

(19)



(11)

EP 2 100 020 B1

(12)

EUROPÄISCHE PATENTSCHRIFT

(45) Veröffentlichungstag und Bekanntmachung des Hinweises auf die Patenterteilung:
02.04.2014 Patentblatt 2014/14

(51) Int Cl.:
F02D 41/20^(2006.01)

(21) Anmeldenummer: **07822494.6**

(86) Internationale Anmeldenummer:
PCT/EP2007/062208

(22) Anmeldetag: **12.11.2007**

(87) Internationale Veröffentlichungsnummer:
WO 2008/071507 (19.06.2008 Gazette 2008/25)

(54) VERFAHREN ZUM BETREIBEN EINES EINSPRITZVENTILS

METHOD FOR OPERATING AN INJECTION VALVE

PROCÉDÉ D'UTILISATION D'UN INJECTEUR

(84) Benannte Vertragsstaaten:
AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB GR HU IE IS IT LI LT LU LV MC MT NL PL PT RO SE SI SK TR

(30) Priorität: **12.12.2006 DE 102006058744**

(43) Veröffentlichungstag der Anmeldung:
16.09.2009 Patentblatt 2009/38

(73) Patentinhaber: **Robert Bosch GmbH
70442 Stuttgart (DE)**

(72) Erfinder:
• **LEHR, Hans-Peter
70469 Stuttgart (DE)**
• **TONNER, Erik
70839 Gerlingen (DE)**

(56) Entgegenhaltungen:
WO-A1-2005/026516 WO-A1-2008/049704
DE-A1- 10 315 815 DE-A1-102004 037 255
DE-A1-102004 058 971 GB-A- 2 366 664
US-B2- 6 619 268

EP 2 100 020 B1

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents im Europäischen Patentblatt kann jedermann nach Maßgabe der Ausführungsordnung beim Europäischen Patentamt gegen dieses Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist. (Art. 99(1) Europäisches Patentübereinkommen).

Beschreibung

Stand der Technik

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Betreiben eines Einspritzventils, insbesondere eines Kraftstoffeinspritzventils einer Brennkraftmaschine eines Kraftfahrzeugs, wobei das Einspritzventil einen piezoelektrischen Aktor zum Antrieb einer mit dem Aktor, vorzugsweise hydraulisch, gekoppelten Ventilnadel aufweist.

[0002] Aus der WO 2005/026516 ist ein Verfahren zum Betreiben eines Einspritzventils, insbesondere eines Kraftstoffeinspritzventils einer Brennkraftmaschine, bekannt. Dieser Piezoaktor weist ein Schaltventil ein, über den die Bewegung der Ventilnadel gesteuert wird. In einer ersten Phase des Einspritzvorgangs steigt die Aktorspannung an und der Piezoaktor verändert seine Länge. Erreicht die Spannung den Wert U_{ab} wird der Ladevorgang des Piezoaktors beendet. Aufgrund von elektrischen Effekten steigt die Spannung am Piezoaktor noch leicht auf den Wert U_{max} an. Nach Erreichen des Wertes U_{max} fällt die Spannung auf einen nicht bezeichneten Wert ab. Dieser Abfall beruht auf hydraulischen Effekten. Anschließend entlädt sich der Piezoaktor langsam, bis er die Spannung U_{Regel} erreicht hat. Es wird die Differenz der Spannung zwischen dem Ende des Ladevorgangs und dem Ende des Einspritzvorgangs geregelt.

[0003] Einspritzventile und Verfahren dieser Art sind bekannt und umfassen üblicherweise das Vorgeben einer Aktorspannung, auf die der piezoelektrische Aktor auf- bzw. umgeladen werden soll, um die Ventilnadel des Einspritzventils an eine gewünschte Position zu bewegen bzw. um das Einspritzventil in einen gewünschten Betriebszustand zu versetzen. Aufgrund von Alterungseffekten insbesondere des piezoelektrischen Aktors selbst sowie der in dem Einspritzventil enthaltenen mechanischen und hydraulischen Komponenten ergeben sich jedoch Veränderungen der entsprechenden elektrischen bzw. mechanischen Parameter des Einspritzventils, so dass z.B. das präzise Zumessen einer einzuspritzenden Kraftstoffmenge unter Verwendung der bekannten Verfahren auf Dauer nicht möglich ist. Neben diesen Alterungseffekten bewirken insbesondere auch Temperaturschwankungen im Bereich des Einspritzventils eine Änderung der elektrischen Kapazität des piezoelektrischen Aktors, was zu weiteren Ungenauigkeiten bei der Zumessung von Kraftstoff oder sonstiger Fluids durch das Einspritzventil oder generell bei der Positionierung des Aktors führt. Darüber hinaus führen Stückstreuungen zwischen verschiedenen Einspritzventilen, die beispielsweise alle unterschiedlichen Zylindern einer bestimmten Brennkraftmaschine zugeordnet sind, zu zylinderindividuellen Abweichungen bei der Kraftstoffeinspritzung, die ebenfalls unerwünscht sind.

Offenbarung der Erfindung

[0004] Dementsprechend ist es Aufgabe der vorlie-

genden Erfindung, ein Verfahren der eingangs genannten Art dahingehend zu verbessern, dass eine gesteigerte Präzision bei der Zumessung eines einzuspritzenden Fluids auch über einen längeren Zeitraum hinweg und zumindest eine teilweise Kompensation von alterungsbedingten Veränderungen des Einspritzventils gegeben ist.

[0005] Diese Aufgabe wird bei einem Verfahren der eingangs genannten Art erfindungsgemäß dadurch gelöst, dass der Aktor ausgehend von einem ersten Betriebszustand des Einspritzventils entsprechenden Ausgangsspannung um einen vorgebbaren Spannungshub auf eine einem zweiten Betriebszustand des Einspritzventils entsprechende Zielspannung umgeladen, d. h. aufgeladen oder entladen, wird. Dabei wurde erkannt, dass die Ventilnadel während des Öffnens des Einspritzventils und vor dem Erreichen eines Nadelhubanschlags, der einem vollständig geöffneten Zustand des Einspritzventils entspricht, eine Rückwirkung auf den Aktor ausübt, die die Aktorspannung um eine Rückwirkungsspannung erhöht. Dabei ist vorteilhaft vorgesehen, dass der Spannungshub so gewählt wird, dass sich eine gewünschte Rückwirkungsspannung ergibt.

[0006] Die Rückwirkung der Ventilnadel auf den Aktor wird dadurch verursacht, dass sich die Ventilnadel auch nach einem Ende der Bestromung des Aktors zunächst weiter auf den Aktor zu bewegt und eine entsprechende Kraft auf den - nach dem Bestromungsende im wesentlichen ruhenden - Aktor ausübt, die dem piezoelektrischen Effekt entsprechend zu der Rückwirkungsspannung führt. Die erfindungsgemäße Vorgabe des zur Öffnung des Einspritzventils verwendeten Spannungshubs ermöglicht einen Rückschluss auf den dem Spannungshub entsprechenden Aktorhub und somit auch auf den von der Ventilnadel zurückgelegten Weg während des Öffnungsvorgangs des Einspritzventils bzw. während des Bestromens des Aktors. Bei einem verhältnismäßig großen zum Entladen des Aktors bzw. zum Öffnen des Einspritzventils verwendeten Spannungshub hat die Ventilnadel bereits während der Ansteuerung des Aktors einen entsprechenden, verhältnismäßig großen Weg weg von ihrem Ventilsitz auf ihren Nadelhubanschlag zurückgelegt, so dass sie nachfolgend nur noch einen verhältnismäßig geringen Weg bis zu ihrem Nadelhubanschlag zurücklegen muss und hierbei eine dementsprechend verhältnismäßig geringe Rückwirkungsspannung bewirkt. Bei einem vergleichsweise klein gewählten Spannungshub für den Öffnungsvorgang des Einspritzventils ergibt sich dementsprechend für die Ventilnadel ein größerer Weg bis zu ihrem Nadelhubanschlag nach dem Bestromungsende, so dass auch eine vergleichsweise große Rückwirkungsspannung auftritt. Durch die erfindungsgemäße entsprechende Wahl des Spannungshubs ist es demnach vorteilhaft möglich, den nach dem Bestromungsende verbleibenden Weg der Ventilnadel bis zu ihrem Nadelhubanschlag und damit auch den Zeitpunkt des Auftreffens der Ventilnadel auf den Nadelhubanschlag festzulegen, wodurch beispielsweise

auch über mehrere Betriebszyklen des Einspritzventils hinweg bzw. sogar über die gesamte Betriebsdauer eine präzise Einspritzung von Kraftstoff realisierbar ist. Das erfindungsgemäße Verfahren kann ferner vorteilhaft dazu verwendet werden, den Zeitpunkt des Erreichens des jeweiligen Nadelhubanschlags durch die Ventilnadeln mehrerer Einspritzventile gleichzustellen, um deren Einspritzverhalten bzw. die durch sie eingespritzten Fluidmengen einander anzugleichen.

[0007] Durch die entsprechende Auswahl der Rückwirkungsspannung und der Vorgabe eines entsprechenden Spannungshubs ist es vorteilhaft beispielsweise möglich, eine vorgebbare Zeit für den gesamten Öffnungsvorgang des Einspritzventils vorzugeben.

[0008] Im Gegensatz zu der herkömmlichen Ansteuerung piezoelektrischer Aktoren von Einspritzventilen, bei der ein einzustellender absoluter Spannungswert fest vorgegeben wird, ermöglicht die erfindungsgemäße Berücksichtigung des Spannungshubs, d. h. der Spannungsdifferenz zwischen einer Ausgangsspannung und der Zielspannung für den Aktor eine besonders präzise Einstellung eines gewünschten Betriebszustands des Einspritzventils insbesondere auch bei sich ändernden Eigenschaften des Einspritzventils bzw. dessen Komponenten. Erfindungsgemäß ist erkannt worden, dass ein von dem piezoelektrischen Aktor bewirkter Aktorhub näherungsweise proportional zu einem entsprechenden Spannungshub der Aktorspannung ist, unabhängig von Alterungseffekten des piezoelektrischen Aktors oder beispielsweise einer temperaturbedingten Änderung der elektrischen Kapazität des piezoelektrischen Aktors. Durch eine entsprechende Regelung des einem gewünschten Betriebszustand entsprechenden Spannungshubs kann demgemäß eine besonders präzise Ansteuerung des piezoelektrischen Aktors und damit ein präzises Erreichen des gewünschten Betriebszustands für das Einspritzventil erfolgen.

[0009] Besonders vorteilhaft kann der Aktor einer weiteren Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens zufolge in einer vorgebbaren Umladezeit mit einem von dem Spannungshub abhängigen Umladestrom umgeladen werden. Dadurch ist sichergestellt, dass für jeden Umladevorgang dieselbe vorgebbare Umladezeit benötigt wird, während der zum Umladen des Aktors erforderliche Umladestrom entsprechend gewählt werden kann. Durch eine Variation des Umladestroms während des Umladevorgangs kann ferner vorteilhaft eine Vielzahl von möglichen Bewegungsprofilen der Ventilnadel bei der Überführung von einem ersten Betriebszustand in einen zweiten Betriebszustand eingestellt werden. Beispielsweise können hiermit auch charakteristische Arbeits- bzw. Hubpositionen der Ventilnadel eingeregelt oder sogar unter mehreren Einspritzventilen gleichgestellt werden.

