



(19)
Bundesrepublik Deutschland
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) DE 600 11 038 T2 2005.07.21

(12)

Übersetzung der europäischen Patentschrift

(97) EP 1 138 903 B1

(51) Int Cl.⁷: F02D 41/20

(21) Deutsches Aktenzeichen: 600 11 038.9

(96) Europäisches Aktenzeichen: 00 106 962.4

(96) Europäischer Anmeldetag: 01.04.2000

(97) Erstveröffentlichung durch das EPA: 04.10.2001

(97) Veröffentlichungstag
der Patenterteilung beim EPA: 26.05.2004

(47) Veröffentlichungstag im Patentblatt: 21.07.2005

(73) Patentinhaber:

Robert Bosch GmbH, 70469 Stuttgart, DE

(72) Erfinder:

Rueger, Johannes-Joerg, 71665 Vaihingen/Enz,
DE; Hock, Alexander, 71229 Leonberg, DE

(84) Benannte Vertragsstaaten:

DE, FR, GB, IT, SE

(54) Bezeichnung: Zeit und Fall-kontrolliertes Aktivierungssystem für die Aufladung und die Entladung von piezoelektrischen Elementen

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach der Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents kann jedermann beim Europäischen Patentamt gegen das erteilte europäische Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch ist schriftlich einzureichen und zu begründen. Er gilt erst als eingelebt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist (Art. 99 (1) Europäisches Patentübereinkommen).

Die Übersetzung ist gemäß Artikel II § 3 Abs. 1 IntPatÜG 1991 vom Patentinhaber eingereicht worden. Sie wurde vom Deutschen Patent- und Markenamt inhaltlich nicht geprüft.

Beschreibung

[0001] Die vorliegende Erfindung betrifft eine Vorrichtung wie in Anspruch 1 definiert und ein Verfahren wie in Anspruch 12 definiert und eine Anwendung zur Verwendung wie in Anspruch 18 definiert; d.h. eine Vorrichtung und ein Verfahren und eine Anwendung zur Verwendung zum Laden und Entladen eines piezoelektrischen Elements, wobei sowohl das Laden als auch Entladen zumindest teilweise über ein Element erfolgt, das im wesentlichen als eine Induktanz für den Lade- und Entladestrom dient.

[0002] Die ausführlicher betrachteten vorliegenden piezoelektrischen Elemente sind insbesondere, aber nicht ausschließlich, als Aktuatoren verwendete piezoelektrische Elemente. Piezoelektrische Elemente können für solche Zwecke verwendet werden, da sie bekannterweise die Eigenschaft besitzen, sich als Funktion einer an sie angelegten Spannung zusammenzuziehen oder auszudehnen.

[0003] Die praktische Implementierung von piezoelektrischen Elementen verwendenden Aktuatoren ist insbesondere dann vorteilhaft, wenn der fragliche Aktuator schnelle und/oder häufige Bewegungen ausführen muß.

[0004] Der Einsatz von piezoelektrischen Elementen als Aktuatoren ist unter anderem bei Kraftstoffeinspritzdüsen für Verbrennungsmotoren von Vorteil. Siehe die Literaturstellen EP 0 371 469 B1 und EP 0 379 182 B1, die durch Bezugnahme hier aufgenommen sind, hinsichtlich der Verwendbarkeit von piezoelektrischen Elementen in Kraftstoffeinspritzdüsen.

[0005] Ein Beispiel für den besten Stand der Technik findet man in DE 198 54 789, die den Oberbegriff von Anspruch 1 zeigt.

[0006] [Fig. 15](#) ist eine schematische Darstellung eines Kraftstoffeinspritzsystems unter Verwendung eines piezoelektrischen Elements **2010** als Aktuator. Unter Bezugnahme auf [Fig. 15](#) wird das piezoelektrische Element **2010** bestromt, damit es sich als Reaktion auf eine gegebene Aktivierungsspannung ausdehnt und zusammenzieht. Das piezoelektrische Element **2010** ist an einen Kolben **2015** gekoppelt. Im ausgedehnten Zustand bewirkt das piezoelektrische Element **2010**, daß der Kolben **2015** in einen Hydraulikadapter **2020** vorragt, der ein Hydraulikfluid, beispielsweise Kraftstoff, enthält. Infolge des Ausdehnens des piezoelektrischen Elements wird ein doppeltwirkendes Steuerventil **2025** hydraulisch von dem Hydraulikadapter **2020** weggedrückt und der Ventil-Absperrkörper **2035** wird von einer ersten geschlossenen Position **2040** weggefahren. Die Kombination aus doppeltwirkendem Steuerventil **2025** und Hohlbohrung **2050** wird deshalb oftmals als ein doppeltwirkendes Doppelsitzventil bezeichnet, weil das

doppeltwirkende Steuerventil **2025**, wenn sich das piezoelektrische Element **2010** in einem nichtangeregten Zustand befindet, in seiner ersten geschlossenen Position **2040** ruht. Wenn das piezoelektrische Element **2010** andererseits vollständig ausgefahren ist, ruht es in seiner zweiten geschlossenen Position **2030**. Die letztere Position des Ventil-Absperrkörpers **2035** ist in [Fig. 15](#) mit Geisterlinien schematisch dargestellt.

[0007] Das Kraftstoffeinspritzsystem umfaßt eine Einspritznadel **2070**, um das Einspritzen von Kraftstoff aus einer unter Druck stehenden Kraftstoffzuführleitung **2060** in den Zylinder (nicht gezeigt) zu gestatten. Wenn das piezoelektrische Element **2010** nicht angeregt ist oder wenn es vollständig ausgefahren ist, ruht das doppeltwirkende Steuerventil **2050** jeweils in seiner ersten geschlossenen Position **2040** oder in seiner zweiten geschlossenen Position **2030**. In jedem Fall hält der Hydraulikraildruck die Einspritznadel **2070** in einer geschlossenen Position. Somit tritt das Kraftstoffgemisch nicht in den Zylinder (nicht gezeigt) ein. Wenn umgekehrt das piezoelektrische Element **2010** angeregt wird, so daß sich das doppeltwirkende Steuerventil **2025** bezüglich der Hohlbohrung **2050** in der sogenannten Mittelposition befindet, dann kommt es in der unter Druck stehenden Kraftstoffzuführleitung **2060** zu einem Druckabfall. Dieser Druckabfall führt in der unter Druck stehenden Kraftstoffzuführleitung **2060** zu einem Druckdifferential zwischen der Oberseite und der Unterseite der Einspritznadel **2070**, so daß die Einspritznadel **2070** angehoben wird und Kraftstoff in den Zylinder (nicht gezeigt) eingespritzt werden kann.

[0008] Aus den deutschen Patentanmeldungen Nr. DE 197 42 073 A1 und DE 197 29 844 A1, die unten beschrieben sind und durch Bezugnahme in ihrer Gänze hier aufgenommen sind, sind piezoelektrische Elemente mit doppeltwirkenden Doppelsitzventilen zum Steuern von Einspritznadeln in einem Kraftstoffeinspritzsystem bekannt.

[0009] Piezoelektrische Elemente sind kapazitive Lasten, die sich, wie oben bereits teilweise angedeutet, gemäß dem jeweiligen Ladungszustand oder der Spannung, der/die darin auftritt oder daran angelegt wird, zusammenziehen und ausdehnen.

[0010] Zum Laden und Entladen eines piezoelektrischen Elements sind zwei Grundprinzipien bekannt; das heißt, Laden und Entladen über einen Ohmschen Widerstand und Laden und Entladen über eine Spule. In diesen Fällen dienen sowohl der Ohmsche Widerstand als auch die Spule unter anderem dazu, den beim Laden auftretenden Ladestrom und den beim Entladen auftretenden Entladestrom zu begrenzen.

[0011] Die erste Variante, d.h. Laden und Entladen über einen Ohmschen Widerstand, ist in [Fig. 9](#) dar-

gestellt.

[0012] Das in [Fig. 9](#) mit der Bezugszahl **101** bezeichnete zu ladende oder entladende piezoelektrische Element ist mit einem Ladetransistor **102** und einem Entladetransistor **103** verbunden.

[0013] Der Ladetransistor **102** wird durch einen Ladungsverstärker **104** aktiviert und verbindet im leitenden Zustand das piezoelektrische Element **101** mit einer positiven Versorgungsspannung; der Entladetransistor **103** wird durch einen Entladeverstärker **105** aktiviert und verbindet im leitenden Zustand das piezoelektrische Element **101** mit Masse.

[0014] Wenn sich der Ladetransistor **102** im leitenden Zustand befindet, fließt ein Ladestrom durch ihn und lädt das piezoelektrische Element **101**. Bei zunehmendem Laden des piezoelektrischen Elements **101** steigt die in ihm auftretende Spannung und auch seine Außenmaße ändern sich dementsprechend. Eine Blockierung des Ladetransistors **102**, d.h. eine Unterbrechung oder eine Beendigung des Ladevorgangs, bewirkt, daß die im piezoelektrischen Element **101** gespeicherte Ladung und die dadurch in ihm hergestellte Spannung und somit auch die existierenden Außenmaße des piezoelektrischen Elements **101** auf im wesentlichen ungeänderte Weise beibehalten werden.

[0015] Wenn sich der Entladetransistor **103** im leitenden Zustand befindet, fließt ein Entladestrom durch das piezoelektrische Element **101** und entlädt es. Bei zunehmender Entladung des piezoelektrischen Elements **101** nimmt die in ihm auftretende Spannung ab und auch seine Außenmaße ändern sich dementsprechend. Eine Blockierung des Entladetransistors **103**, d.h. eine Unterbrechung oder eine Beendigung des Entladevorgangs, bewirkt, daß die noch im piezoelektrischen Element **101** gespeicherte Ladung und die dadurch in ihm hergestellte Spannung und somit auch die existierenden Außenmaße des piezoelektrischen Elements **101** beibehalten werden.

[0016] Der Ladetransistor **102** und der Entladetransistor **103** wirken hinsichtlich des Ladestroms und Entladestroms wie steuerbare Ohmsche Widerstände. Die sich daraus ergebende Steuerbarkeit des Ladestroms und Entladestroms ermöglicht es, daß der Ladevorgang und der Entladevorgang präzise wie gewünscht erfolgen können. Der durch den Ladetransistor **102** fließende Ladestrom und der durch den Entladetransistor **103** fließende Entladestrom erzeugen jedoch darin einen nicht unerheblichen Leistungsverlust. Der Energieverlust in den Transistoren für jeden Lade/Entladezyklus ist mindestens doppelt so groß wie die im piezoelektrischen Element **101** gespeicherte Energie. Dieser hohe Energieverlust führt zu einer sehr ausgeprägten Erwärmung des Lade-

transistors **102** und des Entladetransistors **103**.

[0017] Aus diesem Grund wird prinzipiell unter anderem die bereits obenerwähnte zweite Variante zum Laden und Entladen des piezoelektrischen Elements – d.h. Laden und Entladen über eine Spule – häufig verwendet; eine praktische Implementierung dieser zweiten Variante ist in [Fig. 10](#) dargestellt.

[0018] Das in [Fig. 10](#) mit der Bezugszahl **201** bezeichnete zu ladende und entladende piezoelektrische Element ist eine Komponente eines Ladestromkreises, der durch einen Ladeschalter **202** geschlossen werden kann, und eines Entladestromkreises, der durch einen Entladeschalter **206** geschlossen werden kann; der Ladestromkreis umfaßt eine Reihenschaltung, die aus einem Ladeschalter **202**, einer Diode **203**, einer Ladespule **204**, dem piezoelektrischen Element **201** und einer Spannungsquelle **205** besteht. Der Entladestromkreis umfaßt eine Reihenschaltung, die aus einem Entladeschalter **206**, einer Diode **207**, einer Entladespule **208** und dem piezoelektrischen Element **201** besteht.

