(19) österreichisches patentamt

(10) **AT 502 382 B1 2007-03-15**

(12) **Patentschrift**

(21) Anmeldenummer: A 1560/2005

(22) Anmeldetag: 2005-09-22

(43) Veröffentlicht am: 2007-03-15

(51) Int. Cl.[8]: ***B29C 45/76*** (2006.01)
G05B 19/19 (2006.01)

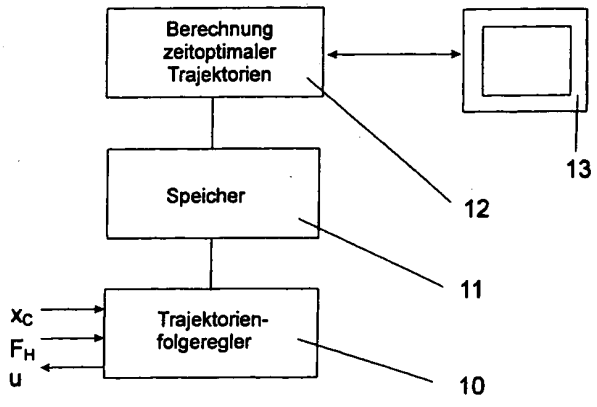
(73) Patentanmelder:
ENGEL AUSTRIA GMBH
A-4311 SCHWERTBERG (AT)

(72) Erfinder:
ENGLEDER STEFAN DIPL.ING.
WIEN (AT)

(54) VERFAHREN ZUM STEUERN UND/ODER REGELN EINER SPRITZGIESSMASCHINE

(57) Die Erfindung betrifft ein Verfahren oder eine Einrichtung zum Steuern und/oder Regeln einer Spritzgießmaschine, die einen Kniehebelmechanismus mit Kreuzkopf aufweist. Es werden Restriktionsgrößen für die Bewegung der beweglichen Formaufspannplatte ($v_{B,max}$ und $a_{B,max}$) sowie Restriktionsgrößen für die Bewegung des Kreuzkopfes ($v_{C,max}$ und $a_{C,max}$) festgelegt. Abschließend wird eine zeitoptimale Bewegungstrajektorie numerisch berechnet und abgespeichert. Anschließend erfolgt das Steuern und/oder Regeln der Antriebsvorrichtung der Spritzgießmaschine entlang der gespeicherten Bewegungstrajektorie.

Fig. 9



AT 502 382 B1 2007-03-15

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Steuern und/oder Regeln einer Spritzgießmaschine, deren bewegliche Formaufspannplatte von einem Kniehebelmechanismus bewegt wird, dessen Kreuzkopf von einer Antriebsvorrichtung antreibbar ist. Weiters betrifft die Erfindung ein insbesondere zur Durchführung dieses Verfahrens geeignetes Programm, einen Datenträger zum Speichern dieses Programms sowie eine Spritzgießmaschine mit einer beweglichen Formaufspannplatte, die von einem Kniehebelmechanismus angetrieben ist, dessen Kreuzkopf von einer Antriebsvorrichtung antreibbar ist.

Bei modernen Spritzgießmaschinen ist es wichtig, die Zykluszeit zu minimieren bzw. mit anderen Worten, eine zeitoptimierte Bewegungstrajektorie insbesondere für die bewegliche Formaufspannplatte zu finden. Es ist bereits bekannt, dass bei der Bewegung der beweglichen Formaufspannplatte Restriktionsgrößen zu beachten sind, insbesondere die maximal zulässige Geschwindigkeit und die maximal zulässige bzw. erzielbare Beschleunigung.

Bei einer Kniehebel-Spritzgießmaschine sind aber noch andere bewegbare Komponenten zu beachten, was bisher - zumindest in systematischem Umfang - unterblieben ist.

Aufgabe der Erfindung ist es, ein Verfahren zum Steuern und/oder Regeln einer Kniehebelspritzgießmaschine anzugeben, mit dem es möglich ist, zeitoptimierte Bewegungstrajektorien zu ermitteln und die Kniehebel-Spritzgießmaschine anschließend damit zu betreiben, um letztlich eine kleine Zykluszeit zu erzielen.

Eine weitere Aufgabe der Erfindung besteht in der Angabe eines entsprechend geeigneten Programms sowie eines Datenträgers für das Programm und schließlich in der Angabe einer Spritzgießmaschine, deren bewegliche Formaufspannplatte über einen Kniehebelmechanismus bewegt wird und die eine kurze Zykluszeit aufweist.

1. Das erfindungsgemäße Verfahren ist dadurch gekennzeichnet, dass das Verfahren folgende Schritte umfasst:

   (i) Zahlenmäßiges Festlegen von Restriktionsgrößen für die Bewegung der beweglichen Formaufspannplatte, vorzugsweise von deren maximaler Geschwindigkeit $v_{B,max}$ und deren maximaler Beschleunigung $a_{B,max}$.

   (ii) Zahlenmäßiges Festlegen von Restriktionsgrößen für die Bewegung des Kreuzkopfes, vorzugsweise von dessen maximaler Geschwindigkeit $v_{c,max}$ und dessen maximale Beschleunigung $a_{c,max}$.

   (iii) Numerisches Berechnen einer zeitoptimierten Bewegungstrajektorie für den Kreuzkopf bzw. die bewegliche Formaufspannplatte mittels einer elektronischen Datenverarbeitungsanlage unter Berücksichtigung der vorher festgelegten Restriktionsgrößen für die bewegliche Formaufspannplatte einerseits und den Kreuzkopf andererseits.

   (iv) Abspeichern der berechneten Bewegungstrajektorie in einem Speicher der elektronischen Datenverarbeitungsanlage.

   (v) Steuern und/oder Regeln der Antriebsvorrichtung der Spritzgießmaschine derart, dass sich der Kreuzkopf bzw. die bewegliche Formaufspannplatte in aufeinander folgenden Zyklen gemäß der gespeicherten Bewegungstrajektorie bewegt.

Eine Grundidee der Erfindung besteht darin, bei den kinematischen Überlegungen nicht nur die bewegliche Formaufspannplatte, sondern auch den Kreuzkopf miteinzubeziehen, der ebenfalls Restriktionsgrößen für die Bewegung unterliegt (maximale Kreuzkopfgeschwindigkeit, maximale Kreuzkopfbeschleunigung). Insbesondere ist dabei auch das positionsabhängige Übersetzungsverhältnis zwischen Kreuzkopfbewegung und Bewegung der beweglichen Formauf-

spannplatte zu berücksichtigen. Um Geräusche im Kniehebelmechanismus und um den mechanischen Verschleiß zu verringern, ist eine Anstiegsbegrenzung der Beschleunigung (Ruckbegrenzung) ebenfalls sinnvoll. Obwohl die Hydraulik einer schnell laufenden Kniehebel-Spritzgießmaschine sehr hohe Kräfte am Schließkolben der Antriebsvorrichtung zur Verfügung stellt, kann es unter Umständen zweckmäßig sein, die hydraulische Kraft zu begrenzen. Bei elektrischen Antrieben wird man noch häufiger eine Kraftbegrenzung vorfinden.

Zusammenfassend können daher bevorzugt folgende typische Restriktionen für die Bewegung des Kniehebelmechanismus festgehalten werden.

$x_B \leq v_{B,max}$
$|x_B| \leq |a_{B,max}|$
$x_C \leq v_{C,max}$
$|x_C| \leq |a_{C,max}|$
$|x_C| \leq |r_{C,max}|$
$F_H \leq F_{H,max}$

Für das Formschließen bzw. Formöffnen können unterschiedliche Worte vorgegeben werden, wie dies aus der beispielhaften folgenden Tabelle ersichtlich ist.

Restriktionsgrößen	*Formschließen*	*Formöffnen*	*Einheit*
$v_{C,max}$	1,3	-0,8	m/s
$v_{B,max}$	1,5	-1,5	m/s
$a_{C,max}$	12	-12	m/s^2
$a_{C,min}$	-12	12	m/s^2
$a_{B,max}$	12	-12	m/s^2
$a_{B,min}$	-12	12	m/s^2
$r_{B,max}$	300	-300	m/s^3
$r_{B,min}$	-300	300	m/s^3
$F_{H,max}$	60	-60	kN
$F_{H,min}$	100	-100	kN

Besonders bevorzugt ist die Eingabe dieser Größen mit gleichzeitiger sichtbarer Darstellung auf einem Bildschirm in den angegebenen Si-Einheiten. Nach dem erfindungsgemäß Verfahren bzw. Programm, das vorzugsweise in der ohnehin vorgesehenen elektronischen Maschinensteuerung implementiert sein kann, ist es möglich, jeden Satz von Restriktionsgrößen in relativ kurzer Zeit eine zeitoptimierte Bewegungstrajektorie für den Kreuzkopf bzw. die bewegliche Formaufspannplatte zu berechnen und anschließend die Spritzgießmaschine dann auch zu steuern bzw. zu regeln. In einem Expertenmodus werden bevorzugt alle Restriktionsgrößen angezeigt. Sie sind auch alle veränderbar. Um beim Anwender Schäden an der Maschine durch falsche Eingaben hintanzuhalten, ist es auch möglich, einen speziellen Anwendermodus vorzusehen, bei dem lediglich ein Teil der Restriktionsgrößen vom Benutzer veränderbar ist. Solche Restriktionsgrößen können beispielsweise der maximale Plattenhub und die maximale Plattengeschwindigkeit sein. Insbesondere für die Plattengeschwindigkeit ist es auch möglich, im Anwendermodus nicht explizit Zahlen, sondern beispielsweise auch graphisch dargestellt Wertebereiche auszuwählen. Typisch ist aber ansonsten die tatsächliche zahlenmäßige Eingabe mit Kontrolle am Bildschirm.

Weitere Vorteile und Einzelheiten der Erfindung werden anhand der nachfolgenden Beschrei-

bung, die auch auf die Figuren Bezug nimmt näher beschrieben.

Die Fig. 1 zeigt ein Flussdiagramm zur Ermittlung einer optimalen Bewegungstrajektorie in der Phasenebene für eine allgemeine Variable s.

Die Fig. 2 zeigt eine allgemeine Lösung eines zeitoptimalen Bewegungsproblems mittels Planung in der Phasenebene für eine allgemeine Variable s.

Die Fig. 3 zeigt zeitoptimale Bewegungstrajektorien des Kniehebelsystems mittels Planung in der Phasenebene.

Die Fig. 4 zeigt zeitoptimale Bewegungstrajektorien des Kniehebelsystems für das Formschließen mit Berücksichtigung des Formschutzbereiches.