[0010] Bei einer weiteren Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens, bei der die Ventilnadel in dem ersten Betriebszustand so auf einem Ventilsitz ruht, dass das Einspritzventil geschlossen ist, und bei der der

Aktor bei der Ausgangsspannung eine erste Länge aufweist, ist vorgesehen, dass der Aktor um den vorgebbaren Spannungshub auf die Zielspannung entladen wird, wobei er sich auf eine zweite Länge, die kleiner ist als die erste Länge, verkürzt, um das Einspritzventil von seinem geschlossenen Zustand in seinen geöffneten Zustand zu überführen.

[0011] Bei einer weiteren, ganz besonders vorteilhaften Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens ist vorgesehen, dass der Spannungshub so gewählt ist, dass die Ventilnadel den Ventilsitz und/oder einen/den Nadelhubanschlag erreicht, wenn die Bestromung des Aktors beendet wird. Erfindungsgemäß ist erkannt worden, dass bei einer derartigen Konfiguration keine wesentliche Rückwirkung der Ventilnadel auf den Aktor eintritt, so dass beispielsweise die vorstehend beschriebenen Auswirkungen der Rückwirkungsspannung vorteilhaft nicht betrachtet werden müssen, wodurch sich eine weitere Steigerung der Präzision bei der Ansteuerung des Aktors ergibt. Insbesondere ergibt sich bei verschwindender Rückwirkungsspannung auch ein größerer, zur Ansteuerung des Aktors verwendbarer Spannungsbereich, d.h. ein größerer effektiv nutzbarer Spannungshub.

[0012] Wenn der Spannungshub zur Ansteuerung des Aktors so gewählt ist, dass ein Betrag der ersten zeitlichen Ableitung der Aktorspannung minimal wird zwischen einem Ende der Bestromung des Aktors und einem ersten Vorzeichenwechsel der ersten zeitlichen Ableitung der Aktorspannung seit dem Ende der Bestromung des Aktors, ist die vorstehend beschriebene Konfiguration, bei der die Erreichung eines Ventilsitzes bzw. des Nadelhubanschlags gleichzeitig mit dem Ende der Bestromung des Aktors erfolgt, besonders präzise realisierbar.

[0013] Bei einer weiteren vorteilhaften Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens wird eine Umladezeit, die für das Überführen des Einspritzventils von seinem geöffneten Zustand in seinen geschlossenen Zustand erforderlich ist, geregelt, wodurch eine präzise Einhaltung der Umladezeit auch bei sich ändernden Eigenschaften des Einspritzventils bzw. des piezoelektrischen Aktors sichergestellt ist.

[0014] Besonders vorteilhaft kann die Umladezeit einer weiteren Erfindungsvariante zufolge in Abhängigkeit einer gewünschten Schließzeit gewählt werden, innerhalb der sich die Ventilnadel von einer Ausgangsposition auf ihren Ventilsitz zu bewegt.

[0015] Die erfindungsgemäße Regelung des Spannungshubs wird vorzugsweise für jeden Betriebszyklus des Einspritzventils vorgenommen, so dass eine besonders hohe Genauigkeit bei der Regelung erzielt wird. Auch die vorstehend erwähnte Umladezeit kann erfindungsgemäß vorteilhaft für jeden Betriebszyklus des Einspritzventils geregelt werden.

[0016] Die Regelung der Rückwirkungsspannung und/oder die Regelung der ersten zeitlichen Ableitung der Aktorspannung zwischen einem Ende der Bestro-

mung des Aktors und einem ersten Vorzeichenwechsel der ersten zeitlichen Ableitung der Aktorspannung seit dem Ende der Bestromung des Aktors und/oder die Regelung der Schließzeit erfolgt erfindungsgemäß vorteilhaft in jedem n-ten Betriebszyklus des Einspritzventils, wobei $n > 1$, so dass entsprechende Schritte der betreffenden Regelungsverfahren nicht in jedem Betriebszyklus des Einspritzventils ausgeführt werden müssen, wodurch insbesondere Ressourcen einer das Regelungsverfahren ausführenden Recheneinheit geschont werden, die beispielsweise in einem das Einspritzventil steuernden Steuergerät integriert ist.

[0017] Von besonderer Bedeutung ist die Realisierung des erfindungsgemäßen Verfahrens in Form eines Computerprogramms, das auf einem Computer beziehungsweise einer Recheneinheit eines Steuergeräts ablauffähig und zur Ausführung des Verfahrens geeignet ist. Das Computerprogramm kann beispielsweise auf einem elektronischen Speichermedium abgespeichert sein, wobei das Speichermedium seinerseits zum Beispiel in dem Steuergerät enthalten sein kann.

[0018] Weitere Vorteile, Merkmale und Einzelheiten ergeben sich aus der nachfolgenden Beschreibung, in der unter Bezugnahme auf die Zeichnung verschiedene Ausführungsbeispiele der Erfindung dargestellt sind. Dabei können die in den Ansprüchen und in der Beschreibung erwähnten Merkmale jeweils einzeln für sich oder in beliebiger Kombination erfindungswesentlich sein.

Kurze Beschreibung der Zeichnung

[0019] In der Zeichnung zeigt:

- | | |
|----------|---|
| Figur 1 | eine schematische Schnittdarstellung eines Ausführungsbeispiels eines Kraftstoffeinspritzventils zur Ausführung des erfindungsgemäßen Verfahrens, |
| Figur 2a | schematisch einen zeitlichen Verlauf einer Aktorspannung eines piezoelektrischen Aktors des Kraftstoffeinspritzventils aus Figur 1, |
| Figur 2b | einen zeitlichen Verlauf der Aktorspannung des piezoelektrischen Aktors zusammen mit einem zeitlichen Verlauf des Ansteuerstroms des piezoelektrischen Aktors und eines entsprechenden Aktorhubs, |
| Figur 3a | eine Detaildarstellung des zeitlichen Verlaufs der ersten zeitlichen Ableitung der Aktorspannung des piezoelektrischen Aktors, |
| Figur 3b | eine Detaildarstellung des zeitlichen Verlaufs der zweiten zeitlichen Ablei- |

tung der Aktorspannung des piezoelektrischen Aktors,

- | | | |
|----|-----------------|---|
| 5 | Figur 4a | schematisch ein Funktionsdiagramm einer Reglerstruktur zur Implementierung einer ersten Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens, |
| 10 | Figur 4b | schematisch ein Funktionsdiagramm einer Reglerstruktur zur Implementierung einer weiteren Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens, |
| 15 | Figur 5a bis 5c | jeweils weitere Beispiele für einen zeitlichen Verlauf der Aktorspannung des piezoelektrischen Aktors, und |
| 20 | Figur 6 | schematisch ein Funktionsdiagramm einer weiteren Reglerstruktur einer dritten Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens. |

Ausführungsform(en) der Erfindung

[0020] In der Figur 1 ist ein als Kraftstoffeinspritzventil 10 ausgebildetes Einspritzventil einer Brennkraftmaschine eines Kraftfahrzeugs dargestellt, das mit einem piezoelektrischen Aktor 12 versehen ist. Der piezoelektrische Aktor 12 wird wie in Figur 1 durch den Pfeil angedeutet von einem Steuergerät 20 angesteuert. Weiterhin weist das Kraftstoffeinspritzventil 10 eine Ventilnadel 13 auf, die auf einem Ventilsitz 14a im Inneren des Gehäuses des Kraftstoffeinspritzventils 10 aufsitzen kann.

[0021] Ist die Ventilnadel 13 von dem Ventilsitz 14a abgehoben, so ist das Kraftstoffeinspritzventil 10 geöffnet und es wird Kraftstoff eingespritzt. Dieser Zustand ist in der Figur 1 dargestellt. Ein vollständig geöffneter Zustand des Kraftstoffeinspritzventils 10 ist dadurch gekennzeichnet, dass die Ventilnadel 13 an einem in dem Bereich 14b angeordneten und nicht näher dargestellten Nadelhubanschlag anliegt, der eine weitere Bewegung der Ventilnadel 13 weg von ihrem Ventilsitz 14a, d.h. auf den Aktor 12 zu, verhindert. Sitzt die Ventilnadel 13 auf dem Ventilsitz 14a auf, so ist das Kraftstoffeinspritzventil 10 geschlossen. D.h., der gesamte, bei der Abbildung nach Figur 1 vertikal verlaufende, Hubweg, den die Ventilnadel 13 zurücklegen kann, ist einerseits durch den Ventilsitz 14a (Schließposition) und andererseits durch den Nadelhubanschlag in dem Bereich 14b (Öffnungsposition) begrenzt.

[0022] Der Übergang von dem geschlossenen in den geöffneten Zustand wird mithilfe des piezoelektrischen Aktors 12 bewirkt. Hierzu wird eine nachfolgend auch als Aktorspannung U bezeichnete elektrische Spannung an den Aktor 12 angelegt, die eine Längenänderung eines in dem Aktor 12 angeordneten Piezostapels hervorruft, welche ihrerseits zum Öffnen beziehungsweise Schließen des Kraftstoffeinspritzventils 10 ausgenutzt wird.

[0023] Das Kraftstoffeinspritzventil 10 weist ferner einen hydraulischen Koppler 15 auf. Der hydraulische Koppler 15 ist innerhalb des Kraftstoffeinspritzventils 10 angeordnet und weist ein Kopplergehäuse 16 auf, in dem zwei Kolben 17, 18 geführt sind. Der Kolben 17 ist mit dem Aktor 12 und der Kolben 18 ist mit der Ventilnadel 13 verbunden. Zwischen den beiden Kolben 17, 18 ist ein Volumen 19 eingeschlossen, das die Übertragung der von dem Aktor 12 ausgeübten Kraft auf die Ventilnadel 13 bewerkstelligt.

[0024] Der Koppler 15 ist von unter Druck stehendem Kraftstoff 11 umgeben. Das Volumen 19 ist ebenfalls mit Kraftstoff gefüllt. Über die Führungsspalte zwischen den beiden Kolben 17, 18 und dem Kopplergehäuse 16 kann sich das Volumen 19 über einen längeren Zeitraum hinweg an die jeweils vorhandene Länge des Aktors 12 anpassen. Bei kurzzeitigen Änderungen der Länge des Aktors 12 bleibt das Volumen 19 jedoch nahezu unverändert und die Änderung der Länge des Aktors 12 wird auf die Ventilnadel 13 übertragen.

