

(12)

Patentschrift

(21) Anmeldenummer: A 1097/2009
(22) Anmeldetag: 13.07.2009
(45) Veröffentlicht am: 15.08.2013

(51) Int. Cl. : **F02B 71/04** (2006.01)
H02K 7/18 (2006.01)

(56) Entgegenhaltungen:
DE 10241101 A1
US 2007169476 A1
WO 199417295 A1 GB 1285952 A
US 2005081804 A1
WO 200055482 A1

(73) Patentinhaber:
VE VIENNA ENGINEERING
FORSCHUNGS- UND ENTWICKLUNGS
GMBH
2111 TRESZDORF (AT)

(72) Erfinder:
PUTZ MICHAEL
GROSS ENZERSDORF (AT)
SEIDL GERHARD
GERASDORF (AT)

(54) SCHWINGUNGSKOMPENSIRTER FREIKOLBENMOTOR

(57) Für einen praktikablen Betrieb eines Freikolbenmotors ist ein Ausgleich der schwingenden Massen notwendig, da es hervorgerufen durch die beim Verbrennungsvorgang entstehenden Kräfte sonst zu starken Vibrationen kommen kann, die zu einer Beschädigung des Freikolbenmotors führen können. Dazu wird erfindungsgemäß vorgeschlagen, dass für zwei gegengleich arbeitende Kolben (3a, 4b; 3b, 4a) der Kolbenpaare (2a, 2b) des Freikolbenmotors (1) der zeitliche Verlauf FK der Verbrennungskräfte erfasst wird und daraus die zeitliche Abweichung der Verbrennungsstöße F2 dieser beiden Kolben (3a, 4b; 3b, 4a) zueinander ermittelt wird und in Abhängigkeit davon zur Reduzierung der zeitlichen Abweichung der Verbrennungsstöße FZ für zumindest einen der beiden Kolben (3a, 4b; 3b, 4a) die Kraftstoffmenge für die Verbrennung und/oder die Verbrennungsluftmenge und/oder die Stromentnahme des zugehörigen Lineargenerators (10) geregelt wird.

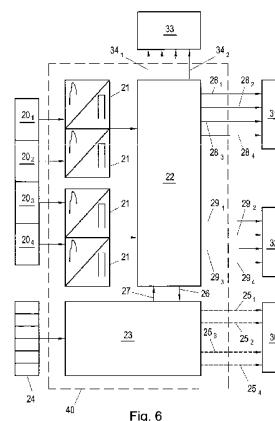


Fig. 6

Beschreibung

SCHWINGUNGSKOMPENSIERTER FREIKOLBENMOTOR

[0001] Die gegenständliche Erfindung betrifft eine Vorrichtung und ein Verfahren zur Schwingungskompensation bei einem Freikolbenmotor mit zwei Kolbenpaaren mit jeweils einem Lineargenerator zur Stromerzeugung.

[0002] Freikolbenmotoren bestehen aus zwei verbundenen Kolben, die jeweils in einem Zylinder hin- und herbewegbar angeordnet sind. Ebenso sind Freikolbenmotoren mit zwei Kolbenpaaren bekannt, wobei der Raum zwischen den zwei zugewandten Kolben als Brennraum ausgeführt ist. Aufgrund dieser allgemeinen Anordnung entsteht eine oszillierende Anordnung, wobei die verbundenen Kolben die schwingende Masse bilden. Freikolbenmotoren werden häufig für die Erzeugung von elektrischer Energie eingesetzt, indem ein Lineargenerator gebildet aus dem bewegten Kolben, an dem Magnete angeordnet sind, und einem ortsfesten Stator vorgesehen ist. Durch die hin- und hergehende Bewegung der Kolben durch die Verbrennung wird im Stator ein Strom induziert, der einen Verbraucher zugeführt oder einem Netz eingespeist werden kann.

[0003] Für einen praktikablen Betrieb eines solchen Freikolbenmotors ist jedoch ein Ausgleich der schwingenden Massen notwendig, da es hervorgerufen durch die beim Verbrennungsvorgang entstehenden Kräfte sonst zu starken Vibrationen kommen kann, die bis zur Zerstörung von Bauteilen des Freikolbenmotors, wie z.B. der Motorlagerung, führen können. Der Verbrennungsvorgang kann dazu noch sehr rasch ablaufen, viel rascher als bei herkömmlichen Benzin- oder Dieselmotoren, was die Verhältnisse schwingungstechnisch weiter verschlechtert. Im Zeitpunkt der Verbrennung entstehen dabei die höchsten Gasdrücke und damit die höchsten Kräfte, die auf zwei Massen wirken, nämlich einerseits auf den beweglichen Teil des Freikolbenmotors (im Wesentlichen die Kolben und allen daran angebrachten und mitbewegten Massen) und andererseits auf den ortsfesten Zylinder bzw. Zylinderkopf in Form von Stößen, die nach außen wirken. Ein möglichst großes Verhältnis dieser beiden Massen im Sinne eines schweren Gesamtmotors und eines leichten Kolbens wäre erwünschenswert, um die Stöße nach außen klein zu halten. Ein solches großes Verhältnis zwischen den ortsfesten und den bewegten Massen lässt sich bei Freikolbenmotoren aber aus den folgenden Gründen nicht erreichen.

[0004] Freikolbenmotoren können Motoren mit hoher Leistung pro Gewicht sein (über 1 kW pro kg des Verbrennungsmotors ist durchaus möglich) und sie benötigen magnetische Teile, die sich mit den Kolben bewegen, wenn sie zur Stromerzeugung dienen. Der Lineargenerator zur Stromerzeugung kann ebenso große elektrische Leistung pro Gewicht liefern (über 1 kW elektrisch pro kg des Generators ist durchaus erreichbar). Natürlich ist das Gewicht des mit dem Kolben bewegten Magneten (z.B. Dauermagnet, Elektromagnet oder Kurzschlusswicklung) nur ein Teil des Generatorgewichts, man muss aber doch mit einem nennenswerten Gewicht des Magneten rechnen. Eine denkbare Konstellation eines 100 kW Freikolbenmotor-Stromerzeugers wäre grob 100 kg für den Verbrennungsmotor und grob 100 kg für den gesamten Generator mit grob kaum unter 10 kg für die Magnete. Das ergibt eine ungewöhnliche Konstellation eines 100 kW Motors, bei dem die Kolben (mit allen mitschwingenden Teilen) kaum unter 10 kg haben. Die Kolben mit den Anbauteilen sind also grob zehnmal schwerer als bisher bei herkömmlichen Verbrennungsmotoren üblich. Es ist also bei solchen Freikolbenmotor zur Stromerzeugung (bei konstruktiv sinnvoller Auslegung) nicht erreichbar, dass der Freikolbenmotor schwer ist und die bewegten Massen im Vergleich dazu leicht sind. Zusammen mit der sehr schnellen Verbrennung ist ein solcher Freikolbenmotor also schwingungsmäßig sehr ungünstig und es müssen folglich Maßnahmen gesetzt werden, um die entstehenden Vibrationen zu dämpfen.

[0005] Auswuchtung durch einen gegengleich schwingenden zweiten Freikolbenmotor wäre eine Lösung, die entweder mechanisch erzwungen wird oder über Vorgabe der Zünd- oder Einspritzzeitpunkte erreicht werden soll. Aus der WO 94/17295 A1 geht z.B. ein Dieselmotor

hervor, bei dem die Einspritzzeitpunkte aus einer gemeinsamen Einspritzpumpe synchron vorgegeben werden. Bei Benzin- und Dieselmotoren ist diese Synchronisation aber nur bedingt verstellbar, denn Dieselmotoren können nicht selbstzünden, solange die Kompression zu gering ist, und Benzinmotoren produzieren eine Klopfzündung, wenn die Verdichtung zu hoch wird. Außerdem gibt es daneben noch das HCCI-Brennverfahren, bei dem kein Zündzeitpunkt (durch Zündkerze oder Einspritzzeitpunkt) von außen vorgegeben werden kann, sondern bei Erreichen einer bestimmten Kompression selbsttätig gezündet wird. Ein Vorschlag mit Gestänge zur Kraftübertragung zur mechanisch erzwungenen Synchronisation der gegengleich laufenden Freikolbenmotoren ist z.B. aus der WO 2004/04652 A1 bekannt. Auch Vorschläge mit zahnstangengetriebenen Gegengewichten zum Auswuchten eines Freikolbenmotors sind bekannt, z.B. aus GB1 285 952 A. Die mechanischen Lösungen sind aber natürlich unglückliche Konstruktionen, vor allem wegen den hohen stoßweisen Belastungen und den damit verbundenen notwendigen kräftigen Konstruktionsteilen. Sie sind bei Freikolbenmotoren zur Stromerzeugung vor allem auch unnötig, weil sich elektrische Maschinen bekannter Weise auch elektrisch synchronisieren lassen. Es ist seit Beginn der Wechselstromerzeugung Stand der Technik, dass Wechselstromgeneratoren durch phasenrichtige elektrische Verbindung absoluten Drehzahlgleichlauf haben.

[0006] Eine solche elektrische Synchronisation eines Freikolbenmotors ist z.B. in der US 2005/081804 A1 beschrieben. Es werden hier eigene Wicklungen für die Synchronisation vorgeschlagen, durch die im Falle ungleicher Bewegungen Ausgleichsströme entstehen, die den einen Kolben bremsen und den anderen Kolben beschleunigen. Das ist zweifelsohne ein richtiger Ansatz und wird ja genau in dieser Art auch bei allen synchronisierten Wechselstromgeneratoren (natürlich in rotierender Art statt oszillierend) angewendet. Ausgleichsströme zur Kolbenpositionierung sind für den Gesamtwirkungsgrad jedoch sehr ungünstig, weil sie verlorene Wärme bewirken. Freikolbenmotoren können durch Wegfall von Reibungen gegenüber Kurbelwellenmotoren grob 10% Wirkungsgradvorteil erreichen. Wenn nun größere Ausgleichsströme für die Synchronisation aufgewendet werden, ist dieser Vorteil schnell aufgebraucht. Außerdem bringen Ausgleichsströme bei hoher Bewegungsähnlichkeit der Kolben (also bei erwünschter hoher Synchronität) sinkende und gegen Null gehende Wirkung, weil mit ähnlicher werdendem Kurvenverlauf der Kolbenbewegung und damit der Ströme immer weniger Ausgleichsstrom fließen kann. Natürlich könnte man Zusatzschaltungen mit elektrischen Speichern und/oder mit Wandlern anwenden, was aber verlustreich wäre und das Problem der Stromverschwendung zur Synchronisation nur weiter vergrößern würde. Aber bereits eine kleine Phasenabweichung genügt schon für Vibrationen nach außen, da die ungleichzeitigen Verbrenungskräfte unkompensiert nach außen dringen.