Die Fig. 5 zeigt zeitoptimale Bewegungstrajektorien des Kniehebelsystems mittels linearer Programmierung.

Die Fig. 6 zeigt eine schematische Darstellung zeitoptimaler Bewegungstrajektorien des Kniehebelsystems mit Berücksichtigung des Schließkraftaufbaus.

Die Fig. 7 zeigt zeitoptimale Bewegungstrajektorien des Kniehebelsystems mittels Planung in der Phasenebene mit Berücksichtigung des Schließkraftaufbaus.

Die Fig. 8 zeigt eine schematische Darstellung eines Ausführungsbeispiels einer erfindungsgemäßen Spritzgießmaschine.

Die Fig. 9 zeigt eine schematische Darstellung eines Ausführungsbeispiels einer elektronischen Datenverarbeitungsanlage zur Verwirklichung der Erfindung.

Die Fig. 10 zeigt eine Bildschirmmaske (Expertenmodus).

Die Fig. 11 zeigt eine Bildschirmmaske (Anwendermodus).

Aus Gründen der Einfachheit kann die Dynamik des Kniehebelmechanismus für den Entwurf der Bewegungstrajektorien, die später als Referenztrajektorien für den Betrieb der Spritzgießmaschine herangezogen werden, annähernd durch die nichtlineare Bewegungsgleichung

$$(1) \quad \left(\frac{m_B}{i_{KH}^2} + m_C\right)\ddot{x}_C - m_B \frac{1}{i_{KH}^3}\frac{di_{KH}}{dx_C}\dot{x}_C^2 \cong F_H$$

beschrieben werden. Diese gilt es nun unter Beachtung von Nebenbedingungen, nämlich den gewünschten Restriktionsgrößen (beispielsweise den oben aufgelisteten Restriktionsgrößen) zu lösen. Aufgrund der durch die Kinematik bedingten nichtlinearen Nebenbedingungen handelt es sich um ein nichtlineares Optimierungsproblem, für das sich grundsätzlich mehrere Optimierungsverfahren eignen, beispielsweise die klassische Variationsrechnung, die dynamische Programmierung, die Planung der Trajektorien in der Phasenebene und die lineare Programmierung.

Zur Bestimmung der zeitoptimalen Bewegungstrajektorie in der Phasenebene können folgende Überlegungen angestellt werden.

Die kleinstmögliche Zeitdauer für die Bewegung ergibt sich durch eine Minimierung der Kostenfunktion

$$(2) \quad J = \int_{t_0}^{t_f} \text{□} dt.$$

Durch die Umformung $dt = \frac{ds}{\dot{s}}$ ergibt sich

$$(3) \qquad J = t(s) = \int_{s_0}^{s_f} \frac{1}{\dot{s}(s)} ds,$$

wobei die Kostenfunktion J gleichzeitig die Gesamtzeit für die Ausführung der Bewegung darstellt. Es ist ersichtlich, dass sich die zeitoptimale Bewegung einstellt, wenn die Geschwindigkeiten in jedem Punkt der Bahn maximal sind. Aus den Betrachtungen in der Phasenebene kann man nun einen Algorithmus ableiten, der eine programmtechnische Umsetzung zur Bestimmung der maximal zulässigen Bahngeschwindigkeit in jedem Bahnpunkt unter Berücksichtigung der Restriktionen gewährleistet. Das Fig. 1 zu entnehmende Schema skizziert den Algorithmus. Da der Algorithmus reine Geschwindigkeitsbeschränkungen beachtet, ist eine besondere Berücksichtigung von kritischen bzw. singulären Punkten nicht notwendig.

Anhand von Fig. 2 kann der erzielte Lösungsweg eines allgemeinen, zeitoptimalen Bewegungsproblems in der Phasenebene $(s,\dot{s})$ nachvollzogen werden. Ausgehend von dem Initialpunkt $(s_0,\dot{s}_0)$ wird so lange mit der maximal zulässigen Beschleunigung $\ddot{s}_{max}$ verfahren, bis die maximal zulässige Geschwindigkeit $\dot{s}_{max}$ erreicht ist (Bahnpunkte s_2, s_4) oder man an die Endposition s_f gelangt. Trifft ersteres zu, so bewegt man sich entlang der Maximalgeschwindigkeitstrajektorie mit $\dot{s}_{max}$. Dies wird so lange vollzogen, bis entweder die Maximalbeschleunigung $\ddot{s}_{max}$ überschritten (Bahnpunkt s_2), die Minimalbeschleunigung $\ddot{s}_{min}$ unterschritten (Bahnpunkt s_4) oder die Endposition s_f erreicht wird.

In ersterem Fall wird wiederum mit der Maximalbeschleunigungstrajektorie $\ddot{s}_{max}$, wie oben beschrieben, verfahren. Kommt es zu einer Unterschreitung der Minimalbeschleunigung $\ddot{s}_{min}$, so müssen zuerst die Anschlusspunkte ermittelt werden, zwischen denen entlang der Minimalbeschleunigungstrajektorie verfahren wird. Die Anschlusspunkte, die die Bewegung entlang der Minimalbeschleunigungstrajektorie begrenzen, setzen sich aus dem Schnittpunkt (Bahnpunkt s_3) und dem Fortsetzungspunkt (Bahnpunkt s_5) zusammen. In einem ersten Schritt wird der Fortsetzungspunkt berechnet. Das ist derjenige Punkt, bei dem der zeitoptimale Geschwindigkeitsverlauf der minimalen Bahnbeschleunigung folgen oder diese zumindest tangential berühren könnte, d.h. für diesen Fortsetzungspunkt muss $\frac{d\dot{s}_{max}}{dt} = \ddot{s}_{min}$ gelten. Durch Rückwärtsrechnung ergibt sich der Schnittpunkt mit der bereits errechneten zeitoptimalen Bewegungstrajektorie. Erreicht man den Fortsetzungspunkt, so gilt zu überprüfen, ob zum Fortsetzen entlang einer Maximalbeschleunigungstrajektorie $\ddot{s}_{max}$ (bei $\frac{d\dot{s}_{max}}{dt} = \ddot{s}_{max}$) oder entlang einer Maximalgeschwindigkeitstrajektorie $\dot{s}_{max}$ (bei $\ddot{s}_{min} = \frac{d\dot{s}_{max}}{dt} = \ddot{s}_{max}$) verfahren wird.

Sobald man die Endposition s_f, erreicht, wird von diesem Punkt ausgehend eine Minimalbeschleunigungstrajektorie berechnet. Der Fortsetzungspunkt der letzten Minimalbeschleunigungstrajektorie ist das Bahnende s_f mit $\dot{s}(s_f) = \dot{s}_f$.

Die Planung der zeitoptimalen Referenztrajektorien für Manipulatoren, die sich entlang einer vorgegebenen Bahnkurve bewegen, aufgrund des sich durch die Parametrierung der Bahnkurve ergebenden Einfreiheitsgradsystems auch für Kniehebelsysteme herangezogen werden kann. Sind alle Massen und Trägheitsmomente des Kniehebels bekannt, so kann zur Planung nicht nur die vereinfachte Differentialgleichung, sondern auch die Differentialgleichung des Gesamtsystems verwendet werden.

Im Folgenden wird die für praktische Anwendungen hinreichend exakte, vereinfachte Variante nach Gleichung 1 beschrieben. Zur programmtechnischen Umsetzung wird die Bahn in N_B äquidistante Teilstücke $\Delta s_k, k \in \{1,...,N_B\}$ diskretisiert und für jeden Punkt der Bahn der in Fig. 1

skizzierte Algorithmus angewandt. Da es gegen Ende des Formschließens zu sehr geringen Bewegungen der beweglichen Aufspannplatte im Vergleich zum Kreuzkopf kommt, wird aus Gründen der Genauigkeit als Bahnparameter s die Kreuzkopfposition x_C herangezogen.

Zuvor gilt es jedoch die eingangs tabellarisch aufgelisteten Restriktionen des Kniehebelsystems in der Phasenebene $(\dot{s}^2, \ddot{s})$ darzustellen. Die Geschwindigkeitsbeschränkungen lauten

(4) $\dot{s}(s) \leq v_{C,\max}$,

(5) $\dot{s}(s) \leq v_{B,\max,C} = i_{KH}(s) v_{B,\max}$,

die reinen Beschleunigungsbeschränkungen ergeben sich zu

(6) $a_{C,\min} \leq \ddot{s}(s) \leq a_{C,\max}$,

(7) $$i_{KH}(s) a_{B,\min} + \frac{di_{KH}(s)}{ds} \frac{1}{i_{KH}(s)} \dot{s}^2 \leq \ddot{s}(s) \leq i_{KH}(s) a_{B,\max} + \frac{di_{KH}(s)}{ds} \frac{1}{i_{KH}(s)} \dot{s}^2$$

und die Beschleunigungsbeschränkung aufgrund der Antriebskraftbeschränkung zu

(8) $$\ddot{s}(s) \leq \left(\frac{m_B}{i_{KH}^2(s)} + m_C \right)^{-1} \left(F_{H,\max} + m_B \frac{1}{i_{KH}^3(s)} \frac{di_{KH}(s)}{ds} \dot{s}^2 \right).$$

Neben der Geschwindigkeit gilt es die benötigte Zeit in jedem Bahnpunkt zu berechnen. Näherungsweise kann der Zeitbedarf für das Durchschreiten eines äquidistanten Bahnstücks Δs_k angegeben werden mit

(9) $$\Delta t_k \approx \frac{\Delta s_k}{\bar{v}_k}.$$

Setzt man

(10) $$\bar{v}_k = \frac{\dot{s}_k + \dot{s}_{k-1}}{2}$$

in Gleichung 9 ein, so erhält man

(11) $$\Delta t_k \approx 2 \frac{s_k - s_{k-1}}{\dot{s}_k + \dot{s}_{k-1}}$$

Die Gesamtzeit für das Durchlaufen der Bewegungstrajektorie ergibt sich zu

(12) $$t_g = \sum_{k=1}^{N_B} \Delta t_k.$$

Für eine anschließende digitale Filterung oder für die Vorgabe der Sollwerte im Zuge einer Regelung ist es notwendig, die zeitoptimale Bewegungstrajektorie in zeitlich äquidistanten Abständen zu diskretisieren. Dies kann durch Interpolation der Bahnpunkte, -geschwindigkeiten und -beschleunigungen über der Zeit erfolgen.