[0019] Die Diode **203** des Ladestromkreises verhindert, daß ein möglicher Strom, der das piezoelektrische Element entladen könnte, in den Ladestromkreis fließt.

[0020] Die Diode **207** des Entladestromkreises verhindert, daß ein möglicher Strom, der das piezoelektrische Element laden könnte, in den Entladestromkreis fließt.

[0021] Wenn der (normalerweise geöffnete) Ladeschalter **202** geschlossen wird, fließt ein Ladestrom in dem Ladestromkreis und bewirkt, daß das piezoelektrische Element **201** geladen wird; die im piezoelektrischen Element **201** gespeicherte Ladung und die dadurch in ihm auftretende Spannung und somit auch die existierenden Außenmaße des piezoelektrischen Elements **201** werden auf im wesentlichen unveränderte Weise beibehalten, wenn der Ladeschalter wieder geöffnet wird.

[0022] Wenn der (normalerweise geöffnete) Entladeschalter **206** geschlossen wird, fließt ein Entladestrom in dem Entladestromkreis und bewirkt, daß das piezoelektrische Element **201** entladen wird; der Ladestatus des piezoelektrischen Elements **201**, die dadurch im piezoelektrischen Element **201** auftretende Spannung und die existierenden Außenmaße des piezoelektrischen Elements **201** werden auf im wesentlichen unveränderte Weise beibehalten, wenn der Entladeschalter wieder geöffnet wird.

[0023] Die Ladespule **204** und die Entladespule **206** stellen ein Element dar, das im wesentlichen als eine Induktanz für den Ladestrom und den Entladestrom wirkt; die Ladespule **204** und das piezoelektrische

Element **201** und die Entladespule **206** und das piezoelektrische Element **201** stellen während des Ladens bzw. Entladens des piezoelektrischen Elements **201** einen LC-Reihenschwingkreis dar.

[0024] Für eine Erörterung bestimmter Schaltungen, die zum Laden und Entladen von piezoelektrischen Elementen verwendet werden, wird auf die obenerwähnten Dokumente EP 0 371 469 B1 und EP 0 379 18-2 B1 verwiesen.

[0025] Die aus den obenerwähnten Dokumenten bekannten und oben hinsichtlich ihrer Grundprinzipien beschriebenen Vorrichtungen und Verfahren sind Vorrichtungen wie im Oberbegriff von Anspruch 1 oder Anspruch 2 definiert und Verfahren wie im Oberbegriff von Anspruch 9 oder Anspruch 10 oder Anspruch 14 definiert.

[0026] Da die Schaltungen, wie sie in [Fig. 10](#) beschrieben sind, weder in dem Ladestromkreis noch in dem Entladestromkreis nennenswerte Ohmsche Widerstände enthalten, ist die durch das Laden und Entladen des piezoelektrischen Elements, d.h. durch den Fluß von Ladestrom und Entladestrom durch Ohmsche Widerstände, erzeugte Wärmeenergie extrem klein.

[0027] Für die praktische Implementierung derartiger Schaltungen wird insbesondere wegen der nicht unerheblichen Größe der Ladespule **204** und der Entladespule **208** relativ viel Platz benötigt.

[0028] Bei dem Aktivieren von piezoelektrischen Elementen oder Piezoaktuatoren besteht die Grundaufgabe darin, den Aktuator innerhalb einer vordefinierten Zeit zu laden und zu entladen.

[0029] Bei dem beschriebenen Aktivierungssystem beispielsweise erfolgt dies durch Regeln des Stroms innerhalb eines Strombandes, wobei das Stromband durch zwei Sollpunkte definiert wird. Das Stromband muß so gewählt werden, daß der mittlere Stromfluß der Gleichung

$$I_{\text{average}} = (C_P \times U_P) / T_A$$

genügt, wobei C_P die Piezokapazität, U_P die Differenz zwischen der Anfangsspannung und der Sollspannung während des Ladens und Entladens bei dem Piezo oder piezoelektrischen Element und T_A die Zeit ist, innerhalb derer der Piezo oder das piezoelektrische Element geladen oder entladen werden muß.

[0030] Jüngere Anwendungen weisen immer kleinere Aktuatoren und deshalb immer geringere Kapazitäten beim Piezo oder beim piezoelektrischen Element auf; es wird jedoch für das Laden oder Entladen die gleiche Zeit gefordert. Diese Anforderungen führen im allgemeinen zu einem viel niedrigeren mittle-

ren Strom von beispielsweise etwa 3 A oder weniger.

[0031] Bei dem existierenden Aktivierungssystem gibt es jedoch Grenzen hinsichtlich der Reduzierung des mittleren Stroms. Der Stromgradient für Spulenanwendungen in der Praxis und die Kapazität des Piezo oder piezoelektrischen Elements beispielsweise ist je nach der Induktanz und der Kapazität des Piezos oder piezoelektrischen Elements sehr hoch und liegt bei bis zu 10 A/ μ s.

[0032] Da die Aktivierungslogik und die Schalter, die für die Stromsteuerung verwendet werden, Schaltzeiten von etwa 1 μ s aufweisen, bedeutet dies, daß der Referenzstrom um bis zu 10 A übertroffen wird. Der mittlere Strom kann somit auf nur etwa 5 A begrenzt werden. Hier wäre zum Begrenzen des Stroms eine größere Induktivität hilfreich, doch erscheint dies unpraktisch, da dadurch allgemein die Größe zunimmt.

[0033] Eine Aufgabe der vorliegenden Erfindung besteht in der Entwicklung einer Vorrichtung wie im Oberbegriff von Anspruch 1 oder Anspruch 2 definiert und eines Verfahrens wie im Oberbegriff von Anspruch 12 oder Anspruch 13 oder Anspruch 17 definiert und einer Anwendung zur Verwendung wie im Oberbegriff von Anspruch 18 definiert, und zwar derart, daß man beim Laden und Entladen von piezoelektrischen Elementen oder Piezoaktuatoren willkürlich niedrige mittlere Ströme erzielt.

[0034] Eine weitere Aufgabe der vorliegenden Erfindung besteht in der Entwicklung eines Verfahrens wie im Oberbegriff von Anspruch 12 oder Anspruch 13 oder Anspruch 17 definiert und einer Vorrichtung wie im Oberbegriff von Anspruch 1 oder Anspruch 2 definiert und einer Anwendung zur Verwendung wie im Oberbegriff von Anspruch 18 definiert, und zwar derart, daß damit ein effizientes Laden und Entladen piezoelektrischer Elemente gleichzeitig damit ermöglicht wird, daß während des Ladens und Entladens von piezoelektrischen Elementen willkürlich niedrige mittlere Ströme erzielt werden.

[0035] Mit der vorliegenden Erfindung werden während des Ladens und Entladens von piezoelektrischen Elementen oder Piezoaktuatoren willkürlich niedrige mittlere Ströme erzielt. Bei der vorliegenden Erfindung kann das Aktivierungssystem derart modifiziert werden, daß der Strom nicht innerhalb eines bestimmten Strombandes geregelt wird, sondern gegebenenfalls auch Lücken aufweisen kann, was während des Ladens und Entladens der piezoelektrischen Elemente einen niedrigen mittleren Strom gestattet.

[0036] Es wird hier eine Möglichkeit dafür geschaffen, daß der Ladestrom und Entladestrom zumindest teilweise durch das gleiche, als eine Induktanz wirkende Element geschickt wird und daß das mindes-

tens eine, als eine Induktanz wirkende Element so angeordnet wird, daß sowohl der Ladestrom als auch der Entladestrom durch es hindurchgeschickt werden können.

[0037] Das mindestens teilweise Laden und Entladen des piezoelektrischen Elements über ein im wesentlichen als eine Induktanz wirkendes Element für den Lade- oder Entladestrom beispielsweise über eine Spule oder ein als eine Spule wirkendes Element ermöglicht es, den Ladestromweg und den Entladestromweg von elektrischen Lasten im wesentlichen freizuhalten; dadurch wird einerseits sehr wenig Energie verbraucht (weil der Leistungsverlust gering ist und da die während des Entladens dem piezoelektrischen Element entnommene Energie zu der Spannungsquelle zurückgeschickt wird oder vorübergehend in einem Kondensator gespeichert werden kann) und andererseits kann die Erwärmung der Schaltung, die beim Laden und Entladen auftritt, sehr gering gehalten werden. Dadurch können die einzelnen Komponenten (einschließlich Stromversorgung) für relativ geringe Leistungsniveaus ausgelegt werden, und die Maßnahmen, die bisher für das Kühlen erforderlich waren, können entweder völlig entfallen oder jedenfalls einen sehr eingeschränkten Umfang aufweisen.

[0038] Weil der Ladestrom und der Entladestrom durch das gleiche als Induktanz wirkende Element geschickt werden, d.h., weil der Ladestrom und Entladestrom beispielsweise durch die gleiche Spule oder durch ein als eine Spule wirkendes Element geschickt werden, ist es zudem möglich, die Anzahl der Komponenten, genauer gesagt die Anzahl der als Induktanz wirkenden Elemente, zu minimieren; aufgrund der nicht unerheblichen Größe dieser Elemente ist es offensichtlich, daß dies auf die Größe der fraglichen Anordnung einen sehr positiven Effekt hat.

[0039] Es ist dadurch möglich, selbst in einem beschränkten Raum und innerhalb einer vordefinierten Zeit ein effizientes Laden und Entladen von piezoelektrischen Elementen vorzunehmen.

[0040] Die Vorrichtung gemäß der vorliegenden Erfindung läßt sich leichter und preiswerter herstellen, als dies mit herkömmlichen Vorrichtungen der Fall ist.

[0041] Vorteilhafte Entwicklungen der Erfindung sind der Gegenstand der abhängigen Ansprüche.

[0042] Die Erfindung wird unten unter Bezugnahme auf Ausführungsbeispiele ausführlicher erörtert, wobei auf die Zeichnungen Bezug genommen wird. Es zeigen:

[0043] [Fig. 1](#) eine Schaltung gemäß der vorliegenden Erfindung, die sich für das Laden und Entladen eines piezoelektrischen Elements unter Verwendung

des Verfahrens gemäß der vorliegenden Erfindung eignet;

[0044] [Fig. 2](#) eine Darstellung, um die Zustände zu erläutern, die während einer ersten Ladephase (Ladeschalter 3 geschlossen) in der Schaltung gemäß [Fig. 1](#) auftreten;

[0045] [Fig. 3](#) eine Darstellung, um die Zustände zu erläutern, die während einer zweiten Ladephase (Ladeschalter 3 wieder offen) in der Schaltung gemäß [Fig. 1](#) auftreten;

[0046] [Fig. 4](#) eine Darstellung, um die Zustände zu erläutern, die während einer ersten Entladephase (Entladeschalter 5 geschlossen) in der Schaltung gemäß [Fig. 1](#) auftreten;

[0047] [Fig. 5](#) eine Darstellung, um die Zustände zu erläutern, die während einer zweiten Entladephase (Entladeschalter 5 wieder offen) in der Schaltung gemäß [Fig. 1](#) auftreten;

[0048] [Fig. 6](#) die zeitliche Änderung der Spannungs- und Stromwerte, die während des Betriebs der Schaltung gemäß [Fig. 1](#) auftreten;

[0049] [Fig. 7](#) eine Schaltung gemäß der vorliegenden Erfindung zum sequentiellen Laden und Entladen mehrerer piezoelektrischer Elemente unter Verwendung des Verfahrens gemäß der vorliegenden Erfindung;

[0050] [Fig. 8](#) die zeitliche Änderung der Spannungs- und Stromwerte, die während des Betriebs der Schaltung gemäß [Fig. 7](#) auftreten;

[0051] [Fig. 9](#) eine herkömmliche Schaltung zum Laden und Entladen eines piezoelektrischen Elements über als Ohmsche Widerstände für den Lade- und Entladestrom wirkende Elemente;

[0052] [Fig. 10](#) eine herkömmliche Schaltung zum Laden und Entladen eines piezoelektrischen Elements über als Spulen für den Lade- und Entladestrom wirkende Elemente;

[0053] [Fig. 11](#) ein Profil während des Ladens eines in einer Schaltung angeordneten Piezoaktuators;

[0054] [Fig. 12](#) eine alternative Ausführungsform der vorliegenden Erfindung mit einem niedrigeren Stromschwellwert bei 0 A und einer konstanten Zeit t nach Erreichen des unteren Schwellwerts, bis der Ladeschalter 3 gemäß [Fig. 1](#) wiedereingeschaltet wird;

[0055] [Fig. 13](#) eine alternative Ausführungsform der vorliegenden Erfindung mit einem oberen Stromschwellwert, wobei der Ladeschalter mit einer bestimmten, aber konstanten Frequenz eingeschaltet

wird;

[0056] [Fig. 14](#) eine weitere alternative Ausführungsform der vorliegenden Erfindung mit einer vordefinierten Zeitverzögerung zwischen dem Lesen des Stromschwellwerts und dem Wiedereinschalten des Ladeschalters und

[0057] [Fig. 15](#) eine schematische Darstellung eines Kraftstoffeinspritzsystems unter Verwendung eines piezoelektrischen Elements als Aktuator.

