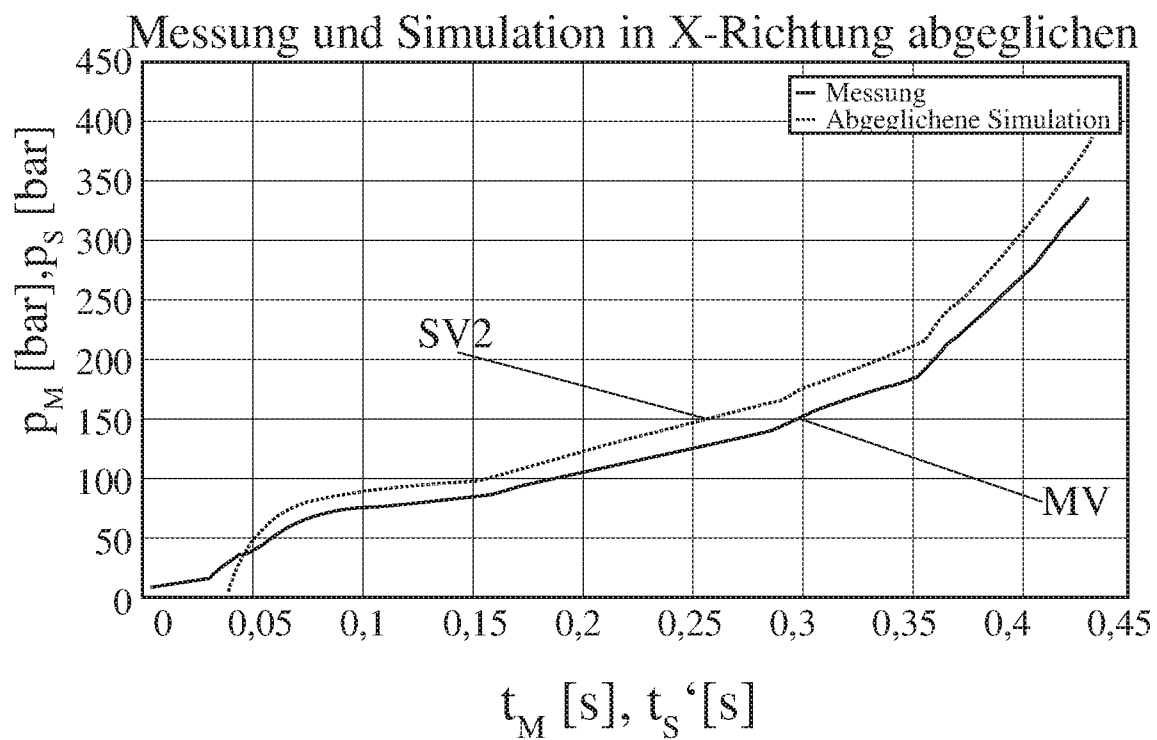


Fig. 19 Messung und Simulation in X-sowie
in Y-Richtung abgeglichen

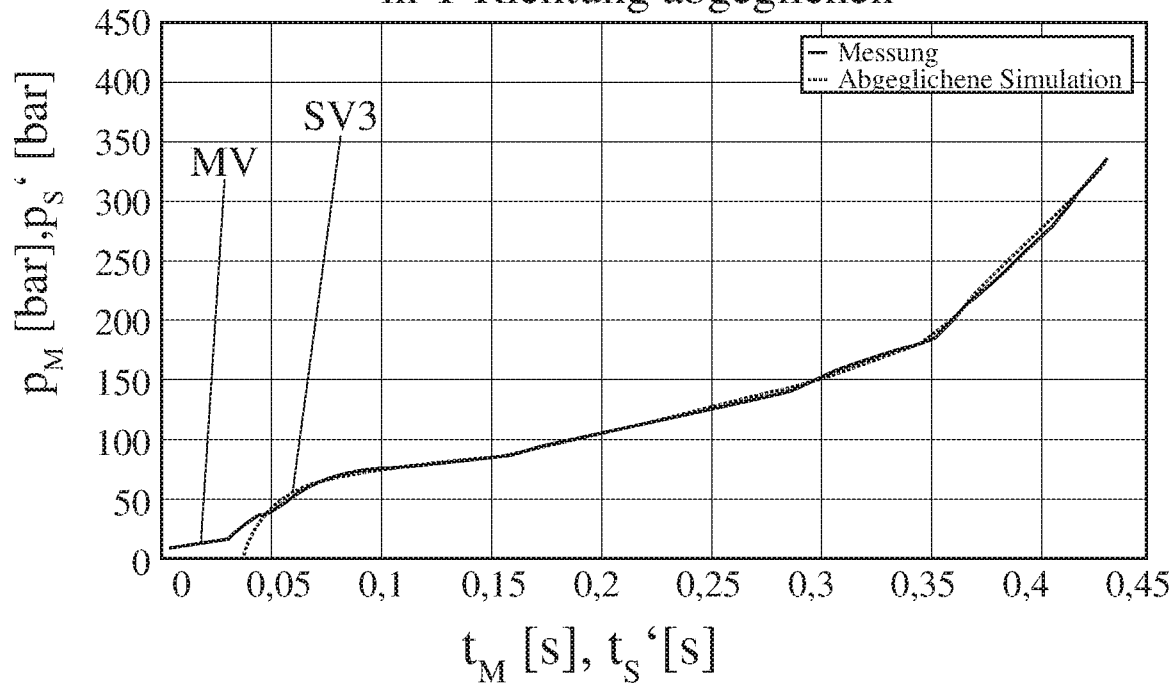


Fig. 20 Ausgezeichnete Punkte von
Messung und Simulation