[0007] Eine elektronische Synchronisation eines Freikolbenmotors ist in der WO 00/55482 A1 beschrieben. Dabei erzeugt eine elektronische Einheit ein von Positionssensoren gesteuertes Signal für einen Kraftstoffinjektor, um den Einspritzzeitpunkt und/oder die zugeführte Kraftstoffmenge zu regeln. Dazu ist vorgesehen, dass der Kraftstoffdurchfluss abhängig von der Phasenabweichung gesteuert wird und der Kraftstoffdurchfluss ausreichend gewählt wird, um eine Frequenzabweichung des Ausgangsstromes zu eliminieren. Positionssensoren erfassen die Bewegung der Kolben, wobei die Frequenz des Positionssignals der Frequenz des erzeugten Stromes entspricht. Die Positionssignale werden in einer Vergleichseinheit ausgewertet, die Vorzeichen und Größe der Abweichung der Istfrequenz zu einer zugewiesenen Frequenz ermittelt. Wenn die Frequenzabweichung unter ein bestimmtes Maß geht, wird ein Phasenabweichungssignal mit einem Frequenzabweichungssignal summiert. Diese gemeinsame Vorgangsweise soll dazu führen, dass die Motorleistung auf das gewünschte Maß hinaufgeregelt wird. Als Resultat entsteht Wechselstrom von vorgegebener Frequenz und Phase. Bei kleinen Frequenzabweichungen wird eine Regelung aus der Abweichung der Stromphasenlage aktiviert und die Stromphasenabweichung wird in einem Regler verringert. Diese Veröffentlichung zielt somit darauf ab, zuerst eine Frequenzabweichung wegzuregulieren und dann die Phasenabweichung bedarfsgemäß einzustellen und ist folglich hauptsächlich zur Synchronisation eines Wechselstromgenerators an das Stromnetz oder zur frequenz- und phasenrichtigen Synchronisation mehrerer solcher Module zueinander gedacht. Es ist aber seit Anfang der Wechselstrom-

technik bekannt, dass zuerst die Frequenz eines Generators an die Netzfrequenz angenähert wird, dann die korrekte Phasenlage eingestellt wird, dann der Generator ans Wechsel- oder Drehstromnetz geschaltet wird und dann die Stromphase so geregelt wird, dass die gewünschte Stromstärke (Leistung) ins Netz geliefert wird.

[0008] Es wird dabei immer die Antriebsleistung des Generatorantriebes verändert, hier die zugeführte Kraftstoffmenge. Soweit ist obige elektronische Synchronisation eine Anwendung der bekannten Vorgangsweise bei Wechselstromgeneratoren auf den Freikolbenmotor. Das Problem dabei ist einerseits wieder der Umstand, dass bei Benzin- und Dieselmotoren der Zündzeitpunkt nur bedingt verstellbar ist und bei HCCI-Brennverfahren überhaupt nicht vorgegeben werden kann. Andererseits ist eine Frequenzannäherung in der Praxis problematisch, da die großen Massenunwuchten bei Frequenzungleichheit bis zu einer Synchronisation der Frequenz zu schweren Schäden führen können oder sogar die Motoranordnung aus Ihrer Verankerung reißen können.

[0009] Es ist daher eine Aufgabe der gegenständlichen Erfindung ein Verfahren zur Schwingungskompensation der Kolbenpaare eines Freikolbenmotors eines beliebigen Motortyps anzugeben, das sowohl unabhängig von der Vorgabe eines Zündzeitpunktes ist, als auch Frequenzungleichheiten zwischen den beiden Kolbenpaaren verhindert.

[0010] Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß für das Verfahren dadurch gelöst, indem für zwei gegengleich arbeitende Kolben der Kolbenpaare der zeitliche Verlauf der Verbrennungskräfte erfasst wird und daraus die zeitliche Abweichung der Verbrennungsstöße dieser beiden Kolben zueinander ermittelt wird und in Abhängigkeit davon zur Reduzierung der zeitlichen Abweichung der Verbrennungsstöße für zumindest einen der beiden Kolben die Kraftstoffmenge für die Verbrennung und/oder die Verbrennungsluftmenge und/oder die Stromentnahme des zugehörigen Lineargenerators geregelt wird. Die erfindungsgemäße Vorrichtung zeichnet sich dadurch aus, dass eine Sensoreinheit vorgesehen ist, mit der der zeitliche Verlauf der Verbrennungskräfte zweier gegengleich arbeitender Kolben der Kolbenpaare erfassbar ist und weiters eine Synchronisationsvorrichtung vorgesehen ist, in der aus dem zeitlichen Verlauf der Verbrennungskräfte eine zeitliche Abweichung der Verbrennungsstöße dieser beiden Kolben zueinander ermittelbar ist und in der Synchronisationsvorrichtung in Abhängigkeit von der zeitlichen Abweichung der Verbrennungsstöße zur Reduzierung der zeitlichen Abweichung der Verbrennungsstöße für zumindest einen der beiden Kolben ein Kraftstoffmengensteuersignal und/oder ein Verbrennungsluftmengensteuersignal zur Regelung der Verbrennung für diesen Kolben und/oder ein Stromentnahmesteuersignal zur Regelung der Stromentnahme des zugehörigen Lineargenerators erzeugbar und ausgebbar ist.

[0011] Das neue Verfahren hat als wesentliches Merkmal, dass es zur Schwingungskompensation möglichst gleichzeitige gegenwirkende Verbrennung bewirkt, aber im Gegensatz zu bekannten Verfahren nicht den Zündzeitpunkt (z.B. über Zündkerze oder Einspritzzeitpunkt) für gleichzeitige Zündung verwendet. Damit ist dieses Verfahren insbesondere auch für Motoren mit HCCI-Zündung, bei denen kein Zündzeitpunkt z.B. über Zündkerzen vorgegeben wird, sondern die Zündung selbst einsetzt, einsetzbar. Das neue Verfahren kann auch helfen, wenn bei zündzeitpunktgesteuerten Betrieben z.B. Klopfzündungen oder mangelnde Kompression bei Dieseleinspritzung einer gesteuerten Zündung entgegenwirken. Allerdings ist das erfindungsgemäße Verfahren auch für Motortypen mit zeitpunktbestimmter Zündung (z.B. Zündkerze, Einspritzzeitpunkt) anwendbar, womit das Verfahren grundsätzlich für jeden Motortyp einsetzbar ist. Das erfindungsgemäße Verfahren erfasst den tatsächlichen Stoß durch die sehr schnelle Verbrennung, damit diese kurzen Stöße gegengleich möglichst überlappend zur Schwingungskompensation dienen können. Damit kann auch ein sehr schneller Regeleingriff realisiert werden, da auf jeden einzelnen Verbrennungsvorgang Einfluss genommen werden kann und bei Verwendung der Beeinflussung durch Stromentnahme sogar während des Verbrennungsvorganges eingegriffen werden kann. Eine Annäherung der Frequenzen, wie z.B. in der WO 00/55482A1 beschrieben, ist beim erfindungsgemäßen Verfahren vermieden, weil die großen Massenunwuchten dabei zu schweren Schäden führen können. Es wird im neuen Verfahren also immer mit Frequenzgleichheit gearbeitet, d.h. es wird mit Frequenzgleichheit ange-

startet und die Verbrennungen werden in Frequenzgleichheit gegengleich überlappend synchronisiert.

[0012] Ganz besonders vorteilhaft werden aus Eingangsdaten für den Freikolbenmotor eine Kraftstoffmenge und/oder Verbrennungsluftmenge und/oder Stromentnahme ermittelt und die ermittelte Kraftstoffmenge und/oder die Verbrennungsluftmenge und/oder die Stromentnahme für zumindest einen der beiden Kolben zur Reduzierung der zeitlichen Abweichung der Verbrennungsstöße korrigiert und/oder die Stromentnahme des zugehörigen Lineargenerators geregelt. Damit kann das erfindungsgemäße Verfahren zur Schwingungskompensation sehr einfach in die vorhandene Motorsteuerung eingebunden werden. Die Eingangsvorgaben zur Erreichung bestimmter Betriebszustände des Freikolbenmotors werden, z.B. unter Nutzung der bestehenden Motorsteuerparameter und/oder Motorsteuerprogramme, in Vorgaben für die Verbrennung (Kraftstoff, Verbrennungsluft) und/oder Stromentnahme umgesetzt, die dann korrigiert werden, um eine Synchronisation der Verbrennungsvorgänge in den beiden Freikolbenpaaren und damit eine Schwingungskompensation zu erzielen. Diese Vorgaben für die Kraftstoffmenge und/oder Verbrennungsluftmenge und/oder Stromentnahme werden dabei ganz besonders vorteilhaft von einer Motorsteuereinheit ermittelt.

[0013] Vorzugsweise ist eine Not-Aus-Funktion vorgesehen, die bei Frequenzungleichheit oder Phasenungleichheit der Schwingungen der Kolbenpaare aktiviert wird, um im Fehlerfall schwere Schäden am Freikolbenmotor zu verhindern.

[0014] Die gegenständliche Erfindung wird anhand der beispielhaften, schematischen, vorteilhafte Ausgestaltungen zeigenden und nicht einschränkenden Figuren 1 bis 6 näher beschrieben. Dabei zeigt

[0015] Fig. 1 einen Freikolbenmotor mit zwei Freikolbenpaaren,

[0016] Fig. 2 einen Freikolbenmotor mit zwei Freikolbenpaaren und einem gemeinsamen mittleren Brennraum,

[0017] Fig. 3 den zeitlichen Verlauf der Kraft auf ein Freikolbenpaar,

[0018] Fig. 4 Strategien zur Ermittlung der Phasenabweichung zweier Freikolbenpaare,

[0019] Fig. 5 der zeitliche Verlauf der Kraft auf einen Kolben bei unterschiedlichen Kraftstoffmengen und

[0020] Fig. 6 eine Vorrichtung zur Synchronisation zweier Freikolbenpaare

[0021] In Fig. 1 ist schematisch ein Freikolbenmotor 1 mit zwei Kolbenpaaren 2a, 2b dargestellt. Jedes Kolbenpaar 2a, 2b besteht aus zwei Kolben 3a, 3b, 4a, 4b, die jeweils durch eine Kolbenstange 5, 6 miteinander verbunden sind. Die Kolben 3a, 3b, 4a, 4b der Kolbenpaare 2a, 2b bewegen sich daher immer gemeinsam und sind in Brennräumen 7a, 7b, 8a, 8b, wie z.B. in Zylindern, angeordnet. Ein Brennraum 7a, 7b, 8a, 8b kann je nach Motortyp (Otto, Diesel, HCCI, 2-Takt oder 4-Takt) unterschiedlich ausgeführt sein, z.B. mit Einlass- und Auslassschlitzen bei einem 2-Takt-Motor (wie in Fig. 1 angedeutet) und es können je nach Motortyp in oder an einem Brennraum 7a, 7b, 8a, 8b auch weitere Bauteile angeordnet sein, wie z.B. Einlass- oder Auslassventile, Zündkerzen, Einspritzdüsen, etc.