[0058] Die piezoelektrischen Elemente, deren Lade- und Entladevorgänge unten ausführlicher beschrieben werden, können beispielsweise als Aktuatoren bei Kraftstoffeinspritzdüsen (insbesondere bei sogenannten Common-Rail-Einspritzdüsen) von Verbrennungsmotoren verwendet werden. Es gibt jedoch keine Beschränkung auf eine derartige Verwendung der piezoelektrischen Elemente; die piezoelektrischen Elemente können im Grunde in jeder Verrichtung für jeden Zweck verwendet werden.

[0059] Es wird davon ausgegangen, daß sich die piezoelektrischen Elemente als Reaktion auf das Laden ausdehnen und als Reaktion auf das Entladen zusammenziehen. Die Erfindung läßt sich jedoch natürlich auch anwenden, wenn genau das Gegenteil der Fall ist.

[0060] [Fig. 1](#) zeigt eine Ausführungsform einer Schaltung zum Durchführen des Verfahrens gemäß der vorliegenden Erfindung zum Laden und Entladen eines piezoelektrischen Elements. Das piezoelektrische Element soll bei dem fraglichen Beispiel geladen werden. Einer der Anschlüsse des piezoelektrischen Elements **1** ist ständig mit Masse verbunden, d.h., es ist mit einem ersten Pol einer Spannungsquelle verbunden; der andere Anschluß des piezoelektrischen Elements ist über eine Spule **2** und einen Parallelkreis, der aus einem Ladeschalter **3** und einer Diode **4** besteht, mit dem zweiten Pol der Spannungsquelle und über eine Spule **2** und einen Parallelkreis, der aus einem Entladeschalter **5** und einer Diode **6** besteht, mit dem ersten Pol der Spannungsquelle verbunden.

[0061] Die Spannungsquelle umfaßt eine Batterie **7** (beispielsweise eine Kraftfahrzeugbatterie), einen dieser nachgeschalteten Gleichspannungswandler **8** und dahinter einen als Pufferkondensator dienenden Kondensator **9**. Über diese Anordnung wird die Batteriespannung (beispielsweise 12 V) in im wesentlichen jede andere Gleichspannung umgewandelt und als die Versorgungsspannung zur Verfügung gestellt.

[0062] Bei dem betrachteten Beispiel findet das Laden und Entladen des piezoelektrischen Elements **1** auf zyklische Weise statt. Mit anderen Worten werden der Ladeschalter **3** und der Entladeschalter **5**

während des Lade- und Entladevorgangs wiederholt geschlossen und geöffnet.

[0063] Die Zustände, die dadurch auftreten, werden nachstehend unter Bezugnahme auf die [Fig. 2](#) bis [Fig. 5](#) erläutert, von denen [Fig. 2](#) und [Fig. 3](#) das Laden des piezoelektrischen Elements **1** und [Fig. 4](#) und [Fig. 5](#) das Entladen des piezoelektrischen Elements **1** darstellen.

[0064] Der Ladeschalter **3** und der Entladeschalter **5** sind nur dann und solange geöffnet, wenn/wie kein Laden oder Entladen des piezoelektrischen Elements **1** stattfindet. In diesem Zustand befindet sich die in [Fig. 1](#) gezeigte Schaltung in einem eingeschwungenen Zustand, d.h., das piezoelektrische Element **1** behält seinen Ladungszustand auf im wesentlichen unveränderte Weise bei, und es fließt kein Strom.

[0065] Mit dem Einsetzen des Ladens des piezoelektrischen Elements **1** wird der Ladeschalter **3** wiederholt geschlossen und geöffnet; der Entladeschalter **5** bleibt offen.

[0066] Bei geschlossenem Ladeschalter **3** treten die in [Fig. 2](#) gezeigten Zustände auf, d.h., es wird ein geschlossener Kreis gebildet, der eine Reihenschaltung umfaßt, die aus dem piezoelektrischen Element **1**, dem Kondensator **9** und der Spule **2** besteht, und in dem ein Strom $i_{LE}(t)$ wie durch die Pfeile in [Fig. 2](#) angegeben fließt. Das Ergebnis dieses Stromflusses ist, daß Energie in der Spule **2** gespeichert wird. Der Energiefluß in die Spule **2** wird durch die positive Potentialdifferenz zwischen dem Kondensator **9** und dem piezoelektrischen Element **1** bewirkt. Wenn der Ladeschalter **3** kurz geöffnet wird (beispielsweise einige wenige μ s), nachdem er geschlossen worden ist, treten die in [Fig. 3](#) gezeigten Zustände auf: ein geschlossener Kreis, der eine Reihenschaltung umfaßt, die aus dem piezoelektrischen Element **1**, der Diode **6** und der Spule **2** besteht, wird ausgebildet, in dem ein Strom $i_{LA}(t)$ wie durch die Pfeile in [Fig. 3](#) dargestellt fließt. Das Ergebnis dieses Stromflusses besteht darin, daß in der Spule **2** gespeicherte Energie in das piezoelektrische Element **1** fließt. Entsprechend der Energiezufuhr zu dem piezoelektrischen Element nehmen in letzterem auftretende Spannung und seine Außenmaße zu. Nachdem der Energietransport von Spule **2** zum piezoelektrischen Element **1** stattgefunden hat, wird wieder der eingeschwungene Zustand der Schaltung, wie in [Fig. 1](#) gezeigt und bereits beschrieben, erreicht.

[0067] Zu diesem Zeitpunkt oder (je nach dem gewünschten Zeitprofil des Ladevorgangs) früher oder später wird der Ladeschalter **3** wieder geschlossen und wieder geöffnet, so daß die obenbeschriebenen Prozesse wiederholt werden. Durch das erneute Schließen und erneute Öffnen des Ladeschalters **3**

nimmt die im piezoelektrischen Element **1** gespeicherte Energie zu (die bereits im piezoelektrischen Element gespeicherte Energie und die neu zugeführte Energie werden addiert), und die beim piezoelektrischen Element auftretende Spannung und seine Außenmaße nehmen entsprechend zu.

[0068] Falls das obenerwähnte Schließen und Öffnen des Ladeschalters **3** häufig wiederholt wird, nehmen die am piezoelektrischen Element auftretende Spannung und die Ausdehnung des piezoelektrischen Elements stufenförmig zu (siehe die Darstellung in [Fig. 6](#) (später erläutert)).

[0069] Nachdem sich der Ladeschalter **3** mit einer vordefinierten Häufigkeit geschlossen und geöffnet hat und/oder nachdem das piezoelektrische Element **1** den gewünschten Ladezustand erreicht hat, wird das Laden des piezoelektrischen Elements beendet, indem der Ladeschalter **3** geöffnet bleibt.

[0070] Wenn das piezoelektrische Element **1** wieder entladen werden soll, geschieht dies durch wiederholtes Schließen und Öffnen des Entladeschalters **5**, während der Ladeschalter **3** offenbleibt.

[0071] Wenn der Entladeschalter **5** geschlossen wird, treten die in [Fig. 4](#) gezeigten Zustände auf: ein geschlossener Kreis wird gebildet, der eine Reihenschaltung umfaßt, die aus dem piezoelektrischen Element **1** und der Spule **2** besteht, und in dem ein Strom $i_{EE}(t)$ wie durch Pfeile in [Fig. 4](#) angedeutet fließt. Das Ergebnis dieses Stromflusses besteht darin, daß die im piezoelektrischen Element gespeicherte Energie (ein Teil dieser) in die Spule **2** transportiert wird. Entsprechend der Energieübertragung vom piezoelektrischen Element **1** zur Spule **2** nehmen am piezoelektrischen Element auftretende Spannung und seine Außenmaße ab.

[0072] Wenn sich der Entladeschalter **5** kurz öffnet (beispielsweise einige wenige μs), nachdem er geschlossen worden ist, treten die in [Fig. 5](#) gezeigten Zustände auf: ein geschlossener Kreis wird gebildet, der eine Reihenschaltung umfaßt, die aus dem piezoelektrischen Element **1**, dem Kondensator **9**, der Diode **4** und der Spule **2** besteht, und in dem ein Strom $i_{EA}(t)$ wie durch Pfeile in [Fig. 5](#) angedeutet fließt. Das Ergebnis dieses Stromflusses besteht darin, daß in der Spule **2** gespeicherte Energie in den Kondensator **9** zurückgeführt wird. Nachdem Energietransport von der Spule **2** zum Kondensator **9** stattgefunden hat, wird wieder der eingeschwungene Zustand der Schaltung, wie in [Fig. 1](#) gezeigt und bereits beschrieben, erreicht.

[0073] Zu diesem Zeitpunkt oder (je nach dem gewünschten Zeitprofil des Entladevorgangs) früher oder später wird der Entladeschalter **5** wieder geschlossen und wieder geöffnet, so daß die obenbe-

schriebenen Prozesse wiederholt werden. Infolge des erneuten Schließens und erneuten Öffnens des Entladeschalters **5** nimmt die im piezoelektrischen Element **1** gespeicherte Energie weiter ab und auch die am piezoelektrischen Element auftretende Spannung und seine Außenmaße nehmen dementsprechend ab.

[0074] Wenn das obenerwähnte Schließen und Öffnen des Entladeschalters **5** häufig wiederholt werden, nehmen die am piezoelektrischen Element auftretende Spannung und die Ausdehnung des piezoelektrischen Elements stufenweise ab (siehe die Darstellung in [Fig. 6](#)).

[0075] Nachdem sich der Entladeschalter **5** mit einer vordefinierten Häufigkeit geschlossen und geöffnet hat und/oder nachdem das piezoelektrische Element den gewünschten Entladezustand erreicht hat, wird das Entladen des piezoelektrischen Elements beendet, indem der Entladeschalter **5** geöffnet bleibt.

[0076] Der Betrieb der in [Fig. 1](#) gezeigten Schaltung, oder genauer gesagt das Laden und Entladen des piezoelektrischen Elements **1** wie oben beschrieben, führt zu den in [Fig. 6](#) gezeigten Strom- und Spannungsprofilen.

[0077] Die in [Fig. 6](#) gezeigten Kurven sind mit Symbolen bezeichnet, die ihre Meßvariablen darstellen. Die verwendeten Symbole stehen für:

- \square : die am Kondensator **9** auftretende Spannung U_S ;
- \diamond : die am piezoelektrischen Element **1** auftretende Spannung und
- v: der durch die Spule **2** fließende Strom.