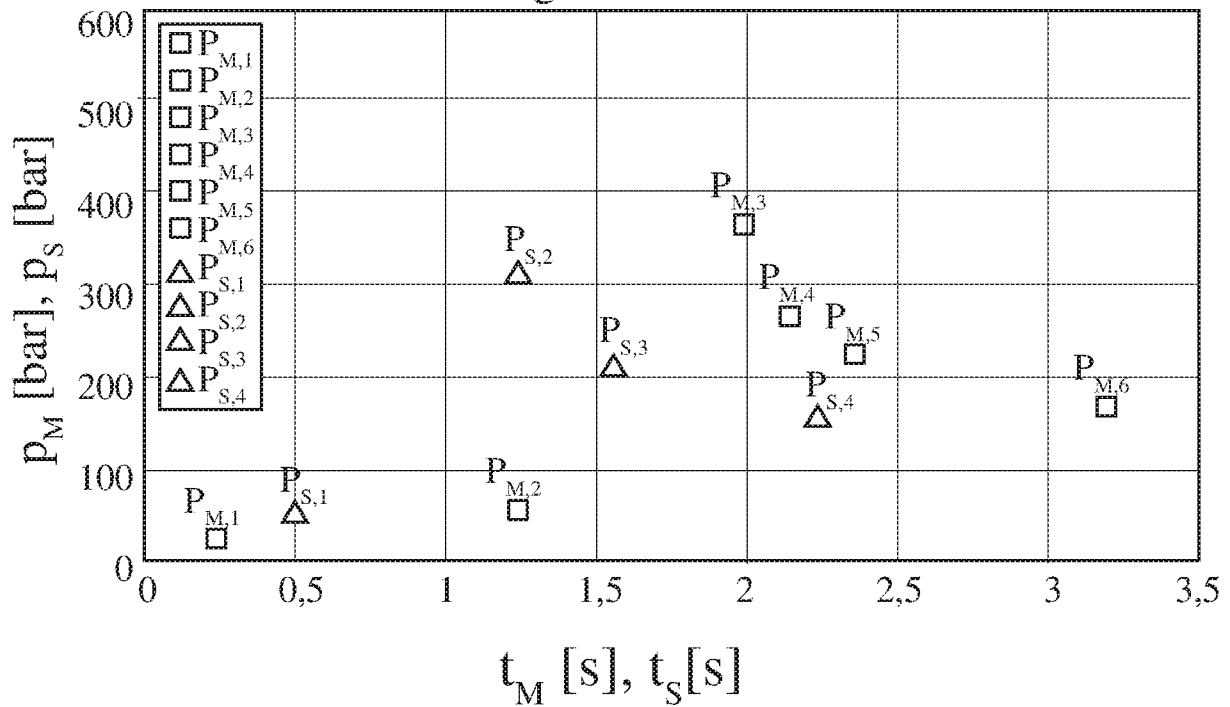


Fig. 21

Ausgezeichnete Punkte von
Messung und Simulation

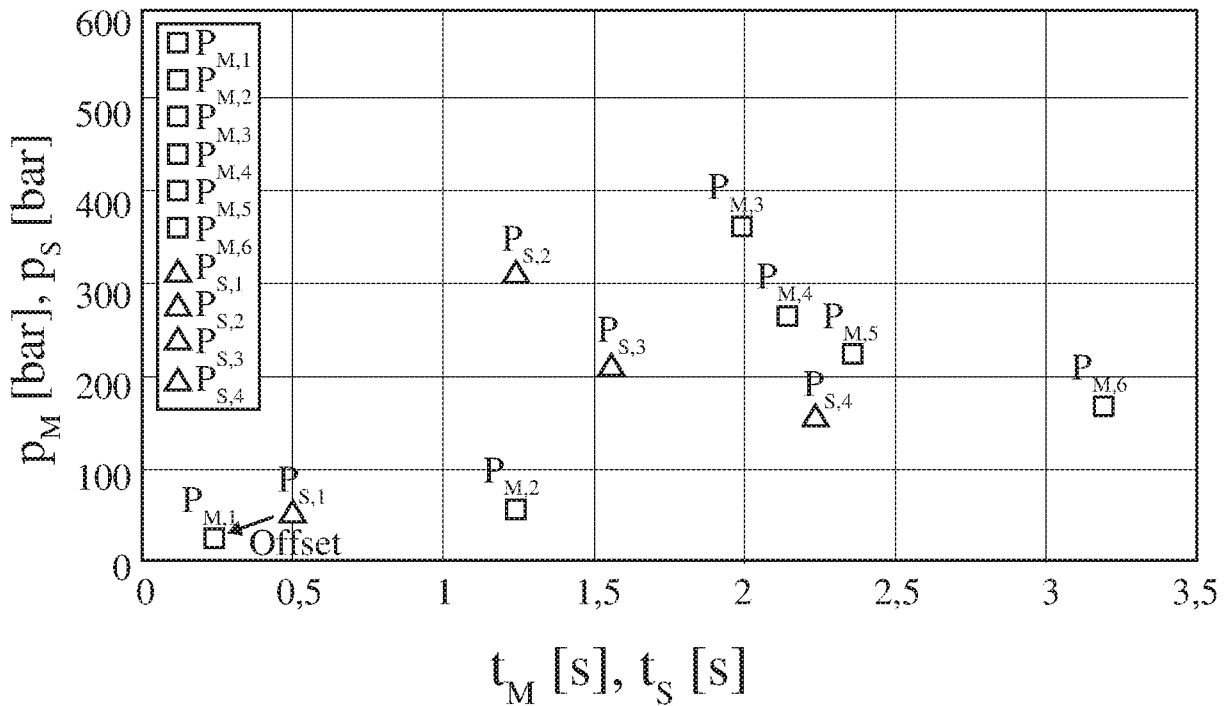


Fig. 22

Ausgezeichnete Punkte von
Messung und Simulation

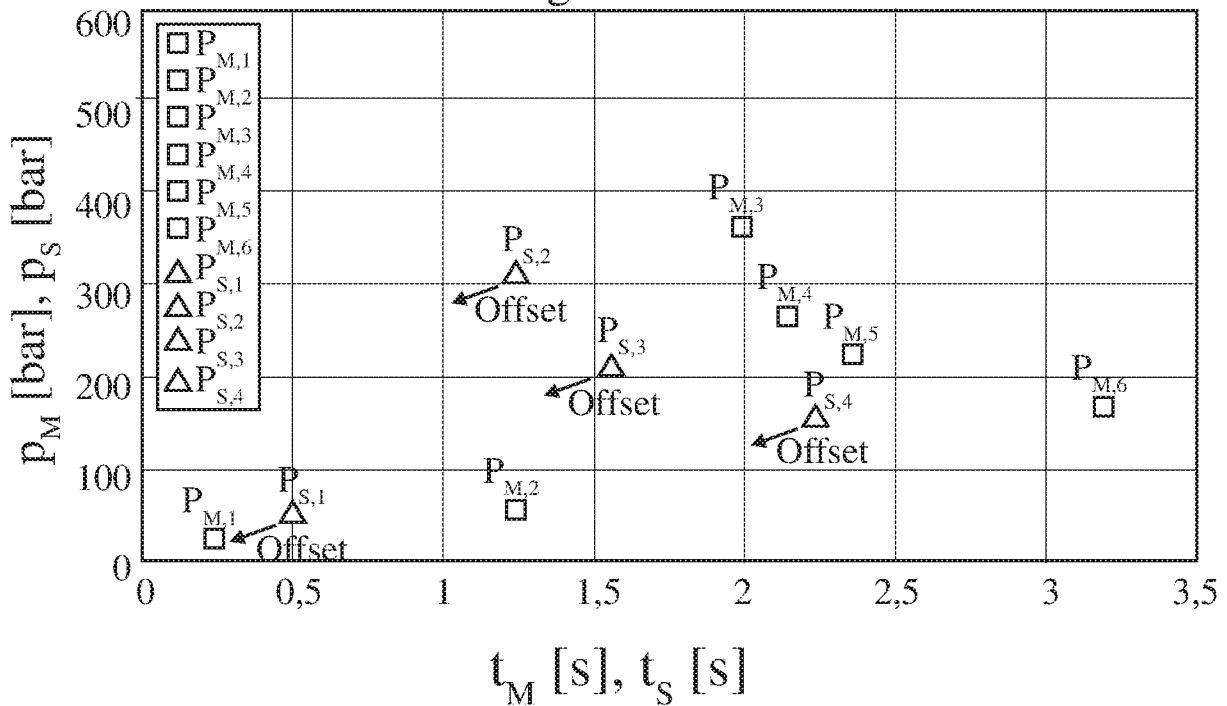