[0022] In Fig. 2 ist eine weitere prinzipiell bekannte Ausgestaltung eines solchen Freikolbenmotors 1 gezeigt. Dabei sind die beiden einander zugewandten Brennräume 7b, 8a zu einem einzigen gemeinsamen Brennraum 9 zusammengefasst, in dem die beiden Kolben 3b, 4a der Kolbenpaare 2a, 2b angeordnet sind.

[0023] Jedem Kolbenpaar 2a, 2b ist ein Lineargenerator 10 zugeordnet, der jeweils aus einem mit dem Kolbenpaar 2a, 2b mitbewegten Magneten 11, z.B. ein Elektro- oder Permanentmagnet, und einem ortsfesten Stator 12, z.B. eine Wicklung, besteht. Durch die durch die Verbrennung in den Brennräumen 7a, 7b, 8a, 8b hervorgerufene hin- und hergehende Bewegung der Kolbenpaare 2a, 2b und damit der Magnete 11 wird in bekannter Weise im Stator 12 ein elektrischer Strom induziert, der abgegriffen werden kann.

[0024] Solche Freikolbenmotoren 1 sind hinlänglich bekannt, weshalb hier nicht weiter im Detail auf deren konstruktiven Aufbau eingegangen wird. Insbesondere ist hier auch hervorzuheben, dass das nachfolgende Verfahren zur Schwingungskompensation vollkommen unabhängig vom Motortyp ist.

[0025] In Fig. 3a ist der durch die Verbrennung hervorgerufene zeitliche Verlauf der Kraft F_{K1} auf ein Kolbenpaar 2a dargestellt. Darin sind die Verbrennungsstöße, durch Zündung im ersten Brennraum 7a und durch Zündung im zweiten Brennraum 7b, durch sehr kurzzeitige, hohe Kraftspitzen F_z angedeutet. Dazwischen treten Kräfte F_l durch die Stromentnahme am zugehörigen Lineargenerator 10 auf. Das zweite Kolbenpaar 2b des Freikolbenmotors 1 schwingt mit gleicher Frequenz fast genau entgegengesetzt, kann aber einen kleinen Zeitversatz t_{diff} (Phasenverschiebung) haben, wie in Fig. 3b angedeutet. Das genügt aber bereits zur Erzeugung von nicht vernachlässigbaren Vibrationen (Schwingungen) der Anordnung nach außen, da die ungleichzeitigen hohen Verbrennungsstöße jeweils unkompensiert nach außen dringen. Für die Vibration nach außen ist es vorteilhaft, dass der Zeitverzug t_{diff} klein ist. Vorteilhaft sollte der Zeitverzug t_{diff} so klein sein, dass sich große Teile der Kraftkurven der den beiden Kolbenpaaren 2a, 2b zugeordneten Verbrennung gegengleich überdecken.

[0026] Um die durch Zeitverzug t_{diff} auftretenden Schwingungen nach außen kompensieren zu können, werden beim erfindungsgemäßen Verfahren die tatsächlichen sehr kurzen Verbrennungsvorgänge, also die Verbrennungsstöße, detektiert und zur Synchronisation der Verbrennungsvorgänge verwendet. Denn wenn die Verbrennungen vollkommen synchronisiert wären, also vollkommen gegengleiche Verbrennungen stattfinden würden, würden die Verbrennungsstöße und damit auftretende Schwingungen kompensiert bzw. unterdrückt werden. Hier ist anzumerken, dass eine vollständige Kompensation natürlich nicht möglich ist (aufgrund von Messungenauigkeiten, einer immer nachteiligen Regelung, etc.), sondern unter Kompensation im Wesentlichen eine Reduktion der nach außen wirkenden Schwingungen verstanden wird, sodass die noch auftretenden Schwingungen nicht mehr von Belang sind.

[0027] Eine Kolbenposition, z.B. aufgenommen mittels Wegsensoren, sagt aufgrund der sehr kurzen Verbrennungszeit nicht genug aus. Es ist ja z.B. auch normale Arbeitsweise von Zündungen, dass der Winkel der Vorzündung je nach Betriebszustand des Motors (Drehzahl, Kraftstoffqualität, Verdichtung, Gemisch, Temperatur, Last, etc.) verstellt wird. Das zeigt, dass die bloße Kolbenposition noch nicht genug über den tatsächlichen Verbrennungsverlauf aussagt. Eine genaue Zündzeitpunktermittlung oder gar Ermittlung des Verbrennungsverlaufes ist aber auch aus dem Spulenstrom nicht gut möglich, weil die Kolbengeschwindigkeit im Totpunkt bei maximaler Kompression (in dessen Umgebung die Zündung erfolgt) durch Null geht und dort kein Strom im Lineargenerator 10 induziert wird und erst wieder (messbarer) Strom fließt, wenn eine höhere Kolbengeschwindigkeit erreicht ist. Im Übrigen ist der Strom auch durch den Verbraucher bestimmt, womit eine Messung des Spulenstromes auch vom Verbraucher beeinflusst werden würde.

[0028] Um die Verbrennungsstöße detektieren zu können gibt es eine Fülle von an sich bekannten Möglichkeiten. So kann der Verbrennungskraftverlauf direkt gemessen werden, z.B. mittels Drucksensoren im Brennraum, Stoßsensoren (Beschleunigung) an Bauteilen des Freikolbenmotors 1, Mikrophone (auch Körperschall) an Bauteilen des Freikolbenmotors 1, Lichtstromsensoren im Brennraum, etc. Dazu können mehrere solcher Sensoren verwendet werden oder auch nur ein Sensor. Z.B. kann ein Mikrophon absichtlich außermittig mehr im Bereich eines der beiden Freikolbenpaare 2a, 2b angeordnet sein, um die vom Mikrophon aufgenommen Größen aufgrund deren Intensität einem der Kolbenpaare 2a, 2b zuordnen zu können. Ebenso kann der Verbrennungsverlauf über Modellbildung aus bestimmten, möglicherweise ohnehin aufgenommen, Messgrößen ermittelt werden. Z.B. kann aus dem Spannungsverlauf am Lineargenerator 10 und/oder Orts- bzw. Zeitmessungen über Modellbildung auf den Verbrennungsverlauf geschlossen werden. Es können solche Modelle im normalen Betrieb eingesetzt werden oder es können solche Modelle im Falle von Sensorstörungen für Ersatz sorgen. Es können solche Modelle aber auch zur Kontrolle der Sensoren (oder umgekehrt) eingesetzt werden. Im Falle widersprüchlicher Werte könnten dann entsprechende Aktionen gesetzt wer-

den, z.B. Korrekturversuche oder Notabschaltung des Freikolbenmotors 1.

[0029] Der Freikolbenmotor 1 ist im Prinzip ein Feder-Masse Schwingssystem, in dem die frequenzbestimmenden Teile die vorgegebene Kolbenmasse und die „Federkräfte“ die Verbrennungskraft und die magnetische Kraft aus dem Stromfluss (Kraft aus Stromentnahme) sind. Die Kolbenmasse (mit Anbauteilen) ist dabei im Wesentlichen unveränderbar und durch die Fertigung vorgegeben. Andere Kräfte wirken zwar ebenfalls, sind aber in der Praxis nur schwer beeinflussbar, wie z.B. Kräfte durch Reibung (diese sind darüber hinaus abhängig von Motor- und Öltemperaturen, etc.) und eine Kraft zur Verdichtung der Luft für die nächste Zündung. Die Verbrennungskraft ist dahingegen weit steuerbar, z.B. über die Kraftstoffmenge und/oder durch Vorgabe der Luftmenge für die Verbrennung. Die Bremskraft aus Stromentnahme kann entweder nicht veränderbar sein, wenn z.B. beide Spulen elektrisch verbunden sind, oder sie kann einzeln einstellbar sein, wenn z.B. eine Wicklung 12 einen eigenen Regler zur Stromentnahme hat, und ist ebenfalls einfach steuerbar. Ebenso könnte die Stromentnahme durch das Vorsehen von mehreren zu- und wegschaltbaren Wicklungen in der Spule verändert werden.

[0030] Beim erfindungsgemäßen Verfahren werden nun die Verbrennungsstöße F_z jeweils der beiden gegengleich arbeitenden Kolben 3a, 4b und 3b, 4a erfasst (z.B. durch entsprechende Auswertung der mittels geeigneter Sensoren aufgenommen zeitlichen Kraftverläufe F_{K1} , F_{K2}) und der Zeitverzug t_{diff} zwischen den beiden Verbrennungsstößen F_z ermittelt, z.B. durch einfachen Vergleich, wie in Fig. 4 a) angedeutet. Diese Zündzeitpunktermittlung muss nicht notwendigerweise den genauen Beginn oder die genaue Spitze der Verbrennung ermitteln, es muss aber für beide Freikolbenpaare 2a, 2b gleich ermittelt werden, um Messfehler hinsichtlich der Zeitpunktermittlung gering zu halten. Der ermittelte Zeitverzug t_{diff} kann dann dazu dienen, auf die „Federkräfte“ des Feder-Masse Schwingssystems einzugreifen und so den Zeitverzug t_{diff} zu reduzieren. Eine denkbare logische Verknüpfung wäre z.B., dass bei steigender Vorseilung eines Kolbens eines Freikolbenpaares 2a gegenüber dem gegengleich arbeitenden Kolben des anderen Freikolbenpaares 2b der vorseilende Kolben für die nächsten Zündung(en) weniger Kraftstoff bekommt oder die Verbrennungsluftmenge verändert wird oder mehr elektrische Last eingestellt wird oder mehrere Maßnahmen gleichzeitig angewendet werden. Umgekehrt kann der zeitlich zurückliegende Kolben gleichzeitig mehr Kraftstoff bekommen oder die Verbrennungsluftmenge verändert werden oder weniger elektrische Last eingestellt werden oder wiederum mehrere dieser Maßnahmen eingesetzt werden. Ebenso ist es denkbar, Kurven zu hinterlegen, die festlegen, wie stark die Beeinflussung bei welchen Zeitverzügen t_{diff} ist. Auch Eingriffe in Zündzeitpunkt oder Einspritzzeitpunkt können zusätzlich angewendet werden, wenn dies der jeweils vorliegende Motortyp zulässt bzw. ermöglicht. Damit sind aber auch sehr schnelle Regeleingriffe möglich, da die eingespritzte Kraftstoffmenge mit jeder einzelnen Zündung beeinflusst werden kann. Noch schneller ließe sich die Kraft aus Stromfluss verstellen, da diese sogar während der gesamten Hubbewegung eines Freikolbenpaares 2a, 2b verstellt werden könnte.