[0078] Die in [Fig. 6](#) gezeigten Strom- und Spannungskurven veranschaulichen den Ladeprozess (im Bereich von etwa 100 μs bis 300 μs auf der Zeitskala) und den Entladeprozess (im Bereich zwischen etwa 400 μs und 600 μs auf der Zeitskala). Wie aus [Fig. 6](#) hervorgeht, weist die am piezoelektrischen Element **1** auftretende Spannung ein homogenes und gut gesteuertes Profil auf.

[0079] Gleichzeitig weist die Schaltung, mit der das Laden und Entladen des piezoelektrischen Elements bewirkt wird – genauer gesagt die in [Fig. 1](#) gezeigte Schaltung – eine extrem einfache Konfiguration auf und ist von optimaler Effizienz. Dazu tragen drei Faktoren bei, nämlich

- 1) daß Laden und Entladen durch ein und dieselbe Spule bewirkt werden (nämlich Spule **2**);
- 2) daß der auf Wärmeerzeugung in Ohmschen Widerständen zurückzuführende Energieverlust vernachlässigbar klein ist und
- 3) daß die im piezoelektrischen Element gespeicherte Energie im wesentlichen vollständig in den Kondensator **9** zurückgeführt wird und somit zur sofortigen Wiederverwendung zur Verfügung

steht.

[0080] Der erste Faktor ermöglicht es, die Anzahl der Komponenten zu minimieren, insbesondere die Anzahl der Spulen (die inherent relativ groß sind). Durch den zweiten und dritten Faktor wird es ermöglicht, die Batterie **7** und den Gleichstromwandler **8** für relativ niedrige Leistungspegel auszulegen.

[0081] Alle obenerwähnten Faktoren führen entweder alleine oder in Kombination zu der Möglichkeit, oder tragen zumindest zu ihr bei, daß die zum Laden und Entladen von piezoelektrischen Elementen bereitgestellte Schaltung im kleinstmöglichen Raum untergebracht wird und Kosten für ihre Herstellung und ihren Betrieb minimiert werden.

[0082] Unter Verwendung des oben in seinem Kern beschriebenen Verfahrens zum Laden und Entladen piezoelektrischer Elemente und der für das Ausführen dieses Verfahrens geeigneten Schaltung ist es möglich, hintereinander mehrere piezoelektrische Elemente zu laden und zu entladen, als nacheinander nur ein piezoelektrisches Element.

[0083] Eine Schaltung, die dies ermöglicht, ist in [Fig. 7](#) dargestellt.

[0084] Die in [Fig. 7](#) gezeigte Schaltung basiert auf der in [Fig. 1](#) gezeigten Schaltung; einander entsprechende Elemente sind mit den gleichen Bezugszeichen bezeichnet. Das „einige“ piezoelektrische Element **1** gemäß [Fig. 1](#) wird durch eine Parallelschaltung ersetzt, die aus einer Diode **10** und mehreren (n) von Piezo- oder piezoelektrischen Elementzweigen **11, 12, ..., 1n**, besteht, wobei jeder Piezo- oder piezoelektrische Elementzweig eine Reihenschaltung umfaßt, die aus einem piezoelektrischen Element **11₁, 12₁, ..., 1n₁**, und einer Parallelschaltung, die aus einem Wähltschalter **11₂, 12₂, ..., 1n₂** und einer Diode **11₃, 12₃, ..., 1n₃** besteht.

[0085] Die Diode **10** verhindert, daß negative Spannungen an den piezoelektrischen Elementen auftreten, die dadurch unter einigen Umständen beschädigt werden könnten.

[0086] Die parallel in den individuellen Piezo- oder piezoelektrischen Elementzweigen angeordneten Wähltschalter-Dioden-Paare, d.h. Wähltschalter **11₂** und Diode **11₃** im Piezo- oder piezoelektrischen Elementzweig **11**, Wähltschalter **12₂** und Diode **12₃** im Piezo- oder piezoelektrischen Elementzweig **12** und Wähltschalter **1n₂** und Diode **1n₃** im Piezo- oder piezoelektrischen Elementzweig **1n**, können über elektronische Schalter mit parasitären Dioden implementiert werden, beispielsweise MOSFETs oder IGBTs.

[0087] Das Laden und Entladen von piezoelektrischen Elementen **11₁, 12₁, ..., 1n₁** erfolgt im wesentli-

chen auf die gleiche Weise wie das Laden und Entladen des piezoelektrischen Elements **1** nach [Fig. 1](#); d.h. zum Laden wird der Ladeschalter **3** wiederholt geschlossen und geöffnet, und zum Entladen wird der Entladeschalter **5** wiederholt geschlossen und geöffnet.

[0088] Das oder die piezoelektrischen Elemente **11₁, 12₁, ..., 1n₁**, die bei wiederholtem Schließen und Öffnen des Ladeschalters **3** geladen werden, werden durch Wähltschalter **11₂, 12₂, ..., 1n₂** bestimmt; in jedem Fall sind die piezoelektrischen Elemente **11₁, 12₁, ..., 1n₁**, die geladen sind, alle diejenigen, deren Wähltschalter **11₂, 12₂, ..., 1n₂** während des wiederholten Schließens und Öffnens des Ladeschalters **3** geschlossen sind.

[0089] Die Auswahl der piezoelektrischen Elemente **11₁, 12₁, ..., 1n₁**, die (durch Schließen der zugeordneten Wähltschalter **11₂, 12₂, ..., 1n₂**) geladen werden sollen, und die Aufhebung der Auswahl (durch Öffnen der relevanten Schalter) erfolgen allgemein außerhalb des Ladevorgangs. Falls in spezifischen Fällen mehrere der piezoelektrischen Elemente **11₁, 12₁, ..., 1n₁**, gleichzeitig auf verschiedene Pegel geladen werden sollen, kann das Öffnen und Schließen der Wähltschalter **11₂, 12₂, ..., 1n₂** auch während des Ladevorgangs stattfinden.

[0090] Die während des Ladens der ausgewählten piezoelektrischen Elemente **11₁, 12₁, ..., 1n₁** auftretenden Vorgänge sind im wesentlichen mit denjenigen Vorgängen identisch, die im Fall der in [Fig. 1](#) gezeigten Schaltung auftreten. Die [Fig. 2](#) und [Fig. 3](#) und die sich darauf beziehenden Erläuterungen gelten ebenfalls; der einzige Unterschied besteht darin, daß ein oder mehrere der piezoelektrischen Elemente **11₁, 12₁, ..., 1n₁**, anstatt des piezoelektrischen Elements **1**, geladen sind.

[0091] Das Entladen der piezoelektrischen Elemente **11₁, 12₁, ..., 1n₁** findet unabhängig von der Position der zugeordneten Wähltschalter **11₂, 12₂, ..., 1n₂** statt, da der die Entladung der piezoelektrischen Elemente bewirkende Entladestrom über die den jeweiligen piezoelektrischen Elementen zugeordneten Dioden **11₃, 12₃, ..., 1n₃** fließen kann. Der Entladevorgang bewirkt deshalb, daß alle vollständig oder teilweise geladenen piezoelektrischen Elemente **11₁, 12₁, ..., 1n₁** entladen werden.

[0092] Die während des Entladens der piezoelektrischen Elemente **11₁, 12₁, ..., 1n₁** auftretenden Vorgänge sind im wesentlichen mit denjenigen Vorgängen identisch, die im Fall der in [Fig. 1](#) gezeigten Schaltung auftreten. Die [Fig. 4](#) und [Fig. 5](#) und die sich darauf beziehenden Erläuterungen gelten ebenfalls; der einzige Unterschied besteht darin, daß ein oder mehrere der piezoelektrischen Elemente **11₁, 12₁, ..., 1n₁**, anstatt des piezoelektrischen Elements **1**, entladen

sind.

[0093] Falls die in [Fig. 7](#) gezeigte Schaltung so betrieben wird, daß die piezoelektrischen Elemente **11₁**, **12₁**, ..., **1n₁**, individuell und nacheinander wie obenbeschrieben geladen und entladen werden, dann sind die sich ergebenden Strom- und Spannungsprofile diejenigen, die in [Fig. 8](#) gezeigt sind.

[0094] Die in [Fig. 8](#) gezeigten Kurven sind mit Symbolen bezeichnet, die ihre Meßvariablen darstellen. Die verwendeten Symbole stehen für:

- : die am Kondensator **9** auftretende Spannung U_S ;
- ◊: die am piezoelektrischen Element **11₁** auftretende Spannung,
- v: die am piezoelektrischen Element **12₁** auftretende Spannung und
- o: die am piezoelektrischen Element **1n₁** auftretende Spannung.

[0095] Die in [Fig. 8](#) gezeigten Strom- und Spannungsprofile stellen den Lade- und Entladevorgang für das piezoelektrische Element **11₁**, (im Bereich zwischen etwa 0,1 ms und 0,7 ms auf der Zeitskala), den Lade- und Entladevorgang für das piezoelektrische Element **12₁**, (im Bereich zwischen etwa 0,8 ms und 1,4 ms auf der Zeitskala) und den Lade- und Entladevorgang für das piezoelektrische Element **1n₁**, (im Bereich zwischen etwa 1,5 ms und 2,1 ms) auf der Zeitskala dar und können verstanden werden bei Be trachtung der Konfiguration, der Funktion und der Arbeitsweise der Schaltung, wie sie in [Fig. 7](#) gezeigt ist.

[0096] Wie aus [Fig. 8](#) hervorgeht, weist die an den piezoelektrischen Elementen auftretende Spannung ein fast lineares und gut gesteuertes Profil auf.

[0097] Gleichzeitig weist die Schaltung, mit der das Laden und Entladen des piezoelektrischen Elements bewirkt wird – genauer gesagt die in [Fig. 7](#) gezeigte Schaltung – eine extrem einfache Konfiguration und eine optimale Effizienz auf. Wie bereits bei der Schaltung nach [Fig. 1](#) der Fall war, sind wieder die dazu beitragenden Faktoren im Grunde, daß das Laden und Entladen durch ein und dieselbe Spule bewirkt wird (nämlich Spule **2**); daß der Energieverlust aufgrund von Wärmeerzeugung in Ohmschen Widerständen vernachlässigbar klein ist und daß die im piezoelektrischen Element gespeicherte Energie im wesentlichen vollständig in den Kondensator **9** zurückgeleitet wird und somit zur sofortigen Wiederverwendung zur Verfügung steht.

[0098] Der erste Faktor ermöglicht es wiederum, die Anzahl der Komponenten, insbesondere die Anzahl der Spulen (die inherent relativ groß sind) zu minimieren. Der zweite Faktor ermöglicht es, den Gleichspannungswandler **8** für relativ geringe Leistungspegel auszulegen.

[0099] Alle obenerwähnten Faktoren, ob alleine oder in Kombination, schaffen die Möglichkeit, oder tragen zumindest zu dieser bei, die obenerörterte Schaltung (die Schaltung nach [Fig. 7](#)) zum Laden und Entladen von piezoelektrischen Elementen im kleinstmöglichen Raum unterzubringen und die Kosten für ihre Herstellung und für ihren Betrieb zu minimieren.

[0100] Bei jeder der beschriebenen Ausführungsbeispiele wurde eine Spule als das als Induktanz wirkende Element verwendet. Dies stellt jedoch keinerlei Einschränkung dar. Anstelle der Spule können auch andere als eine Induktanz wirkende Elemente verwendet werden, wie etwa Sender, Transformatoren usw. (bei entsprechenden Modifikationen an der Konfiguration und der Arbeitsweise der Schaltung).