Fig. 23

Ausgezeichnete Punkte von
Messung und Simulation mit Offset

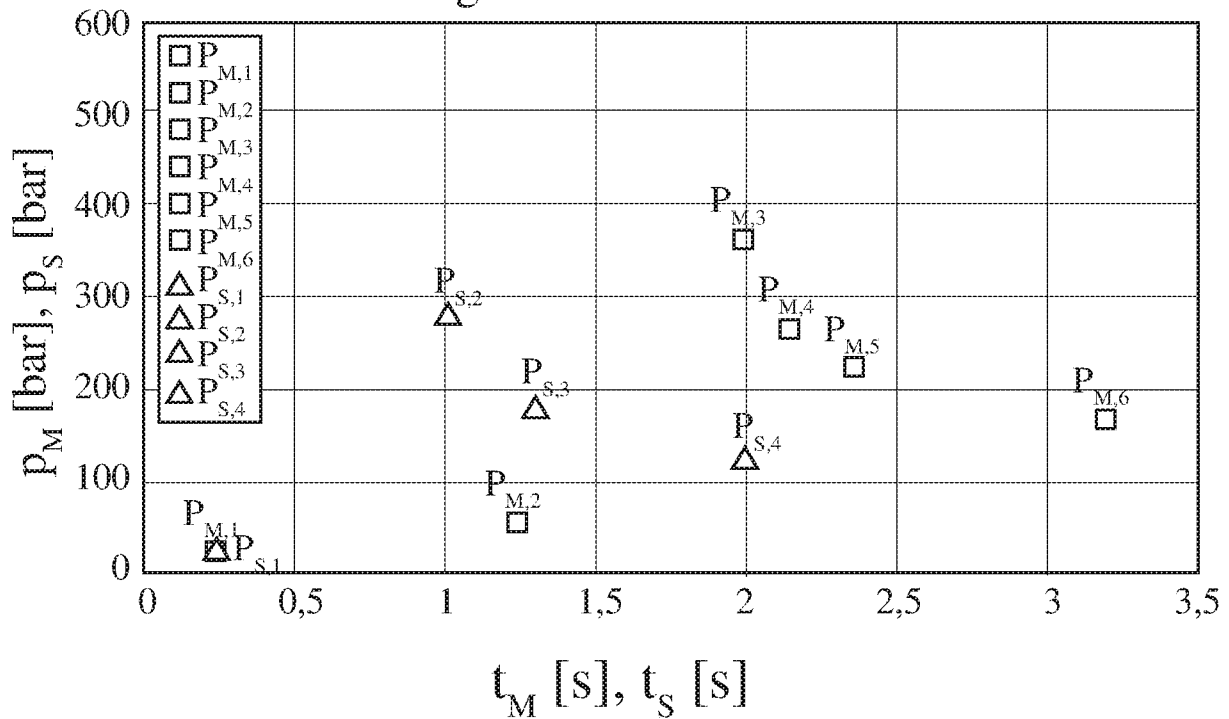


Fig. 24

Ausgezeichnete Punkte von
Messung und Simulation mit Offset