In Fig. 3 sind die zeitoptimalen Geschwindigkeitstrajektorien des Kniehebelsystems mit den dazu korrespondierenden Beschleunigungen für das Formschließen und -öffnen mittels Planung in der Phasenebene dargestellt. Als Beschränkungen dienen die in der obigen Tabelle angeführten Werte. Beginnend bei 400 mm Plattenhub wird entlang der maximalen Beschleunigungstrajektorie $a_{B,\max}$ so lange verfahren, bis die Maximalgeschwindigkeit erreicht ist. Die Beschränkung der Kreuzkopfgeschwindigkeit spielt in diesem Beispiel für den Beschleunigungsvorgang nur eine untergeordnete Rolle. Ab 110 mm Plattenhub greift die Restriktion der maximalen Kreuzkopfgeschwindigkeit $v_{C,\max}$. Die bewegliche Aufspannplatte wird entsprechend

abgebremst. Ab 20 mm Plattenhub wird das Abbremsen auf die Endposition eingeleitet. Wie man erkennt, ist es aufgrund des stark ansteigenden Übersetzungsverhältnisses i_{KH} notwendig, dem Kreuzkopf eine minimale Beschleunigungsbeschränkung $a_{C,min}$ aufzuerlegen.

Beim Formöffnen wird aus der geschlossenen Kniehebelposition kurzzeitig mit der maximalen Kreuzkopfbeschleunigung $a_{C,max}$ auf die Trajektorie der maximale Kreuzkopfgeschwindigkeit $v_{C,max}$ beschleunigt und so lange entlang dieser verfahren, bis der Bremsvorgang mit der minimalen Plattenverzögerung $a_{B,min}$ eingeleitet wird. Aufgrund des niedrigen Übersetzungsverhältnisses i_{KH} in der geöffneten Kniehebellage kommt die Beschränkung der Kreuzkopfbeschleunigung nicht zum Tragen. Am Ende des Formöffnens befindet sich der Kniehebel in der vollständig geöffneten Position bei 400 mm Plattenhub.

Wie in Fig. 4 für das Formschließen ersichtlich, ist das Verfahren auch bei Beschränkung der Geschwindigkeit im Formschutzbereich anwendbar.

Als Vorteil der Planung von zeitoptimalen Bewegungstrajektorien in der Phasenebene ist die sehr genaue und garantiert optimale Lösung des Problems zu nennen. Der Rechenzeit- sowie der Speicherplatzbedarf für die Berechnung zeitoptimaler Bewegungstrajektorien mittels Planung in der Phasenebene sind die geringsten von allen in dieser Anmeldung beschriebenen Verfahren. Da keine Iterationen notwendig sind, kann unter der Voraussetzung einer sorgfältigen Implementierung des Verfahrens die Stabilität des Algorithmus gewährleistet werden.

Der Programmieraufwand ist im Vergleich zur dynamischen Programmierung deutlich geringer und im Vergleich zur linearen Programmierung ungefähr gleich anzusetzen, sofern Standardbibliotheken für den linearen Gleichungslöser verwendet werden. Ist aus verfahrenstechnischen Gründen ein Zwischenstopp notwendig, so kann dies ebenfalls mit dem skizzierten Schema berücksichtigt werden, in dem die Restriktionen an den notwendigen Positionen geändert werden.

Ist eine Ruckbegrenzung im Anschluss an die Erzeugung der zeitoptimalen Bewegungstrajektorien mittels Planung in der Phasenebene erwünscht, kann dies durch Filterung mittels Tiefpass erreicht werden.

Eine andere Möglichkeit besteht darin, die zeitoptimierten Bewegungstrajektorien mittels linearer Programmierung zu finden. Für eine möglichst einfache Implementierung der Trajektorienerzeugung mittels linearer Programmierung ist es vorteilhaft, fertig ausprogrammierte Gleichungslöser für lineare Programme zu verwenden. Nicht nur kommerzielle, sondern auch open-source Produkte verfügen über sehr leistungsfähige und robuste Gleichungslöser basierend auf dem Simplexalgorithmus und/oder dem Interior-Point Verfahren. Als Beispiel für kommerziell verfügbare Gleichungslöser sei die umfangreiche, von der Firma IBM zur Verfügung gestellte Optimierungsbibliothek (Optimization Solutions and Library, OSL) genannt.

Da beinahe alle linearen Gleichungslöser (außer der von MatLab) das Format MPS als quasi-Standard verwenden, kann, nachdem die Schnittstellen einmal programmiert sind, der lineare Gleichungslöser ausgetauscht werden, ohne das Hauptprogramm wesentlich verändern zu müssen.

Es gilt nun, das zeitoptimale Bewegungsproblem für das vorliegende Kniehebelsystem derart zu gestalten, dass es mit Hilfe der linearen Programmierung gelöst werden kann. Wie man aus den Überlegungen zur Erzeugung zeitoptimaler Bewegungstrajektorien mittels Planung in der Phasenebene schließt, kann die Dynamik eines mechanischen Manipulators, so auch eines Kniehebelsystems, lediglich durch eine Bahnkoordinate beschrieben werden. Als Bahnparameter s wird wiederum aus Genauigkeitsgründen die Kreuzkopfposition x_C herangezogen, wodurch sich die Restriktionsgrößen für die Kniehebelbewegung nach Gleichung 4 bis 8 ergeben.

Im nächsten Schritt gilt es, das zeitoptimale Bewegungsproblem zu diskretisieren. Der Kreuzkopfweg als Bahnparameter wird in N_B äquidistante Teilstücke $\Delta s_k, k \in \{1,...,N_B\}$ aufgeteilt. Die Beschleunigung ergibt sich mit Hilfe der Kettenregel zu

$$(13) \quad \ddot{s}(s_k) = \frac{d\dot{s}}{ds}\frac{ds}{dt} = \frac{1}{2}\frac{d}{ds}(\dot{s}^2).$$

Die Berechnung der Differenzenquotienten zur Bestimmung der diskretisierten Restriktionen erfolgt unter der Annahme konstanter Beschleunigungen $\ddot{s} = \text{const.}$ innerhalb zweier Stützstellen:

$$(14) \quad \ddot{s}(s_k) = \ddot{s}_k \;\ddot{O}\; \frac{\dot{s}_{k+1} - \dot{s}_k}{\Delta t_k} = \frac{\Delta \dot{s}_k}{\Delta t_k}.$$

Mit

$$(15) \quad \Delta t_k = t_{k+1} - t_k \;\ddot{O}\; \frac{\Delta s_k}{\bar{v}_k}$$

und der gemittelten Geschwindigkeit

$$(16) \quad \bar{v}_k = \frac{\dot{s}_{k+1} + \dot{s}_k}{2}$$

ergibt sich

$$(17) \quad \Delta t_k \;\ddot{O}\; \frac{s_{k+1} - s_k}{\dot{s}_{k+1} + \dot{s}_k} = 2\frac{\Delta s_k}{\Delta \dot{s}_k}.$$

Einsetzen von Gleichung 17 in Gleichung 14 liefert

$$(18) \quad \ddot{s} \;\ddot{O}\; \frac{1}{2}\frac{\dot{s}_{k+1}^2 - \dot{s}_k^2}{s_{k+1} - s_k} = \frac{1}{2}\frac{\Delta \dot{s}_k^2}{\Delta s_k}.$$

Man erkennt, dass es zu einer linearen Abhängigkeit der Beschleunigungen von $\dot{s}^2$ kommt. Die Restriktionen für die reinen Beschleunigungsbeschränkungen nach Gleichung 4 bis 7 ergeben sich für alle $k \in \{1,...,N_B\}$ mit

$$(19) \quad \Delta i_{KH,k} = i_{KH}(s_{k+1}) - i_{KH}(s_k)$$

zu

$$(20) \quad \ddot{s}(s_k) \;\ddot{U}\; a_{C,\max},$$

$$(21) \quad -\ddot{s}(s_k) \;\ddot{U}\; a_{C,\max},$$

$$(22) \quad \ddot{s}(s_k) - \frac{\Delta i_{KH,k}}{\Delta s_k}\frac{1}{i_{KH}(s_k)}\dot{s}^2(s_k) \;\ddot{U}\; i_{KH}(s_k) a_{B,\max},$$

$$(23) \quad -\left(\ddot{s}(s_k) - \frac{\Delta i_{KH,k}}{\Delta s_k}\frac{1}{i_{KH}(s_k)}\dot{s}^2(s_k)\right) \;\ddot{U}\; i_{KH}(s_k) a_{B,\min}.$$

Die Beschleunigungsbeschränkung aufgrund der Antriebskraftbeschränkung nach Gleichung 8 folgt unter Vernachlässigung der Kreuzkopfmasse m_C zu

$$(24) \quad \ddot{s}(s_k) - \frac{\Delta i_{KH,k}}{\Delta s_k}\frac{1}{i_{KH}(s_k)}\dot{s}^2(s_k) \;\ddot{U}\; \frac{i_{KH}^2(s_k) F_{H,\max}}{m_B}.$$

Die Kreuzkopfmasse m_C wird vernachlässigt, um die Gleichungsstruktur der reinen Beschleunigungsbeschränkung (Gleichung 22) für die Beschleunigungsbeschränkung infolge der Antriebs-

kraftbeschränkung (Gleichung 24) zu wahren. Da in der Praxis meist die im Verhältnis zur Plattenmasse m_B sehr geringe Kreuzkopfmasse m_C aufgrund der hohen Antriebskräfte F_H vernachlässigt werden kann, ist durch diesen Ansatz eine wesentliche Reduktion der Anzahl von Nebenbedingungen möglich.

Durch Quadrieren der Geschwindigkeitsrestriktionen erhält man ebenfalls in $\dot{s}^2$ lineare Abhängigkeiten

(25) $\dot{s}^2(s_k) \leq v_{C,\max}^2$,

(26) $\dot{s}^2(s_k) \leq v_{B,\max|C}^2 = (i_{KH}(s_k) v_{B,\max})^2$.

Um dem linearen Programm zu genügen, ist daher als Entscheidungsvariable die quadratische Bahngeschwindigkeit

(27) $x_k = \dot{s}_k^2 \quad k \in \{1,\ldots,N_B+1\}$

zu wählen.

Die zeitoptimale Bewegung stellt sich ein, wenn die Geschwindigkeit in jedem Bahnpunkt maximiert wird. Positive Bahngeschwindigkeiten vorausgesetzt, gilt dies auch für die Quadrate der Bahngeschwindigkeit. Da die meisten Gleichungslöser für lineare Programme eine zu minimierende Kostenfunktion voraussetzen, wird letztendlich die Kostenfunktion formuliert in der Form

(28) $J = -\sum_{k=1}^{N_B-1} x_k = -\sum_{k=1}^{N_B+1} \dot{s}_k^2$.