[0101] Außerdem gibt es keine Einschränkung hinsichtlich des zyklischen Durchführens der Lade- und Entladevorgänge wie beschrieben. Das Laden und/oder Entladen kann außerdem alternativ oder zusätzlich auf andere Weisen durchgeführt werden.

[0102] Unter anderem könnten Maßnahmen getroffen werden, um die Lade- und/oder Entladevorgänge vollständig oder teilweise darüber durchzuführen, daß eine oder mehrere Lade- und/oder Entladestromschaltungen als Oszillatorschaltungen wirken.

[0103] [Fig. 11](#) zeigt beispielhaft ein Beispielsprofil während des Ladens eines piezoelektrischen Elements oder Piezoaktuators, der einen mittleren Strom aufweist, der höher ist als der, der von der vorliegenden Erfindung bereitgestellt wird.

[0104] Das Aktivierungssystem gemäß der vorliegenden Erfindung sorgt, anstatt den Ladeschalter **3** wieder zu schließen, nachdem der Strom unter die Untergrenze abgefallen ist und somit ein Wiederanstieg des Stroms gestattet wird, dafür, daß gegebenenfalls ein Strom erzeugt wird, der Lücken aufweisen und somit zu einem niedrigen mittleren Strom führen kann.

[0105] Für eine beliebige der Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung sieht die vorliegende Erfindung vor, daß eine bestimmte Zeitverzögerung oder vorbestimmte Zeit derart definiert werden kann, daß bei Auftreten eines bestimmten Ereignisses wie etwa, daß der Stromwert (beispielsweise durch eine Meßeinheit oder dergleichen) so gemessen wird, daß er einen unter einem vordefinierten unteren Stromwert liegenden Wert oder einen über einem vordefinierten höheren Stromwert liegenden Wert aufweist, veranlaßt wird, daß der Lade- oder Entladeschalter weiterhin aus- bzw. eingeschaltet bleibt, bis die bestimmte Zeitverzögerung oder vordefinierte Zeit auftritt oder abläuft, und dann darf der Lade- oder Entladeschalter (**3**, **5**) ein- bzw. ausschalten. Wenn insbe-

sondere der gemessene Stromwert kleiner oder gleich dem vordefinierten niedrigeren Stromwert ist, dann beginnt die vordefinierte Zeit und läuft. Wenn die vordefinierte Zeit beendet oder erfüllt ist, dann schaltet der Ladeschalter 3 von Aus auf Ein. Das heißt, eine Ausführungsform der vorliegenden Erfindung sieht vor, daß durch Variieren der Zeitperiode ein beliebiger gewünschter mittlerer Strom erreicht werden kann.

[0106] Dafür werden drei Alternativen vorgeschlagen, wobei ihr gemeinsames Merkmal, anstatt ein rein ereignisgesteuertes Steuersystem zu sein (wobei „Ereignisse“ Ausschläge über und unter die Stromschwellwerte sind), ein ereignis- und zeitgesteuertes Steuersystem ist.

[0107] Eine erste Ausführungsform der vorliegenden Erfindung sieht als zusätzlichen Parameter eine Zeitverzögerung vor, um den Ladeschalter bei einem Ausschlag unter den unteren Stromschwellwert wieder einzuschalten. In einem Spezialfall kann der untere Stromschwellwert Null sein, wie in [Fig. 12](#) gezeigt. Wenn diese Zeitperiode auf Null gesetzt ist, gibt es im Vergleich zu der vorausgegangenen Situation keine Änderung. [Fig. 12](#) zeigt ein Beispiel der ersten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung mit einer Zeit von etwa 5 µs und einem unteren Stromschwellwert bei 0 A. Durch Variieren der Zeitperiode kann jeder gewünschte mittlere Strom erzielt werden.

[0108] Eine zweite Ausführungsform der vorliegenden Erfindung, wie in [Fig. 13](#) gezeigt, sieht vor, daß der untere Stromschwellwert wegfällt. Stattdessen wird zum Einschalten des Ladeschalters ein Rechtecksignal mit einer bestimmten Frequenz verwendet. Er wird wie bisher ausgeschaltet, wenn der obere Stromschwellwert überstiegen wird. Dies garantiert, daß der maximale Strom, der auftritt, die Komponenten nicht beschädigen kann.

[0109] Eine dritte Ausführungsform der vorliegenden Erfindung, wie in [Fig. 14](#) gezeigt, sieht vor, daß nach einer vordefinierbaren Zeit nach dem Ausschlag über den oberen Stromschwellwert der Ladeschalter wieder eingeschaltet wird.

[0110] Alle Aktivierungsvarianten gestatten eine beliebige gewünschte Abwandlung bei der Aktivierungszeit und bei dem Aktivierungsstrom. Alle Aktivierungsvarianten gestatten Lücken im Strom, die dadurch zu einem niedrigeren mittleren Strom beitragen können.

[0111] Das zeit- und ereignisgesteuerte Aktivierungssystem für piezoelektrische Elemente oder Piezoaktuatoren, auf dem die vorliegende Erfindung basiert, stellt sich im Vergleich zu den bisher implementierten, rein ereignisgesteuerten Aktivierungssyste-

men als zumindest anwendungsneutral heraus. Je nach der Ausführungsform und den definierten Zeit- und Ereigniseigenschaften kann tatsächlich aufgrund einer weniger komplexen Implementierung des Aktivierungssystems im Aktivierungs-IC ein Kostenvorteil vorliegen.

[0112] Im Grunde ermöglicht die vorliegende Erfindung jedoch die Implementierung frei auswählbarer Aktivierungssignale, wodurch die Flexibilität des Aktivierungs-IC stark erhöht wird.

[0113] Die vorliegende Erfindung ist hinsichtlich des Produktes ohne weiteres offensichtlich, da sie die gewünschte Funktionalität garantiert.

[0114] Die vorliegende Erfindung kann in einer Vielzahl von Anwendungen verwendet werden und ist nicht notwendigerweise auf Krafteinspritzsysteme begrenzt. Es ist sogar möglich, daß die vorliegende Erfindung aufgrund einer weniger komplexen Implementierung des Aktivierungssystems im Aktivierungs-IC der vorliegenden Erfindung eine weniger aufwendige und dennoch effizientere und zuverlässige Alternative zu bisherigen Verfahren bereitstellen kann.

[0115] Zusammengefaßt kann somit festgestellt werden, daß die Vorrichtung und das Verfahren gemäß der vorliegenden Erfindung es ermöglichen, ein effizientes Laden und Entladen von piezoelektrischen Elementen auf einfache und elegante Weise und sogar in beschränktem Raum durchzuführen, insbesondere durch Erreichen von willkürlich niedrigen mittleren Strömen während des Ladens und Entladens von piezoelektrischen Elementen.

Patentansprüche

1. Vorrichtung zum Laden oder Entladen eines piezoelektrischen Elements (**1** und/oder **11₁, 12₁, ..., 1n₁**), wobei ein Strom geregelt wird, indem ein Lade- oder Entladeschalter (**3, 5**) als Funktion einer Zeiteigenschaft oder einer Ereigniseigenschaft umgeschaltet wird, um einen effektiven geringen mittleren Strom zu erhalten, dadurch gekennzeichnet, daß die Zeiteigenschaft einen vordefinierten Zeitpunkt liefert, so daß, wenn ein Ereignis der Ereigniseigenschaft auftritt, veranlaßt wird, daß der Lade- oder Entladeschalter (**3, 5**) solange offen oder geschlossen bleibt, bis die vordefinierte Zeit vorüber ist.

2. Vorrichtung nach Anspruch 1 für ein Kraftstoffeinspritzsystem.

3. Vorrichtung nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß der Strom geregelt wird, indem ein Lade- oder Entladeschalter (**3, 5**) als Funktion der Zeiteigenschaft und der Ereigniseigenschaft umgeschaltet wird, um den effektiven niedrigen mittleren

Strom zu erzielen.

4. Vorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß, wenn sich der Strom auf einem Pegel unter einem vordefinierten unteren Schwellwert befindet, der Ladeschalter für einen vordefinierten Zeitraum offen bleibt, damit der Strom eine Lücke aufweisen kann.

5. Vorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß ein Ladeschalter (3) oder ein Entladeschalter (5) der Vorrichtung aus einer AUS-Position in eine EIN-Position bzw. von der EIN-Position zu einer AUS-Position umgeschaltet wird, um das Laden oder Entladen zu gestatten oder zu stoppen, wenn ein Absolutwert des Stroms jeweils größer oder gleich oder kleiner oder gleich der Ereigniseigenschaft ist, die ein Strom mit einem vordefinierten Grenzsollwert ist.

6. Vorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß ein Lade- oder Entladeschalter (3, 5) der Vorrichtung aus der AUS-Position in die EIN-Position umgeschaltet wird, um das Laden oder Entladen zu einem vordefinierten Zeitpunkt der Zeiteigenschaft zu gestatten, nachdem der Absolutwert des Stroms kleiner oder gleich der Ereigniseigenschaft ist, die ein Strom mit einem vordefinierten unteren Grenzsollwert ist.

7. Vorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß ein Rechteckwellensignal mit einer bestimmten Frequenz verwendet wird, um einen Lade- oder Entladeschalter (3, 5) von einer AUS-Position in eine EIN-Position umzuschalten, um das Laden oder Entladen zu gestatten.

8. Vorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß der Lade- oder Entladeschalter (3, 5) aus der EIN-Position in die AUS-Position geschaltet wird, wenn der Absolutwert des Stroms größer oder gleich der Ereigniseigenschaft ist, die ein Strom mit einem vordefinierten Grenzsollwert ist.

9. Vorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß ein gewünschter mittlerer Strom erreicht wird, indem die Zeiteigenschaft und die Ereigniseigenschaft variiert werden.

10. Vorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß eine Zeitverzögerung vordefiniert ist, so daß der Lade- oder der Entladeschalter gemäß der vordefinierten Zeitverzögerung in die EIN-Position umgeschaltet wird, wobei die vordefinierte Zeitverzögerung so eingestellt ist, daß sie auslöst, wenn der Absolutwert des Stroms größer oder gleich einem vordefinierten Stromschwellwert ist.

11. Vorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß der Strom innerhalb eines Strombandes nicht geregelt wird und Lücken aufweist.

12. Verfahren zum Laden oder Entladen eines piezoelektrischen Elements (1 und/oder 11, 12, ..., 1n₁), wobei ein Strom geregelt wird, indem ein Lade- oder Entladeschalter (3, 5) als Funktion einer Zeiteigenschaft oder einer Ereigniseigenschaft umgeschaltet wird, um einen effektiven geringen mittleren Strom zu erhalten, dadurch gekennzeichnet, daß die Zeiteigenschaft einen vordefinierten Zeitpunkt liefert, so daß, wenn ein Ereignis der Ereigniseigenschaft auftritt, veranlaßt wird, daß der Lade- oder Entladeschalter (3, 5) solange offen oder geschlossen bleibt, bis die vordefinierte Zeit vorüber ist.

13. Verfahren nach Anspruch 12 zum Laden oder Entladen eines piezoelektrischen Elements (1 und/oder 11, 12, ..., 1n₁) eines Kraftstofffeinspritzsystems.

14. Verfahren nach Anspruch 12 oder 13, dadurch gekennzeichnet, daß der Lade- oder Entladeschalter (3, 5) des Systems aus einer AUS-Position in eine EIN-Position bzw. von der EIN-Position zu einer AUS-Position umgeschaltet wird, um das Laden oder Entladen zu gestatten oder zu stoppen, wenn ein Absolutwert des Stroms jeweils größer oder gleich der oder kleiner als die Ereigniseigenschaft ist, die ein Strom mit einem vordefinierten unteren Grenzsollwert ist.

