



(11) **EP 3 763 933 A1**

(12) **EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG**

(43) Veröffentlichungstag:
13.01.2021 Patentblatt 2021/02

(51) Int Cl.:
F02D 41/38 (2006.01) **F02D 41/00 (2006.01)**
F02D 41/14 (2006.01) **F02M 59/36 (2006.01)**
F02M 63/02 (2006.01)

(21) Anmeldenummer: **20184711.8**

(22) Anmeldetag: **08.07.2020**

(84) Benannte Vertragsstaaten:
AL AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB GR HR HU IE IS IT LI LT LU LV MC MK MT NL NO PL PT RO RS SE SI SK SM TR
Benannte Erstreckungsstaaten:
BA ME
Benannte Validierungsstaaten:
KH MA MD TN

(71) Anmelder: **Volkswagen AG**
38440 Wolfsburg (DE)

(72) Erfinder:
• **Halfpaap, Josef**
39114 Magdeburg (DE)
• **Barski, Andrej**
38542 Wolfsburg (DE)
• **Tschoeke, Ines**
38114 Braunschweig (DE)
• **Wagner, Andreas**
39110 Magdeburg (DE)

(30) Priorität: **12.07.2019 DE 102019118914**
12.07.2019 DE 102019118923
12.07.2019 DE 102019118932
30.10.2019 DE 102019129320
30.10.2019 DE 102019129323
30.10.2019 DE 102019129306

(74) Vertreter: **Gulde & Partner**
Patent- und Rechtsanwaltskanzlei mbB
Wallstraße 58/59
10179 Berlin (DE)

(54) **VERFAHREN ZUR VOLUMENSTROMBASIERTEN PUMPENSYNCHRONEN, INSBESONDERE ZYLINDERSELEKTIVEN RAILDRUCKREGELUNG FÜR EIN KRAFTSTOFFVERSORGUNGSSYSTEM EINER BRENNKRAFTMASCHINE MIT STROMERFASSUNG UND STROMREGELUNG DER STELLGLIEDER DER RAILDRUCKREGELUNG**

(57) Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Regeln eines durch eine Hochdruckpumpe (1) in einem Kraftstoffspeicher (4) bewirkten Raildrucks ($p_{7\text{Soll}}$) für ein Kraftstoffversorgungssystem (100) einer Brennkraftmaschine, wobei eine kurbelwinkelbezogene oder nockenwinkelbezogene feste Winkeldifferenz der Brennkraftmaschine zwischen einer Oberen-Totpunkt-Position eines Zylinderkolbens eines Zylinders der Brennkraftmaschine und einer Oberen-Totpunkt-Position des Pumpenkolbens der Hochdruckpumpe (1) des Kraftstoffversorgungssystems (100) bei der Zumessung des Förderolumens der Hochdruckpumpe (1) berücksichtigt wird.

Es ist vorgesehen, dass wiederkehrend pumpensynchron je Segment, das einer Umdrehung einer Kurbelwelle und somit der Bewegung des Pumpenkolbens der Hochdruckpumpe (1) von der Oberen-Totpunkt-Position des Pumpenkolbens zur nächsten Oberen-Totpunkt-Position entspricht, eine Diskretisierung einer Regelabweichung (Δp_7) des Raildrucks (p_7) im Kraftstoffspeicher (4) vorgenommen und von der diskreten Regelabweichung (Δp_7) ausgehend eine volumenbezogene diskrete Volumen-Regeldifferenz (ΔV_{Rail}), insbesondere eine volumenbezogene diskrete zylinderselektive Volumen-Re-

geldifferenz (ΔV_{Rail}) berechnet wird.

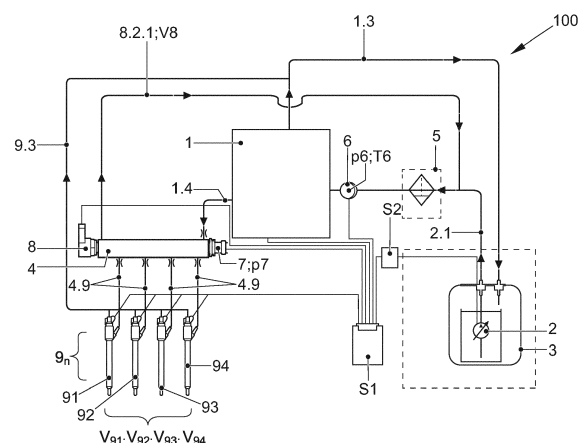


Fig. 1

EP 3 763 933 A1

Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Regeln eines durch eine Hochdruckpumpe in einem Kraftstoffspeicher bewirkten Raildrucks für ein Kraftstoffversorgungssystem einer Brennkraftmaschine, wobei eine kurbelwinkelbezogene oder nockenwinkelbezogene feste Winkeldifferenz der Brennkraftmaschine zwischen einer Oberen-Totpunkt-Position eines Zylinderkolbens eines Zylinders der Brennkraftmaschine und einer Oberen-Totpunkt-Position des Pumpenkolbens der Hochdruckpumpe des Kraftstoffversorgungssystems bei der Zumessung des Fördervolumens der Hochdruckpumpe berücksichtigt wird.