Wird eine Ruckbegrenzung

(29) $r_{C,\min} \leq \dddot{s} \leq r_{C,\max}$

gefordert, müssen die Nebenbedingungen des linearen Programms erweitert werden. Trifft man erneut die Annahme konstanter Beschleunigungen $\ddot{s} = \text{const.}$ innerhalb zweier Stützstellen, ergibt sich der Ruck in einem Bahnpunkt durch Differenzenbildung zu

(30) $\dddot{s}(s_k) = \dddot{s} \approx \frac{\ddot{s}_{k+1}^2 - \ddot{s}_k^2}{t_{k+1} - t_k}$.

Durch Einsetzen von Gleichung 17 und 18 in 30 folgt

(31) $\dddot{s} \approx \ddot{s}_k \frac{1}{2\Delta s_k} \left(\frac{\Delta \dot{s}_{k+1}^2}{\Delta s_{k+1}} - \frac{\Delta \dot{s}_k^2}{\Delta s_k} \right)$.

Man erkennt, dass der Ruck in einem Bahnpunkt nicht nur von $\dot{s}^2$, sondern auch von $\dot{s}$ abhängt. Ein Aufstellen bzw. Lösen des linearen Programms in $\dot{s}^2$ ist deshalb nicht mehr möglich. Um dennoch das zeitoptimale Bewegungsproblem mittels linearer Programmierung zu realisieren, wird eine iterative Lösung notwendig. Die Bahngeschwindigkeit der j-ten Iterationsstufe $\dot{s}_k^j$ wird durch das Ergebnis der (j - 1)-ten Iteration

(32) $\hat{\dot{s}}_k^j = \dot{s}_k^{j-1}$

approximiert. Man erhält dann für den Ruck in einen Bahnpunkt

(33) $\dddot{s}^j(s_k) \approx \ddot{s}_k^{j-1} \frac{1}{2\Delta s_k} \left(\frac{\Delta \dot{s}_{k+1}^2}{\Delta s_{k+1}} - \frac{\Delta \dot{s}_k^2}{\Delta s_k} \right)$,

wobei die geschätzten Bahngeschwindigkeiten für den Start der Iteration

(34) $\hat{\dot{s}}_k^2 = \dot{s}_k^1$

durch Lösung des linearen Programms ohne Ruckbeschränkung ermittelt werden können. Die Ruckbeschränkungen für das Kniehebelsystem ergeben sich für die j-te Iterationsstufe zu

(35) $\dddot{s}^j(s_k) \leq \dddot{r}_{C,\max}$,

(36) $-\dddot{s}^j(s_k) \leq -\dddot{r}_{C,\min}$.

Vorsicht ist bei der Wahl der Randbedingungen des zeitoptimalen Bewegungsproblems mit Ruckbeschränkung geboten. Die Randbedingungen

(37) $\dot{s}(s_1) = \dot{s}_1 = 0$,

(38) $\ddot{s}(s_1) = \ddot{s}_1 = 0$

sowie

(39) $\dot{s}(s_f) = \dot{s}_f = 0$,

(40) $\ddot{s}(s_f) = \ddot{s}_f = 0$

sind nicht realisierbar, da es nach Gleichung 17 zum Durchschreiten dieser Bahnintervalle unendlich langer Zeit bedarf. Abhilfe schafft die Vorgabe von Randbedingungen ungleich Null und, bei Bedarf der exakten Randwerte, eine manuelle Berechnung des ersten bzw. des letzten Schrittes. Des Weiteren ist die Konvergenz des Verfahrens aufgrund der notwendigen Iteration nicht gewährleistet. Aus diesem Grund dürfen die geschätzten Anfangsbahngeschwindigkeiten $\dot{s}_k^1, k \in \{1,\ldots,N_B+1\}$ nicht zu stark von den tatsächlichen abweichen.

Das lineare Programm kann folgendermaßen formuliert werden:

Maximiere die Gütefunktion (Zielfunktion)

(41) $J = \mathbf{c}^T\mathbf{x}$

unter den Nebenbedingungen

(42) $\mathbf{Fx} \leq \mathbf{g}$,

(43) $\mathbf{x} > \mathbf{0}$

im Hinblick auf die Entscheidungsvariablen $\mathbf{x} \in \Re^n$. Es gilt $\mathbf{c} \in \Re^n$, $\mathbf{g} \in \Re^m$ und $\mathbf{F} \in \Re^{m \times n}$. Für eine programmtechnische Umsetzung gilt es, die geforderten Vektoren $\mathbf{c}^T$ und $\mathbf{g}$ sowie die Matrix $\mathbf{F}$ des linearen Programms (Gleichungen 41 bis 43) zu besetzen.

Wie bereits erwähnt, setzen die meisten Gleichungslöser zur Lösung linearer Programme eine zu minimierende Kostenfunktion voraus, weswegen bei der Wahl des Entscheidungsvektors zu

(44) $\mathbf{x} = [\dot{s}_1^2, \dot{s}_2^2, \ldots, \dot{s}_{N_B+1}^2]^T$

der Vektor zur Erstellung der Zielfunktion

(45) $\mathbf{c}^T = [-1,-1,\ldots,-1]$

lauten muss. Aus Gleichung 25 und 26 ist ersichtlich, dass die schärfsten Geschwindigkeitsrestriktionen

$$(46)\quad v_{\max}^2 = \min\left\{v_{B,\max|C}^2, v_{C,\max}^2\right\}$$

a priori ermittelt werden können. Dies ist ebenfalls für die rechte Seite der maximalen Beschleunigungsrestriktion aufgrund der Beschleunigung der beweglichen Aufspannplatte (Gleichung 22 und 23) sowie der maximalen hydraulischen Kraft (Gleichung 24) möglich:

$$(47)\quad \tilde{a}_{\max}(s_k) = \min\left\{ i_{KH}(s_k) a_{B,\max}, \frac{i_{KH}^2(s_k) F_{H,\max}}{m_B} \right\}.$$

Da für das Abbremsen keine Beschränkung der hydraulischen Kraft notwendig ist, gilt für die rechte Seite der Minimalbeschleunigungsrestriktion

$$(48)\quad \tilde{a}_{\min}(s_k) = i_{KH}(s_k) a_{B,\min}.$$

Die Beschleunigungsrestriktionen des Kreuzkopfs müssen aufgrund des fehlenden verallgemeinerten Zentrifugalterms separat angeschrieben werden. Somit ergibt sich der Vektor für die einzuhaltenden Nebenbedingungen zu

$$(49)\quad \mathbf{g} = [\mathbf{g}_v^T, \mathbf{g}_{a_{C,\max}}^T, -\mathbf{g}_{a_{C,\min}}^T, \mathbf{g}_{\tilde{a}_{\max}}^T, -\mathbf{g}_{\tilde{a}_{\min}}^T, \mathbf{g}_{r_{\max}}^T, -\mathbf{g}_{r_{\min}}^T]^T.$$

mit

$$\begin{aligned}
&\mathbf{g}_v = [0, v_{\max}^2(s_2), \ldots, v_{\max}^2(s_{N_B}), 0]^T,\\
&\mathbf{g}_{a_{C,\max}} = [a_{C,\max}, \ldots, a_{C,\max}]^T,\\
&\mathbf{g}_{a_{C,\min}} = [a_{C,\min}, \ldots, a_{C,\min}]^T,\\
(50)\quad &\mathbf{g}_{\tilde{a}_{\max}} = [\tilde{a}_{\max}(s_1), \ldots, \tilde{a}_{\max}(s_{N_B+1})]^T,\\
&\mathbf{g}_{\tilde{a}_{\min}} = [\tilde{a}_{\min}(s_1), \ldots, \tilde{a}_{\min}(s_{N_B+1})]^T,\\
&\mathbf{g}_{r,\max} = [r_{B,\max}, \ldots, r_{B,\max}]^T,\\
&\mathbf{g}_{r,\min} = [r_{B,\min}, \ldots, r_{B,\min}]^T.
\end{aligned}$$

Die Matrix **F** wird aus den Matrizen der Nebenbedingungen für die Geschwindigkeiten $\mathbf{F}_v$, den Beschleunigungen $\mathbf{F}_a$ und $\mathbf{F}_{\tilde{a}}$ sowie für den Ruck $\mathbf{F}_r$ zusammengesetzt zu

$$\mathbf{F} = [\mathbf{F}_v^T,\ \mathbf{F}_a^T,\ -\mathbf{F}_a^T,\ \mathbf{F}_{\tilde{a}}^T,\ -\mathbf{F}_{\tilde{a}}^T,\ \mathbf{F}_r^T,\ -\mathbf{F}_r^T]^T.$$

Die Matrix für die Geschwindigkeitsrestriktionen ergibt sich zu

$$(51)\quad \mathbf{F}_v = \begin{bmatrix} 1 & & & \\ & 1 & & \\ & & \ddots & \\ & & & 1 \end{bmatrix},$$

die Matrix für die reinen Beschleunigungsrestriktionen des Kreuzkopfs zu

$$(52)\quad \mathbf{F}_a = \frac{1}{2\Delta s}\begin{bmatrix} -1 & 1 & & & \\ & -1 & 1 & & \\ & & \ddots & \ddots & \\ & & & -1 & 1 \end{bmatrix},$$

die Matrix der allgemeinen Beschleunigungsrestriktionen mit den verallgemeinerten Zentrifugaltermen zu

$$(53)\quad \mathbf{F}_{\tilde{a}} = \mathbf{F}_a - \frac{1}{\Delta s}\begin{bmatrix} \frac{\Delta i_{KH,1}}{i_{KH}(s_1)} & & \\ & \ddots & \\ & & \frac{\Delta i_{KH,N_B}}{i_{KH}(s_{N_B})} \end{bmatrix}$$

sowie die Matrix für den Ruck zu

$$(54)\quad \mathbf{F}_r = \frac{1}{2\Delta s^2}\begin{bmatrix} 1 & -2 & 1 & & & \\ & 1 & -2 & 1 & & \\ & & \ddots & \ddots & \ddots & \\ & & & 1 & -2 & 1 \end{bmatrix}.$$

Da der Weg in äquidistante Teilstücke unterteilt wird, gilt

(55) $\Delta s_k = \Delta s = \text{const} \forall k \in \{1,...,N_B\}$.

Findet keine Berücksichtigung der Ruckbegrenzung statt, so fallen $[\mathbf{F}_r^T, -\mathbf{F}_r^T]^T$ in der Matrix $\mathbf{F}$ und $[\mathbf{g}_{r,\max}^T, -\mathbf{g}_{r,\min}^T]^T$ Vektor $\mathbf{g}$ weg.