[0025] Figur 2a gibt schematisch den zeitlichen Verlauf der Aktorspannung U zur Ansteuerung des piezoelektrischen Aktors 12 des Einspritzventils 10 aus Figur 1 wieder. Wie aus Figur 2a ersichtlich, wird die Aktorspannung U ab dem Zeitpunkt t_0 im Rahmen des erfindungsgemäßen Verfahrens ausgehend von einer Ausgangsspannung U_0 um einen durch den Doppelpfeil ΔU symbolisierten Spannungshub auf eine entsprechende Zielspannung U_1 abgesenkt, die wie ebenfalls aus Figur 2a ersichtlich, zu dem Zeitpunkt t_1 an dem piezoelektrischen Aktor 12 (Figur 1) anliegt. Zu dem Zeitpunkt t_1 wird auch eine nicht aus Figur 2a ersichtliche Bestromung des Aktors 12, d. h. eine Beaufschlagung des Aktors 12 mit einem dem Spannungshub ΔU entsprechenden Entladestrom eingestellt. Allerdings bewegt sich zu diesem Zeitpunkt t_1 die Ventilnadel 13 weiter auf ihren im Bereich des Kopplergehäuses 16 befindlichen Nadelhubanschlag 14b zu und übt hierbei eine entsprechende Kraft auf den piezoelektrischen Aktor 12 aus. Diese Kraft ist messtechnisch durch die nachfolgend auch als Rückwirkungsspannung bezeichnete Spannung ΔU_R erfassbar, die sich der eigentlichen Aktorspannung U des Aktors 12 überlagert und diese damit verändert. Zu dem in Figur 2a dargestellten Zeitpunkt t_2 hat die Ventilnadel 13 ihren Nadelhubanschlag 14b erreicht und damit ihre Ruhelage eingenommen, die einem vollständig geöffneten Zustand des Einspritzventils 10 entspricht. Dementsprechend übt die Ventilnadel 13 nun keinen weiteren Druck auf den Aktor 12 aus, und es stellt sich ab dem Zeitpunkt t_2 die auch als Plateauspannung bezeichnete im Wesentlichen zeitlich konstante Spannung U_p ein.

[0026] Ab einem darauffolgenden Zeitpunkt t_3 wird der piezoelektrische Aktor 12 erneut angesteuert, insbesondere durch einen entsprechenden Ladestrom aufgeladen, so dass sich bis hin zu dem Zeitpunkt t_5 die Aktorspannung U wieder auf den Wert der Ausgangsspannung U_0 vergrößert. Während des Aufladens erfährt der Aktor 12 die vorstehend bereits beschriebene Längenän-

derung, die die Ventilnadel 13 aus ihrer Ruhelage an dem Nadelhubanschlag 14b wiederum auf ihren Ventil-sitz 14a zu bewegt, wodurch die Schließposition des Einspritzventils 10 bzw. dessen geschlossener Betriebszustand gekennzeichnet ist. Nach dem Aufladen, d. h. ab dem Zeitpunkt t_5 ist das Einspritzventil für einen neuen Betriebszyklus bereit.

[0027] Figur 2b zeigt ergänzend einen messtechnisch erfassten, zu der schematischen Darstellung aus Figur 2a vergleichbaren, Zeitverlauf der Aktorspannung U des Aktors 12 zusammen mit einem zeitlichen Verlauf des Lade-/Entladestroms I , mit dem der Aktor 12 während der Intervalle $(t_0; t_1)$ bzw. $(t_3; t_5)$ (Figur 1) beaufschlagt wird. Ein Hubverlauf h , d. h. der von der Ventilnadel 13 tatsächlich zurückgelegte Weg, ist aus Figur 2b ebenfalls ersichtlich.

[0028] Das erfindungsgemäße Umladen des Aktors 12 durch Ansteuerung mit einem vorgebbaren Spannungshub ΔU (Figur 2a) bzw. einem entsprechenden Umladestrom I ermöglicht eine besonders präzise Ansteuerung der Ventilnadel 13 und damit beispielsweise eine besonders präzise Zumessung von Kraftstoff durch das Einspritzventil 10. Erfindungsgemäß wird zur Realisierung des während des Entladevorgangs des Aktors 12 aufzubringenden Spannungshubs ΔU ein Regelungsverfahren eingesetzt, bei dem ein Entladestrom I_E in Abhängigkeit des einzustellenden Spannungshubs ΔU_{soll} eingestellt wird. Eine entsprechende Reglerstruktur ist schematisch in Figur 4a wiedergegeben.

[0029] Der erste Teil R1 des in Figur 4a veranschaulichten Reglers erhält als Sollgröße den einzustellenden Spannungshub ΔU_{soll} , der in einem nicht näher bezeichneten Subtrahierer zusammen mit dem tatsächlich auftretenden Spannungshub ΔU_{ist} zu einer entsprechenden Regeldifferenz verarbeitet wird. Diese Regeldifferenz wird einem Funktionsblock 30 zugeführt, der beispielsweise als Kennlinie bzw. Kennfeld ausgebildet sein kann und eine Transformation der Regeldifferenz in einen Entladestrom I_E vornimmt, mit dem der piezoelektrische Aktor 12 in einem nachfolgenden Regelzyklus anzusteuern ist, um die Regeldifferenz $\Delta U_{\text{soll}} - \Delta U_{\text{ist}}$ zu minimieren. Der Entladestrom I_E wird einem das Einspritzventil 10 repräsentierenden Funktionsblock zugeführt, und die sich aus der Ansteuerung mit dem Entladestrom I_E ergebenden Größen Aktorspannung U und Aktorstrom I , die beispielsweise messtechnisch von dem Steuergerät 20 (Figur 1) erfasst werden, werden einer vorzugsweise ebenfalls in dem Steuergerät 20 realisierten Auswerteeinheit 25 zugeführt.

[0030] Die Auswerteeinheit 25 ermittelt einerseits aus den ihr zugeführten messtechnisch erfassten Größen U , I den tatsächlichen Spannungshub ΔU_{ist} , beispielsweise durch Subtraktion der momentanen Aktorspannung U von der Ausgangsspannung U_0 . Andererseits ermittelt die Auswerteeinheit 25 aus den ihr zugeführten Größen U , I auch eine später näher zu beschreibende Istgröße ΔU_{Rist} .

[0031] Durch den vorstehend beschriebenen Regel-

kreis R1 ist eine effiziente Regelung des gewünschten Spannungshubs ΔU während eines Entladevorgangs des Aktors 12 zum Öffnen des Einspritzventils 10 angegeben. Ein vergleichbarer Spannungshub ΔU kann beispielsweise auch zum Aufladen des Aktors 12 eingesetzt werden, insbesondere um das Einspritzventil 10 von einem geöffneten Zustand in einen geschlossenen Zustand zu versetzen. Auch hierbei kann der vorstehend beschriebene Regler R1 zum Einsatz kommen. Durch die erfindungsgemäße Regelung des Spannungshubs ΔU ist stets sichergestellt, dass sich ein gewünschter Aktorhub h einstellt, unabhängig von Alterungseffekten des piezoelektrischen Aktors 12 und/oder der weiteren Komponenten des Einspritzventils 10.

[0032] Da der Zeitpunkt, zu dem die Ventilnadel 13 des Einspritzventils 10 tatsächlich ihren Nadelhubanschlag 14b (Figur 1) erreicht, und der in Figur 2a mit dem Bezugszeichen t_2 bezeichnet ist, für eine präzise Steuerung des Betriebs des Einspritzventils 10 besonders interessiert, sieht das erfindungsgemäße Betriebsverfahren neben der vorstehend beschriebenen Regelung des Spannungshubs ΔU auch eine Regelung der Rückwirkungsspannung ΔU_R vor.

[0033] Durch die erfindungsgemäße Vorgabe des Spannungshubs ΔU wird - neben der definierten Umladung des Aktors 12 - vorteilhaft festgelegt, welchen Weg die Ventilnadel 13 ausgehend von ihrer Schließposition auf dem Ventilsitz 14a während der zum Entladen vorgesehenen Bestromungszeit t_0 bis t_1 (Figur 2a) zurücklegt. Gleichzeitig ist hiermit auch der verbleibende Weg der Ventilnadel 13 bis hin zu ihrem Nadelhubanschlag 14b festgelegt, den sie in der Zeit t_1 bis t_2 zurücklegt.

[0034] Da die Bestromungs- bzw. Umladezeit $t_1 - t_0$ bekannt und beispielsweise von dem Steuergerät 20 vorgegeben ist, kann auf diese Weise durch die Auswahl des Spannungshubs ΔU auch die gesamte Öffnungszeit $t_2 - t_0$ eingestellt werden, d.h. die Zeit zwischen dem Beginn der Ansteuerung bei $t=t_0$ und dem Auftreffen der Ventilnadel auf dem Nadelhubanschlag 14b bei $t=t_2$.

[0035] Eine Regelung der Öffnungszeit $t_2 - t_0$ wird durch den erfindungsgemäßen, ebenfalls in Figur 4a abgebildeten zusätzlichen Regelkreis R2 ermöglicht. Entsprechend einer gewünschten Öffnungszeit $t_2 - t_0$ wird ein Sollwert $\Delta U_{R\text{soll}}$ vorgegeben, der die gewünschte Rückwirkungsspannung ΔU_R bestimmt und dementsprechend auch die Zeitdifferenz $t_2 - t_1$ und damit auch t_2 selbst beeinflusst. Zusammen mit der wie vorstehend bereits beschrieben durch die Auswerteeinheit 25 erhaltenen Istgröße $\Delta U_{R\text{ist}}$ wird wiederum eine entsprechende Regeldifferenz $\Delta U_{R\text{soll}} - \Delta U_{R\text{ist}}$ für die Rückwirkungsspannung gebildet, die einem Funktionsblock 31 zugeführt und hierdurch in einen entsprechenden Sollwert für den erfindungsgemäß einzustellenden Spannungshub ΔU transformiert wird.

[0036] D. h., die Kombination der in Figur 4a abgebildeten erfindungsgemäßen Regelkreise R1, R2 ermöglicht durch ihr Zusammenwirken die Vorgabe einer der Öffnungszeit $t_2 - t_0$ entsprechenden Rückwirkungsspan-

nung, die auf die vorstehend beschriebene Weise mit einem entsprechenden Spannungshub ΔU für das Entladen des Aktors 12 korrespondiert.

[0037] Die Detailansicht aus Figur 3a gibt einen zeitlichen Verlauf der Aktorspannung U für den Aktor 12 in dem Zeitbereich zwischen etwa t_1 und t_2 aus Figur 2a wieder. Der in Figur 3a mit dem Bezugszeichen t_{BE} bezeichnete Zeitpunkt gibt das Ende einer Bestromung des Aktors 12 an und entspricht damit dem in Figur 2a mit dem Bezugszeichen t_1 bezeichneten Zeitpunkt. Erfindungsgemäß wird der erste nach dem Bestromungsende t_{BE} auftretende Vorzeichenwechsel der ersten zeitlichen Ableitung $\dot{U}$ der Aktorspannung U ausgewertet und als Merkmal für das Erreichen des Nadelhubanschlags 14b durch die Ventilnadel 13 interpretiert, so dass hierdurch der Zeitpunkt t_2 gemäß Figur 2a ermittelbar ist. Dieser erste Vorzeichenwechsel der ersten zeitlichen Ableitung $\dot{U}$ tritt bei dem Szenario gemäß Figur 3a zu dem Zeitpunkt t_{VZW} auf. Zu diesem Zeitpunkt t_{VZW} ($= t_2$ gemäß Figur 2a) wird erfindungsgemäß die Istgröße für die Rückwirkungsspannung $\Delta U_{R\text{ist}}$, vgl. Figur 4a, ermittelt und zur beschriebenen Regelung eingesetzt. Da die Auswertung der ersten zeitlichen Ableitung $\dot{U}$ (Figur 3a) der Aktorspannung U rechenintensiver ist als die reine Überwachung der Aktorspannung U durch den Regler R1, wird das in dem Regler R2 (Figur 4a) implementierte Verfahren vorzugsweise nur jeden n -ten Betriebszyklus des Einspritzventils 10 durchgeführt, wobei $n > 1$, also beispielsweise für $n=4$ bei jedem vierten Entladevorgang.