[0002] Aus der Druckschrift DE 10 2016 204 386 A1 ist bereits ein Verfahren zum Regeln eines durch eine Hochdruckpumpe in einem Kraftstoffrail bewirkten Raildrucks für einen Brennkraftmotor bekannt, bei dem der Raildruck synchron zu einer Motordrehzahl des Brennkraftmotors der Hochdruckpumpe geregelt wird. Die Regelung des Raildrucks erfolgt also nicht in dem bekannten festen, zeitsynchronen Berechnungsraster, sondern erfolgt in einem zeitlich variablen, motordrehzahlsynchronen Berechnungsraster, dessen jeweiliges Rasterintervall sich bevorzugt von einem bis zum nächsten durchlaufenen oberen Totpunkt, bezogen auf einen einzigen Zylinder oder alle Zylinder, des Brennkraftmotors erstreckt. Die Hochdruckpumpe stellt mit jedem Pumpenförderhub eine Kraftstoffmenge bereit. Die Abfolge der Pumpenförderhübe der Hochdruckpumpe folgt zeitlich aber nicht dem festen Abtastraster des Raildruckreglers, sondern wird durch den aktuellen Betriebszustand des Brennkraftmotors bestimmt.

[0003] Das bekannte Kraftstoffversorgungssystem umfasst einen Raildruckregler zur Anwendung des vorgeschlagenen Verfahrens. Eine Hochdruckpumpe wird von einer Vorförderpumpe über eine Niederdruckleitung mit Kraftstoff aus einem Tank versorgt. Über eine Hochdruckleitung pumpt die Hochdruckpumpe Kraftstoff in ein Kraftstoffrail. Das Fördervolumen der Hochdruckpumpe ist gemäß einem Fördervolumen-Steuerwert eingestellt, den ein Raildruckregler zur Regelung des Raildrucks im Kraftstoffrail berechnet hat. Der Raildruckregler ist aus einem PID-Regler und einer Vorsteuerungseinheit zusammengesetzt. Dem PID-Regler wird eine Raildruck-Regelabweichung zugeführt, die als Differenz des synchron zur Motordrehzahl berechneten Raildruck-Sollwertes und des synchron zur Motordrehzahl mit einem Raildrucksensor erfassten Raildruck-Istwertes berechnet worden ist, und berechnet synchron zur Motordrehzahl einen additiven Korrekturvolumenstrom. Eine synchron zur Motordrehzahl vorgenommene Berechnung bedeutet, dass diese Berechnung einmal pro durchlaufenen oberen Totpunkt des Brennkraftmotors erfolgt.

[0004] Der Vorsteuerungseinheit wird eine synchron zur Motordrehzahl berechnete Einspritzmenge und eine erwünschter Druckänderungswert zugeführt, sodass die Vorsteuerungseinheit synchron zur Motordrehzahl einen

Vorsteuerungswert berechnet. Die Summe des additiven Korrekturvolumenstroms und des Vorsteuerungswertes wird als Fördervolumen-Steuerwert an die Hochdruckpumpe gespeist, um das Fördervolumen des aktuellen Förderhubs vorzugeben und um den Raildruck-Sollwert ps im Kraftstoffrail einzustellen.

[0005] Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde die Raildruckregelung zu verbessern.

[0006] Ausgangspunkt der Erfindung ist es, dass es bei einer klassischen zeitsynchronen Raildruckregelung, die im 10ms Abtastraster arbeitet, je nach Motordrehzahl zu Unter- oder Überabtastungen des motorsynchronen Pumpenevents kommt. Dadurch kommt es in nachteiliger Weise zu Druckschwingungen in Form von Schwebungen sowie Aliasing, die selbst in stationären Betriebspunkten nicht vollständig ausgegletzt werden können.

[0007] Die herkömmliche Raildruckregelung soll ferner aufgabengemäß an die neu verfügbaren Hochdruckpumpen, die für jedes Arbeitsspiel einen Volumenstrom stellen können, angepasst werden.

[0008] Dabei soll eine bestmögliche Regelperformance mit Abweichungen zwischen Soll- und Istwert von weniger als 2% des aktuellen Sollwerts erreicht werden. Weiterhin soll Rechenzeit und Codespeicher im Steuergerät eingespart werden, und der Kalibrierungs- und Absicherungsaufwand soll reduziert sowie eine einfache Anpassung an verschiedene Pumpenausführungen, Druckregelventilvarianten und Hochdruckkomponenten ermöglicht werden.

[0009] Insbesondere negativ wirken sich diese Effekte bei modernen Hochdruckpumpen aus, bei denen das Fördervolumen von einem Förderhub zum nächsten im kompletten Stellbereich beeinflusst wird. Abhilfe schafft bisher nur eine extrem geringe Kreisverstärkung, womit der klassische zeitsynchrone Raildruckregler, insbesondere in dynamischen Druckänderungssituationen dem nachfolgend erläuterten Verfahren gemäß der Erfindung weit unterlegen ist.

[0010] Gemäß den vorhergehenden Ausführungen ist bereits ein Verfahren zum Regeln eines durch eine Hochdruckpumpe in einem Kraftstoffspeicher bewirkten Raildrucks für ein Kraftstoffversorgungssystem einer Brennkraftmaschine bekannt, wobei eine kurbelwinkelbezogene oder nockenwinkelbezogene feste Winkeldifferenz der Brennkraftmaschine zwischen einer Oberen-Totpunkt-Position eines Zylinderkolbens eines Zylinders der Brennkraftmaschine und einer Oberen-Totpunkt-Position des Pumpenkolbens der Hochdruckpumpe des Kraftstoffversorgungssystems bei der Zumessung des Fördervolumens der Hochdruckpumpe berücksichtigt wird.