15. Verfahren nach einem der Ansprüche 12, 13 oder 14, dadurch gekennzeichnet, daß ein Lade- oder Entladeschalter (3, 5) des Systems aus der AUS-Position in die EIN-Position umgeschaltet wird, um das Laden oder Entladen zu einem vordefinierten Zeitpunkt der Zeiteigenschaft zu gestatten, nachdem der Absolutwert des Stroms kleiner oder gleich der Ereigniseigenschaft ist, die ein Strom mit einem vordefinierten unteren Grenzsollwert ist.

16. Verfahren nach Anspruch 12 oder 13, dadurch gekennzeichnet, daß ein Rechteckwellensignal mit einer bestimmten Frequenz verwendet wird, um einen Lade- oder Entladeschalter (3, 5) von einer AUS-Position in eine EIN-Position umzuschalten, um das Laden oder Entladen zu gestatten und dadurch gekennzeichnet, daß der Lade- oder Entladeschalter (3, 5) aus der EIN-Position in die RUS-Position geschaltet wird, wenn der Absolutwert des Stroms größer oder gleich der Ereigniseigenschaft ist, die ein Strom mit einem vordefinierten oberen Grenzsollwert ist.

17. Verfahren nach Anspruch 12 oder 13 zum Laden oder Entladen eines piezoelektrischen Elements (1 und/oder 11, 12, ..., 1n₁) eines Kraftstofffeinspritz-

systems, dadurch gekennzeichnet, daß vor dem Laden oder Entladen eine Definition erfolgt für einen Absolutwert des Stroms zum Laden oder Entladen des piezoelektrischen Elements (**1** und/oder **11₁**, **12₁,...1n₁**) als Funktion einer Zeiteigenschaft des Kraftstoffeinspritzsystems.

18. Anwendung, die sich insbesondere zur Verwendung in einem Kraftstoffeinspritzsystem eignet, das Kraftstoffeinspritzsystem gemäß einer der obigen Ansprüche, wobei das Kraftstoffeinspritzsystem bevorzugt ein doppeltwirkendes Steuerventil verwendet.