Die Berechnung zeitoptimaler Bewegungstrajektorien mit Berücksichtigung der Ruckbeschränkung erfolgt mit den in obiger Tabelle angeführten Restriktionswerten bei einem Plattenhub von 400 mm. Die Ergebnisse für das Formöffnen und -schließen sind in Fig. 5 dargestellt. Wie man erkennen kann, kommt es aufgrund der Ruckbeschränkung des Kreuzkopfs r_C zu keiner sprunghaften Änderung der Beschleunigung. Als Folge besitzt der Geschwindigkeitsverlauf abgerundete Übergänge.

Die mit Hilfe der linearen Programmierung berechneten zeitoptimalen Bewegungstrajektorien ohne Ruckbeschränkung sind, wie nicht anders zu erwarten, identisch mit den Bewegungstrajektorien durch Planung in der Phasenebene.

Ein wesentlicher Vorteil des Verfahren ist, dass ein zeitoptimales Bewegungsproblem mit Berücksichtigung der Ruckbegrenzung gelöst werden kann. Der Implementierungsaufwand hält sich im Vergleich zur dynamischen Programmierung bei Verwendung von fertig ausprogrammierten linearen Gleichungslösern in Grenzen. Es ist lediglich die Aufbereitung der Matrizen des linearen Programms und die Auswertung der Ergebnisse erforderlich. Die Rechenzeiten sind zwar gegenüber linearen Programmen ohne Berücksichtung der Ruckbegrenzung deutlich höher, bei einer geeigneten Wahl der Stützstellenanzahl jedoch vertretbar. In ersterem Fall ist die Lösung exakt, in zweiterem Fall konvergieren die Lösungen schon nach wenigen Iterationsschritten. Das Verfahren kann somit als sehr robust bezeichnet werden. Durch vorteilhaftes Programmieren kann der Speicheraufwand in Grenzen gehalten werden.

Wie bereits erwähnt erlaubt der Algorithmus zur Erzeugung zeitoptimaler Bewegungstrajektorien mittels Planung in der Phasenebene keine Berücksichtigung der Ruckbeschränkung. Ferner kann es bei der Berechnung mit Hilfe der linearen Programmierung für den praktischen Einsatz zu unzulässig hohen Rechenzeiten kommen, wenn die Ruckbeschränkung berücksichtigt wird. Eine Ruckbegrenzung ist für einen ruhigen und schonenden Lauf der Kniehebelspritzgießmaschine jedoch vorteilhaft. Eine Möglichkeit, die Beschleunigungsänderung in Grenzen zu halten ist, die bereits ohne Ruckbegrenzung ermittelten zeitoptimalen Bewegungstrajektorien mit Hilfe eines Tiefpasses zu filtern. Die sich ergebenden Bewegungstrajektorien sind im strengen Sinn zwar nicht zeitoptimal, da es zu keiner exakten Begrenzung des Ruckes kommt, dennoch sind sie für den praktischen Einsatz hinreichend genau.

Die obigen Überlegungen besitzen ihren Gültigkeitsbereich in der Bewegungsphase der Schließbewegung, d.h. vor dem Berühren bzw. nach dem Abheben der Werkzeughälften. Es ist aber auch möglich, die Trajektorienplanung und die Regelung auf die gesamten Schließ- und Öffnungsbewegung, also auch auf die Schließkraftaufbau- und -abbauphase, gekennzeichnet durch $x_B \leq x_{B,1}$, auszudehnen. Da dadurch auf eine Umschaltung zwischen Steuerung und Regelung verzichtet werden kann, erhält man ein einheitliches Regelkonzept für die Kniehebelschließeinheit.

Neben den fixen Restriktionsgrößen für die Bewegungsphase, die der obigen Tabelle zu entnehmen sind, müssen die Restriktionsgrößen für den Schließkraftbereich ($x_B \leq x_{B,1}$) definiert werden. Eine schematische Darstellung der zusätzlichen Restriktionsgrößen für den Schließkraftbereich ist in Fig. 6 enthalten. Es ist anzumerken, dass die Geschwindigkeitsverläufe für $v_{C,opt}$ aufgrund der Beschränkung der Plattengeschwindigkeit nicht dem tatsächlichen Verlauf entsprechen.

In Fig. 6 ist ersichtlich, dass die bewegliche Aufspannplatte beim Formschließen vor der Berührung der Werkzeughälften abgebremst werden muss, damit ein annähernd stoßfreier Übergang zum Schließkraftaufbau stattfindet. Da sich herausgestellt hat, dass in der Praxis die Plattenberührung nicht genau erfolgt, ist es von Vorteil, zusätzlich zum Formschutzbereich, der bei $x_{C,f}$ beginnt, ein Intervall $\Delta x_{C,t}$ vor dem erwarteten Plattenberührungspunkt $x_{C,1}$ mit konstanter Plattenberührungsgeschwindigkeit $v_{B,t}$ zu definieren. Weiters kann eine separate Beschleunigungsbeschränkung $a_{C,FSK}$ für den Kreuzkopf vorgegeben werden. Für das Formöffnen ist es von Vorteil, die Geschwindigkeit des Kreuzkopfs in der Schließkraftabbauphase auf $v_{C,op}$ zu beschränken, um das Werkzeug und das Spritzgussteil nicht zu beschädigen. Diese Geschwindigkeitsbeschränkung kann jedoch schon um den Wert $\Delta x_{C,l}$ vor dem angenommenen Abheben der Werkzeughälften $x_{C,1}$, aufgehoben werden. In der folgenden Tabelle sind die zusätzlichen Restriktionsgrößen zusammen mit den Werten, die für die Erstellung der Fig. 7 herangezogen wurden, zusammengefasst. Da sich die Trajektorienplanung in der Phasenebene als das vorteilhafteste Verfahren zur Implementierung in die Steuerung einer Spritzgießmaschine erweist, wird die Erweiterung der Trajektorienplanung um den Schließkraftbereich ausschließlich für dieses Trajektorienplanungsverfahren durchgeführt. Die (ungefilterten) Ergebnisse sind der Fig. 7 zu entnehmen.

Restriktionsgrößen	Formschließen	Formöffnen	Einheit
$\Delta x_{C,t}$	10	-	mm
$\Delta x_{C,l}$	-	3	mm
$v_{B,t}$	0.01	-	m/s
$v_{C,op}$	-	-0.7	m/s
$a_{C,FSK}$	10	-10	m/s^2

Die Fig. 8 zeigt eine Spritzgießmaschine 1 mit einem Kniehebelmechanismus 2, dessen Kreuzkopf 3 von einer (elektro)hydraulischen Antriebseinheit 4 angetrieben ist. 1a bezeichnet die bewegliche, 1b die feste Formaufspannplatte.

Eine elektronische Datenverarbeitungsanlage 5 mit einem Bildschirm 6 ist zur Steuerung der Spritzgießmaschine 1 vorgesehen. Selbstverständlich führen in der Praxis zahlreiche Sensor- und Aktorleitungen von dieser Steuerung zur Spritzgießmaschine und umgekehrt. Die hier dargestellten Leitungen sind nur eine Auswahl davon und jene, die für die vorliegende Erfindung relevant sind.

Am Kniehebelmechanismus 2 der Spritzgießmaschine 1 ist ein Wegsensor 7 für die Kreuzkopfposition x_C angeordnet. Kraft- bzw. Drucksensoren 8 liefert ein Kraftsignal F_H an die Steuerung 5. Beim Öffnen und Schließen der Form steuert die Steuerung 5 über ein Stellsignal u ein Hydraulikteil 9 an. Damit wird die von der hydraulischen Antriebsvorrichtung 4 aufgebrachte Kraft F_H auf den Kreuzkopf 3 festgelegt.

Das Steuersignal u stammt aus einem Trajektorienfolgeregler 10, der wie die übrigen Komponenten der Fig. 9 in der Steuerung 5 implementiert ist. Dem Trajektorienfolgeregler 10 werden neben den aktuellen Istwerten für die Kreuzkopfposition x_C und den Drücken der Schließzylinderkammern p_A und p_B auch Daten für die abzufahrende zeitoptimale Trajektorie zugeführt, und zwar aus einem Speicher 11. Zuvor werden diese zeitoptimierten Trajektorien in der Berechungseinheit 12 berechnet, die mit der Ein-/Ausgabe-Einheit (hier ein Touch-Screen) in Verbindung steht.

In einem Expertenmodus zeigt dieser Bildschirm jene Restriktionsgrößen an, die bei der zeitoptimierten Bewegungstrajektorienberechnung zu berücksichtigen sind. Weitere Parameter wie die Masse der Platte m_B und des Kreuzkopfes m_C sowie der Plattenhub $x_{B,max}$ können ebenfalls angezeigt werden. All diese Werte sind im Expertenmodus über den Touch-Screen im Wesentlichen frei veränderbar. Es können aber Plausibilitätskontrollen vorgenommen werden, um sinnlose oder offensichtlich maschinenbelastende Werte auch für den Experten auszuschließen.

Die Fig. 11 zeigt die Bildschirmmaske für den Anwendermodus. Beim dargestellten Ausführungsbeispiel kann der Anwender nur zwei Größen, nämlich die maximale Plattengeschwindigkeit v_B und den Plattenhub $x_{B,max}$ verändern. Alle anderen Größen sind einer vorherigen Festlegung im Expertenmodus vorbehalten.

Im Wesentlichen fix vorprogrammiert, also auch nicht im Expertenmodus veränderbar, sind die Kreuzkopfmasse und das positionsabhängige Übersetzungsverhältnis i_{KH}, weil sich diese Größen für eine Maschine im Wesentlichen nicht ändern.

Selbstverständlich können auch andere Eingabe als Touch-Screen-Bildschirme verwendet werden, beispielsweise eine Tastatur oder eine Maus.

Insgesamt ist die Erfindung nicht auf die dargestellten Ausführungsbeispiele beschränkt, beispielsweise können andere Optimierungsverfahren als die ausführlich diskutierte Planung der Trajektorien in der Phasenebene und die ausführlich diskutierte lineare Programmierung eingesetzt werden.

Die Erfindung ist selbstverständlich nicht auf die dargestellten Ausführungsbeispiele beschränkt. Zahlreiche Abwandlungen und Alternativen im Rahmen der Patentansprüche sind durchaus denkbar und möglich. Es ist auch zu erwähnen, dass die Begriffe „Kniehebelmechanismus“ und „Kreuzkopf“ sehr weit zu sehen sind. Im Rahmen der vorliegenden Anmeldung sind darunter allgemein mechanische Systeme zu verstehen, die ein variables Übersetzungsverhältnis aufweisen. Der Kreuzkopf wird typischerweise linear bewegt. Es sind aber auch rotatorische

Bewegungen möglich, beispielsweise ein Schubkurbelantrieb. Dort entspricht dann der rotatorisch bewegte Gelenkpunkt der Schubkurbel dem Kreuzkopf.