[0011] Erfindungsgemäß ist jetzt vorgesehen, dass wiederkehrend pumpensynchron je Segment, das einer Umdrehung einer Kurbelwelle und somit der Bewegung des Pumpenkolbens der Hochdruckpumpe von der Oberen-Totpunkt-Position des Pumpenkolbens zur nächsten Oberen-Totpunkt-Position entspricht, eine Diskretisierung einer Regelabweichung des Raildrucks im Kraftstoffspeicher vorgenommen und von der diskreten Re-

gelabweichung ausgehend eine volumenbezogene diskrete Volumen-Regeldifferenz, insbesondere zylinderselektiv berechnet wird.

[0012] Erfindungsgemäß wird die diskrete Regelabweichung als Differenz aus dem diskretisierten Ist-Raildruck und dem diskretisierten Soll-Raildruck, insbesondere zylinderselektiv berechnet, indem eine diskretisierte Druckinformation eines Raildruck-Sensor des aktiv erfassten pumpensynchronen Segmentes mit dem diskretisierten Soll-Raildruck des um ein Arbeitsspiel vorhergehenden pumpensynchronen Segmentes verglichen wird, um die diskrete, insbesondere zylinderselektive Regeldifferenz zu bestimmen.

[0013] Bevorzugt wird die volumenbezogene diskrete Volumen-Regeldifferenz als Eingangsgröße einem Regelbaustein für die Hochdruckpumpe und einem Regelbaustein für ein dem Kraftstoffspeicher zugeordnetes Druckregelventil zugeführt, wobei die diskrete Volumen-Regeldifferenz mit einem Vorsteuer-Baustein verknüpft wird, wodurch pumpensynchron und insbesondere zylinderselektiv je Segment die Stellgrößen für die Hochdruckpumpe und das Druckregelventil in einem Ausgabe-Baustein berechnet und den Stellgliedern der Hochdruckpumpe und des Druckregelventils zur volumenbasierten und insbesondere zylinderselektiven Einstellung des Raildrucks zugeführt werden.

[0014] Bevorzugt ist bei der nicht zylinderselektiven Vorgehensweise und der zylinderselektiven Vorgehensweise vorgesehen, dass die Stellgrößen der Stellglieder der Komponenten zum Regeln des Raildrucks in dem Kraftstoffspeicher einem Ausgabe-Baustein zugeführt und in dem Ausgabe-Baustein zur volumenbasierten Einstellung des Raildrucks berechnet werden, wobei eine Stromerfassung und Stromregelung der Stellglieder auf der Basis eines Beobachter-Modells durchgeführt wird.

[0015] Bevorzugt ist bei der nicht zylinderselektiven Vorgehensweise vorgesehen, dass die volumenbezogene diskrete Volumen-Regeldifferenz als Eingangsgröße einem Regelbaustein für die Hochdruckpumpe und einem Regelbaustein für ein dem Kraftstoffspeicher zugeordnetes Druckregelventil zugeführt wird, wobei die diskrete Volumen-Regeldifferenz mit einem Vorsteuer-Baustein verknüpft wird, wodurch pumpensynchron je Segment die Stellgrößen für die Hochdruckpumpe und das Druckregelventil in einem Ausgabe-Baustein berechnet und den Stellgliedern der Hochdruckpumpe und des Druckregelventils zur volumenbasierten Einstellung des Raildrucks zugeführt werden.

[0016] Vorgesehen ist bei der nicht zylinderselektiven Vorgehensweise ferner, dass die diskrete Regelabweichung als Differenz aus dem diskretisierten Ist-Raildrucks und dem diskretisierten Soll-Raildruck berechnet wird, indem eine diskretisierte Druckinformation eines Raildruck-Sensor des aktiv erfassten pumpensynchronen Segmentes mit dem diskretisierten Soll-Raildruck des um ein Arbeitsspiel vorhergehenden pumpensynchronen Segmentes verglichen wird, um die diskrete Re-

geldifferenz zu bestimmen.

[0017] Bei der anderen die Grundkonzeption erweiternden zylinderselektiven Vorgehensweise, wird die volumenbezogene diskrete Volumen-Regeldifferenz zylinderselektiv berechnet, indem die volumenbezogene diskrete Volumen-Regeldifferenz als zylinderselektive Eingangsgrößen einem Regelbaustein für die Hochdruckpumpe und einem Regelbaustein für ein dem Kraftstoffspeicher zugeordnetes Druckregelventil zugeführt wird, wobei die diskrete Volumen-Regeldifferenz mit einem Vorsteuer-Baustein verknüpft wird, wodurch pumpensynchron und zylinderselektiv je Segment die Stellgrößen für die Hochdruckpumpe und das Druckregelventil in einem Ausgabe-Baustein berechnet und den Stellgliedern der Hochdruckpumpe und des Druckregelventils zur volumenbasierten zylinderselektiven Einstellung des Raildrucks zugeführt werden.