Es folgen 11 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

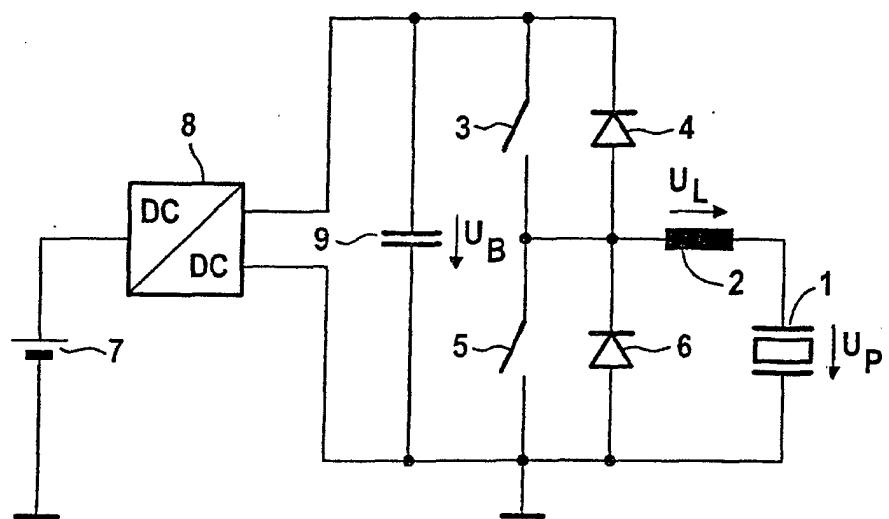


FIG. 2

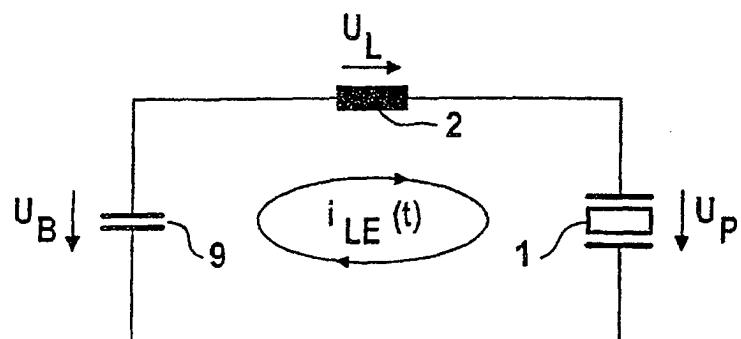


FIG. 3

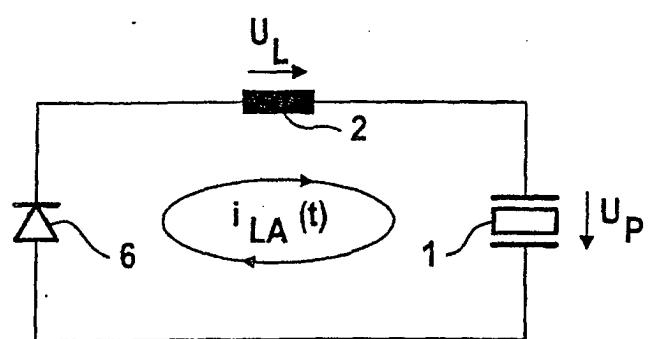


FIG. 4

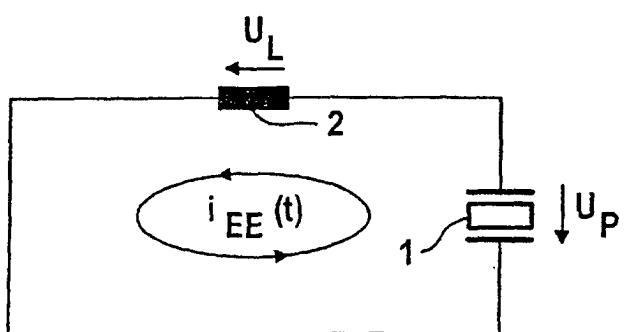


FIG. 5

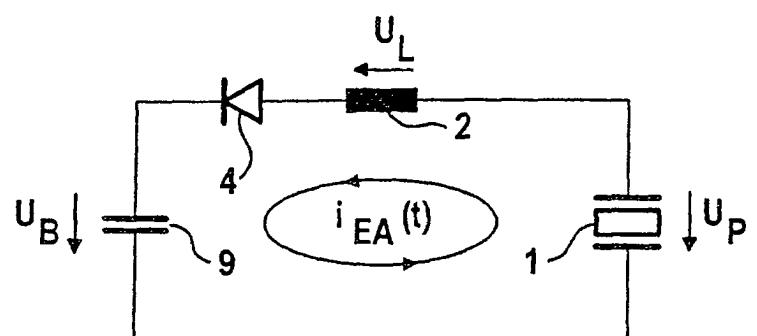


FIG. 6

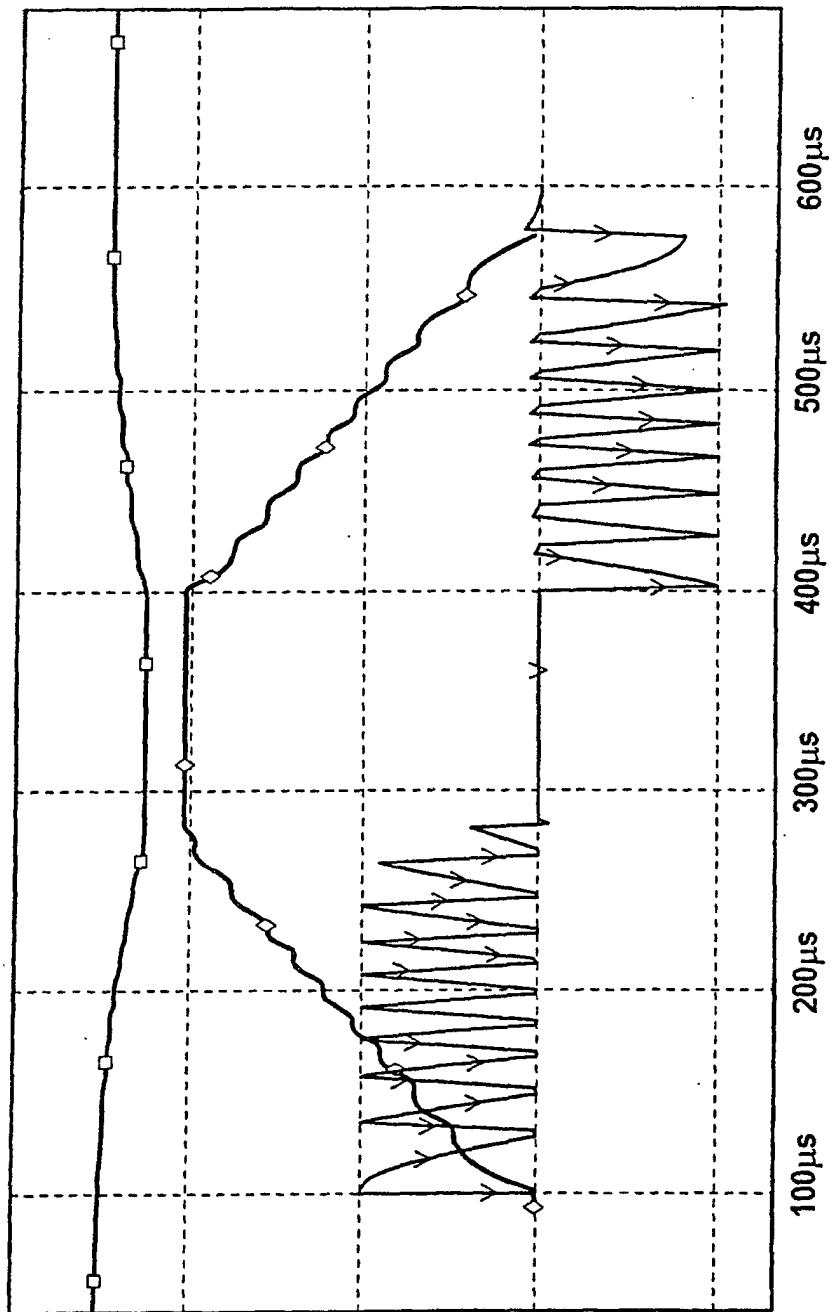


FIG. 7

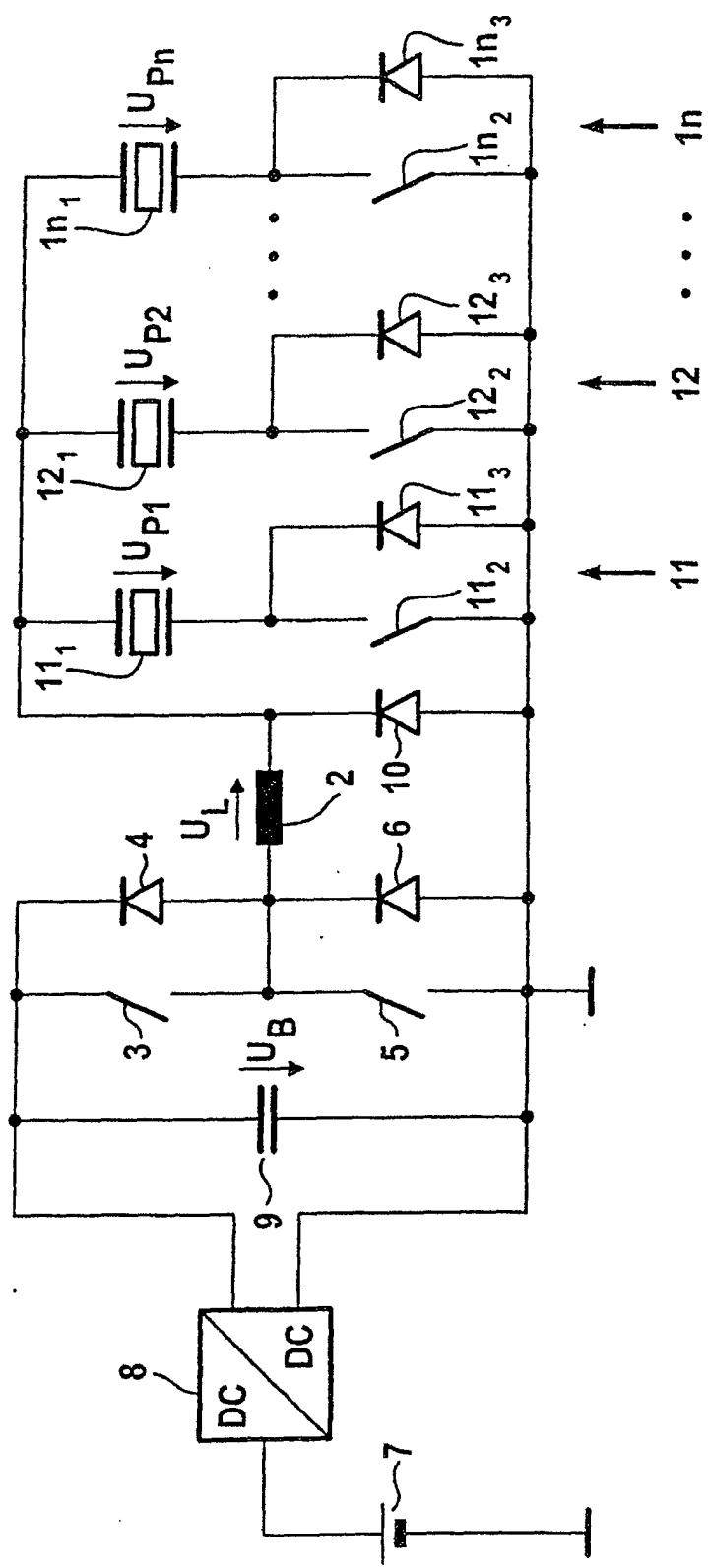


FIG. 8