[0038] Untersuchungen der Anmelderin haben ergeben, dass hierdurch eine hinreichend große Genauigkeit bei der Regelung der gewünschten Rückwirkungsspannung ΔU_R gegeben ist, ohne eine unnötig hohe Rechenleistung einer in dem Steuergerät 20 vorgesehenen Recheneinheit, auf der die Regelverfahren der Regler R1, R2 implementiert werden, zu erfordern.

[0039] Neben einer Auswertung der ersten zeitlichen Ableitung $\dot{U}$ der Aktorspannung U des Aktors 12 kann eine äquivalente Erkennung des Erreichens des Nadelhubanschlags 14b beispielsweise unter Analyse der zweiten zeitlichen Ableitung $\ddot{U}$ der Aktorspannung U oder durch gleichwertige, dem Fachmann bekannte Verfahren erfolgen.

[0040] Bei einer weiteren sehr vorteilhaften Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens ist vorgesehen, dass eine Umladezeit, die für das Überführen des Einspritzventils 10 von seinem geöffneten Zustand in seinen geschlossenen Zustand erforderlich ist, geregelt wird.

[0041] Die betreffende Umladezeit ist aus Figur 2a als Zeitdifferenz zwischen den Zeitpunkten t_3 und t_5 ersichtlich.

[0042] Die erfindungsgemäße Regelung der Umladezeit ermöglicht ein besonders präzises Schließen des Einspritzventils 10 und kann vorteilhaft durch die in Figur 4b abgebildete Reglerstruktur implementiert werden.

[0043] Die einzustellende Umladezeit, innerhalb der das Einspritzventil 10 von seinem geöffneten Zustand

(Zeitpunkt t_3) zu seinem vollständig geschlossenen Zustand (Zeitpunkt t_5) überführt werden soll, ist in Figur 2a durch den Doppelpfeil $\Delta t_{35\text{soll}}$ symbolisiert.

[0044] Ein entsprechender Sollwert $\Delta t_{35\text{soll}}$ für diese Umladezeit wird dem in Figur 4b abgebildeten Regler R3 zugeführt und zusammen mit einer entsprechenden, durch die Auswerteeinheit 25 ermittelten Istgröße $\Delta t_{35\text{ist}}$ in an sich bekannter Weise zu einer entsprechenden Regeldifferenz verarbeitet, die einem nachgeordneten Funktionsblock 32 zugeführt wird. Der Funktionsblock 32 transformiert die Regeldifferenz in einen Ladestrom I_L , mit dem der Aktor 12 während der Umladezeit $t_5 - t_3$ aufzuladen ist, um die gewünschte Umladezeit $\Delta t_{35\text{soll}}$ einzuhalten. Wie bereits unter Bezugnahme auf den Regler R1 aus Figur 4a beschrieben, wirkt auch der in Figur 4b dargestellte Ladestrom I_L auf den das Einspritzventil symbolisierenden Funktionsblock 10, wobei sich tatsächlich einstellende Größen U , I in bereits beschriebener Weise messtechnisch durch die Auswerteeinheit 25 erfasst und verarbeitet werden können. Zur Verbesserung der Regelgüte des Regelkreises R3 kann bei der Bildung der Regeldifferenz $\Delta t_{35\text{soll}} - \Delta t_{35\text{ist}}$ auch ein Korrekturwert K berücksichtigt werden, der von der Regeldifferenz $\Delta U_{\text{soll}} - \Delta U_{\text{ist}}$ abhängt und dementsprechend beispielsweise von dem Regler R1 (Figur 4a) erhalten wird. Der Korrekturwert K berücksichtigt vorteilhaft, dass sich bei einem beispielsweise vergrößerten Spannungshub ΔU dementsprechend auch die Ladezeit für das Umladen des Aktors 12 verändert.

[0045] Zu dem Ende t_5 (Figur 2a) der Umladezeit ist der Aktor 12 wieder auf seine Ausgangsspannung U_0 aufgeladen und für einen erneuten Betriebszyklus, d. h. für ein nachfolgendes Entladen bereit.

[0046] Üblicherweise erreicht die Ventalnadel 13 während der Umladezeit $t_5 - t_3$ jedoch bereits zu einem früheren Zeitpunkt t_4 ihren Ventil Sitz 14a (Figur 1), d. h. der vollständig geschlossene Betriebszustand des Einspritzventils 10 ist bereits nach einer nachfolgend auch als Schließzeit $t_4 - t_3$ bezeichneten Zeit erreicht. Bei dem Erreichen des Ventilsitzes 14a übt die Ventalnadel 13 ebenfalls eine bereits vorstehend im Zusammenhang mit dem Öffnungsvorgang bzw. dem Erreichen des Hubanschlags 14b beschriebene Rückwirkung auf den Aktor 12 aus, die als Änderung der ersten zeitlichen Ableitung $\dot{U}$, d. h. als Knick, der Aktorspannung U , erfassbar ist.

[0047] Eine präzise Regelung der tatsächlichen Schließzeit $t_4 - t_3$ erfolgt erfindungsgemäß dadurch, dass ein der gewünschten Schließzeit $\Delta t_{34\text{soll}}$ entsprechender Wert für die Umladezeit $\Delta t_{35\text{soll}}$ vorgegeben wird. Dies erfolgt durch den ebenfalls in Figur 4b abgebildeten Regler R4, dessen entsprechende Regeldifferenz $\Delta t_{34\text{soll}} - \Delta t_{34\text{ist}}$ in einem Funktionsblock 33 transformiert wird in den entsprechenden Sollwert $\Delta t_{35\text{soll}}$ für die Umladezeit.

[0048] Analog zu den Reglern R1, R2 (Figur 4a) kann auch der Regler R3 vorzugsweise in jedem Betriebszyklus des Einspritzventils 10, d. h. bei jedem Ladevorgang des Aktors 12 aktiv sein, während der Regler R4 vorzugsweise nur in jedem n-ten Ladevorgang des Aktors

12 aktiv ist. Dies ist besonders vorteilhaft, weil die erfindungsgemäße Erkennung des Zeitpunkts t_4 , zu dem die Ventalnadel 13 auf ihren Ventil Sitz 14a trifft, auf einer Auswertung der zweiten zeitlichen Ableitung $\ddot{U}$ der Aktorspannung U des Aktors 12 basiert und dementsprechend einen größeren Rechenaufwand erfordert als die Verarbeitung der in dem Regler R3 verwendeten Größen U , I .

[0049] Soweit die zeitlichen Ableitungen der Aktorspannung U von der innerhalb der Regler R1, R3 angeordneten Auswerteeinheit 25 ermittelt werden, findet eine derartige Ermittlung entsprechend nur alle n Betriebszyklen statt, obwohl die Berechnung weiterer, für den Betrieb der Regler R1, R3 erforderlicher Größen wie beschrieben vorzugsweise in jedem Betriebszyklus erfolgt.

[0050] Figur 3b zeigt eine Detailansicht des Zeitverlaufs der zweiten zeitlichen Ableitung $\ddot{U}$ der Aktorspannung U des Aktors 12. Erfindungsgemäß wird ein lokales Maximum der zweiten zeitlichen Ableitung $\ddot{U}$ als Merkmal interpretiert, das den Schließzeitpunkt $t_{\text{schlie\ss}}$ ($= t_4$ gemäß Figur 2a) angibt. Figur 3b zeigt das entsprechende lokale Maximum der zweiten zeitlichen Ableitung $\ddot{U}$ bei $t = t_{\text{schlie\ss}}$.

[0051] Die Auswerteeinheit 25 der in Figur 4b dargestellten Reglerstruktur wertet dementsprechend die zweite zeitliche Ableitung $\ddot{U}$ aus, ermittelt den Schließzeitpunkt $t_{\text{schlie\ss}}$ (Figur 3b) und bildet hieraus wie in Figur 4b dargestellt die Größe $\Delta t_{34\text{ist}}$.

[0052] Unter Verwendung des erfindungsgemäßen Regelverfahrens für die Umladezeit $t_5 - t_3$ während eines Schließvorgangs des Einspritzventils 10 ist eine besonders präzise Einstellung der tatsächlichen Schließzeit $t_4 - t_3$ möglich.

[0053] Die Auswertung des tatsächlichen Schließzeitpunkts $t_{\text{schlie\ss}}$ gemäß Figur 3b kann alternativ auch durch eine Analyse der ersten zeitlichen Ableitung der Aktorspannung U oder gleichwertige, dem Fachmann bekannte, Maßnahmen erfolgen.

[0054] Die Figuren 5a und 5b stellen weitere Zeitverläufe der Aktorspannung U dar, wie sie bei dem Betrieb des Einspritzventils 10 auftreten können.

[0055] Aus beiden Figuren 5a, 5b ist ersichtlich, dass während des Entladens des Aktors 12 im Rahmen eines Öffnungsvorgangs des Einspritzventils 10 zu einem Zeitpunkt t_7 , insbesondere direkt nach dem Zeitpunkt t_7 , Schwankungen der Aktorspannung U auftreten, die ebenso wie die beschriebene Rückwirkungsspannung aufgrund einer Rückwirkung von Komponenten der Hydraulik bzw. der Ventalnadel 13 auf den Aktor 12 entstehen. Diese Schwankungen der Aktorspannung U sind unerwünscht und werden bei einer weiteren sehr vorteilhaften Ausführungsform des erfindungsgemäßen Betriebsverfahrens wirksam vermieden.

[0056] Erfindungsgemäß ist erkannt worden, dass die vorstehend beschriebenen Schwankungen der Aktorspannung U ausbleiben, wenn die Ansteuerung des Aktors 12 derart erfolgt, dass die Ventalnadel 13 den Ventilsitz 14a und/oder den Nadelhubanschlag 14b erreicht, wenn die Bestromung des Aktors 12 beendet wird. Um

eine derartige Ansteuerung des Aktors 12 zu erzielen, sieht eine besonders vorteilhafte Variante des erfindungsgemäßen Betriebsverfahrens vor, dass der Spannungshub ΔU so gewählt wird, dass die erste zeitliche Ableitung $\dot{U}$ der Aktorspannung U bzw. deren Betrag minimal wird zwischen einem Ende t_{BE} (Figur 3a) der Bestromung des Aktors 12 und einem ersten Vorzeichenwechsel t_{VZW} (Figur 3a) der ersten zeitlichen Ableitung $\dot{U}$ der Aktorspannung U seit dem Ende t_{BE} der Bestromung des Aktors 12.