[0018] Bevorzugt ist bei der zylinderselektiven Vorgehensweise vorgesehen, dass die diskrete Regelabweichung als Differenz aus dem diskretisierten Ist-Raildrucks und dem diskretisierten Soll-Raildruck zylinderselektiv berechnet wird, indem eine diskretisierte Druckinformation eines Raildruck-Sensor des aktiv erfassten pumpensynchronen Segmentes mit dem diskretisierten Soll-Raildruck, des um ein Arbeitsspiel vorhergehenden pumpensynchronen Segmentes verglichen wird, um die diskrete zylinderselektive Regeldifferenz zu bestimmen, wie in der Beschreibung detailliert erläutert ist.

[0019] Erfindungsgemäß wird der Soll-Raildruck zu einem Zeitpunkt diskretisiert wird, der mit einem Triggerstartsignal festgelegt wird, das wiederkehrend zu Beginn eines pumpensynchronen Segmentes ausgegeben wird. Vorgesehen ist, dass der Ist-Raildruck innerhalb des durch das Triggerstartsignal gestarteten Segmentes wiederkehrend erfasst und diskretisiert wird.

[0020] Dabei ist bevorzugt vorgesehen, dass der Ist-Raildruck, der innerhalb des pumpensynchronen Segmentes wiederkehrend erfasst wird, als

- in dem Segment maximaler Ist-Raildruck und
- in dem Segment minimaler Ist-Raildruck und
- in dem Segment berechneter Mittelwert

diskretisiert und wahlweise mit dem diskretisierten Soll-Raildruck zur Bestimmung der diskreten, insbesondere zylinderselektiven Regelabweichung verglichen wird.

[0021] Vorgesehen ist ferner bevorzugt, dass für die Regelung, insbesondere zylinderselektive Regelung als Ist-Wert der erfasste minimale diskrete Druck oder der erfasste maximale diskrete Druck oder der diskrete Mittelwert zum Vergleich mit dem diskreten Soll-Raildruck verwendet wird, wobei je nach Systemanforderung bei einem Druckaufbau der maximale diskrete Druck und bei einem Druckabbau der minimale diskrete Druck verwendet wird, um Regelschwingungen, insbesondere zylinderselektiv Regelschwingungen zu reduzieren beziehungsweise Über- oder Unterschwinger, insbesondere zylinderselektive Über- oder Unterschwinger zu vermei-

den.

[0022] Ein besonderer Aspekt der Erfindung sieht ferner vor, dass die diskrete Regelabweichung in die volumenstrombasierte diskrete Volumen-Regeldifferenz beziehungsweise volumenstrombasierte diskrete zylinderselektive Volumen-Regeldifferenz umgerechnet wird, wobei zusätzlich eine Kraftstoff-Dauerleckage des Hochdrucksystems des Kraftstoffversorgungssystems durch Addition berücksichtigt wird.

[0023] Die druckbasierte diskretisierte Regelabweichung Δp_{Rail} beziehungsweise druckbasierte diskretisierte zylinderselektive Regelabweichung Δp_{Rail} wird in vorteilhafter Weise in eine volumenstrombasierte Volumen-Regeldifferenz ΔV_{Rail} beziehungsweise volumenstrombasierte zylinderselektive Volumen-Regeldifferenz ΔV_{Rail} umgerechnet, wobei bei der Umrechnung das druck- und temperaturabhängige spezifische Elastizitätsmodul E des jeweiligen Kraftstoffs und das Raumvolumen V_H des Kraftstoff-Hochdrucksystems des Kraftstoffversorgungssystems gemäß der Umrechnungsformel

$$\Delta V_{\text{Rail}} = \frac{V_H}{E(p, T)} * \Delta p_{\text{Rail}}$$

berücksichtigt, insbesondere zylinderselektiv berücksichtigt wird.

[0024] Bei der pumpensynchronen segmentweise wiederkehrenden Umrechnung der druckbasierten diskreten Regelabweichung, insbesondere zylinderselektiven Regelabweichung in die volumenbezogene diskrete Volumen-Regeldifferenz, insbesondere zylinderselektive Volumen-Regeldifferenz werden,

- a) die Kraftstoff-Einspritzmengen der Injektoren, insbesondere zylinderselektiv und
- b) die Kraftstoff-Schaltleckagen der Injektoren, insbesondere zylinderselektiv und
- c) ein Druckänderungswunsch bezüglich des Soll-Raildrucks des Kraftstoffspeichers, insbesondere zylinderselektiv berücksichtigt, wobei ferner
- d) die Kraftstoff-Dauerleckage des Hochdrucksystems des Kraftstoffversorgungssystems durch eine pumpensynchrone segmentweise wiederkehrende separate Umrechnung mit einer Z-Transformation ermittelt und der volumenbezogenen diskreten Volumen-Regeldifferenz hinzugefügt wird, beziehungsweise bei zylinderselektiver Vorgehensweise, wird die Kraftstoff-Dauerleckage den volumenbezogenen diskreten zylinderselektiven Volumen-Regeldifferenzen anteilig hinzugefügt.