[0031] Eine verbleibende Regelabweichung könnte grundsätzlich durch höhere Verstärkung kleiner gemacht werden, da bekanntermaßen mit höherer Verstärkung die Erkennbarkeit der Regelabweichung verbessert wird. Die Regelabweichung kann aber auf diese Weise nicht Null werden, da immer kleinere Abweichungen auch bei hoher Verstärkung immer schwerer erkennbar werden. Das hieße für den Freikolbenmotor 1, dass trotzdem Phasenabweichungen verbleiben, also zeitliche Abweichungen t_{diff} in den gegengleichen kurzen Verbrennungsstößen F_z . Um solche Phasenfehler zu reduzieren oder wegregele zu können, können die ermittelten Verbrennungsstöße auch anders miteinander verglichen werden.

[0032] In Fig. 4 b) ist ein genaueres Verfahren gezeigt, das den Teil des zeitgleichen Verbrennens ermittelt, also den überlappenden Teil der Verbrennungskraftverläufe. Die zeitgleiche Kurve kann dann durch Eingriff in Kraftstoffmenge und/oder Verbrennungsluftmenge und/oder Stromentnahme auf ein Maximum optimiert werden. Da Maximierungsaufgaben unter Umständen weniger genau erfolgen können als Minimierungsaufgaben (weil die Verstärkung der Erkennung im Minimum höher ausgelegt werden kann als im Maximum), wird im Verfahren nach Fig. 4 c) der Teil der ungleichzeitigen Verbrennungen erkannt, also der nicht überlappende Teil

der Verbrennungskraftverläufe. Diese Ungleichzeitigkeiten werden wieder durch Eingriff in Kraftstoffmenge und/oder Verbrennungsluftmenge und/oder Stromentnahme auf ein Minimum eingestellt.

[0033] Es ist aber zu erwähnen, dass die Verbrennungsvorgänge nicht unbedingt als ein einziger Druckstoß ablaufen müssen, wie in den schematischen Darstellungen der Figuren 3 und 4. Bei bestimmten Kraftstoffen oder HCCI-Verbrennung lässt sich z.B. beobachten, dass zwei Druckstöße direkt aufeinanderfolgen, was sich durch die tatsächlich ablaufenden chemischen Reaktionen erklären lässt. In diesem Fall muss die Synchronisation natürlich die jeweils richtigen Druckstöße richtig synchronisieren. In den vorangegangenen Figuren wird immer nur auf einen Druckstoß eingegangen. Um dieses Problem zu umgehen, könnte z.B. der Beginn der Verbrennung ab einem bestimmten Druck (oder Kräftewert) als Anfang eines Signales genutzt werden und das Ende der Verbrennung ab Unterschreitung eines bestimmten Wertes als Signalende genutzt werden, dann spielt es keine Rolle, ob zwischen dem „Anfangssignal“ und dem „Endsignal“ ein einfacher Druckanstieg liegt oder ein mehrfacher.

[0034] Es gibt aber selbstverständlich noch eine Fülle weitere Möglichkeiten, um die zeitliche Abweichung der Verbrennungsstöße, also die Synchronität der Verbrennungen, zu ermitteln. Welches Verfahren letztendlich zur Anwendung kommt ist für die gegenständliche Erfindung sekundär. Entscheidend ist nur, dass die Synchronität der Verbrennungsstöße ausgewertet wird.

[0035] Beim erfindungsgemäßen Verfahren zur Schwingungskompensation durch Synchronisierung der Verbrennung der beiden Kolbenpaare 2a, 2b wird die Synchronisation durch Einwirken auf die Verbrennungskraft (als Funktion verbrennbarer Kraftstoffmasse und/oder Luftmasse zur Verbrennung) und die Kraft durch Stromentnahme bewirkt, da diese gut beherrschbar sind. Andere Kräfte sind zwar ebenfalls denkbar, aber in der Praxis nur schwer beeinflussbar, wie z.B. Kräfte durch Reibung (diese sind darüber hinaus abhängig von Motor- und Öltemperaturen, etc.) und eine Kraft zur Verdichtung der Luft für die nächste Zündung. Um das zu verdeutlichen ist in Fig. 5 wieder ein zeitlicher Verlauf F_K der Kraft auf ein Kolbenpaar mit Verbrennungsstoß F_{Z1} und der Kraftverlauf F_{I1} durch Stromentnahme für einen Kolben eines Kolbenpaares 2a, 2b dargestellt. Wird eine größere verbrennbare Kraftstoffmenge zugeführt, so wird der Verbrennungsstoß F_{Z2} größer, wobei je nach Verbrennungsverfahren die Verbrennungszeit trotzdem sehr kurz bleiben kann. Die Kraft F_{I2} durch Stromentnahme wird dabei ebenfalls größer, weil natürlich der Sinn einer größeren Kraftstoffmenge darin besteht, mehr elektrische Leistung zu bekommen. In beiden Kurvenverläufen ist F_{Komp} die Kompressionskraft zufolge des Verdichtens der Luft im zugehörigen Brennraum. Wenn gleiche Luftmasse bei gleicher Temperatur auf gleichen Enddruck verdichtet wird, resultiert sowohl bei kleiner Kraftstoffmenge als auch bei größerer Kraftstoffmenge der gleiche Verlauf der Kompressionskraft F_{Komp} . Wenn die Verdichtung zur Zündung ausreicht, setzt bei HCCI automatisch die Verbrennung ein, die Kurve geht also wie in Fig. 3a mit Zündung weiter. Bei gesteuerten Zündungen würde man wie üblich im günstigsten Zeitpunkt die Zündung auslösen, z.B. mit Zündkerze oder Dieseleinspritzung. Bei Ottoverfahren mit Zündkerze oder HCCI-Verfahren kann sinnvollerweise eine Einspritzung mit kleineren Drücken als bei Dieselpinzip erfolgen. Dies ist ab jenem Zeitpunkt sinnvoll, ab dem keine nennenswerten Kraftstoffmengen mehr in den Auslass (oder auch Einlass) entweichen können. Natürlich könnte das Otto- oder HCCI-Verfahren auch mit anderer Gemischbildung arbeiten, z.B. Vergaser, Saugrohreinspritzung oder Gasmischer.

[0036] Beim erfindungsgemäßen Verfahren wird bevorzugt die Verbrennungskraft und/oder die Kraft aus Stromfluss genutzt. Wenn von den beiden Freikolbenpaaren 2a, 2b ein Paar im Verbrennungszeitpunkt weiter vor geregelt werden muss, wird diesem Kolbenpaar mehr Kraftstoff zugeführt und/oder die Verbrennungsluftmenge variiert und/oder der Stromfluss reduziert. Das Verhältnis aus Kraft durch Verbrennung und Kraft durch Stromentnahme wird vorteilhaft so eingestellt, dass genügend kinetische Energie im Kolben (mit allen schwingenden Teilen) verbleibt, um sicher die Verdichtung auf der gegenüberliegenden Seite bis zur Zündung zu erreichen. Wenn hier ein kleiner Überschuss an kinetischer Energie vorliegt, stört das nicht, weil dann sicher eine Zündung herbeiführbar ist. Wenn die überschüssige kinetische Energie zu

groß ist (höhere Kolbengeschwindigkeit), kann die nächste Zündung früher einsetzen und zusätzlich zur Verbrennung kann ein kleiner Teil der überschüssigen kinetischen Energie als „Gasfeder“ zur Verbrennungsenergie unterstützend wirken. Beides würde bewirken, dass die Frequenz der Kolbenschwingungen unerwünschter Weise immer höher würde. Hier greift aber das erfindungsgemäße Verfahren automatisch ein, da durch Phasenvergleich wieder der frequenzbestimmende Teil auf kleinere Frequenz zurückgeregelt wird und so nicht auf höhere Frequenzen geraten kann. Damit stellt dieses Verfahren sicher, dass von den Kolbenpaaren eine vorgegebene Frequenz eingehalten wird. Dieser Vorgang verläuft bei richtiger Auslegung der Regelung ohne sogenannte „Regelschwingungen“. Es stellt sich also ein stabiler Zustand von Phase und Regeleingriff in den frequenzbestimmenden Teil ein.

[0037] Die Frequenzgleichheit, innerhalb bestimmter vorgegebbarer Grenzwerte, kann auch überwacht werden, z.B. indem die Frequenz der Bewegung der Kolbenpaare 2a, 2b gemessen oder ermittelt wird, z.B. aus dem erfassten Verbrennungskraftverlauf. Sollte aus einem bestimmten Grund doch eine Frequenzungleichheit auftreten, z.B. bei Ausfall eines Zylinders, Beschädigung von Motorteilen (wie z.B. Kraftstoffanlage, Stromentnahme, Verbrennungsluftregelanlage, Zündanlage, etc. oder einem Fehler in der Regelung), kann eine Not-Aus-Funktion vorgesehen sein, die den Freikolbenmotor 1 stoppt, um allfällige Beschädigungen des Freikolbenmotors 1 zu verhindern. Die Not-Aus-Funktion kann vorrangig auf die zugeführten und abgeführten Energien wirken, denn diese sind ja die Ursache für die Kräfte und diese Energien können abgestellt werden, d.h. die Kraftstoffzufuhr kann sehr rasch abgestellt werden und die Stromentnahme könnte sehr rasch abgestellt werden, wenn dazu eine steuerbare elektrische Einrichtung für eine Stromabschaltung vorhanden ist. Seitens der Abschaltung der Energieentnahme kann es aber auch vorteilhaft sein, die Entnahme in allen Freikolbenpaaren 2a, 2b fortzusetzen, damit die Kolben 3a, 3b, 4a, 4b rasch und gedämpft ausschwingen.

[0038] Die Not-Aus-Funktion kann auch aktiviert werden, wenn aus irgendwelchen Gründen die Schwingungskompensation versagt, die Freikolbenpaare 2a, 2b also z.B. zwar mit gleicher Frequenz aber mit Phasenverschiebung (wieder innerhalb bestimmter vorgegebbarer Grenzwerten), also nicht mit gegengleichen Verbrennungen, schwingen. Auch hier sollte der Freikolbenmotor 1 über die Not-Aus-Funktion abgestellt werden, um eine Beschädigung zu vermeiden.