[0057] D. h., das erfindungsgemäße Verfahren analysiert die erste zeitliche Ableitung $\dot{U}$ der Aktorspannung U des Aktors 12 und minimiert diese in dem fraglichen Zeitbereich $t_{VZW} - t_{BE}$, zu dem die Ventilnadel 13 auf den Ventilsitz 14a bzw. den Nadelhubanschlag 14b trifft. Ausgehend von einer fest vorgegebenen Lade- bzw. Entladezeit wird beispielsweise jeweils am Ende der Lade-/Entladezeit die erste zeitliche Ableitung der Aktorspannung U ermittelt, vgl. die Größe $\dot{U}_{ist}$ der Regler R5, R6 aus Figur 6. Zur Minimierung der ersten zeitlichen Ableitung $\dot{U}$ der Aktorspannung U wird als Sollwert $\dot{U}_{soll}$ der Wert Null vorgegeben, und eine entsprechende Regeldifferenz wird dem Funktionsblock 26 des Reglers R6 zugeführt. Der Funktionsblock 26 bildet erfindungsgemäß einen Mittelwert über der Regeldifferenz der letzten beispielsweise drei zurückliegenden Betriebszyklen des Einspritzventils 10. Dieser Mittelwert wird durch den nachgeordneten Funktionsblock 35 transformiert in einen Sollwert für einen erfindungsgemäß einzustellenden Spannungshub ΔU_{soll} , der die erfindungsgemäße Minimierung der ersten zeitlichen Ableitung $\dot{U}$ der Aktorspannung U zum Ende eines jeweiligen Umladevorgangs bewirkt.

[0058] Hierdurch ist vorteilhaft sichergestellt, dass innerhalb der fest vorgegebenen Umladezeit, jeweils zu deren Ende, vgl. den Zeitpunkt t_7 aus den Figuren 5a, 5b, 5c, einerseits sowohl die Bestromung des Aktors 12 beendet wird und andererseits die Ventilnadel 13 das jeweilige, ihren Hubweg begrenzende Element 14a, 14b kontaktiert.

[0059] Bei der Verwendung des erfindungsgemäßen Regelungsverfahrens gemäß Figur 6 ist eine Betrachtung etwaig auftretender Rückwirkungsspannungen (vgl. Figur 2a) nicht mehr erforderlich, weswegen der Regler R2 aus Figur 4a ohne Weiteres durch den Regler R6 aus Figur 6 ersetzt werden kann. Der Funktionsblock 34 in dem Regler R5 korrespondiert hinsichtlich seiner Funktion mit dem Funktionsblock 30 aus dem Regler R1 (Figur 4a).

[0060] Vorteilhaft kann bei dem erfindungsgemäßen Verfahren anstelle der Aktorspannung U auch eine entsprechende gefilterte Größe verwendet werden.

[0061] Analog zu der Mittelwertbildung der Regeldifferenz durch den Funktionsblock 26 des Reglers R6 (Figur 6) kann auch bei den Reglern R2 (Figur 4a), R4 (Figur 4b) eine Mittelwertbildung der betreffenden Regeldifferenz vorgesehen sein, um die Stabilität des jeweiligen Reglers zu steigern.

[0062] Da der Regler R2 (Figur 4a) bzw. R4 (Figur 4b) den Sollwert für den betreffend nachgeordneten Regler R1 bzw. R3 ändert bzw. bildet, sind die nachgeordneten Regler R1, R3 bevorzugt so konzipiert, dass sie schneller arbeiten als die übergeordneten Regler R2, R4. Dies kann wie vorstehend bereits beschrieben z.B. durch eine entsprechende Auslegung der Zykluszeit für die übergeordneten Regler R2, R4 erreicht werden, die bevorzugt nur jeden n-ten Betriebszyklus aktiviert sind. Im Sinne einer besonders schnellen Regelung durch die nachgeordneten Regler R1, R3 wird hierbei bevorzugt auch keine Mittelwertbildung der jeweiligen Regeldifferenz vorgesehen.

[0063] Generell können die Regler R1, ..., R4 jede beliebige, für die vorstehenden Betriebszwecke geeignete Charakteristik aufweisen, wobei insbesondere ein P (proportional)-Verhalten und/oder ein I (integral)-Verhalten in Betracht kommt.

[0064] Das erfindungsgemäße Verfahren ermöglicht durch die Regelung des Spannungshubs ΔU vorteilhaft z.B. ein präzises Konstanthalten des Spannungshubs ΔU , so dass die Auswirkungen temperaturbedingter Änderungen der Eigenschaften des Aktors 12, die sich beispielsweise während des Betriebs ergeben, auf eine tatsächlich eingespritzte Kraftstoffmenge vermindert bzw. komplett kompensiert werden. D.h., durch die erfindungsgemäße Regelung des Spannungshubs ΔU auf einen vorgebbaren, vorzugsweise konstanten, Wert, kann in Verbindung mit einer bestimmten korrespondierenden Entladezeit vorteilhaft eine Temperaturkompensation der Einspritzzeigenschaften des Kraftstoffeinspritzventils 10 und damit auch der eingespritzten Kraftstoffmenge erreicht werden.

[0065] Temperaturbedingte Änderungen des Aktors 12 wie z.B. eine Änderung seiner elektrischen Kapazität wirken sich auch auf die Umladezeit Δt_{35soll} aus. Auch hier kann die erfindungsgemäße Regelung der Umladezeit Δt_{35soll} zur Realisierung einer Temperaturkompensation, d.h. z.B. zum Konstanthalten einer vorgegebenen Umladezeit Δt_{35soll} verwendet werden.

[0066] Die erfindungsgemäße Verwendung des Spannungshubs und der Umladezeit als Regelgröße vermeidet ferner vorteilhaft die Notwendigkeit einer direkten Regelung der entsprechenden Ströme I_E , I_L , die aufgrund einer üblicherweise verhältnismäßig geringen Genauigkeit bei der messtechnischen Erfassung der Ströme nachteilig ist. Die für die erfindungsgemäße Regelung erforderlichen Größen Aktorspannung U und Zeit t können demgegenüber sehr präzise erfasst werden und ermöglichen eine dementsprechend präzise Regelung.

Patentansprüche

1. Verfahren zum Betreiben eines Einspritzventils (10), insbesondere eines Kraftstoffeinspritzventils einer Brennkraftmaschine eines Kraftfahrzeugs, wobei das Einspritzventil (10) einen piezoelektrischen Ak-

- tor (12) zum Antrieb einer mit dem Aktor (12), vorzugsweise hydraulisch, gekoppelten Ventilnadel (13) aufweist, wobei der Aktor (12) ausgehend von einer einem ersten Betriebszustand des Einspritzventils (10) entsprechenden Ausgangsspannung (U_0) um einen vorgebbaren Spannungshub (ΔU) auf eine einem zweiten Betriebszustand des Einspritzventils (10) entsprechende Zielspannung (U_1) umgeladen, d.h. aufgeladen oder entladen, wird, **dadurch gekennzeichnet**, wobei die Ventilnadel (13) in dem ersten Betriebszustand so auf einem Ventilsitz (14a) ruht, dass das Einspritzventil (10) geschlossen ist, und wobei der Aktor (12) bei der Ausgangsspannung (U_0) eine erste Länge aufweist, und dass der Aktor (12) um den vorgebbaren Spannungshub (ΔU) auf die Zielspannung (U_1) entladen wird, wobei er sich auf eine zweite Länge, die kleiner ist als die erste Länge, verkürzt, um das Einspritzventil (10) von seinem geschlossenen Zustand in seinen geöffneten Zustand zu überführen, dass die Ventilnadel (13) während des Öffnens des Einspritzventils (10) und vor dem Erreichen eines Nadelhubanschlags (14b), der einem vollständig geöffneten Zustand des Einspritzventils (10) entspricht, eine Rückwirkung auf den Aktor (12) ausübt, die die Aktorspannung (U) um eine Rückwirkungsspannung (ΔU_R) erhöht, und dass der Spannungshub (ΔU) so gewählt wird, dass sich eine gewünschte Rückwirkungsspannung (ΔU_R) ergibt, wobei die Rückwirkung der Ventilnadel (13) auf den Aktor (12) dadurch verursacht wird, dass sich die Ventilnadel (13) auch nach einem Ende der Bestromung des Aktors zunächst weiter auf den Aktor (12) zu bewegt und eine entsprechende Kraft auf den - nach dem Bestromungsende im wesentlichen ruhenden - Aktor (12) ausübt, die dem piezoelektrischen Effekt entsprechend zu der Rückwirkungsspannung (ΔU_R) führt.
2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Aktor (12) in einer vorgebbaren Umladezeit mit einem von dem Spannungshub (ΔU) abhängigen Umladestrom umgeladen wird.
 3. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Rückwirkungsspannung (ΔU_R) in Abhängigkeit einer vorgebbaren Zeit für den Öffnungsvorgang des Einspritzventils (10) gewählt wird.
 4. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Spannungshub (ΔU) so gewählt ist, dass die Ventilnadel (13) den Ventilsitz (14a) und/oder einen/den Nadelhubanschlag (14b) erreicht, wenn die Bestromung des Aktors (12) beendet wird.
 5. Verfahren nach Anspruch 4, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Spannungshub (ΔU) so gewählt
- ist, dass ein Betrag der ersten zeitlichen Ableitung der Aktorspannung (U) minimal wird zwischen einem Ende der Bestromung des Aktors (12) und einem ersten Vorzeichenwechsel der ersten zeitlichen Ableitung der Aktorspannung (U) seit dem Ende der Bestromung des Aktors (12).
6. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** eine Umladezeit, die für das Überführen des Einspritzventils (10) von seinem geöffneten Zustand in seinen geschlossenen Zustand erforderlich ist, geregelt wird.
 7. Verfahren nach Anspruch 6, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Umladezeit in Abhängigkeit einer gewünschten Schließzeit gewählt wird, innerhalb der sich die Ventilnadel (13) von einer Ausgangsposition auf ihren Ventilsitz (14a) zubewegt.
 8. Verfahren nach einem der vorstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** eine Regelung des Spannungshubs (ΔU) vorzugsweise für jeden Betriebszyklus des Einspritzventils (10) vorgenommen wird.
 9. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 8, **dadurch gekennzeichnet, dass** a) die Regelung der Rückwirkungsspannung (ΔU_R) und/oder b) die Regelung der ersten zeitlichen Ableitung ($\dot{U}$) der Aktorspannung (U) zwischen einem Ende der Bestromung des Aktors (12) und einem ersten Vorzeichenwechsel der ersten zeitlichen Ableitung ($\dot{U}$) der Aktorspannung (U) seit dem Ende der Bestromung des Aktors (12) und/oder c) die Regelung der Schließzeit in jedem n-ten Betriebszyklus des Einspritzventils (10) erfolgt, wobei $n > 1$.
 10. Computerprogramm, **dadurch gekennzeichnet, dass** es zur Ausführung des Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 9 programmiert ist.
 11. Steuergerät (20) für ein Kraftstoffeinspritzventil (10), insbesondere einer Brennkraftmaschine eines Kraftfahrzeugs, **dadurch gekennzeichnet, dass** es zur Ausführung des Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 9 ausgebildet ist.