Spezifische zylinderselektive Vorgehensweise:

[0025] Erfindungsgemäß ist es vorgesehen, dass die Injektoren im stationären Betrieb von Zylinder zu Zylinder

dieselben Mengen-Sollwerte erhalten, die zylinderselektiv mit den Mengenabnahmen aus dem Rail verglichen werden, wobei zylinderselektiv Einspritzmengenfehler festgestellt werden, die den Injektoren zugeordnet werden, wobei eine Art der Mengenabweichungen bestimmten Fehlergruppen zugeordnet wird. Die Einspritzmengenfehler werden in vorteilhafter Weise ursachenabhängig, insbesondere in Abhängigkeit der Höhe, des sich im Soll/Ist-Vergleich ergebenden Einspritzmengenfehler gruppiert, wobei die Injektoren im Betrieb einer Fehlergruppe mit einem Injektordefekt, einer Fehlergruppe mit einer alterungsbedingten Injektor drift oder einer Fehlergruppe mit einer sich ändernden Schaltleckagemenge zugeordnet werden, wobei die Einspritzmengenfehler innerhalb der zylinderselektiven Regelung im Regler ermittelt und in vorteilhafter Weise im Einspritzsystem korrigiert werden und/oder zu einem Austausch des/der jeweiligen Injektors/Injektoren führen.

[0026] Eine Korrektur im Einspritzsystem kann auf verschiedene Art und Weise erfolgen. In einer bevorzugten Ausgestaltung findet die Korrektur durch Änderung der Injektor-Ansteuerdauer statt.

[0027] Das nicht zylinderselektive Kraftstoffversorgungssystem (Grundkonzeption) und das zylinderselektive Kraftstoffversorgungssystem (Erweiterung der Grundkonzeption) unterscheiden sich hinsichtlich der Bausteine, wie nachfolgend deutlich wird.

[0028] Das dem Verfahren zugehörige Kraftstoffversorgungssystem ist zur Durchführung des Verfahrens eingerichtet, wobei das Kraftstoffversorgungssystem in der Grundkonzeption (ohne zylinderselektive Raildruckregelung) zur Ermittlung einer diskreten Eingangsgröße für einen Regler-Baustein für die Hochdruckpumpe und zur Ermittlung einer diskreten Eingangsgröße für einen Regler-Baustein für ein dem Kraftstoffspeicher zugeordnetes Druckregelventil folgende weitere Bausteine umfasst,

- einen Sollwertvorgabe-Baustein des Raildrucks und eine zugehörigen Sollwert-Diskretisierungs-Baustein und
- einen Istwert-Signalerfassungs-Baustein des Raildrucks und einen Istwert-Diskretisierungs-Baustein, sowie einen Regelfehler-Berechnungs-Baustein und
- einen Umrechnungs-Baustein umfasst, der aus einer druckbasierten diskretisieren Regeldifferenz eine Umrechnung in eine volumenstrombasierte Regeldifferenz vornimmt,
- wobei der Umrechnungs-Baustein mit einer Regler-Zustandsmaschine verknüpft ist, welche die diskrete Eingangsgröße für den Regler-Baustein der Hochdruckpumpe und die diskreten Eingangsgröße für den Regler-Baustein des Druckregelventils ausgibt,
- wobei die Regler-Bausteine mit einem Vorsteuer-Baustein verknüpft sind, wodurch mittels des Vorsteuer-Bausteins und der aufgeschalteten Regler-Bausteine pumpensynchron je Segment die Stell-

größen für die Hochdruckpumpe und das Druckregelventil einem Ausgabe-Baustein zugeführt und berechnet werden, und den Stellgliedern der Hochdruckpumpe und des Druckregelventils zur volumenbasierten Einstellung des Raildrucks zugeführt werden.

[0029] Das dem Verfahren zugehörige Kraftstoffversorgungssystem ist in der Erweiterung der Grundkonzeption, nämlich mit zylinderselektiver Raildruckregelung zur Durchführung des Verfahrens erweitert eingerichtet, wobei das Kraftstoffversorgungssystem zu der Ermittlung der jeweiligen diskreten Eingangsgröße des jeweiligen Zylinders zylinderselektiv mehrere Regler-Bausteine für die Hochdruckpumpe und zur Ermittlung einer diskreten Eingangsgröße des jeweiligen Zylinders zylinderselektiv mehrere Regler-Bausteine für ein dem Kraftstoffspeicher zugeordnetes Druckregelventil folgende weitere Bausteine umfasst,

- einen Sollwertvorgabe-Baustein des Raildrucks und eine zugehörigen Sollwert-Diskretisierungs-Baustein und
- einen Istwert-Signalerfassungs-Baustein des Raildruck und einen Istwert-Diskretisierungs-Baustein,
- sowie einen Regelfehler-Berechnungs-Baustein und
- einen Umrechnungs-Baustein umfasst, der aus einer druckbasierten diskretisieren zylinderselektiven Regeldifferenz eine Umrechnung in eine volumenstrombasierte zylinderselektive Regeldifferenz vornimmt,
- wobei der Umrechnungs-Baustein mit einer Regler-Zustandsmaschine verknüpft ist, welche zylinderselektiv die diskrete Eingangsgröße dem jeweiligen Regler-Baustein der Hochdruckpumpe und zylinderselektiv die diskreten Eingangsgröße dem jeweiligen Regler-Baustein des Druckregelventils ausgibt,
- wobei die Regler-Bausteine jeweils zylinderselektiv mit einem Vorsteuer-Baustein verknüpft sind, wodurch mittels des Vorsteuer-Bausteins und der aufgeschalteten zylinderselektiven Regler-Bausteine pumpensynchron je Segment die Stellgrößen für die Hochdruckpumpe und das Druckregelventil einem Ausgabe-Baustein zugeführt und berechnet werden, und den Stellgliedern der Hochdruckpumpe und des Druckregelventils zur volumenbasierten zylinderselektiven Einstellung des Raildrucks zugeführt werden.