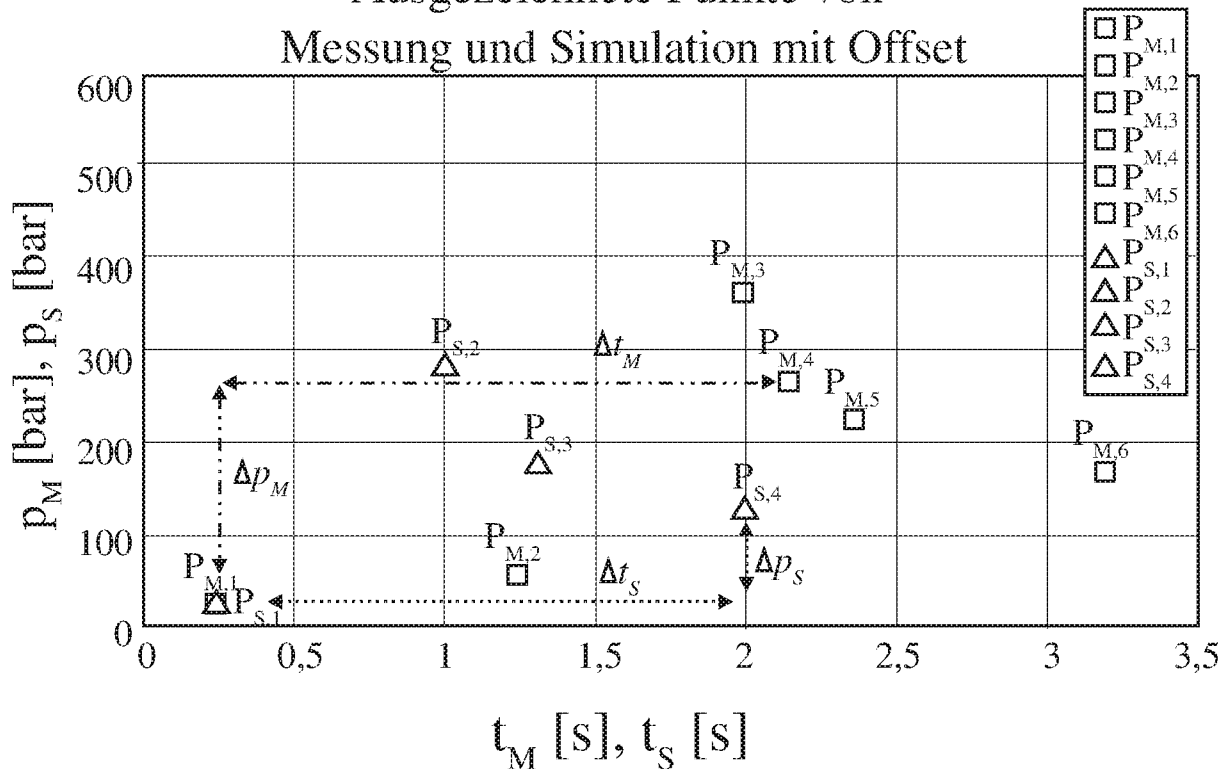


Fig. 25

Ausgezeichnete Punkte von
Messung und Simulation mit Offset + Skalierung

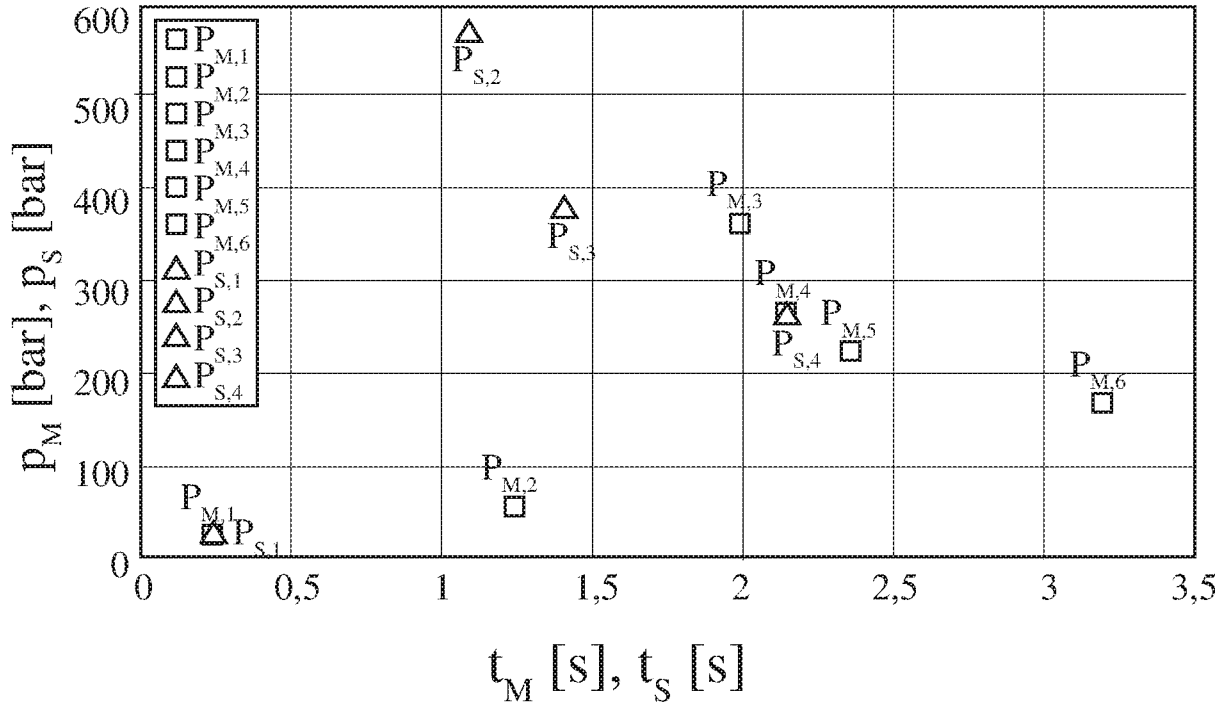


Fig. 26

Ausgezeichnete Punkte von
Messung und Simulation mit Offset + Skalierung