[0039] In einem vereinfachten Verfahren würde es auch ausreichen, wenn nur die Verbrennungskraftsignale zweier gegengleich arbeitender Kolben der beiden Kolbenpaare 2a, 2b, also z.B. Kolben 3a und 4b oder 3b und 4a, erfasst würden und deren Verbrennungen synchronisiert werden würden. Ebenso wäre es ausreichend, wenn durch das erfindungsgemäße Verfahren auf die Verbrennung oder Stromentnahme nur eines Kolbens Einfluss genommen wird. Besser, weil genauer, ist es aber, wenn die Verbrennungen beider Kolben beider Kolbenpaare 2a, 2b erfasst werden und/oder die auf die beiden Kolben wirkenden Kräfte beeinflusst werden.

[0040] Prinzipiell denkbar wäre es auch, dass die Ungleichzeitigkeit der Kraftstöße im Sinne der Erfindung nur während einer Erprobungsphase festgestellt wird (z.B. durch Messungen) und die erfindungsgemäßen Maßnahmen (Einstellung der Kraftstoffmengen und/oder Verbrennungsluftmenge und/oder Einstellung der Ströme, ...) in dieser Phase fix eingestellt werden und der Motor dann (eventuell in Verbindung mit dem gemeinsamen Mittleren Brennraum und/oder eventuell mit zusätzlicher Hilfe der Vorgabe der Zündzeitpunkte) eine gewisse Zeit alleine aufgrund dieser voreingestellten Maßnahmen mit genügender Schwingungsarmut nach außen laufen kann. Wenn aufgrund von fortgeschrittener Betriebsdauer oder Verschleiß aber Frequenzungleichheit und/oder Phasenungleichheit der Schwingungen der beiden Kolbenpaare 2a, 2b auftritt, dann muss wieder auf das erfindungsgemäße Verfahren zur Schwingungskompensation zurückgegriffen werden, um Beschädigungen am Freikolbenmotor 1 zu vermeiden. Ansonsten müsste der Freikolbenmotor 1 durch die Not-Aus-Funktion abgestellt werden, wenn diese „natürliche“ Kompensation nicht mehr ausreicht.

[0041] Zu wenig kinetische Energie im Kolben sollte jedoch vermieden werden, da dann die nächste Zündung aussetzen könnte. Im Falle einer ausgesetzten Zündung sind zwei Eingriffe möglich, es kann zum Einen der Kolben als Einzelmaßnahme elektrisch beschleunigt werden

(unter Nutzung des Lineargenerators als Linearmotors), um die nächste Zündung zu erreichen oder es kann zum Anderen bei einzelnen oder nicht wieder einleitbaren Zündungen die Not-Aus Funktion des Freikolbenmotors 1 ausgelöst werden.

[0042] Das Anstarten des Freikolbenmotors 1 erfolgt durch elektromagnetische Kolbenbeschleunigung unter Nutzung des Lineargenerators als Linearmotors. Dabei wird durch richtige Stromzufuhr vorteilhaft natürlich schon der korrekte gegenphasige und gleichfrequente Lauf der Freikolbenpaare 2a, 2b herbeigeführt.

[0043] Eine Ausführung des Freikolbenmotors 1 wie in Fig. 2 dargestellt, kann die Synchronisation der beiden Freikolbenpaare 2a, 2b unterstützen. Die Verbrennung im mittleren Brennraum 9 wird entgegengesetzt gleiche Kräfte auf die Kolben 3b und 4a hervorrufen und somit eine nach außen stoßfreie Verbrennung bewirken. Für die Verbrennungen in den Brennräumen 7a, 8b ist aber nach wie vor eine Synchronisation wie oben beschrieben notwendig, allerdings hilft dabei die spezielle Brennraumanordnung. Wenn man von einer gemeinsamen Zündung im Brennraum 9 ausgeht, werden beide Kolben 3a, 4b aufgrund gleicher Kräfte gleichzeitig (im Rahmen der Betrachtungsgenauigkeit) die Brennräume 7a, 8b erreichen. Wenn nun in den Brennräumen 7a, 8b leicht ungleiche Verbrennungen ablaufen, werden die Kolbenpaare 2a, 2b mit ungleicher Geschwindigkeit in die Mitte bewegt, womit ein Kolbenpaar 2a, 2b früher in der Mitte ankommt als das andere. Die Zündung im mittleren Brennraum 9 wird aber erst erfolgen, wenn sich die beiden Kolbenpaare 2a, 2b nahe genug gekommen sind, um die erforderliche Verdichtung zu erreichen. Das schnellere Kolbenpaar kann also einen leicht größeren Weg zurücklegen und die Zündung wird außermittig erfolgen. Dadurch bekommt für den nächsten Durchgang das schnellere Kolbenpaar einen leicht größeren Weg. Wenn es nun ein systematischer Zustand ist, dass die Zündung im zum schnelleren Kolbenpaar gehörigen Brennraum etwas größere Energien liefert, hilft der vergrößerte Weg des schnelleren Kolbenpaares, die höheren Zündkräfte (und damit leicht höheren Geschwindigkeiten) zu kompensieren. Der mittlere, gemeinsame Brennraum 9 hilft also, die einzelnen Zündungen in den Brennräumen 7a, 8b in Richtung Gleichzeitigkeit (und damit in Richtung Synchronität) zu verschieben.

[0044] Eine Synchronisationsvorrichtung 40 zum Durchführen des erfindungsgemäßen Verfahrens zur Synchronisation der Kolbenpaare 2a, 2b eines Freikolbenmotors 1 zur Schwingungskompensation ist in Fig. 6 dargestellt. Die Verbrennungsstöße F_z der Verbrennungen in den einzelnen Brennräumen 7a, 7b, 8a, 8b werden durch Sensoren 20₁ bis 20₄ erfasst. Als Sensoren können vorteilhaft z.B. Druckaufnehmer in den Brennräumen 7a, 7b, 8a, 8b mit benötigter Auflösung und zugehöriger Aufbereitungshardware (Filter, Verstärker, etc.) eingesetzt werden, weil der Druck genau die jeweiligen Kraftverhältnisse wiedergibt. In der Praxis sind Zylinderdruckmessungen aber sehr teuer, so dass auch kostengünstigere Ersatzsignale herangezogen werden können. Denkbar wären z.B. Erschütterungssensoren, Beschleunigungssensoren, Lichtstromsensoren oder Mikrophone am Zylinder. Es können aus allen vier (oder drei) Brennräumen 7a, 7b, 8a, 8b, 9 die Verbrennungsstöße erfasst werden, wie in Fig. 6 angedeutet. Es ist aber auch denkbar z.B. je ein außermittiges Mikrophon pro Kolbenpaar 2a, 2b vorzusehen, damit über die Signalgröße eine Erkennung der Verbrennung des jeweiligen Brennraumes 7a, 7b, 8a, 8b, 9 möglich wird. In der Praxis wird die Wahl der Sensoren (Zahl, Typ) stark vom Preis geprägt sein. Selbst eine Modellbildung unter Verwendung anderer Größen kann verwendet werden, um die benötigten Verbrennungskraftsignale zu generieren. Der Verlauf der Spannung in der Wicklung 12 des Lineargenerators 10, der sehr einfach gemessen werden kann, sagt z.B. viel über die Geschwindigkeitsänderung der Kolben 3a, 3b, 4a, 4b aus. Sogar eine einfache Positionsmessung an den Kolbenpaaren 2a, 2b könnte z.B. mit einem Modell der inneren Vorgänge des Motors in ein Verbrennungskraftsignal umgewandelt werden.

[0045] Die Verbrennungskraftsignale werden in der Synchronisationsvorrichtung 40 in einer Digitalisiereinheit 21 vorteilhaft in digitale Signale umgewandelt. Dazu kann ein A/D-Wandler dienen oder ein einfacher Schwellwerterkennung, wie z.B. in Fig. 6 angedeutet. Hierbei ist es natürlich unerheblich, ob für jeden Sensor 20₁ bis 20₄ bzw. für jedes Verbrennungskraftsignal eine eigene Digitalisiereinheit 21 vorhanden ist oder eine Digitalisiereinheit 21 für mehrere Verbrennungskraftsignale verwendet wird. In einer Vergleichseinheit 22 werden die Verbren-

nungskraftsignale (digital oder analog) nach einem gewählten Verfahren, z.B. wie oben beschrieben, verglichen, um den Zeitversatz t_{diff} , also die Phasenunterschiede der Schwingungen der beiden Kolbenpaare 2a, 2b, zu ermitteln. Der Vergleich kann z.B. nach einem Verfahren wie oben zu den Figuren 4 a) bis 4 c) beschrieben erfolgen. Dabei werden jeweils die Verbrennungskraftsignale der gegengleich arbeitenden Kolben der Kolbenpaare 2a, 2b miteinander verglichen, also die Verbrennungskraftsignale der Kolben 3a und 4b und/oder die Verbrennungskraftsignale der Kolben 3b und 4a. Die Vergleichseinheit 22 kann ein einfaches digitales Bauteil sein, z.B. eine logische Und-Verknüpfung, Oder-Verknüpfung oder Exklusiv-Oder-Verknüpfung, kann aber auch ein DSP, ASIC oder ein entsprechend programmierter Mikroprozessor sein. Auch mit analogen Signalen und Bauteilen, wie z.B. Operationsverstärkern, können Vergleiche im Sinne dieses Verfahrens gemacht werden. Es müssen auch nicht unbedingt elektrische bzw. elektronische Bauteile verwendet werden, sondern es können alle Bauteile verwendet werden, mit denen sich dieses Verfahren umsetzen lässt.