[0030] Ein noch weiterer Aspekt der Erfindung besteht darin, dass das Kraftstoffversorgungssystem einen Beobachter-Baustein umfasst, der eine Signalverarbeitungskette zur Stromerfassung und Stromregelung der Stellglieder des Kraftstoffversorgungssystem beobachtet, wie in der Beschreibung ebenfalls detailliert ist.

[0031] In vorteilhafter Weise wird die Brennkraftmaschine mit einem beliebigen flüssigen Kraftstoff oder

Kraftstoffgemisch betrieben, wodurch sich in vorteilhafter Weise die Linearisierung der Umrechnung von Druckdifferenz in Volumenstromdifferenz durch ein physikalisch anderes Elastizitätsmodul an den jeweiligen Kraftstoff anpassen lässt. Dadurch ist das erläuterte Verfahren und die Ausgestaltung des Kraftstoffversorgungssystems nicht nur für Dieselmotoren, die insbesondere als Common-Rail Dieselmotoren ausgeführt sind, sondern auch für Ottomotoren, die ein ottomotorisches - fremdgezündetes - Brennverfahren verwenden, anwendbar und einsetzbar.

[0032] Die Erfindung wird nachfolgend anhand der zugehörigen Zeichnungen erläutert. Es zeigen:

15 Figur 1 eine schematische Darstellung eines Kraftstoffversorgungssystems, das mit einer volumenstrombasierten pumpensynchronen Regelstruktur, insbesondere volumenstrombasierten pumpensynchronen und zylinderselektiven Regelstruktur zur Raildruckregelung gemäß dem erfindungsgemäßen Verfahren betrieben wird;

25 Figur 2A die volumenstrombasierte pumpensynchrone Regelstruktur zur Raildruckregelung, die in einem elektronischen Steuergerät mit einem Mikroprozessor abgelegt und zur Ausführung des erfindungsgemäßen Verfahrens eingerichtet ist;

30 Figur 2B die volumenstrombasierte pumpensynchrone und zylinderselektive Regelstruktur zur Raildruckregelung, die in einem elektronischen Steuergerät mit einem Mikroprozessor abgelegt und zur Ausführung des erfindungsgemäßen Verfahrens eingerichtet ist;

35 Figur 3 die erfindungsgemäße volumenstrombasierte pumpensynchrone Regelstruktur zur Raildruckregelung gemäß Figur 2A oder die erfindungsgemäße volumenstrombasierte pumpensynchrone und zylinderselektive Regelstruktur zur Raildruckregelung gemäß Figur 2B mit Stromerfassung und Stromregelung der Stellglieder der Raildruckregelung weiter erfindungsgemäß auf der Basis eines Beobachter-Modells.

40 **[0033]** Die Figur 1 zeigt ein Kraftstoffversorgungssystem 100, das mit einer volumenstrombasierten pumpensynchronen, insbesondere zylinderselektiven Raildruckregelung gemäß den Figur 2A und 2B betrieben wird.

45 **[0034]** Eine Hochdruckpumpe 1 wird von einer Vorförderpumpe 2 über eine Niederdruckleitung 2.1 mit Kraftstoff aus einem Kraftstofftank 3 versorgt. In der Niederdruckleitung 2.1 ist eine Filtereinheit 5 und ein Duo-Sensor 6, der Druck p_6 und Temperatur T_6 vor der Hochdruckpumpe 1 in der Niederdruckleitung 2.1 misst, an-

geordnet.

[0035] Über eine Hochdruckleitung 1.4 pumpt die Hochdruckpumpe 1 Kraftstoff in einen Kraftstoffspeicher, insbesondere in ein Kraftstoff-Rail 4. Das Kraftstoff-Rail 4 umfasst einen Raildruck-Sensor 7, der den Raildruck p_7 im Kraftstoff-Rail 4 erfasst.

[0036] Das Kraftstoff-Rail 4 umfasst ferner ein Druckregelventil 8, welches innerhalb des Verfahrens einen vorgebbaren Volumenstrom V_8 über eine Rücklaufleitung 8.2.1 in die Niederdruckleitung 2.1 aus dem Kraftstoff-Rail 4 absteuert.

[0037] Zwischen dem Kraftstoff-Rail 4 und den Injektoren 9_n ; ($n = 1, 2, 3, \dots$) 91, 92, 93, 94 sind die Injektorleitungen 4.9 dargestellt, über welche die Injektoren 9_n mit Kraftstoff versorgt werden.

[0038] Die Injektoren 9_n weisen Leckageleitungen auf, die in eine gemeinsame Rücklaufleitung 9.3 münden. Die Rücklaufleitung 9.3 mündet in eine Hochdruckpumpen-Rücklaufleitung 1.3 der Hochdruckpumpe 1, die zum Kraftstofftank 3 zurückführt.

[0039] Ein Steuergerät S1, insbesondere ein Motorsteuergerät ist über Steuerleitungen (ohne Bezugszeichen) direkt mit dem Duo-Sensor 6, der Hochdruckpumpe 1, dem Druckregelventil 8, dem Raildruck-Sensor 7 und den Injektoren 91, 92, 93, 94 und im Ausführungsbeispiel indirekt über ein Steuergerät S2 mit der als Niederdruckpumpe ausgelegten Vorförderpumpe 2 verbunden.