Claims

1. Method for operating an injection valve (10), in particular a fuel injection valve of an internal combustion engine of a motor vehicle, wherein the injection valve (10) has a piezoelectric actuator (12) for driving a valve needle (13) which is coupled, preferably hydraulically, to the actuator 12, the actuator being recharged, i.e. charged or discharged, by a predefined voltage swing (ΔU) starting from an output volt-

- age (U_0) corresponding to a first operating state of the injection valve (10) to a target voltage (U_1) corresponding to a second operating state of the injection valve (10), **characterized in that** in the first operating state the valve needle (13) rests on a valve seat (14a) in such a way that the injection valve (10) is closed, and at the output voltage (U_0) the actuator (12) has a first length, and **in that** the actuator (12) is discharged by the predefinable voltage swing (ΔU) to the target voltage (U_1), wherein said actuator (12) shortens to a second length which is shorter than the first length in order to change the injection valve (10) from its closed state into its open state, **in that** during the opening of the injection valve (10) and before a needle/stop (14b) which corresponds to a completely open state of the injection valve (10) is reached the valve needle (13) applies a reaction to the actuator (12) which increases the actuator voltage (U) by a reaction voltage (ΔU_R), and **in that** the voltage swing (ΔU) is selected such that a desired reaction voltage (ΔU_R) is produced, wherein the reaction of the valve needle (13) applied to the actuator (12) is caused **in that** the valve needle (13) also firstly moves further onto the actuator (12) after the end of the energization of the actuator and the valve needle (13) applies a corresponding force to the actuator (12), which is essentially stationary after the end of energization, which force controls the piezoelectric effect in accordance with the reaction voltage (ΔU_R).
2. Method according to Claim 1, **characterized in that** the actuator (12) is recharged in a predefinable recharging time with a recharging current which is dependent on the voltage swing (ΔU).
 3. Method according to Claim 1, **characterized in that** the reaction voltage (ΔU_R) is selected for the opening process of the injection valve (10) as a function of a predefinable time.
 4. Method according to one of the preceding claims, **characterized in that** the voltage swing (ΔU) is selected such that the valve needle (13) reaches the valve seat (14a) and/or a/the needle/stop (14b) when the energization of the actuator (12) is ended.
 5. Method according to Claim 4, **characterized in that** the voltage swing (ΔU) is selected such that an absolute value of the first time derivative of the actuator voltage (U) becomes minimal between an end of the energization of the actuator (12) and a first change of sign of the first time derivative of the actuator voltage (U) since the end of the energization of the actuator (12).
 6. Method according to one of the preceding claims, **characterized in that** a recharging time, which is necessary for changing the injection valve (10) from its opened state into its closed state, is regulated.
 7. Method according to Claim 6, **characterized in that** the recharging time is selected as a function of a desired closing time within which the valve needle (13) moves from an initial position onto its valve seat (14a).
 8. Method according to one of the preceding claims, **characterized in that** the voltage swing (ΔU) is preferably regulated for each operating cycle of the injection valve (10).
 9. Method according to one of Claims 1 to 8, **characterized in that** a) the regulation of the reaction voltage (ΔU_R) and/or b) the regulation of the first time derivative ($\dot{U}$) of the actuator voltage (U) takes place between the end of the energization of the actuator (12) and a first change of sign of the first time derivative ($\dot{U}$) of the actuator voltage (U) since the end of the energization of the actuator (12) and/or c) the regulation of the closing time takes place in every n -th operating cycle of the injection valve (10), wherein $n > 1$.
 10. Computer program, **characterized in that** it is programmed to carry out the method according to one of Claims 1 to 9.
 11. Control device (20) for a fuel injection valve (10), in particular of an internal combustion engine of a motor vehicle, **characterized in that** it is designed to carry out the method according to one of Claims 1 to 9.

Revendications

1. Procédé pour faire fonctionner une soupape d'injection (10), en particulier une soupape d'injection de carburant d'un moteur à combustion interne d'un véhicule automobile, la soupape d'injection (10) présentant un actionneur piézoélectrique (12) pour l'entraînement d'un pointeau de soupape (13) accouplé de préférence hydrauliquement à l'actionneur (12), l'actionneur (12), partant d'une tension initiale (U_0) correspondant à un premier état de fonctionnement de la soupape d'injection (10), étant commuté, c'est-à-dire étant chargé ou déchargé, d'une course de tension prédéfinissable (ΔU) à une tension cible (U_1) correspondant à un deuxième état de fonctionnement de la soupape d'injection (10), **caractérisé en ce que** le pointeau de soupape (13), dans le premier état de fonctionnement, repose sur un siège de soupape (14a) de telle sorte que la soupape d'injection (10) soit fermée, et l'actionneur (12), à la tension initiale (U_0), présente une première longueur, et **en ce que** l'actionneur (12) est déchargé de la course de tension prédéfinissable (ΔU) à la tension cible

- (U₁), en se raccourcissant à une deuxième longueur inférieure à la première longueur, afin de commuter la soupape d'injection (10) de son état fermé dans son état ouvert, **en ce que** le pointeau de soupape (13), pendant l'ouverture de la soupape d'injection (10) et avant d'atteindre une butée de fin de course de pointeau (14b), qui correspond à un état complètement ouvert de la soupape d'injection (10), exerce une réaction sur l'actionneur (12), qui augmente la tension d'actionneur (U) d'une tension de réaction (ΔU_R), et **en ce que** la course de tension (ΔU) est sélectionnée de telle sorte qu'il en résulte une tension de réaction souhaitée (ΔU_R), la réaction du pointeau de soupape (13) sur l'actionneur (12) étant provoquée par le fait que le pointeau de soupape (13), également après la fin de l'alimentation en courant de l'actionneur, se rapproche initialement davantage de l'actionneur (12) et exerce une force correspondante sur l'actionneur (12) - essentiellement au repos après la fin de l'alimentation en courant, laquelle force conduit à l'effet piézoélectrique correspondant à la tension de réaction (ΔU_R).
2. Procédé selon la revendication 1, **caractérisé en ce que** l'actionneur (12) est commuté dans un temps de commutation prédéfinissable avec un courant de commutation dépendant de la course de tension (ΔU).
 3. Procédé selon la revendication 1, **caractérisé en ce que** la tension de réaction (ΔU_R) est sélectionnée en fonction d'un temps prédéfinissable pour l'opération d'ouverture de la soupape d'injection (10).
 4. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, **caractérisé en ce que** la course de tension (ΔU) est sélectionnée de telle sorte que le pointeau de soupape (13) atteigne le siège de soupape (14a) et/ou une/la butée de fin de course de pointeau (14b) lorsque l'alimentation en courant de l'actionneur (12) est coupée.
 5. Procédé selon la revendication 4, **caractérisé en ce que** la course de tension (ΔU) est sélectionnée de telle sorte qu'une valeur de la première dérivée dans le temps de la tension d'actionneur (U) soit minimale entre une fin de l'alimentation en courant de l'actionneur (12) et un premier changement de signe de la première dérivée dans le temps de la tension d'actionneur (U) depuis la fin de l'alimentation en courant de l'actionneur (12).
 6. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, **caractérisé en ce qu'un** temps de commutation nécessaire pour la commutation de la soupape d'injection (10) de son état ouvert dans son état fermé est régulé.
 7. Procédé selon la revendication 6, **caractérisé en ce que** le temps de commutation est sélectionné en fonction d'un temps de fermeture souhaité, à l'intérieur duquel le pointeau de soupape (13) se déplace d'une position initiale à son siège de soupape (14a).
 8. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, **caractérisé en ce qu'une** régulation de la course de tension (ΔU) est effectuée de préférence pour chaque cycle de fonctionnement de la soupape d'injection (10).
 9. Procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 8, **caractérisé en ce que** a) la régulation de la tension de réaction (ΔU_R) et/ou b) la régulation de la première dérivée dans le temps (U) de la tension d'actionneur (U) entre une fin de l'alimentation en courant de l'actionneur (12) et un premier changement de signe de la première dérivée dans le temps (U) de la tension d'actionneur (U) depuis la fin de l'alimentation en courant de l'actionneur (12) et/ou c) la régulation du temps de fermeture ont lieu à chaque n^{ième} cycle de fonctionnement de la soupape d'injection (10), avec $n > 1$.
 10. Programme informatique, **caractérisé en ce qu'il** est programmé pour mettre en oeuvre le procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 9.
 11. Appareil de commande (20) pour une soupape d'injection de carburant (10), en particulier d'un moteur à combustion interne d'un véhicule automobile, **caractérisé en ce qu'il** est réalisé pour mettre en oeuvre le procédé selon l'une quelconque des revendications 1 à 9.