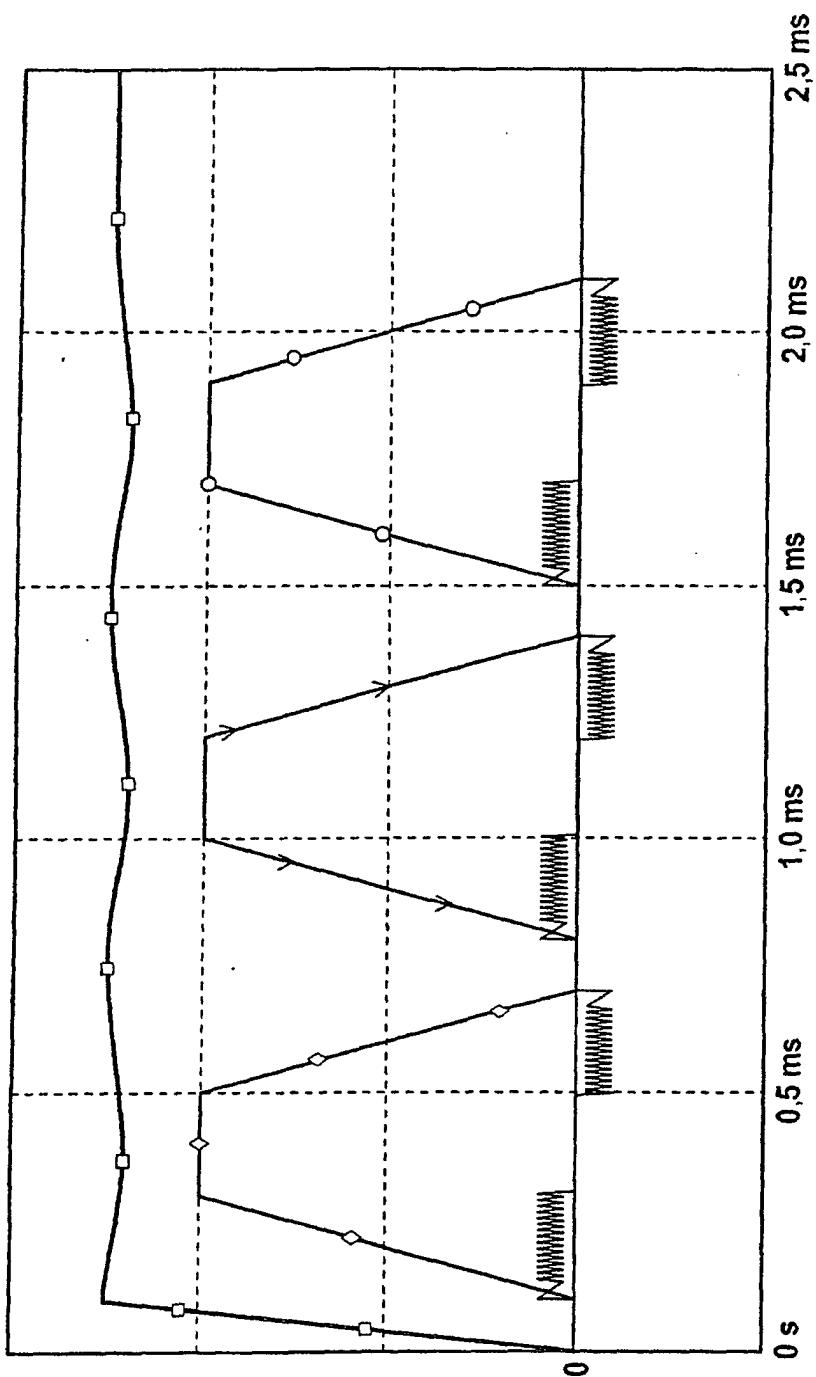


FIG. 9

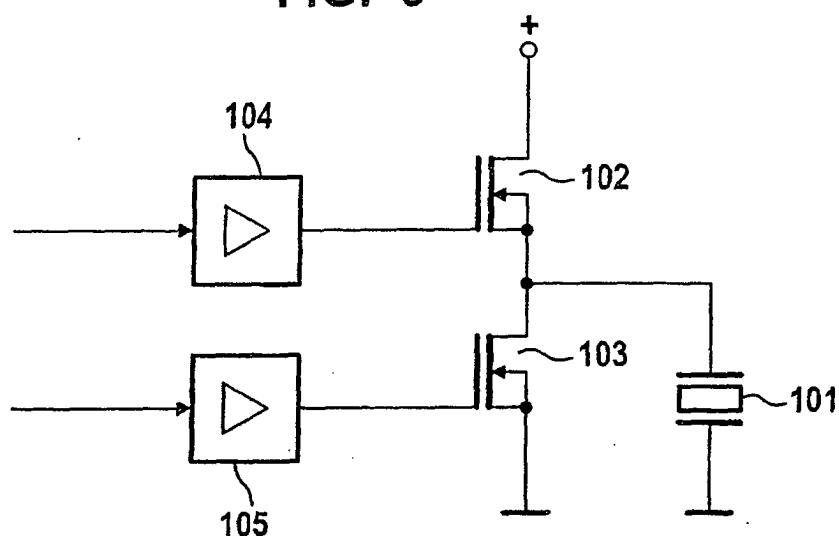


FIG. 10

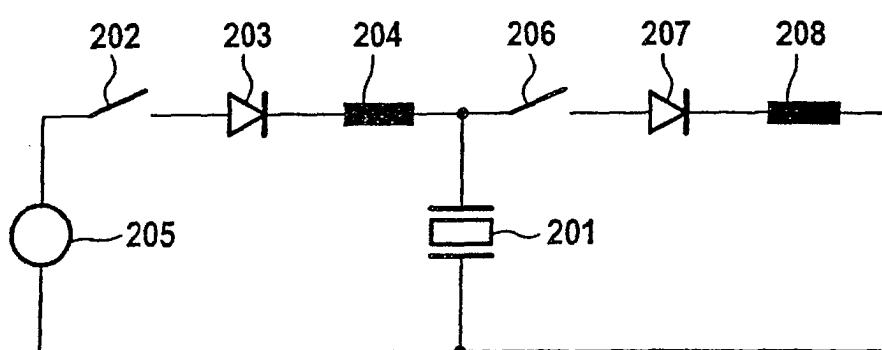


FIG. 11
„Normale Steuerung“ im Verbinder

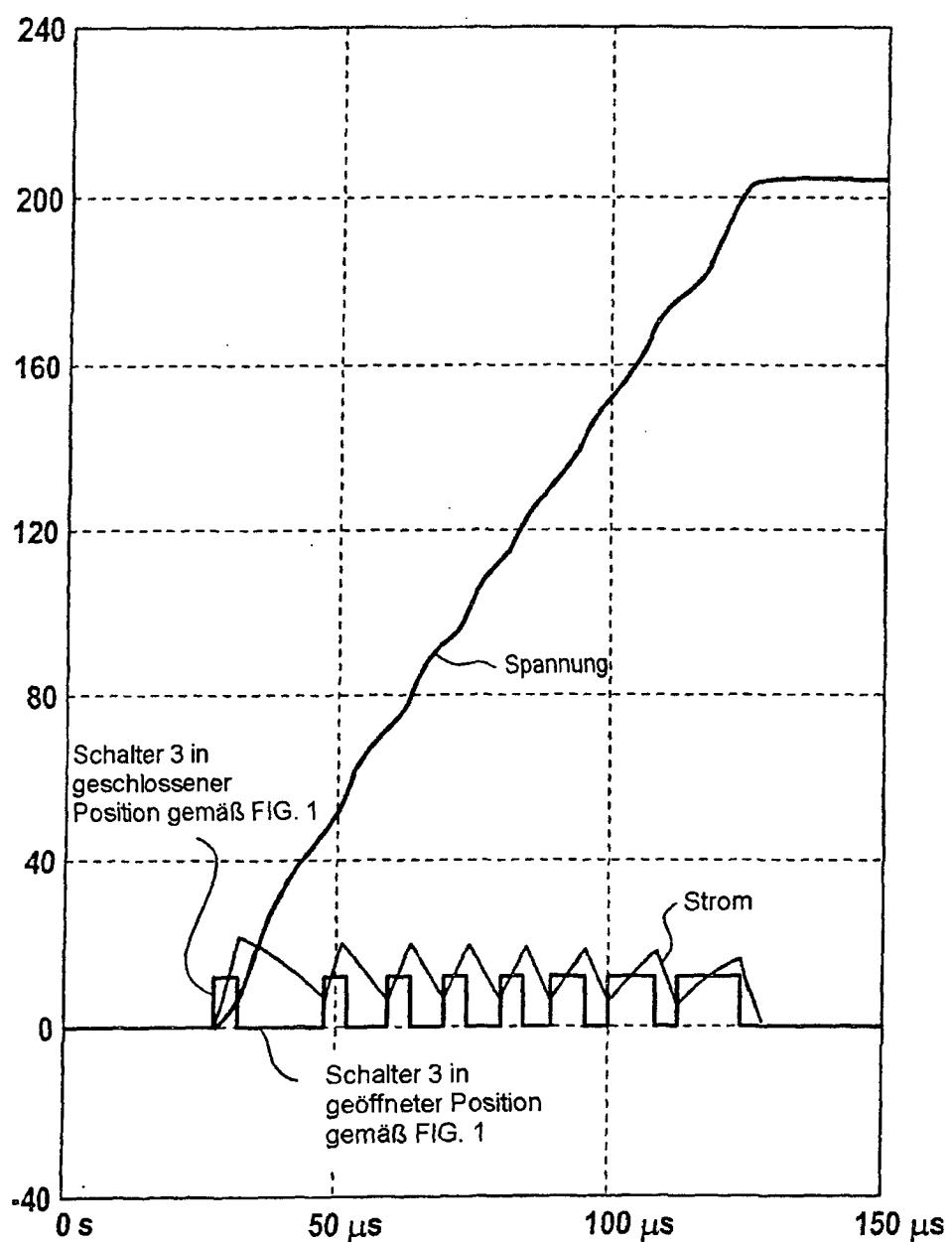


FIG. 12

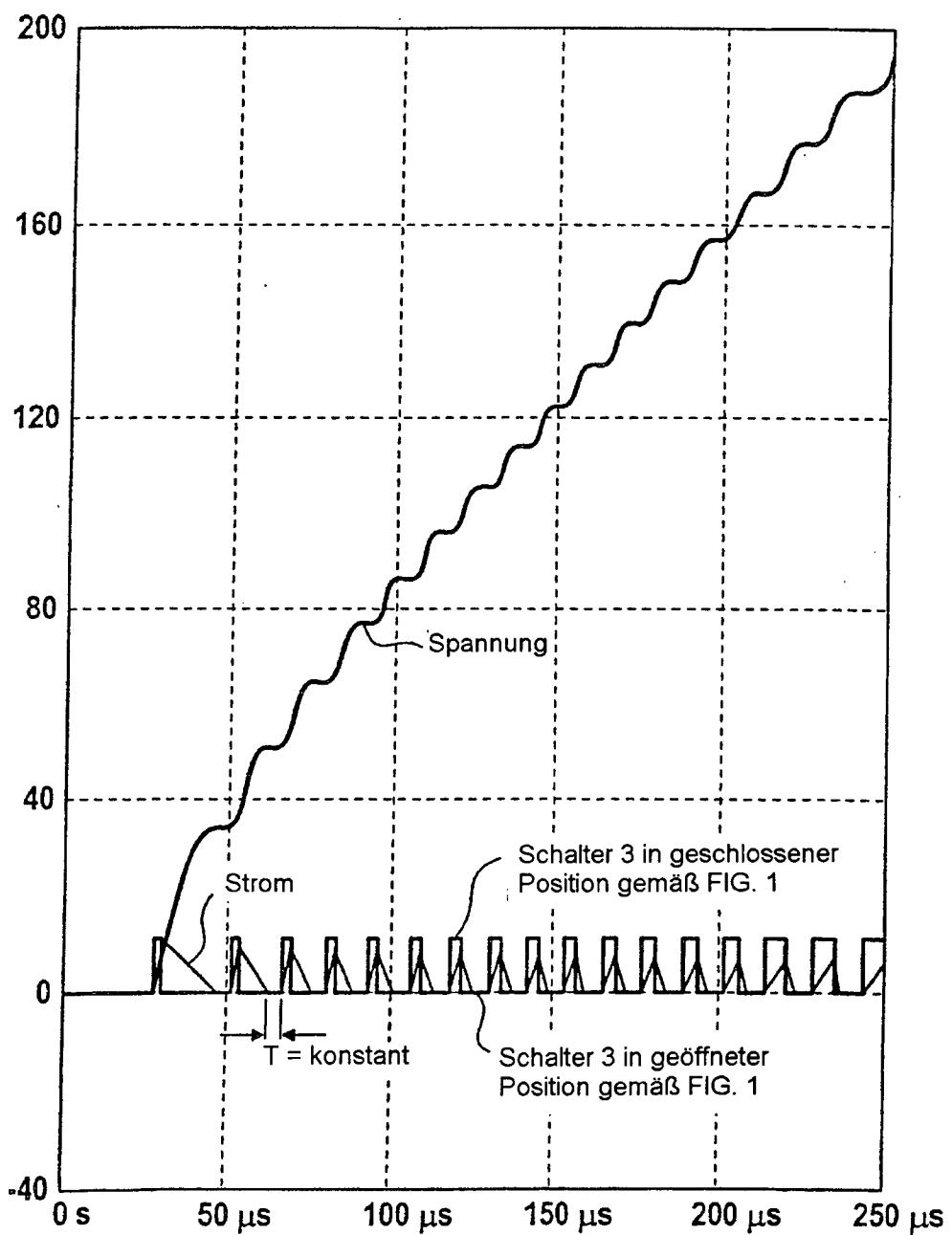


FIG. 13

konstante Steuerfrequenz (50 kHz)

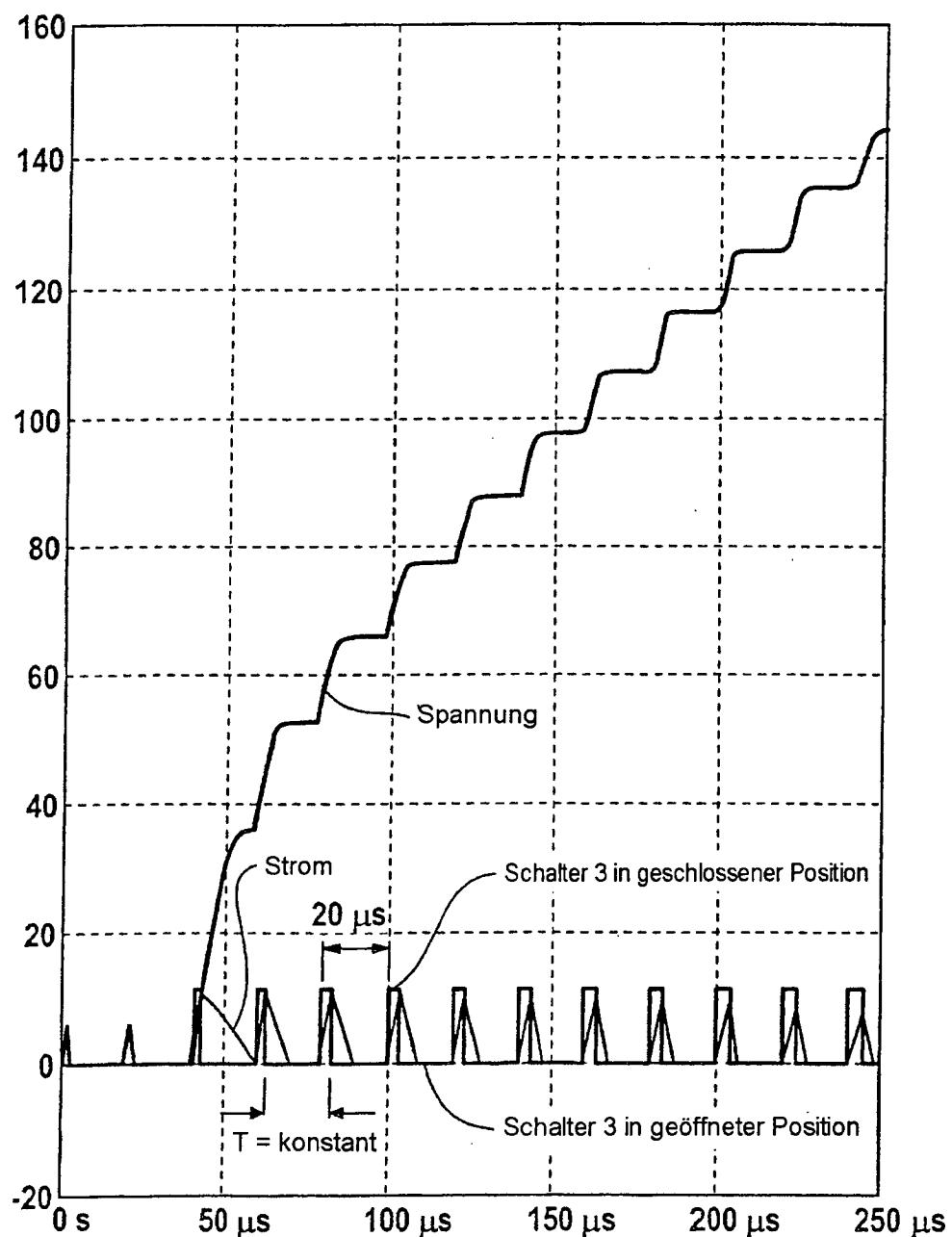


FIG. 14

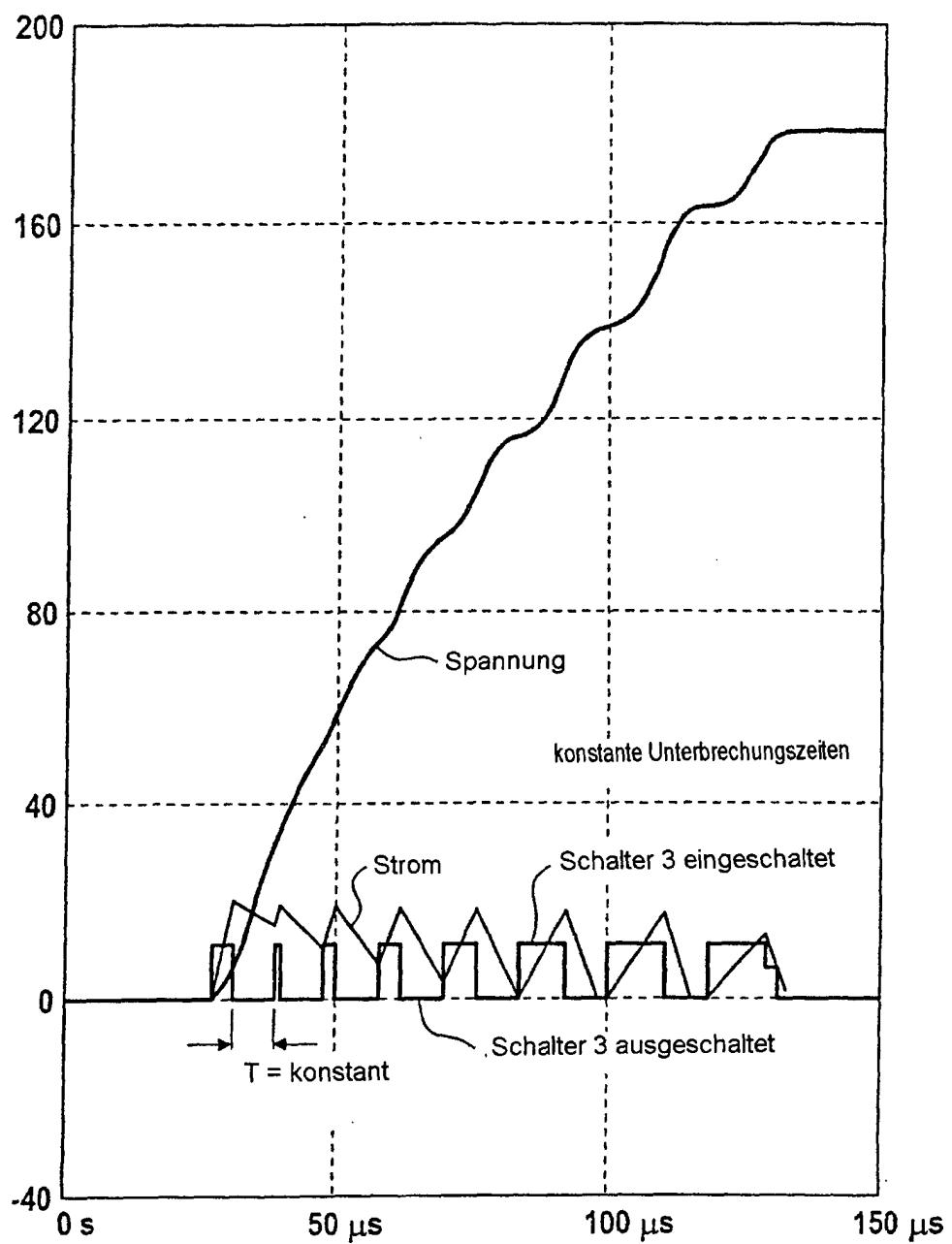


FIG. 15