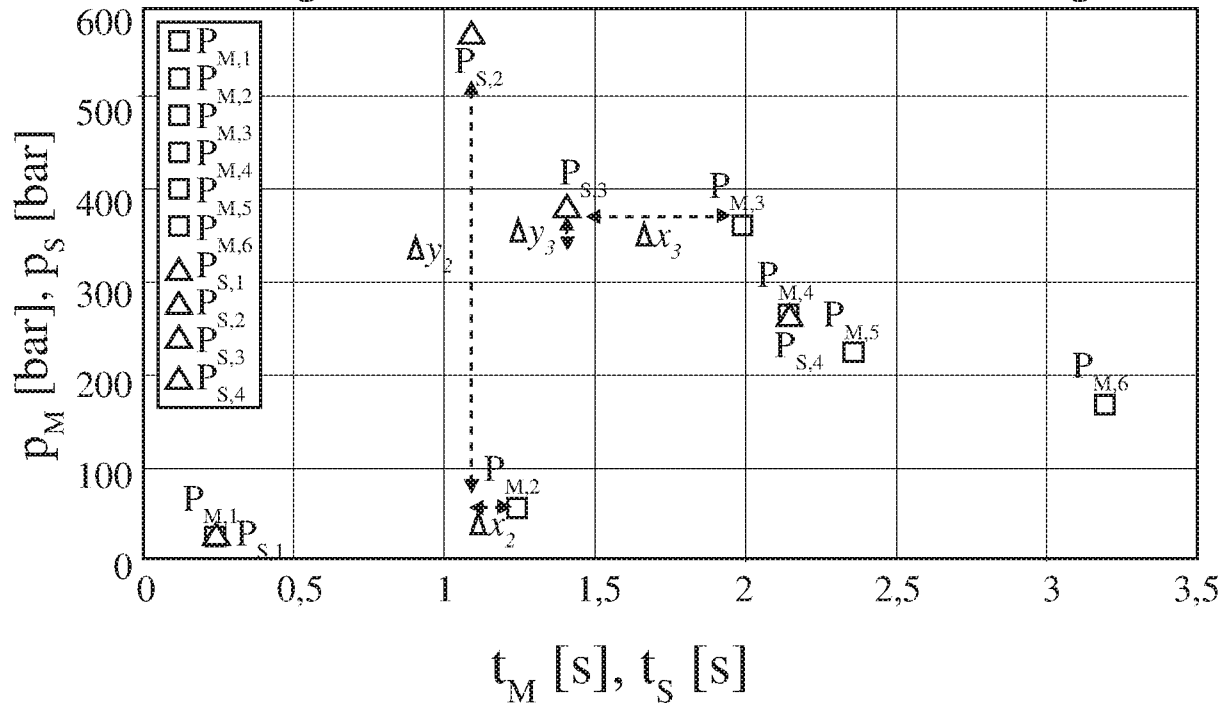


Fig. 27

Ausgezeichnete Punkte von
Messung und Simulation

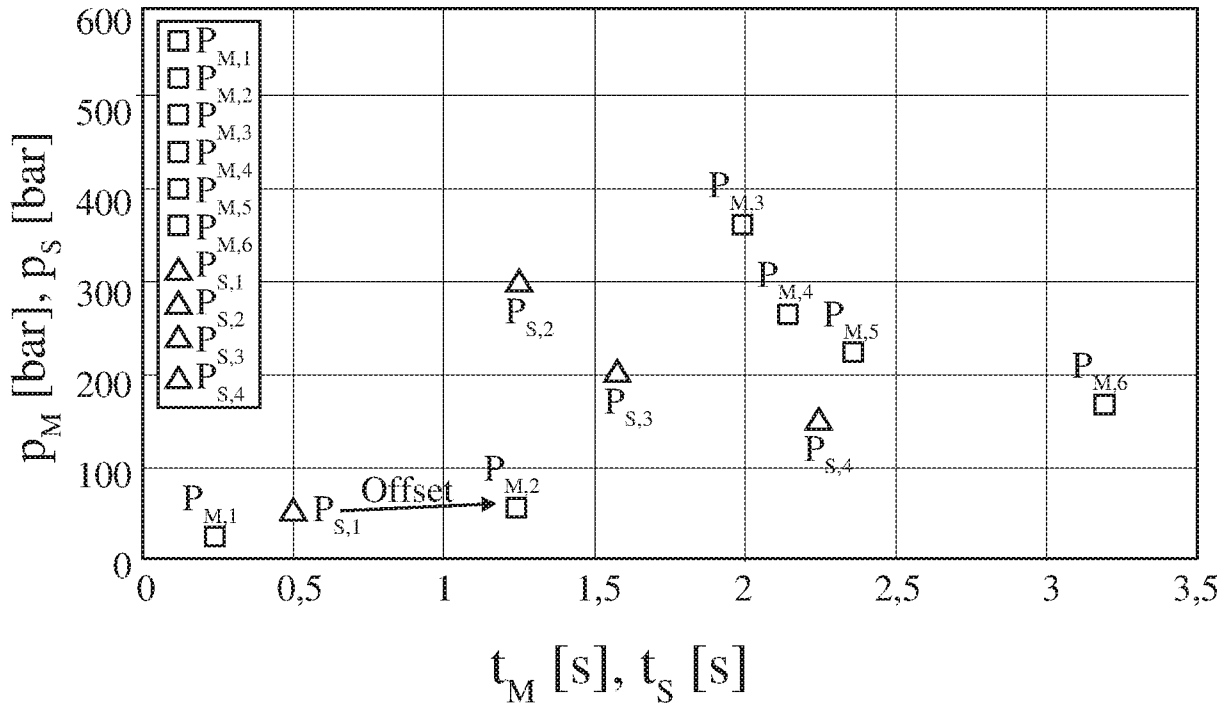


Fig. 28

Ausgezeichnete Punkte von
Messung und Simulation