Fig. 1

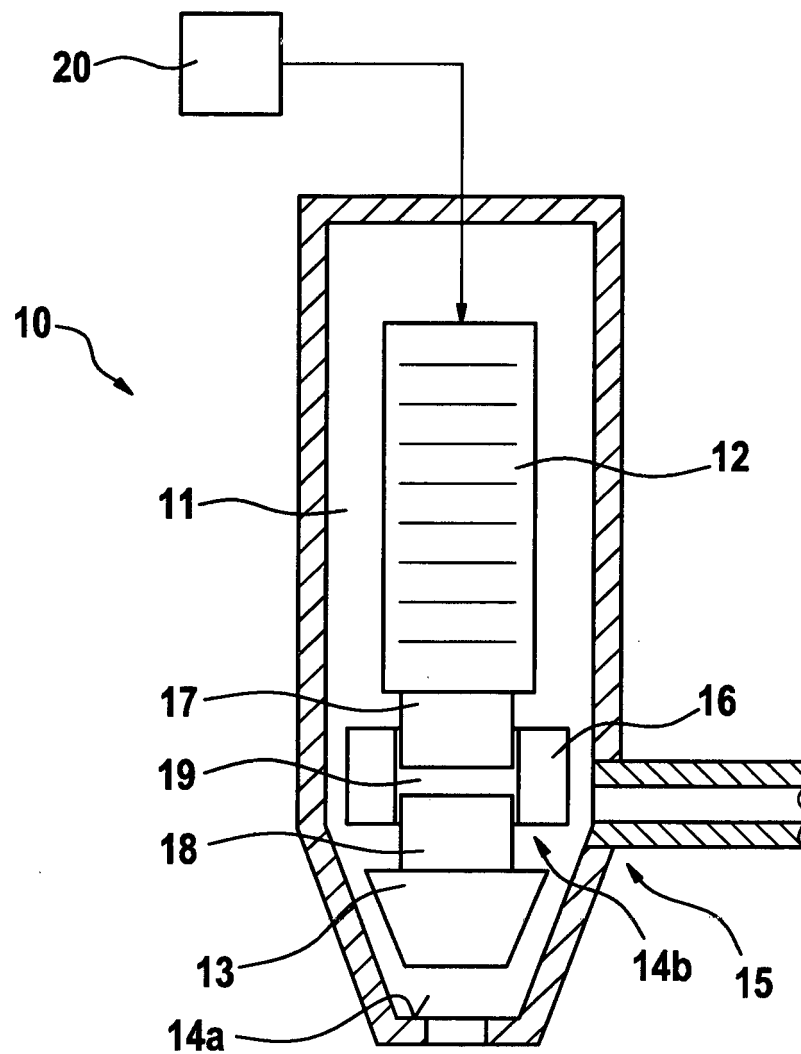


Fig. 2a

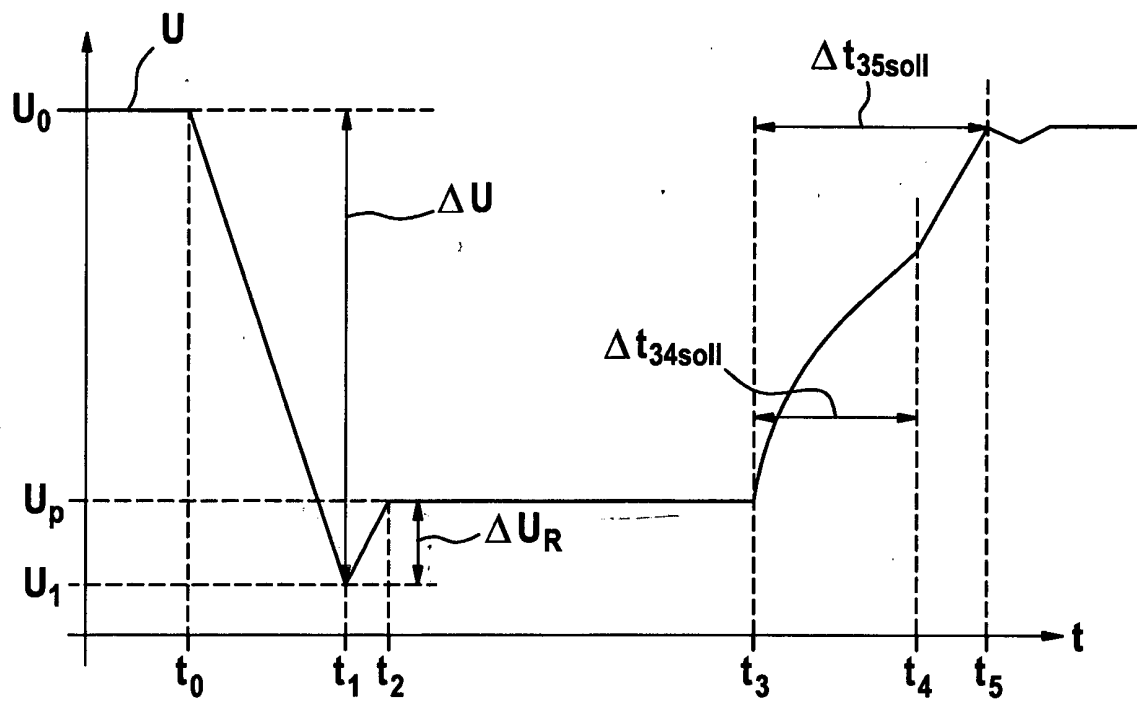


Fig. 2b

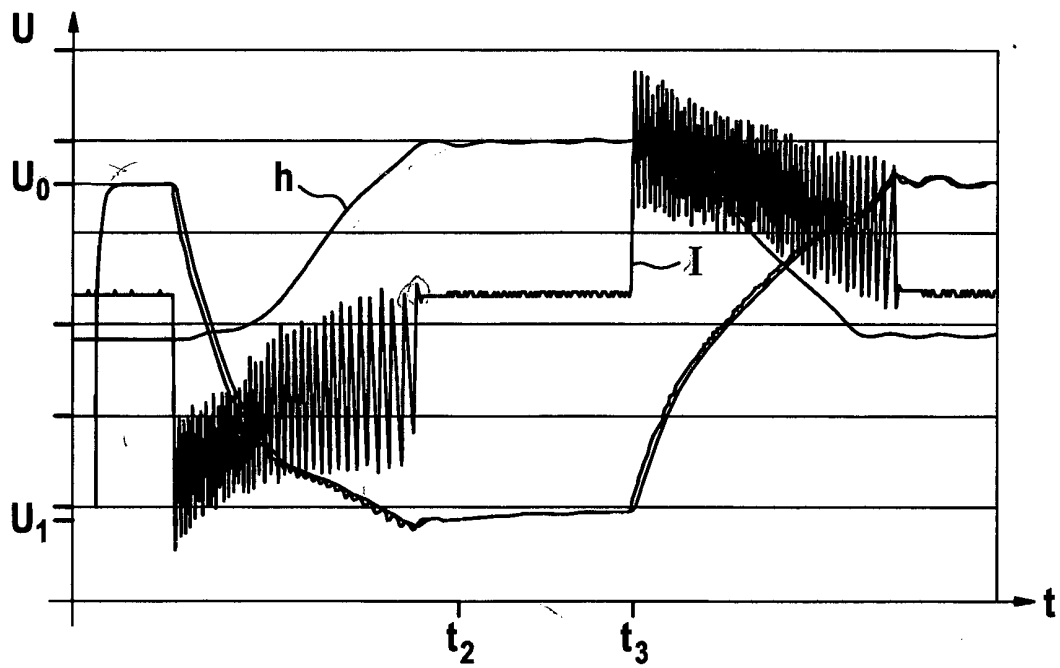


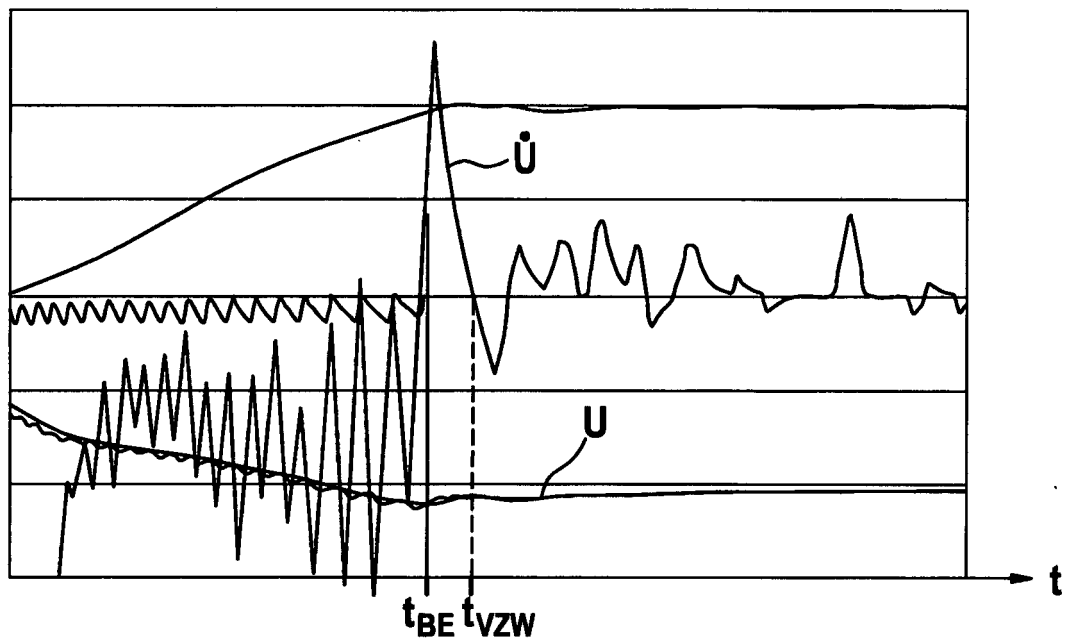
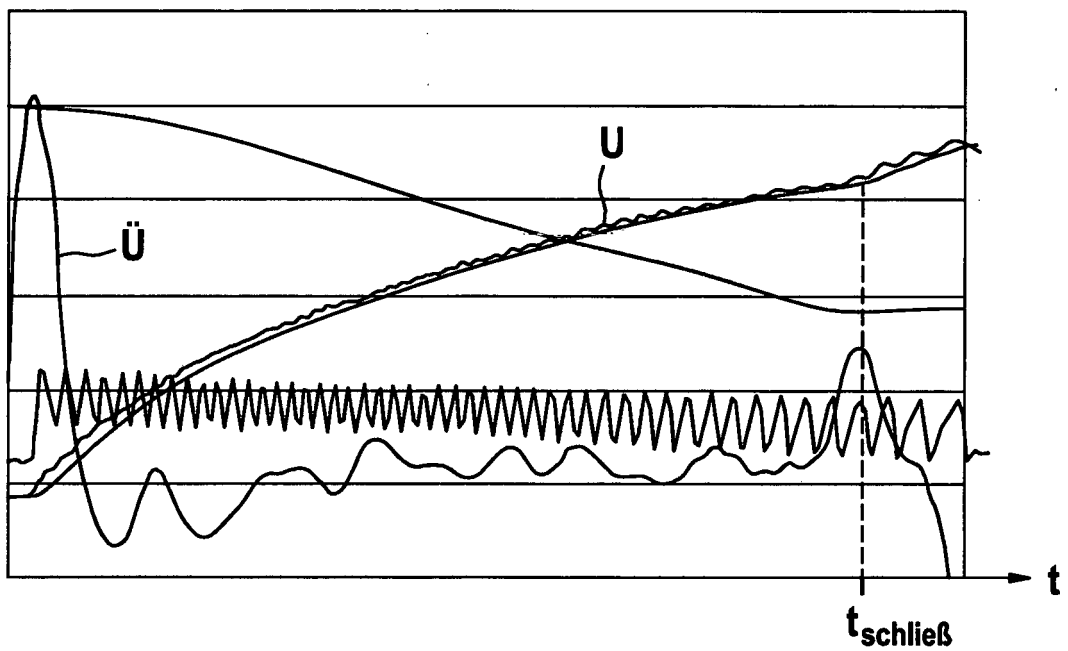
Fig. 3a**Fig. 3b**