Patentansprüche:

1. Verfahren zum Steuern und/oder Regeln einer Spritzgießmaschine, deren bewegliche Formaufspannplatte von einem Kniehebelmechanismus bewegt wird, dessen Kreuzkopf von einer Antriebsvorrichtung antreibbar ist, *dadurch gekennzeichnet*, dass das Verfahren folgende Schritte umfasst:
   (i) Zahlenmäßiges Festlegen von Restriktionsgrößen für die Bewegung der beweglichen Formaufspannplatte, vorzugsweise von deren maximaler Geschwindigkeit $v_{B,max}$ und deren maximaler Beschleunigung $a_{B,max}$.
   (ii) Zahlenmäßiges Festlegen von Restriktionsgrößen für die Bewegung des Kreuzkopfes, vorzugsweise von dessen maximaler Geschwindigkeit $v_{c,max}$ und dessen maximale Beschleunigung $a_{c,max}$.
   (iii) Numerisches Berechnen einer zeitoptimierten Bewegungstrajektorie für den Kreuzkopf bzw. die bewegliche Formaufspannplatte mittels einer elektronischen Datenverarbeitungsanlage unter Berücksichtigung der vorher festgelegten Restriktionsgrößen für die bewegliche Formaufspannplatte einerseits und den Kreuzkopf andererseits,
   (iv) Abspeichern der berechneten Bewegungstrajektorie in einem Speicher der elektronischen Datenverarbeitungsanlage.
   (v) Steuern und/oder Regeln der Antriebsvorrichtung der Spritzgießmaschine derart, dass sich der Kreuzkopf bzw. die bewegliche Formaufspannplatte in aufeinander folgenden Zyklen gemäß der gespeicherten Bewegungstrajektorie bewegt.

2. Verfahren nach Anspruch 1, *dadurch gekennzeichnet*, dass die Restriktionsgrößen für die bewegliche Formaufspannplatte auch deren maximalen Ruck r_{Bmax} umfassen.

3. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 oder 2, *dadurch gekennzeichnet*, dass neben den kinematischen Restriktionsgrößen für die Bewegung des Kreuzkopfes und der beweglichen Formaufspannplatte der Plattenhub $x_{B,max}$ der beweglichen Formaufspannplatte zahlenmäßig festgelegt und bei der numerischen Berechnung der zeitoptimierten Bewegungstrajektorie berücksichtigt wird.

4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, *dadurch gekennzeichnet*, dass neben den kinematischen Restriktionsgrößen für die Bewegung des Kreuzkopfes und der der beweglichen Formaufspannplatte die von der Antriebsvorrichtung maximal bereitstellbare Kraft $F_{H,max}$ als Restriktionsgröße zahlenmäßig festgelegt und bei der numerischen Berechnung der zeitoptimierten Bewegungstrajektorie berücksichtigt wird.

5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, *dadurch gekennzeichnet*, dass zumindest ein Teil der Restriktionsgrößen für den Kreuzkopf oder die bewegliche Formaufspannplatte positionsabhängig als Funktion der Position des Kreuzkopfes oder der beweglichen Formaufspannplatte vorgegeben wird.

6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, *dadurch gekennzeichnet*, dass für die Schließbewegung einerseits und die Öffnungsbewegung andererseits unterschiedliche Restriktionsgrößen vorgebbar sind.

7. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 6, *dadurch gekennzeichnet*, dass die zahlenmäßige Festlegung der Restriktionsgrößen in folgenden Physikalischen Einheiten erfolgt:
   $x_{B,max}$ ... [Weg]
   $v_{B,max}$; $v_{C,max}$ ... [Weg] / [Zeit]
   $a_{B,max}$; $a_{C,max}$ ... [Weg] / [Zeit^2]

$r_{B,max}$ ... [Weg] / [Zeit^3]
$F_{H,max}$ ... [Masse] x [Weg] / [Zeit^2]

8. Verfahren nach Anspruch 7, *dadurch gekennzeichnet*, dass die zahlenmäßige Festlegung der Restriktionsgrößen in Si-Einheiten erfolgt.

9. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 8, *dadurch gekennzeichnet*, dass die zahlenmäßige Eingabe von wenigstens einem Teil, vorzugsweise von allen Restriktionsgrößen zumindest in einem Expertenmodus über eine Eingabevorrichtung der elektronischen Datenverarbeitungsanlage erfolgt, wobei die Zahlenwerte als solche auf einem Bildschirm angezeigt und anschließend abgespeichert werden.

10. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 9, *dadurch gekennzeichnet*, dass in einem Anwendermodus lediglich ein Teil der Restriktionsgrößen vom Benutzer veränderbar ist, während die übrigen Restriktionsgrößen vorab zahlenmäßig gespeichert sind.

11. Verfahren nach Anspruch 10, *dadurch gekennzeichnet*, dass die veränderbaren Restriktionsgrößen den maximalen Plattenhub $x_{B,max}$ und die maximale Plattengeschwindigkeit $v_{B,max}$, und vorzugsweise nur diese, umfassen.

12. Verfahren nach Anspruch 10 oder 11, *dadurch gekennzeichnet*, dass ein Teil der veränderbaren Restriktionsgrößen durch Auswahl aus einer auf einem Bildschirm beschränkt angebotenen Menge an möglichen, vorzugsweise graphisch und/oder verbal aufbereiteten, angezeigten Werten festgelegt wird.

13. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 12, *dadurch gekennzeichnet*, dass die Berechnung der zeitoptimierten Bewegungstrajektorie in derselben elektronischen Datenverarbeitungsanlage der Spritzgießmaschine erfolgt, die für deren Steuerung bzw. Regelung vorgesehen ist.

14. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 13, *dadurch gekennzeichnet*, dass die Berechnung der Bewegungstrajektorie durch Lösen der in der Kreuzkopfkoordinate als Bahnkoordinate formulierten Bewegungsgleichung

$$\left(\frac{m_B}{i_{KH}^2} + m_C\right)\ddot{x}_C - m_B \frac{1}{i_{KH}^3}\frac{di_{KH}}{dx_C}\dot{x}_C^2 \cong F_H$$

für das aus Kreuzkopf und bewegbarer Formaufspannplatte bestehende Gesamtsystem erfolgt, wobei die Restriktionsgrößen in der Bahnkoordinate formuliert und berücksichtigt werden (mit m_B Plattenmasse, m_C Kreuzkopfmasse, $i_{KH} = v_C/v_B$ Kniehebel-Übersetzungsverhältnis, FH Antriebskraft).

15. Verfahren nach Anspruch 14, *dadurch gekennzeichnet*, dass das Lösen der Bewegungsgleichung in der Phasenebene $(x_C, \dot{x}_C)$ erfolgt.

16. Verfahren nach Anspruch 14, *dadurch gekennzeichnet*, dass das Lösen der Bewegungsgleichung durch lineare Programmierung erfolgt.

17. Datenträger, *dadurch gekennzeichnet*, dass auf ihm ein Programm zur Ausführung des in einem der Ansprüche 1 bis 16 beanspruchten Verfahrens gespeichert ist.

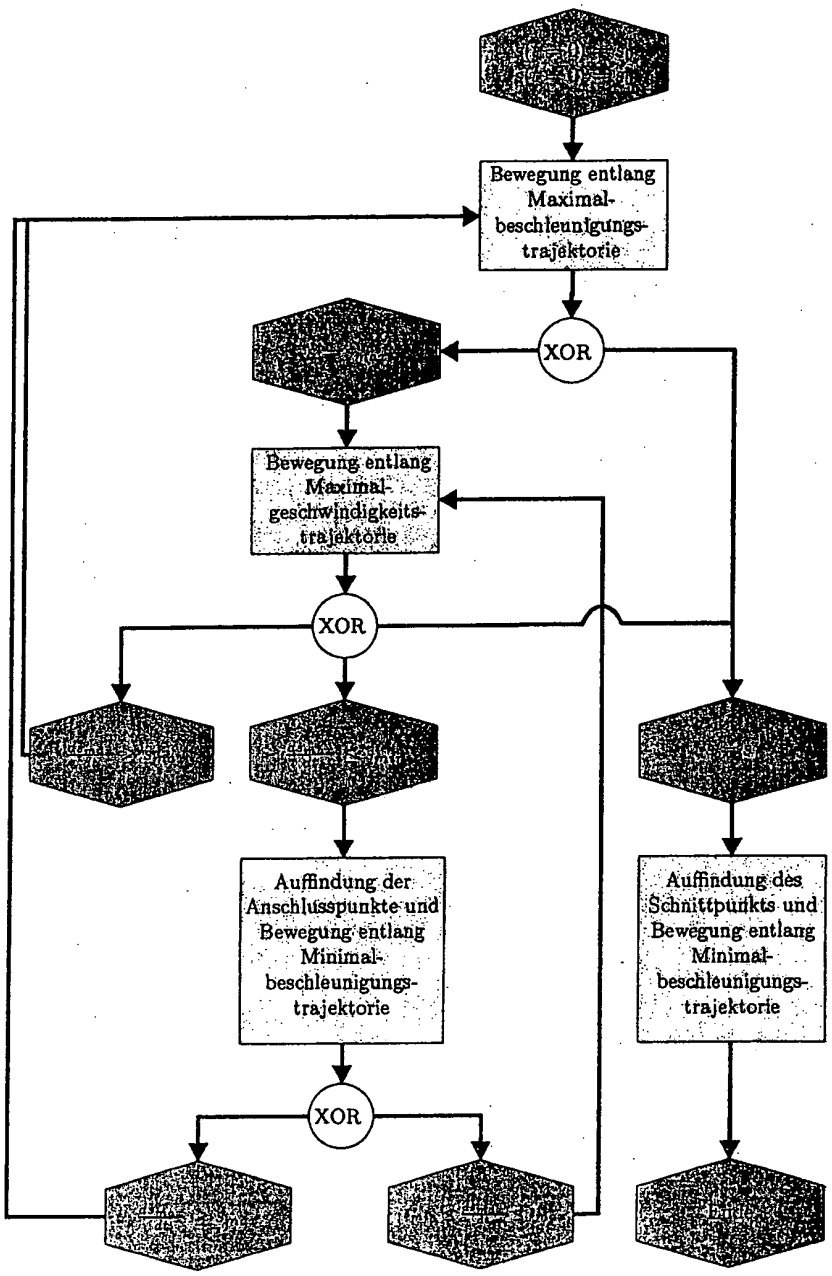
18. Spritzgießmaschine mit einer beweglichen Formaufspannplatte, die von einem Kniehebelmechanismus angetrieben ist, dessen Kreuzkopf von einer Antriebsvorrichtung antreibbar ist, *gekennzeichnet durch* eine elektronische Datenverarbeitungsanlage, die zur Durchführung des Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 16 ausgebildet und programmiert ist.