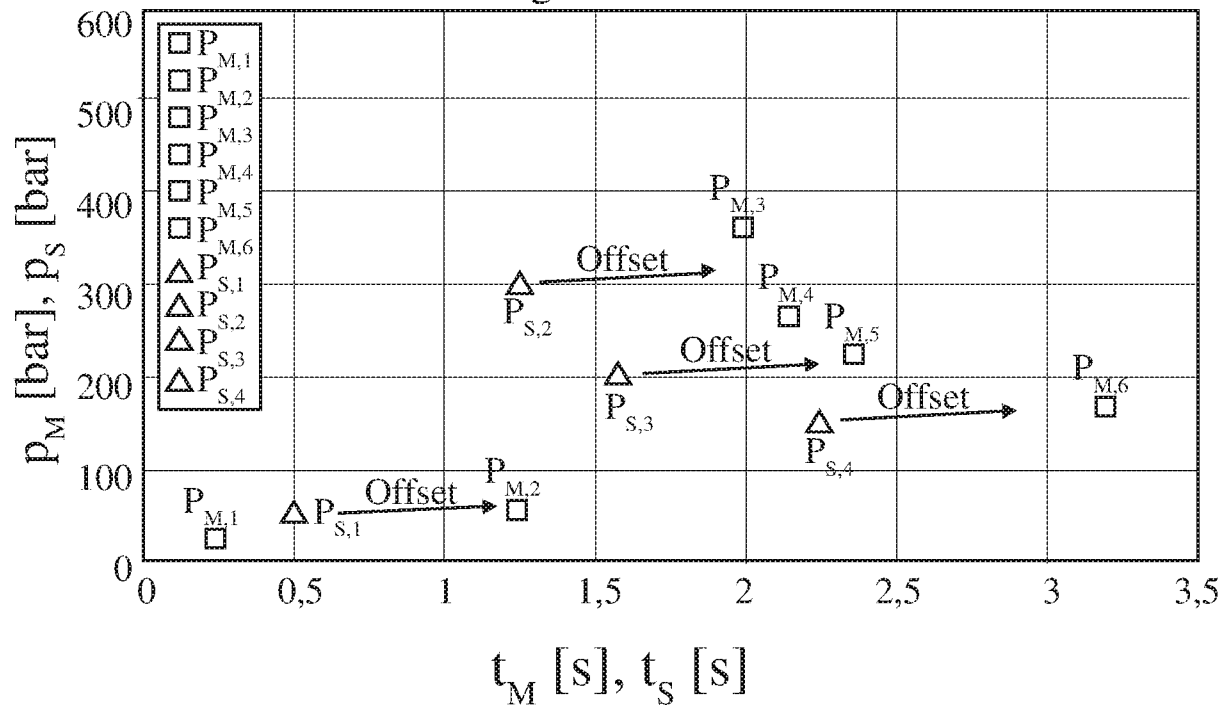


Fig. 29

Ausgezeichnete Punkte von
Messung und Simulation mit Offset

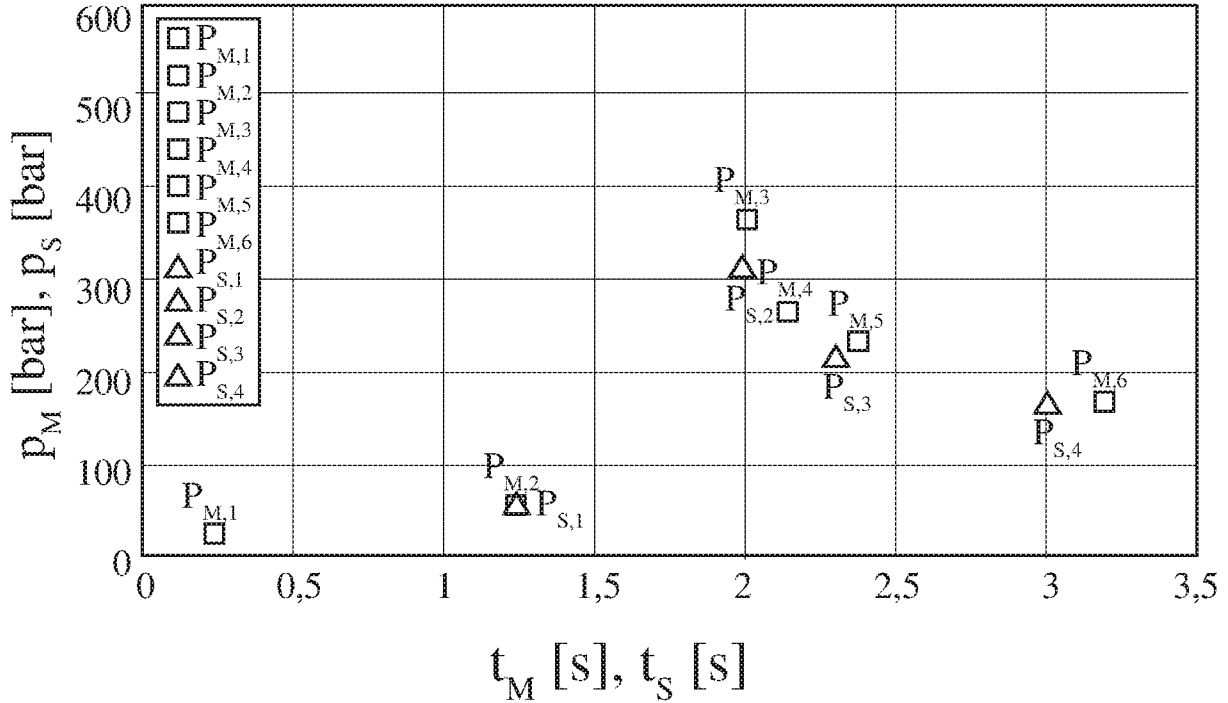


Fig. 30

Ausgezeichnete Punkte von
Messung und Simulation mit Offset