Fig. 4a

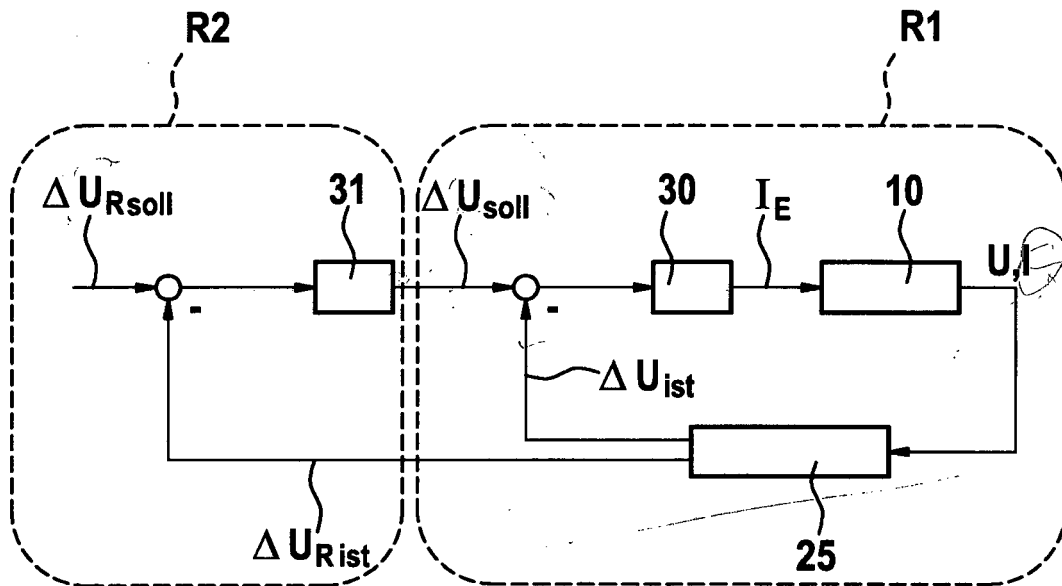


Fig. 4b

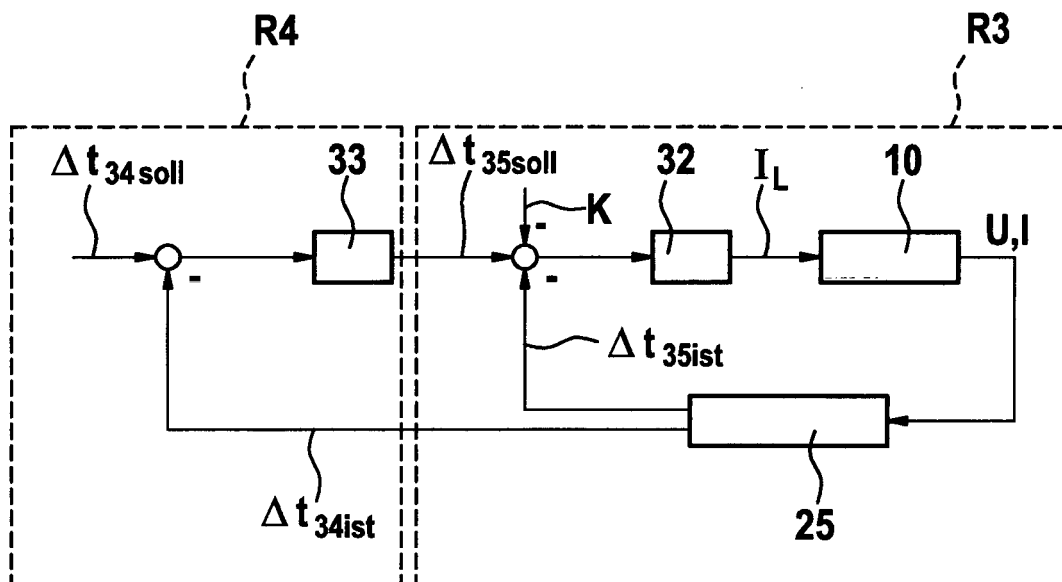


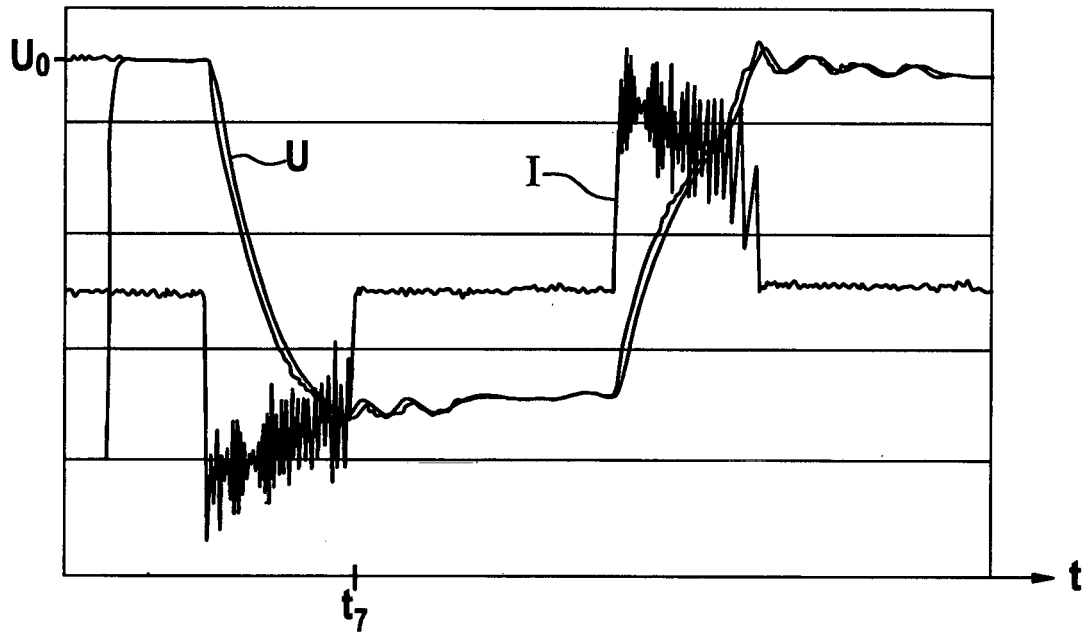
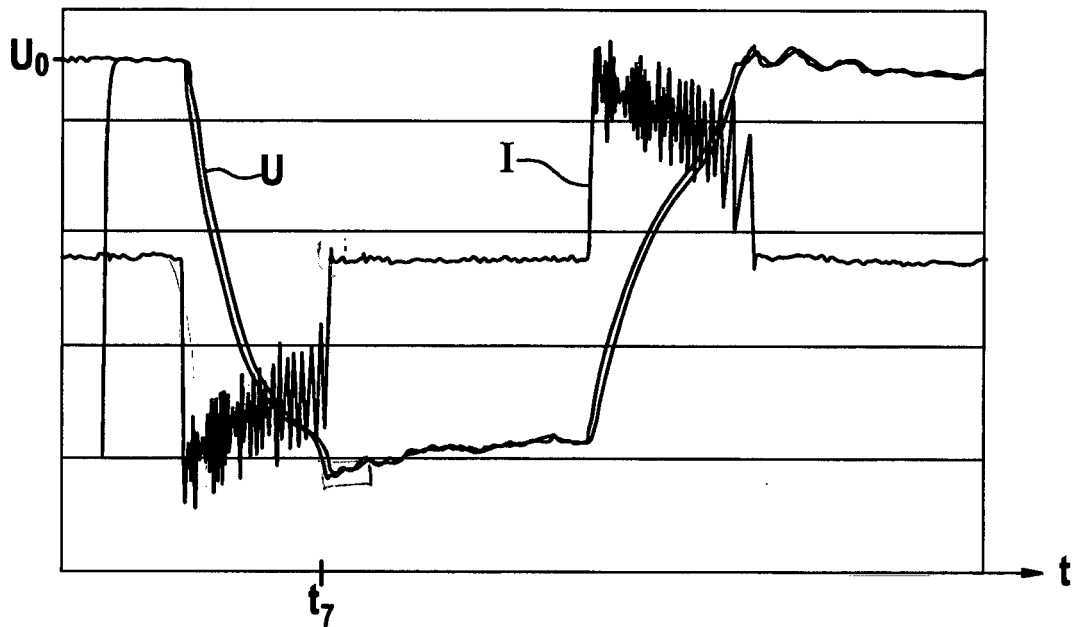
Fig. 5a**Fig. 5b**

Fig. 5c

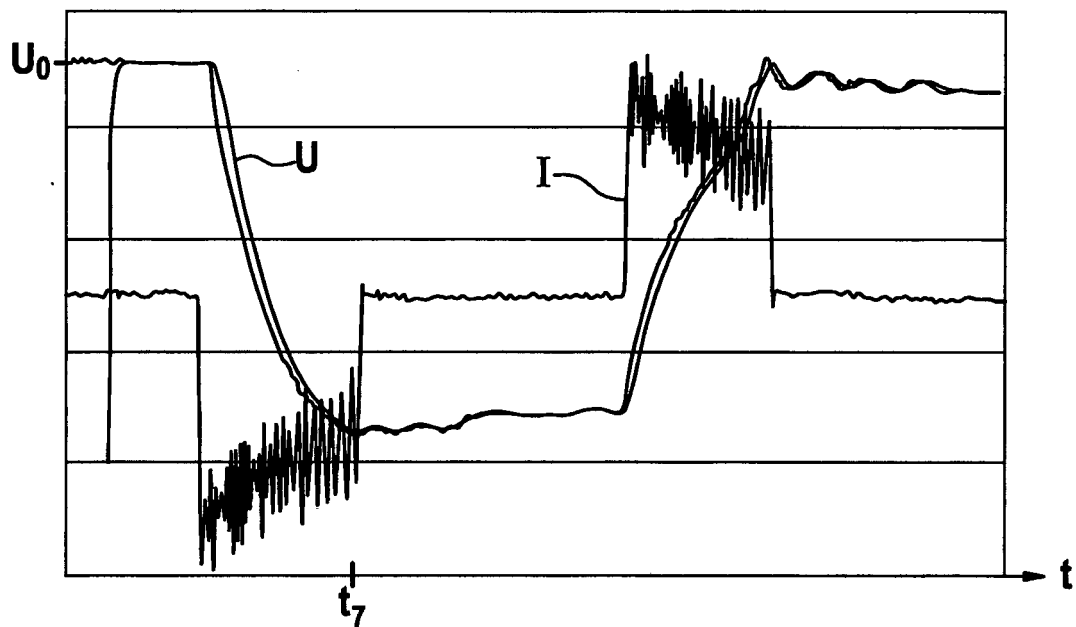
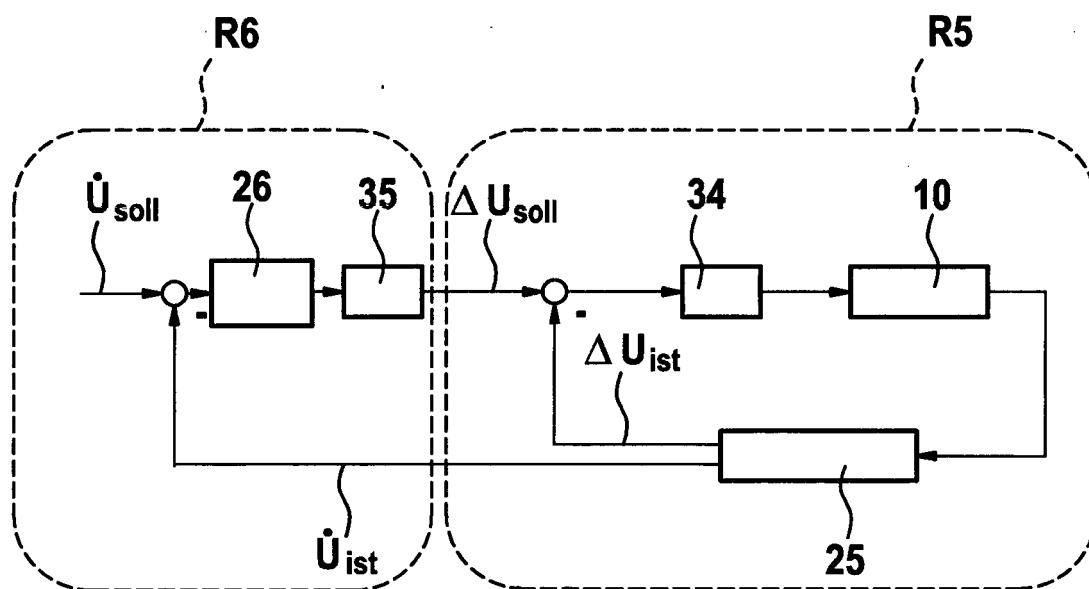


Fig. 6



IN DER BESCHREIBUNG AUFGEFÜHRTE DOKUMENTE

Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde ausschließlich zur Information des Lesers aufgenommen und ist nicht Bestandteil des europäischen Patentdokumentes. Sie wurde mit größter Sorgfalt zusammengestellt; das EPA übernimmt jedoch keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.

In der Beschreibung aufgeführte Patentdokumente

- WO 2005026516 A [0002]