19. Spritzgießmaschine mit einer beweglichen Formaufspannplatte, die von einem Kniehebelmechanismus angetrieben ist, dessen Kreuzkopf von einer Antriebsvorrichtung antreibbar ist, *gekennzeichnet durch* eine elektronische Datenverarbeitungsanlage, in deren Arbeitsspeicher ein Programm zur Ausführung des Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 16.

Hiezu 10 Blatt Zeichnungen

Int. Cl.[8]: ***B29C 45/76*** (2006.01)
G05B 19/19 (2006.01)

Fig. 1



Int. Cl.[8]: ***B29C 45/76*** (2006.01)
G05B 19/19 (2006.01)

Fig. 2

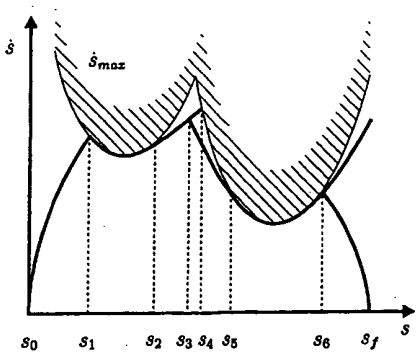
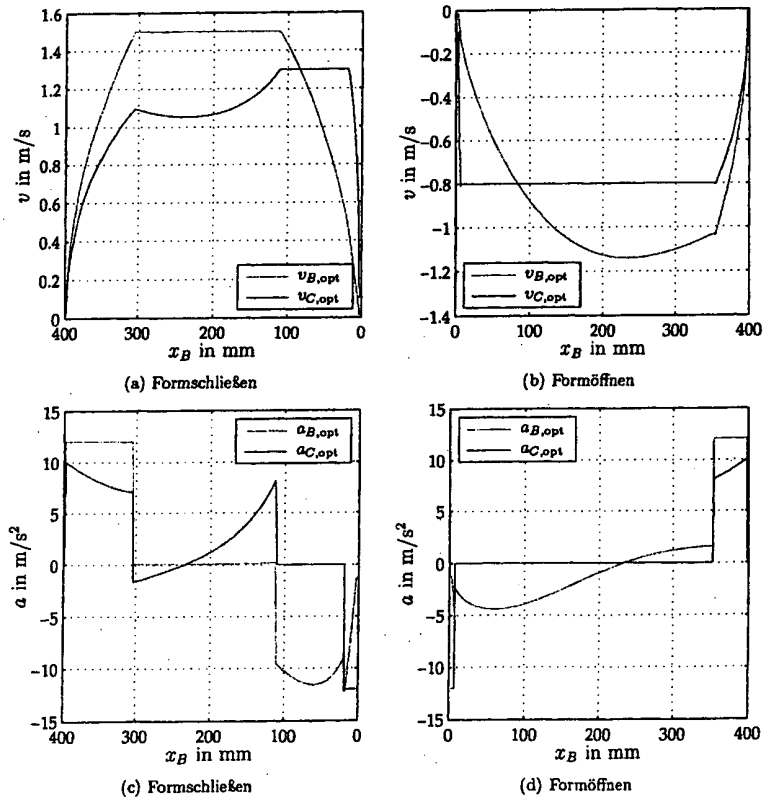


Fig. 3



(a) Formschließen

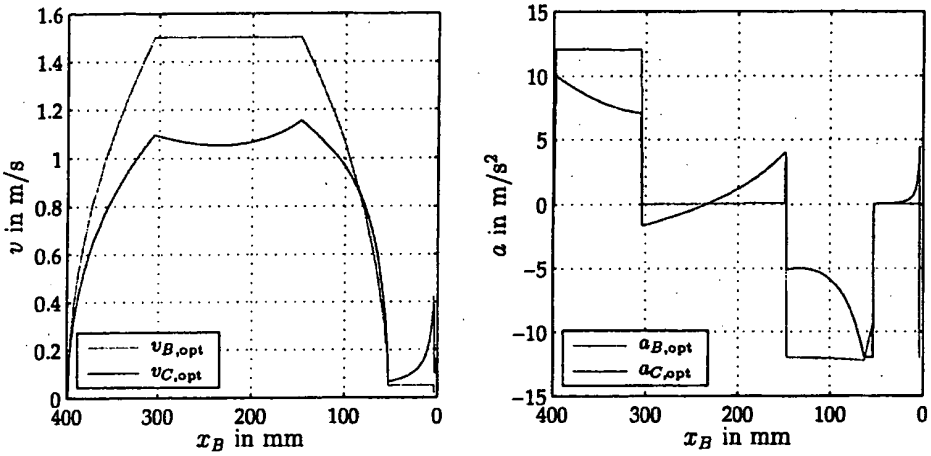
(b) Formöffnen

(c) Formschließen

(d) Formöffnen

Int. Cl.[8]: ***B29C 45/76*** (2006.01)
G05B 19/19 (2006.01)

Fig. 4

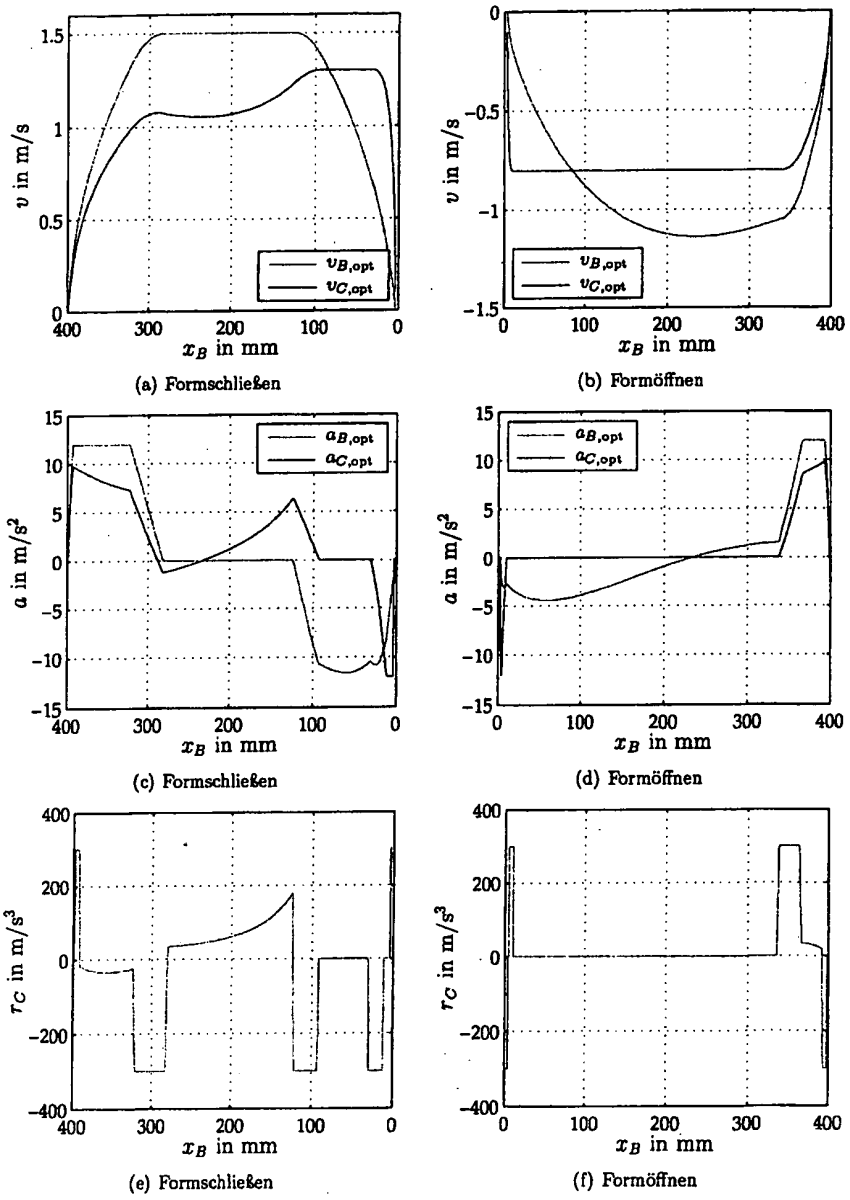


(a) Geschwindigkeitstrajektorien

(b) Beschleunigungstrajektorien

Int. Cl.[8]: ***B29C 45/76*** (2006.01)
G05B 19/19 (2006.01)