[0040] Die Figur 2A zeigt die volumenstrombasierte pumpensynchrone Regelstruktur zur Raildruckregelung in der Grundkonzeption, die in einem elektronischen Steuergerät, insbesondere dem Steuergerät S1 abgelegt ist, das zur Ausführung eines der oben vorgestellten Verfahren eingerichtet ist. Das Steuergerät S1 und das Steuergerät S2 werden über ein Computerprogramm zur Ausführung des Verfahrens betrieben, wobei auf dem Computer ein maschinenlesbares Speichermedium mit dem darauf aufgezeichneten Computerprogramm vorgesehen sind.

[0041] Die volumenstrombasierte pumpensynchrone Regelstruktur zur Raildruckregelung wird anhand der Figur 2A nachfolgend detailliert erläutert.

[0042] Die Grundidee des nachfolgend erläuterten Verfahrens für die zukünftigen Dieselmotoren, die als Common-Rail Dieselmotoren ausgeführt sind, besteht darin, dass ein benötigter Raildruck bis zu 2700 bar mit der Hochdruckpumpe 1 durch einen vorgebbaren Volumenstrom im Rail 4 erzeugt wird.

[0043] Bei positiver Mengenbilanz, das heißt ansteigendem Volumenstrom im Rail 4 steigt der Druck im Rail 4 an. Der Raildruck-Sensor 7 gibt dem Regelkreis bestehend aus einem Vorsteuerungs-Modell, einem Regler und einem Stellglied der Hochdruckpumpe 1 die entsprechende Druckinformation.

[0044] Die Eingangsgröße des Verfahrens zum Betrieb des erfindungsgemäßen Kraftstoffversorgungssystems 100 ist erfindungsgemäß ein bestimmter Volumenstrom, welcher der Hochdruckpumpe 1 zugeführt oder

durch das Druckregelventil 8 abgeführt wird.

[0045] Der Gegenstand der Erfindung besteht somit darin, dass die komplette Hochdruckregelung mithin die Raildruck-Hochdruckregelung innerhalb des Rails 4 des Kraftstoffversorgungssystems 100, von einer zeitbasierten zyklischen Berechnung eines Raildruckreglers zur Regelung des Raildrucks im Rail 4 auf eine an das Motorsegment der Brennkraftmaschine angelehnte volumenstrombasierte und pumpensynchrone diskrete Berechnung zur Raildruckregelung (in einem Zweisteller-Konzept Druckregelventil-Ansteuerung und Hochdruckpumpen-Ansteuerung) umgestellt wird.

[0046] Dazu ist es erfindungsgemäß notwendig, die zu beachtenden Volumenströme und das zugehörige Modell der erfindungsgemäßen Regelstruktur diskret zu beschreiben.

[0047] Dazu wird die Druckinformation $p_{7_{\text{Ist}}}$ vom Raildruck-Sensor 7 eines motorsynchronen/pumpensynchronen Segmentes mit dem Soll-Raildruck $p_{7_{\text{Soll}}}$ des vorhergehenden motorsynchronen/pumpensynchronen Segmentes (man spricht von dem verzögerten Soll-Raildruck) verglichen, um die diskrete Regelabweichung Δp_7 zu bestimmen.

[0048] Diese Druckdifferenz Δp_7 wird über das Elastizitätsmodul E des Kraftstoffs und über die mittels des Duo-Sensors 6 ermittelte Kraftstofftemperatur T_6 in eine Volumendifferenz umgerechnet und als Eingangsgröße ΔV_{Rail} in einer Regelstrecke verarbeitet.

[0049] Diese Volumendifferenz ΔV_{Rail} wird mithilfe der digitalen Zumesseinheit (nicht dargestellt), die bevorzugt im Pumpenraum der Hochdruckpumpe 1 angeordnet ist oder durch Ansteuerung des Druckregelventils 8 als Eingangsgröße der Regelstrecke zugeführt und die Steller der Hochdruckpumpe 1 oder des Druckregelventils 8 werden angesteuert, wobei die Diskretisierung, das heißt die Berechnung Volumendifferenz ΔV_{Rail} für jedes Motorsegment pumpensynchron variiert werden kann.

[0050] Dazu wird eine Volumenbilanz erstellt, die physikalisch den sich einstellenden Druck $p_{7_{\text{Ist}}}$ im Rail 4 beschreibt.

[0051] Bei der Volumenbilanz der volumenstrombasierten segmentsynchronen Berechnung, wird von einem volumenkonstanten Raumvolumen V_H des Hochdrucksystems ausgegangen, in dem sich druckabhängig ein bestimmtes Volumen an Kraftstoff befindet, der grundsätzlich über die Hochdruckpumpe 1 zugeführt und über das Druckregelventil 1 abgeführt wird.

[0052] Das Raumvolumen V_H des Hochdrucksystems des Kraftstoffversorgungssystems 100 umfasst das Raumvolumen des Rails 4, das Raumvolumen der Injektorleitungen 4.9 zu den Injektoren 9_n , das Raumvolumen in den Injektoren 9_n bis zur Drosselstelle innerhalb der Injektoren 9_n , die Zuleitung 1.4 der Hochdruckpumpe 1 zum Rail 4 ab dem Rückschlagventil in der Zuleitung 4.9 und das Totvolumen der Hochdruckpumpe 1 (Totvolumen = Raumvolumen zwischen OT des Kolbens der Hochdruckpumpe 1 und dem Rückschlagventil in der Zuleitung zum Rail 4).