[0046] In einer Motorsteuereinheit 23 in der Synchronisationsvorrichtung 40 wird aus Eingangsdaten 24 eine erforderliche Kraftstoffmenge und/oder Verbrennungsluftmenge zum Erreichen einer Eingangsanforderung ermittelt, z.B. zum Erreichen einer bestimmten Leistung oder Kraft. Ebenso kann eine bestimmte elektrische Leistungsentnahme oder auch die Frequenz der entnommenen Spannung vorgegeben werden. Die Eingangsdaten sind z.B. Betriebsvorgaben, wie Leistungs- oder Kraftvorgabe, elektrische Leistung, Schwingungszahlvorgabe, aber auch Eingaben, die sich aus dem Betrieb des Freikolbenmotors 1 ergeben und z.B. gemessen werden, wie Temperaturen, Drücke, etc. Wenn der Freikolbenmotor 1 über eine Zündung verfügt, können in der Motorsteuereinheit 23 auch die Zündsignale 25_1 bis 25_4 für die einzelnen Brennräume 7a, 7b, 8a, 8b, 9 erzeugt werden. Diese Zündsignale 25_1 bis 25_4 werden vorteilhaft natürlich ebenfalls synchronisiert sein und berücksichtigen ebenfalls eventuell vorhandene Phasenunterschiede. Dazu erhält die Motorsteuereinheit 23 von der Vergleichseinheit 22 über eine Schnittstelle 26 Daten betreffend die Synchronisation (also z.B. einen Zeitverzug t_{diff} oder sonstige Angaben zum Phasenunterschied der Schwingungen der Kolbenpaare 2a, 2b). Die Motorsteuereinheit 23 kann je nach Motortyp noch andere Werte ermitteln, wie z.B. eine Vorzündung, etc., und erzeugt dann die Zündsignale 25_1 bis 25_4 . Es wäre aber auch denkbar, dass die Motorsteuereinheit 23 alle zündungsrelevanten Daten über eine Schnittstelle 27 an die Vergleichseinheit 22 übergibt und die Zündsignale 25_1 bis 25_4 in der Vergleichseinheit 22 erzeugt werden. Die so erzeugten Zündsignale 25_1 bis 25_4 werden dann an das Zündsystem 30 (z.B. Einspritzanlage, Zündkerzen, etc.) des Freikolbenmotors 1 übermittelt. Bei einem Dieselmotor könnte z.B. als Zündsignal das Einspritzsignal zur Anwendung kommen.

[0047] In einem stationären Betrieb, in dem der Freikolbenmotor 1 in einem bestimmten Betriebspunkt (z.B. gleichbleibende Frequenz zur Stromerzeugung) gehalten wird, kann die Vergleichseinheit 22 zur Synchronisation der Verbrennungsvorgänge aus den erfassten Verbrennungskraftsignalen direkt Kraftstoffmengensteuersignale 28_1 bis 28_4 (eventuell auch Verbrennungsluftmengensteuersignale 34_1 bis 34_4) und/oder Stromentnahmesteuersignale 29_1 bis 29_4 erzeugen, die dann an eine Kraftstoffanlage 31 (z.B. Einspritzpumpe, Vergaser, etc.) oder an einen Regler zur Stromentnahme 32 oder an einen Regler zur Steuerung der Verbrennungsluftmenge 33 übergeben werden können. Eine für den stationären Betrieb erforderliche Kraftstoffmengen- und/oder Verbrennungsluftvorgabe, die durch die Vergleichseinheit 22 zur Synchronisation korrigiert werden kann, kann dabei konstant vorgegeben sein, z.B. durch die Motorsteuereinheit 23.

[0048] Damit der Freikolbenmotor 1 bei unterschiedlichen Betriebspunkten (z.B. unterschiedlichen Leistungen) betrieben werden kann, was bei Fahrzeugen normalerweise der Fall sein wird, kann die Vergleichseinheit 22 auch Eingangsdaten 24 berücksichtigen. Es kann durch die Motorsteuereinheit 23 (z.B. aus einer Gaspedalstellung oder einem Strombedarf zur Batterieladung, etc.) eine Kraftstoffmenge und/oder Verbrennungsluftmenge und/oder Stromentnahme vorgegeben werden, z.B. um mit dem Freikolbenmotor 1 eine bestimmte Leistung oder Kraft zu erzeugen, die über eine Schnittstelle 27 der Vergleichseinheit 22 übergeben werden können. Genauso könnte die Vergleichseinheit 22 aus den Eingangsdaten 24 eine für die Umsetzung

der Eingangsanforderung benötigte Kraftstoffmenge und/oder Verbrennungsluftmenge und/oder eine bestimmte Stromentnahme ermitteln. Durch die Vergleichseinheit 22 kann zur Synchronisation der Verbrennungsvorgänge dann die Kraftstoffmengenvorgabe und/oder Verbrennungsluftvorgabe und/oder Stromentnahme für jeden (oder einzelne) Kolben in Abhängigkeit von der momentanen Synchronität der Verbrennungskraftsignalen (also in Abhängigkeit von der Phasenabweichung der Verbrennungsstöße) erhöht oder erniedrigt werden. Dazu werden in der Vergleichseinheit Kraftstoffmengensteuersignale bis 28_4 erzeugt und an eine Kraftstoffanlage 31 gesendet und/oder Verbrennungsluftmengensteuersignale 34_1 bis 34_4 erzeugt und an eine Luftmassenregelanlage 33 (z.B. eine Drosselklappe) gesendet. Wie oben beschrieben können die Kräfte auf die Kolbenpaare 2a, 2b auch durch die Kraft durch die Stromentnahme beeinflusst werden. Die Vergleichseinheit 22 kann daher zur Synchronisation der Verbrennungsvorgänge auch Stromentnahmesteuersignale 29_1 bis 29_4 erzeugen, die an einen Regler zur Stromentnahme 32 übergeben werden können. Ob in der Praxis zur Schwingungskompensation durch Synchronisation der Verbrennungsvorgänge die Kraftstoffmenge, die Verbrennungsluftmenge oder die Stromentnahme oder eine beliebige Kombination daraus geregelt wird, ist freigestellt und ist im Wesentlichen eine Kosten-Nutzen Frage.

[0049] Die Vergleichseinheit 22 kann aber auch andere von der Motorsteuerung 23 vorgegebene Zeitpunkte berücksichtigen, z.B. wenn für den Freikolbenmotor 1 der Einspritzzeitpunkt für den Verbrennungszeitpunkt maßgeblich ist, wie z.B. bei einem Dieselmotor. Dazu erhält die Vergleichseinheit 22 den gewünschten Zeitpunkt über die Schnittstelle 27 von der Motorsteuereinheit 23 und kann noch die Kraftstoffmenge (eventuell auch Luftmasse) und/oder die Stromentnahme variieren. Aber auch wenn der Einspritzzeitpunkt nicht wesentlich für den Zündzeitpunkt ist, z.B. bei einem HCCI-Verfahren, kann die Motorsteuereinheit 23 einen günstigen Einspritzzeitpunkt vorgeben, z.B. um eine Direkteinspritzung durchzuführen wenn der Auslass bereits geschlossen ist.

[0050] Die Vergleichseinheit 22 kann die zeitliche Abweichung, z.B. den ermittelten Zeitverzug t_{diff} , in geeigneter Form aber auch an die Motorsteuereinheit 23 übermitteln, die dann selbst die Kraftstoffmenge ermitteln bzw. korrigieren kann, oder eine Verbrennungsluftmenge ermitteln bzw. korrigieren kann, oder die Stromentnahme regeln kann. Selbstverständlich können die Vergleichseinheit 22 und die Motorsteuereinheit 23 in der Synchronisationsvorrichtung 40 auch in einer einzigen Einheit zusammengefasst sein. Es ist aber auch denkbar, dass die Motorsteuereinheit 23 nicht Teil der Synchronisationsvorrichtung 40 ist, sondern ein eigenständiger Bauteil, wie z.B. eine herkömmliche Motorsteuereinheit.

[0051] Das eigentliche Regelverfahren, also wie die Kraftstoffmenge oder die Verbrennungsluftmenge oder die Stromentnahme in Abhängigkeit von der zeitlichen Abweichung, z.B. vom Zeitverzug t_{diff} , geregelt wird, ist für das erfindungsgemäße Verfahren zur Schwingungskompensation nur sekundär und es wird eine Fülle von möglichen Regelverfahren geben. Wichtig ist, dass der zeitliche Verlauf der Verbrennungskräfte F_K ermittelt wird, um den zeitlichen Versatz der Verbrennungsstöße ermitteln zu können. Ebenso ist es für das erfindungsgemäße Verfahren unerheblich, wie dieser zeitliche Verlauf der Verbrennungskräfte F_K ermittelt wird. Entscheidend ist für das Regelverfahren nur, dass die Verbrennungskraft (Kraftstoffmenge, Verbrennungsluftmenge) und/oder die Stromentnahme so geregelt werden, dass bestmögliche Synchronität der Verbrennungen der beiden gegengleich arbeitenden Kolben erzielt wird, also z.B. indem ein vorausseilender Kolben durch weniger zugeführten Kraftstoff und/oder Erhöhung der Stromentnahme gebremst wird und/oder ein hinterherlaufender Kolben durch Erhöhung der Kraftstoffmenge und/oder Reduzierung der Stromentnahme beschleunigt wird.

[0052] Die erfindungsgemäße Synchronisation eignet sich auch dazu, dass in einem Motor mit mehrere Freikolbenmotoren 1 wie oben beschrieben, z.B. zwei oder drei Freikolbenmotoren aus jeweils zwei gegenläufigen Freikolbenpaaren 2a, 2b, ein Synchronbetrieb hergestellt wird. Prinzipiell ließen sich die einzelnen Freikolbenmotoren 1 mit jeweils synchronisierten Freikolbenpaare 2a, 2b auch asynchron zueinander betreiben weil jede Gruppe dank erfindungsgemäßer Synchronisation vibrationsfrei laufen kann, womit auch der ganze Motor vibrationsfrei laufen würde. Für die Zusammenleitung der Auspuffgase wäre es aber günstig, wenn sich die