Fig. 5



(a) Formschließen

(b) Formöffnen

(c) Formschließen

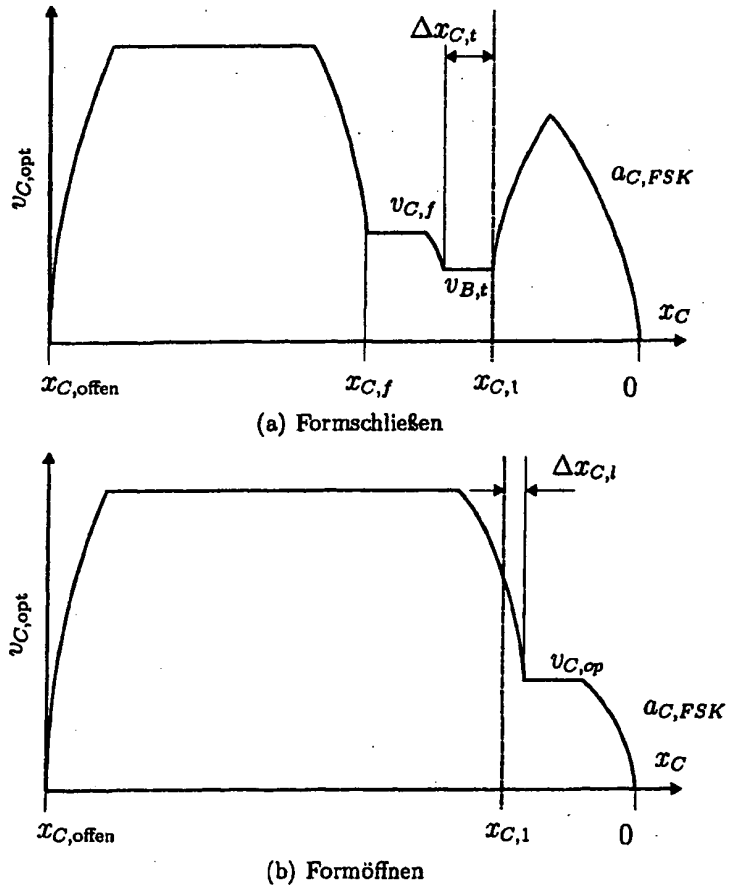
(d) Formöffnen

(e) Formschließen

(f) Formöffnen

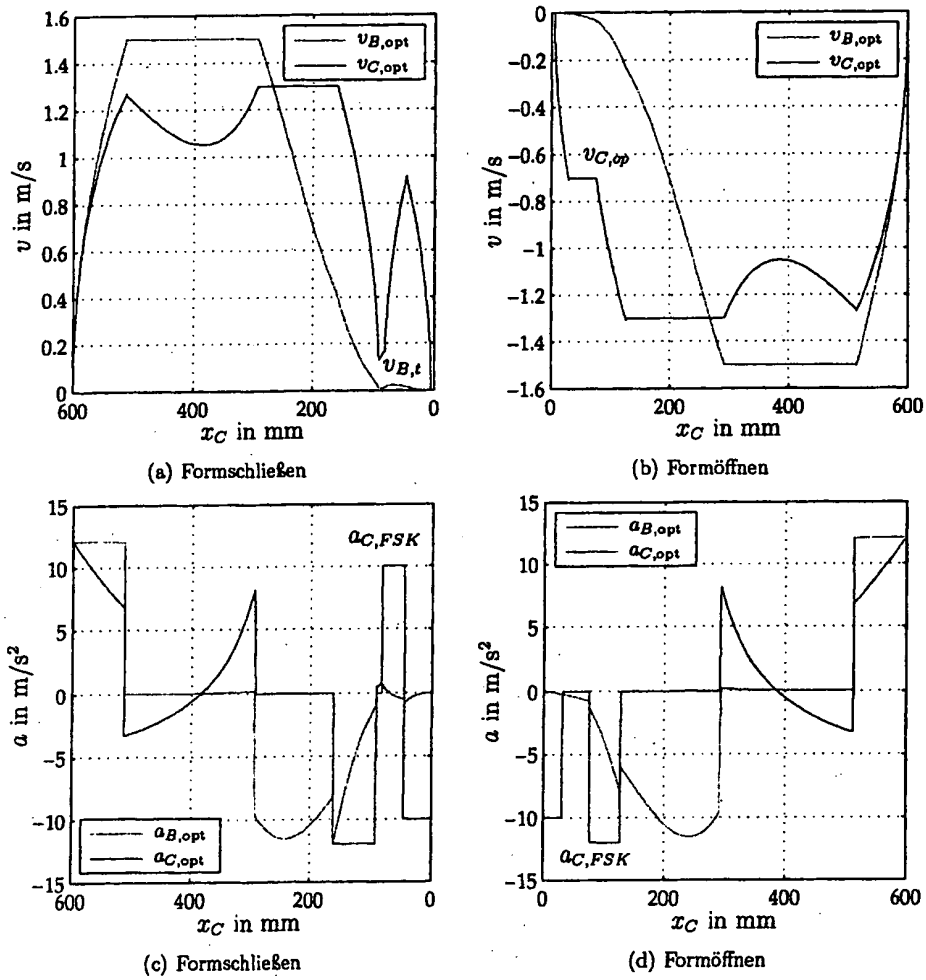
Int. Cl.[8]: ***B29C 45/76*** (2006.01)
G05B 19/19 (2006.01)

Fig. 6



Int. Cl.[8]: ***B29C 45/76*** (2006.01)
G05B 19/19 (2006.01)

Fig. 7



(a) Formschließen

(b) Formöffnen

(c) Formschließen

(d) Formöffnen

Int. Cl.[8]: ***B29C 45/76*** (2006.01)
G05B 19/19 (2006.01)

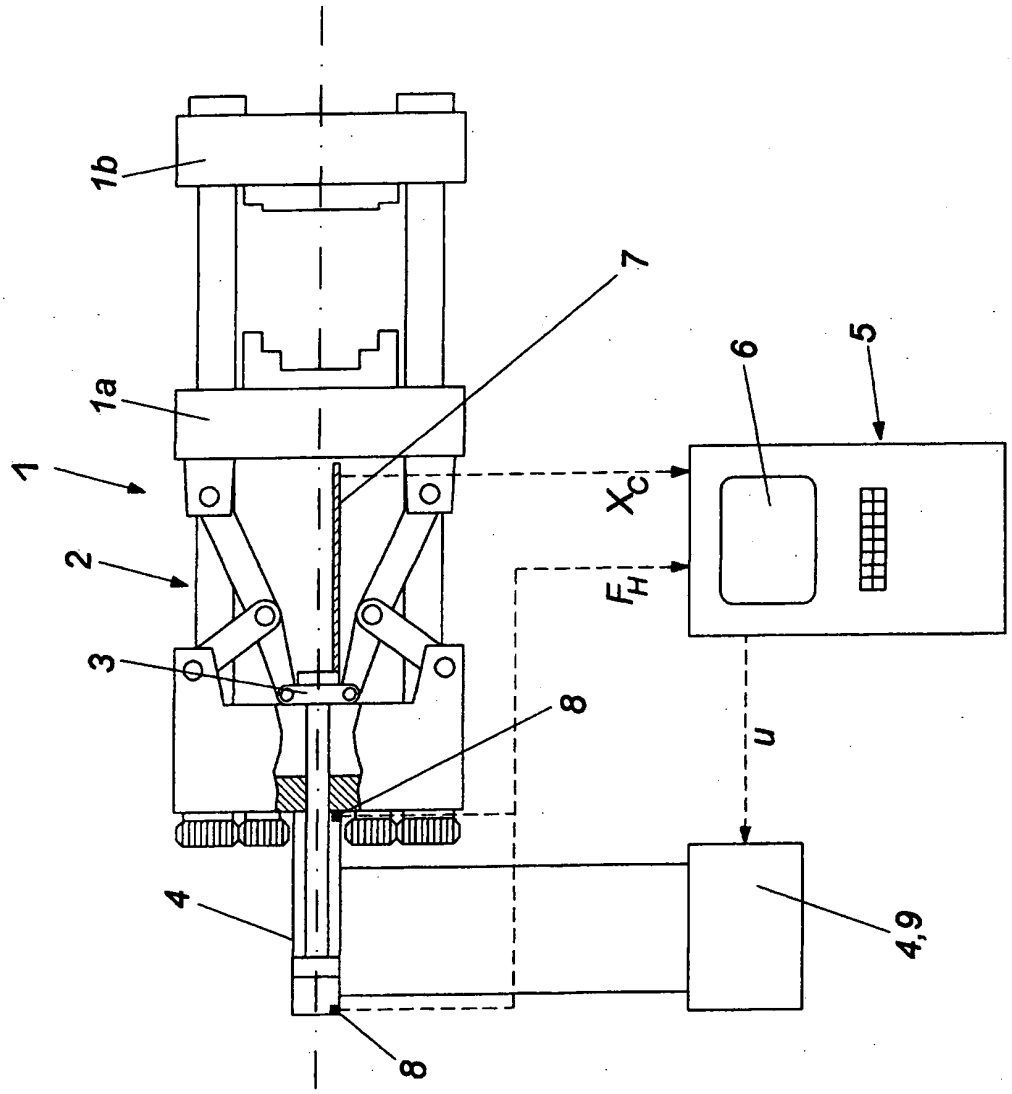
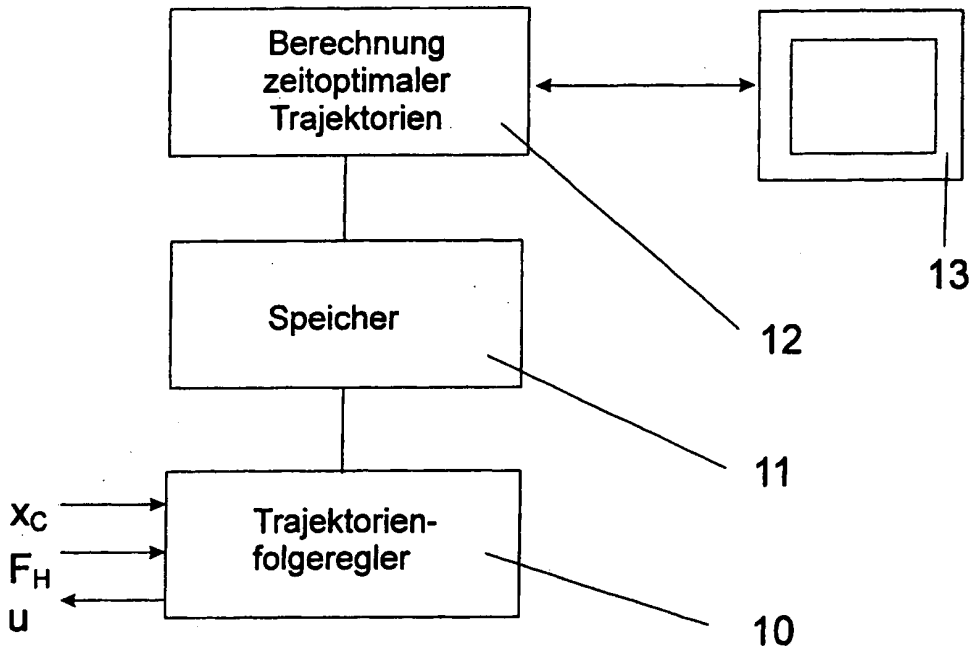


Fig. 8

Int. Cl.[8]: ***B29C 45/76*** (2006.01)
G05B 19/19 (2006.01)

Fig. 9



Int. Cl.[8]: ***B29C 45/76*** (2006.01)
G05B 19/19 (2006.01)

Fig. 10

Berechnung zeitoptimaler Trajektorien (Expertenmodus)

Restriktionsgrößen	Formschließen	Formöffnen	Einheit
$v_{C,max}$	1,3	-0,8	m/s
$v_{B,max}$	1,5	-1,5	m/s
$a_{C,max}$	12	-12	m/s^2
$a_{C,min}$	-12	12	m/s^2
$a_{B,max}$	12	-12	m/s^2
$a_{B,min}$	-12	12	m/s^2
$r_{B,max}$	300	-300	m/s^3
$r_{B,min}$	-300	300	m/s^3
$F_{H,max}$	60	-60	kN
$F_{H,min}$	100	-100	kN

Plattenmasse m_B = ... kg
Plattenmasse m_C = ... kg
Plattenhub $x_{B,max}$ = 400 kg

Menü	Start Berechnung	Anzeige	Speichern

Int. Cl.[8]: *B29C 45/76* (2006.01)
G05B 19/19 (2006.01)

Fig. 11