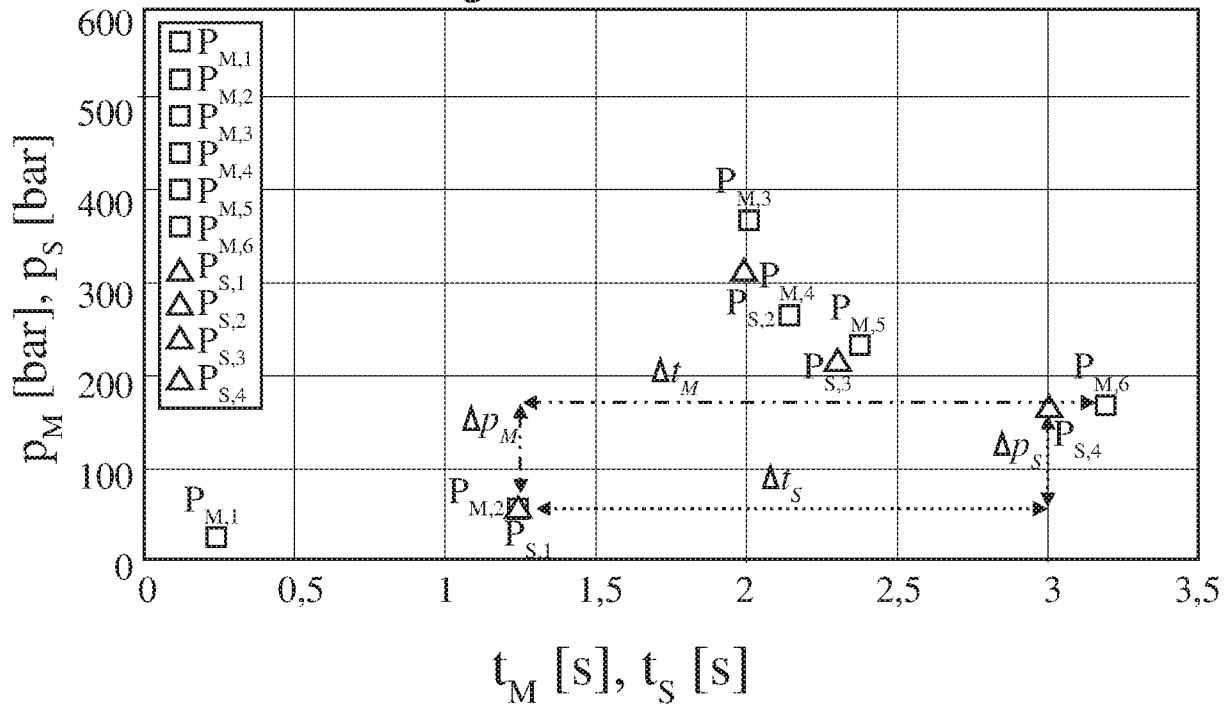


Fig. 31

Ausgezeichnete Punkte von
Messung und Simulation mit Offset + Skalierung

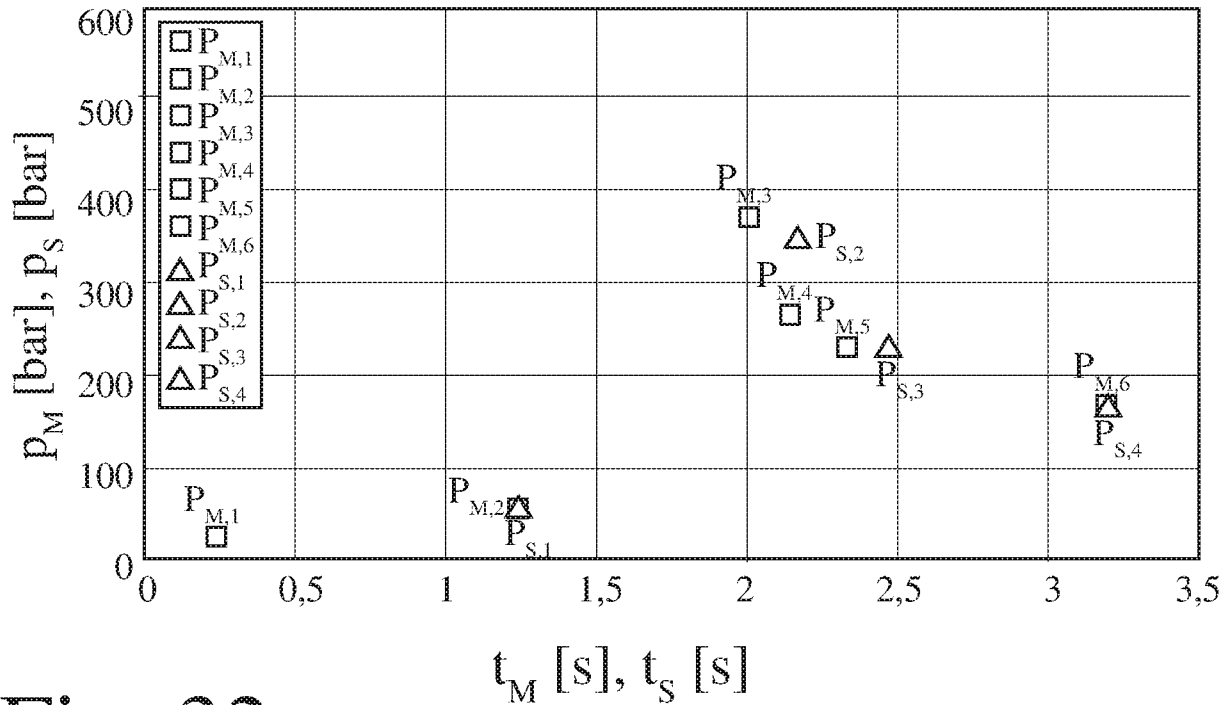
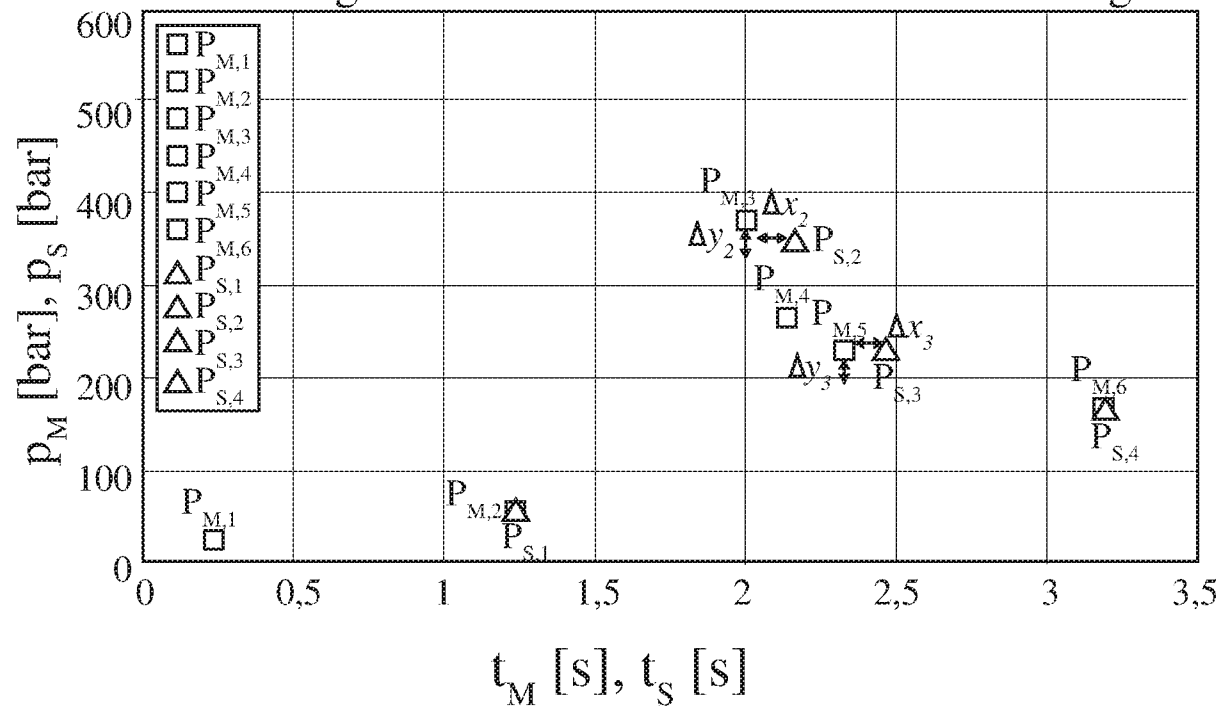