Auspufftakte möglichst gleichmäßig verteilen, da dann z.B. ein Turbolader günstige gleichförmigere Strömung bekommt. Auch akustisch ist Gleichlauf aller Freikolbenpaare zu bevorzugen, weil bei Ungleichlauf sogenannte „Schwebungen“ hörbar werden, also an- und abklingende Geräusche mit der Differenzfrequenz der Freikolbenpaare. Es ist daher vorteilhaft, dass in einem Motor mit mehreren Freikolbenpaaren, alle Freikolbenpaare synchron bezüglich der Frequenz zueinander laufen. Die einzelnen Freikolbenmotoren 1 könnten dabei auch sternförmig angeordnet sein, wobei jeweils zwei Kolbenpaare 2a, 2b diametral gegenüber angeordnet sind.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Schwingungskompensation bei einem Freikolbenmotor (1) mit zwei Kolbenpaaren (2a, 2b) mit jeweils einem Lineargenerator (10) zur Stromerzeugung, **dadurch gekennzeichnet**, dass für zwei gegengleich arbeitende Kolben (3a, 4b; 3b, 4a) der Kolbenpaare (2a, 2b) der zeitliche Verlauf (F_K) der Verbrennungskräfte erfasst wird und daraus die zeitliche Abweichung (t_{diff}) der Verbrennungsstöße (F_Z) dieser beiden Kolben (3a, 4b; 3b, 4a) zueinander ermittelt wird und dass in Abhängigkeit davon zur Reduzierung der zeitlichen Abweichung der Verbrennungsstöße (F_Z) für zumindest einen der beiden Kolben (3a, 4b; 3b, 4a) die Kraftstoffmenge für die Verbrennung und/oder die Verbrennungsluftmenge und/oder die Stromentnahme des zugehörigen Lineargenerators (10) geregelt wird.
2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass aus Eingangsdaten (24) für den Freikolbenmotor (1) für zumindest einen der beiden Kolben (3a, 4b; 3b, 4a) eine Kraftstoffmenge und/oder Verbrennungsluftmenge und/oder Stromentnahme des zugehörigen Lineargenerators (10) ermittelt wird und die ermittelte Kraftstoffmenge und/oder die Verbrennungsluftmenge und/oder Stromentnahme für den Kolben (3a, 4b; 3b, 4a) zur Reduzierung der zeitlichen Abweichung der Verbrennungsstöße (F_Z) korrigiert wird.
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass die zeitliche Abweichung der Verbrennungsstöße (F_Z) durch Ermittlung des Zeitverzuges (t_{diff}) der zeitlichen Verläufe (F_K) der Verbrennungskräfte ermittelt wird.
4. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass die zeitliche Abweichung der Verbrennungsstöße (F_Z) durch Ermittlung des zeitgleichen Verbrennens oder durch Ermittlung des ungleichzeitigen Verbrennens ermittelt wird.
5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Freikolbenmotor (1) mittels einer Not-Aus-Funktion abgestellt wird, wenn die Freikolbenpaare (2a, 2b) mit Frequenzungleichheit oder Phasenungleichheit schwingen.
6. Vorrichtung zur Schwingungskompensation bei einem Freikolbenmotor (1) mit zwei Kolbenpaaren (2a, 2b) mit jeweils einem Lineargenerator (10) zur Stromerzeugung, **dadurch gekennzeichnet**, dass eine Sensoreinheit (20) vorgesehen ist, mit der der zeitliche Verlauf (F_K) der Verbrennungskräfte zweier gegengleich arbeitender Kolben (3a, 4b; 3b, 4a) der Kolbenpaare (2a, 2b) erfassbar ist und weiters eine Synchronisationsvorrichtung (40) vorgesehen ist, in der aus dem zeitlichen Verlauf (F_K) der Verbrennungskräfte eine zeitliche Abweichung der Verbrennungsstöße (F_Z) dieser beiden Kolben (3a, 4b; 3b, 4a) zueinander ermittelbar ist und dass in der Synchronisationsvorrichtung (40) in Abhängigkeit von der zeitlichen Abweichung der Verbrennungsstöße (F_Z) zur Reduzierung der zeitlichen Abweichung der Verbrennungsstöße (F_Z) für zumindest einen der beiden Kolben (3a, 4b; 3b, 4a) ein Kraftstoffmengensteuersignal (28) und/oder ein Verbrennungsluftmengensteuersignal (34) zur Regelung der Verbrennung für diesen Kolben (3a, 4b; 3b, 4a) und/oder ein Stromentnahmesteuersignal (29) zur Regelung der Stromentnahme des zugehörigen Lineargenerators (10) erzeugbar und ausgebenbar ist.
7. Vorrichtung nach Anspruch 6, **dadurch gekennzeichnet**, dass in der Synchronisationsvorrichtung (40) eine Vergleichseinheit (22) vorgesehen ist, in der die zeitliche Abweichung der Verbrennungsstöße (F_Z) ermittelbar ist.
8. Vorrichtung nach Anspruch 6 oder 7, **dadurch gekennzeichnet**, dass in der Synchronisationsvorrichtung (40) eine Digitalisiereinheit (21) vorgesehen ist, in der die Signale von der Sensoreinheit (20) digitalisiert werden.
9. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 6 bis 8, **dadurch gekennzeichnet**, dass in der Synchronisationsvorrichtung (40) zur Erreichung einer Eingangsanforderung aus Eingangsdaten (24) für zumindest einen der beiden Kolben (3a, 4b; 3b, 4a) eine Kraftstoffmengenvorgabe und/oder eine Verbrennungsluftmengenvorgabe und/oder eine Vorgabe für die Stromentnahme des zugehörigen Lineargenerators (10) ermittelbar ist, die zur Reduzierung der zeitlichen Abweichung der Verbrennungsstöße (F_Z) in der Synchronisationsvorrichtung (40) korrigierbar sind.

10. Vorrichtung nach Anspruch 9, **dadurch gekennzeichnet**, dass eine Motorsteuereinheit (23) vorgesehen ist, die aus den Eingangsdaten (24) eine Kraftstoffmengenvorgabe und/oder eine Verbrennungsluftmengenvorgabe und/oder eine Vorgabe für die Stromentnahme ermittelt und diese zur Ermittlung des Kraftstoffmengensteuersignals (28) und/oder des Verbrennungsluftmengensteuersignals (34) und/oder des Stromentnahmesteuersignals (29) an die Vergleichseinheit (22) übergibt.

Hierzu 4 Blatt Zeichnungen

1/4

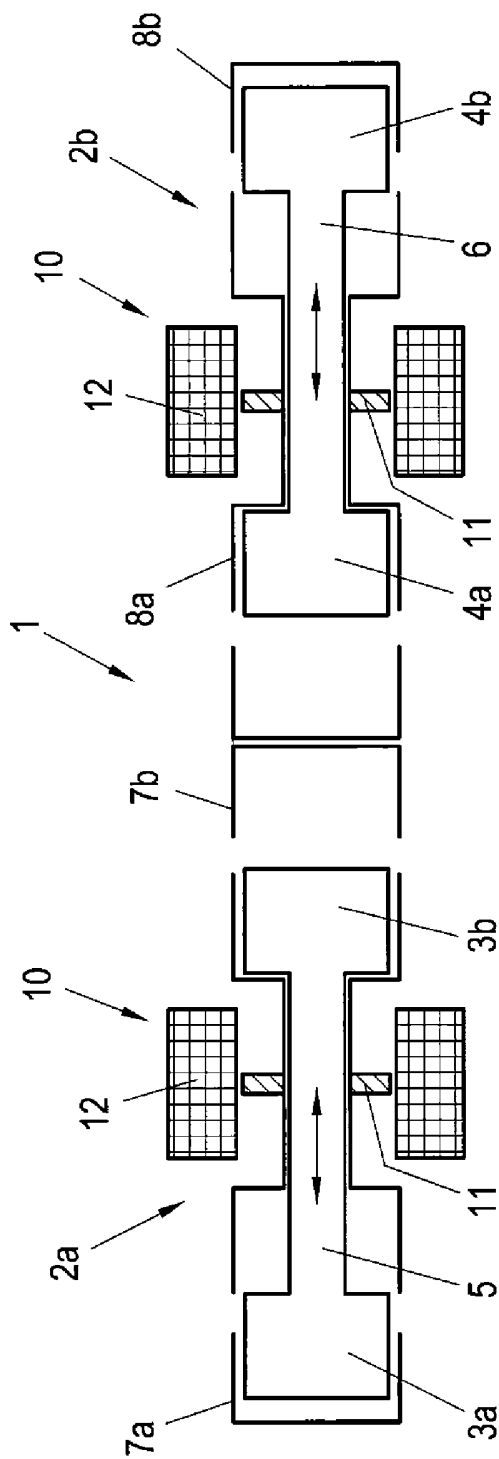


Fig. 1

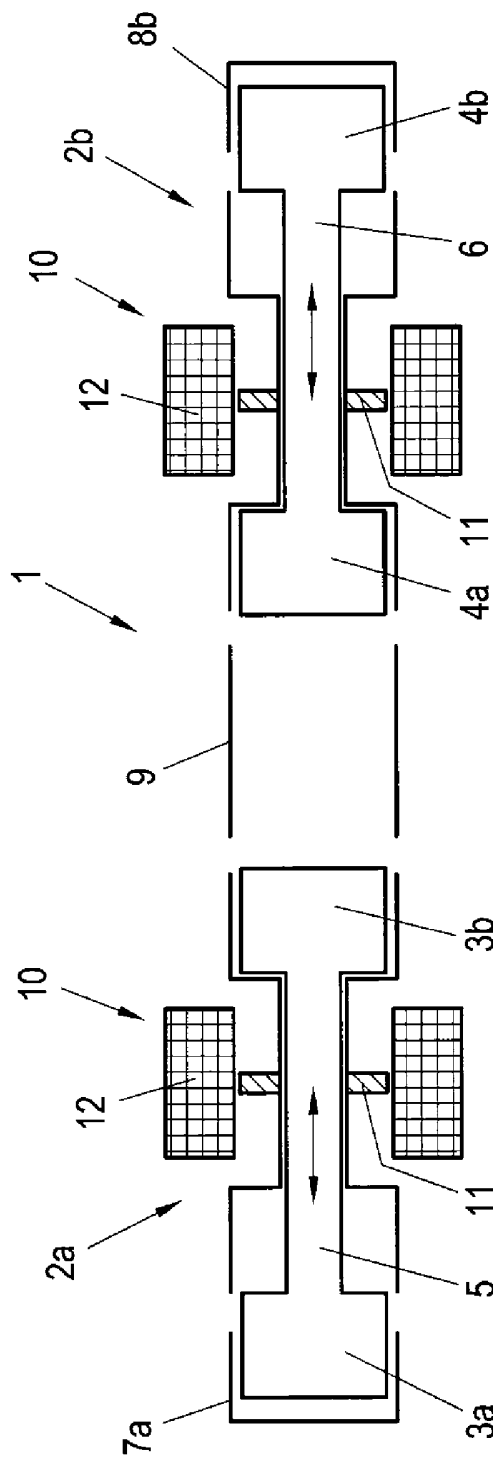


Fig. 2

2/4

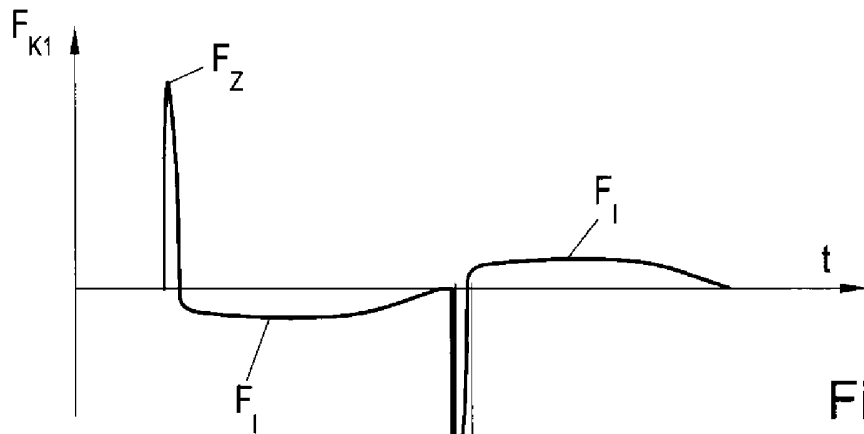


Fig. 3a

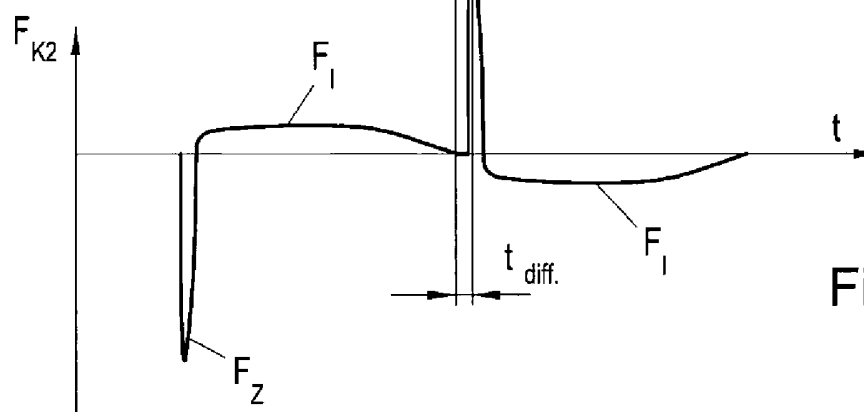


Fig. 3b

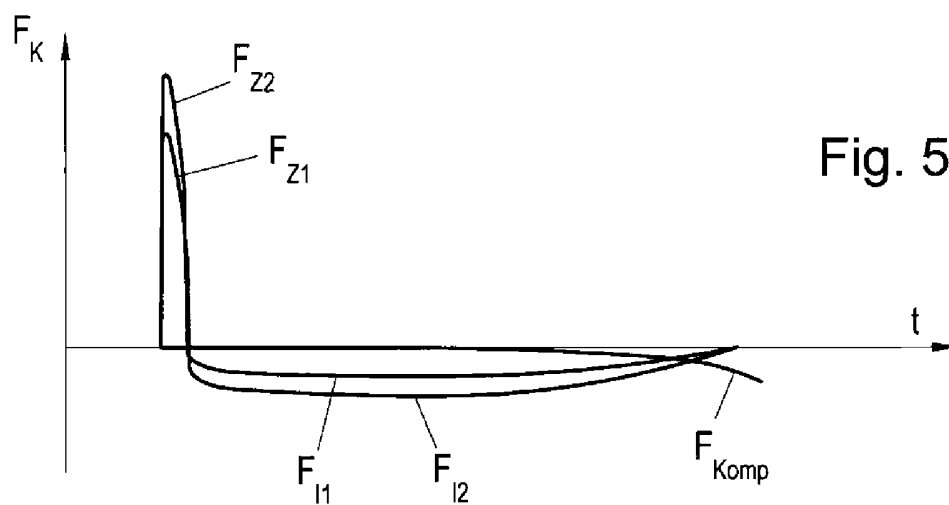


Fig. 5

3/4

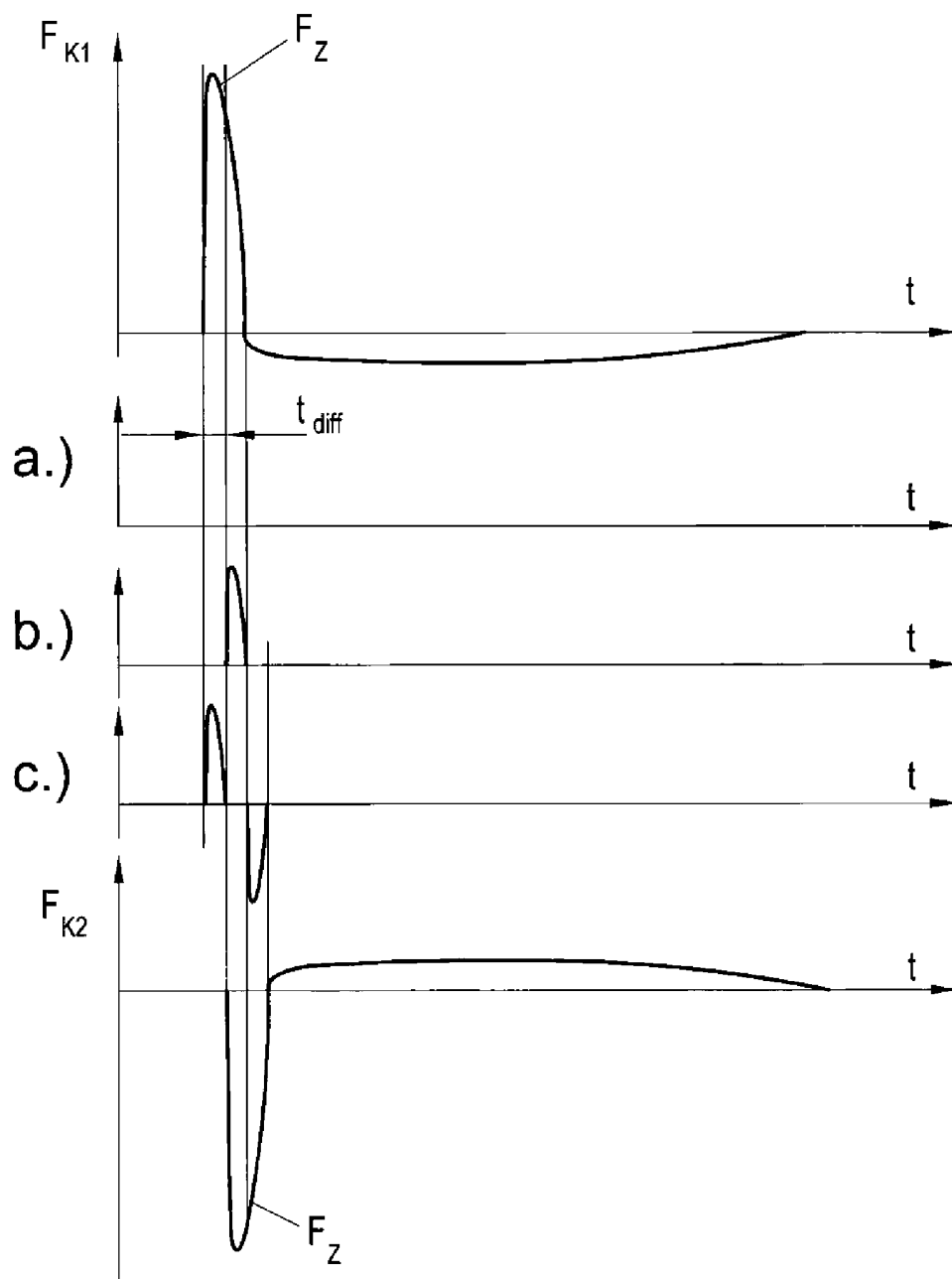


Fig. 4

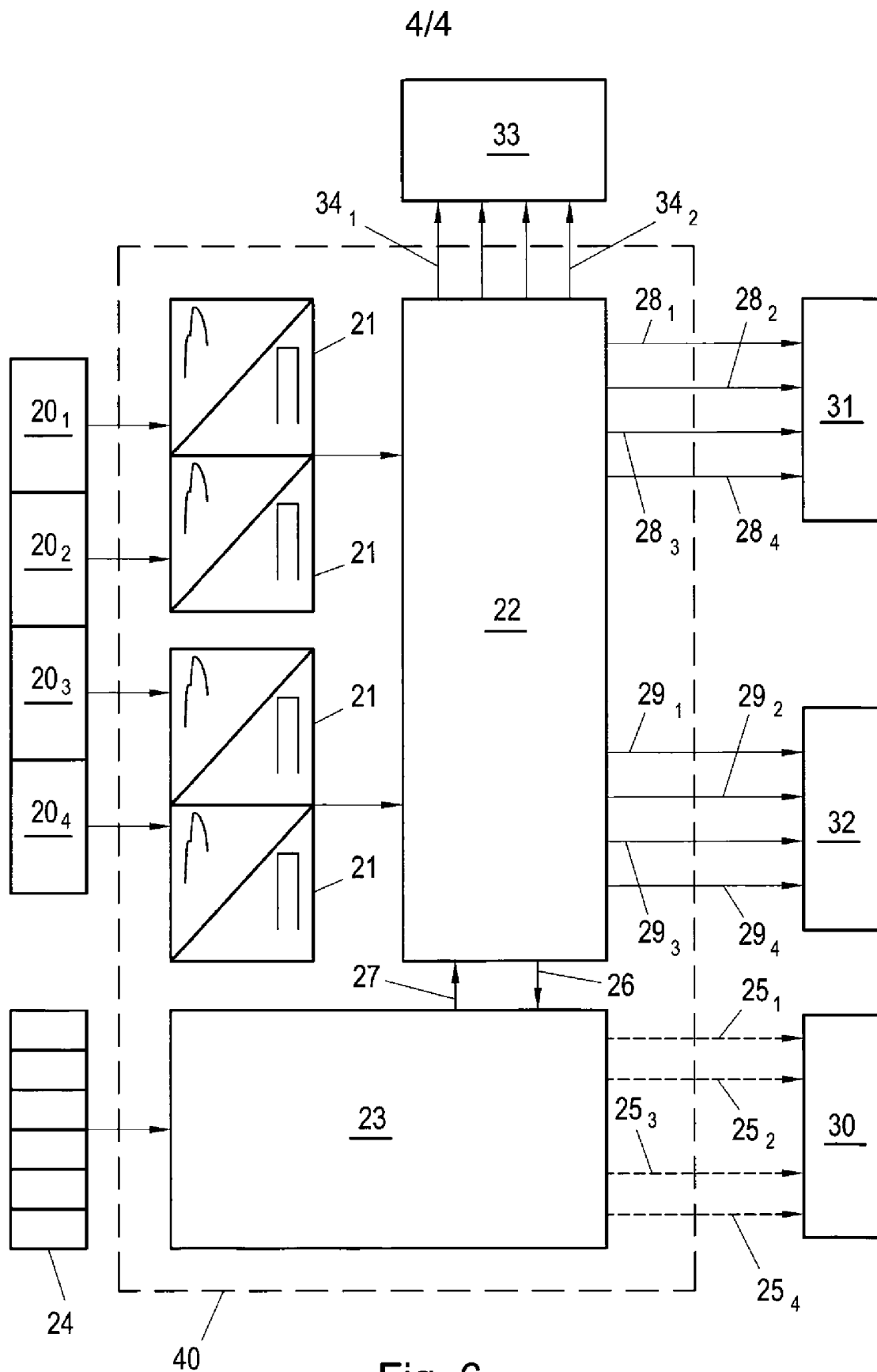


Fig. 6