Fig. 32

Ausgezeichnete Punkte von
Messung und Simulation mit Offset + Skalierung



Klassifikation des Anmeldegegenstands gemäß IPC: B29C 45/76 (2006.01); G05B 19/418 (2006.01)
Klassifikation des Anmeldegegenstands gemäß CPC: B29C 45/7613 (2013.01); G05B 19/41885 (2013.01); G05B 2219/45244 (2013.01)
Recherchierter Prüfstoff (Klassifikation): B29C, G05B
Konsultierte Online-Datenbank: EPODOC, WPIAP, TXTnn, INTERNET: Google Patents, ESPACENET
Dieser Recherchenbericht wurde zu den am 20.04.2020 eingereichten Ansprüchen 1 - 18 erstellt.

Kategorie ^{*)}	Bezeichnung der Veröffentlichung: Ländercode, Veröffentlichungsnummer, Dokumentart (Anmelder), Veröffentlichungsdatum, Textstelle oder Figur soweit erforderlich	Betreffend Anspruch
A	DE 102013016914 A1 (ENGEL AUSTRIA GMBH [AT]) 15. Mai 2014 (15.05.2014) Zusammenfassung; Paragraphen [0001] - [0023], [0029] - [0036]; Figuren 1, 2.	1 - 18
A	WO 2016177513 A1 (BT BAYERN TREUHAND MAN & TECH AG [DE]) 10. November 2016 (10.11.2016) Zusammenfassung; Figuren 1, 2, 5, 14 und zugehörige Beschreibung; Ansprüche.	1 - 18
A	EP 3520987 A1 (NEGRI BOSSI SPA [IT]) 07. August 2019 (07.08.2019) Zusammenfassung; Paragraphen [0044] - [0067]; Figuren 1 - 4 und zugehörige Beschreibung.	1 - 18
A	US 10201918 B1 (FAVALORO ANTHONY J [US], PIPES ROBERT BYRON [US], TSENG HUAN-CHANG [TW]) 12. Februar 2019 (12.02.2019) Zusammenfassung; Spalte 1, Zeile 39 - Spalte 12, Zeile 18.	1 - 18
A	US 9555571 B1 (CHANG YUING [TW], CHANG RONG YEU [TW], HSU CHIA HSIANG [TW], CHANG CHUAN WEI [TW], CHIEN CHING CHANG [TW], CHIU HSIEN SEN [TW]) 31. Januar 2017 (31.01.2017) Zusammenfassung; Spalte 2, Zeile 7 - Spalte 16, Zeile 3; Figuren 1 - 4, 7 - 22.	1 - 18

Datum der Beendigung der Recherche: 30.03.2021	Seite 1 von 1	Prüfer(in): WALTER Peter
---	---------------	-----------------------------

^{*)} Kategorien der angeführten Dokumente: X Veröffentlichung von besonderer Bedeutung : der Anmeldegegenstand kann allein aufgrund dieser Druckschrift nicht als neu bzw. auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden. Y Veröffentlichung von Bedeutung : der Anmeldegegenstand kann nicht als auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren weiteren Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese Verbindung für einen Fachmann naheliegend ist.	A Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert. P Dokument, das von Bedeutung ist (Kategorien X oder Y), jedoch nach dem Prioritätstag der Anmeldung veröffentlicht wurde. E Dokument, das von besonderer Bedeutung ist (Kategorie X), aus dem ein „ älteres Recht “ hervorgehen könnte (früheres Anmeldedatum, jedoch nachveröffentlicht, Schutz ist in Österreich möglich, würde Neuheit in Frage stellen). & Veröffentlichung, die Mitglied der selben Patentfamilie ist.
---	--