[0053] Ausgehend von dem Raumvolumen V_H des Hochdrucksystems des Kraftstoffversorgungssystems 100 wird aus dem Hochdrucksystem segmentsynchron ein Gesamt-Volumen V_{Ges-Ab} abgenommen, welches sich insgesamt

- a) aus den Kraftstoff-Einspritzmengen V_{gn} über die Injektoren 91, 92, 93, 94 und
- b) den Kraftstoff-Schaltleckagen V_{SLeck} der Injektoren 91, 92, 93, 94 sowie der
- c) der Kraftstoff-Dauerleckage V_{DLeck} des Hochdrucksystems des Kraftstoffversorgungssystems 100

zusammensetzt.

[0054] Die Volumina a) und b) werden eventbezogen abgenommen, während c) die Kraftstoff-Dauerleckage V_{DLeck} des Hochdrucksystems über eine Z-Transformation diskretisiert wird. Das heißt, es findet eine Umrechnung der zeitlich nicht eventbezogenen Dauerleckage V_{DLeck} des Hochdrucksystems in ein eventbezogenes segmentsynchrones diskretes Volumen statt. Mit anderen Worten, es findet eine eventbezogene Diskretisierung der Dauerleckage V_{DLeck} des Hochdrucksystems statt, sodass die Volumina a), b), c) entsprechend als aus dem Hochdrucksystems als abgenommenes Gesamt-Volumen V_{Ges-Ab} addiert werden können.

[0055] Hinzu kommt d) der sogenannte Last- und/oder drehzahlabhängige Änderungswunsch des Raildrucks, der sogenannte Druckänderungswunsch (auch als dynamischer Volumenstromanteil bezeichnet) innerhalb des Rails 4, der durch Zuführung von Kraftstoffvolumen (Druckerhöhung) über die Hochdruckpumpe 1 als $V_{Ap-Rail-Vorgabe}$ oder durch Abführung von Kraftstoffvolumen (Druckabsenkung) über das Druckregelventil 8 innerhalb der Volumenbilanz als $V_{Ap-Rail-Vorgabe}$ berücksichtigt wird.

[0056] Je nachdem, ob der Druckänderungswunsch eine Druckerhöhung oder Druckabsenkung betrifft, wird

- bei einer Druckerhöhung ein segmentsynchrones Volumen V_{Zu} zu dem Gesamt-Volumen V_{Ges-Ab} addiert oder
- bei einer Druckabsenkung wird ein segmentsynchrones Volumen V_{Ges-Ab} von dem Gesamt-Volumen V_{Ges-Ab} subtrahiert

[0057] Die Hochdruckpumpe 1 weist in bekannter Weise und vorteilhafter Weise eine feste Zuordnung des Pumpen-OT segmentsynchron/zylindersynchron alle 180° Kurbelwinkel der Brennkraftmaschine zu den Zylinderkolben-OT's der Zylinderkolben (nicht dargestellt) der Brennkraftmaschine auf, wobei die Motordrehzahl mit der Hochdruckpumpendrehzahl übereinstimmt. Zwischen dem Pumpen-OT und den Zylinderkolben-OT's kann ein gewisser fester Offset vorhanden sein, der jedoch bekannt ist und bei der festen Zuordnung entsprechend berücksichtigt werden kann.

[0058] Diese feste Zuordnung ermöglicht es die volumenstrombasierte und pumpensynchrone diskrete Berechnung zur Raildruckregelung auf diese Synchronität zu stützen und zu diskretisieren. Das heißt, man gewinnt nur eine diskrete Teilmenge aus einer kontinuierlichen Daten- oder Informationsmenge, wodurch eine Vereinfachung bei der Berechnung der Größen innerhalb der Regelstrecke erreicht wird.

[0059] Die erfindungsgemäße Berechnung erfolgt über ein Triggerstartsignal n_{sync} (vergleiche Figuren 2A und 2B und Figur 3), wobei die Berechnung segmentsynchron/zylindersynchron alle 180° Kurbelwinkel durchgeführt wird, wobei die Berechnung der Größen der Regelstrecke für jeden der Zylinder beziehungsweise der zugehörigen Injektoren $9n$, welche in dies Zylinder einspritzen getrennt durchgeführt wird.

[0060] Gemäß der Figur 2A umfasst die volumenstrombasierte pumpensynchrone Regelstruktur zur Raildruckregelung der Hochdruckpumpe 1 einen Signalerfassung-Baustein B1 zur Signalerfassung des Raildrucks p_7 mittels des Raildruck-Sensors 7.

[0061] Erfindungsgemäß erfolgt die Erfassung des Raildrucks p_7 zeitsynchron innerhalb des Bausteins B1 zur Signalerfassung des Raildrucks p_7 in einem Messraster in ms-Schritten, wobei innerhalb des Segmentes innerhalb des Bausteins B2, der als Istwert-Diskretisierungs-Baustein bezeichnet wird, segmentsynchron diskret ein Ist-Wert $p_{7|sl}$ als minimaler Druck $p_{7|sl-min}$ und als maximaler Druck $p_{7|sl-max}$ erfasst und abgespeichert werden, wobei aus diesen Drücken $p_{7|sl-min}$, $p_{7|sl-max}$ ferner als Ist-Wert $p_{7|sl}$ ein Mittelwert $p_{7|sl-50\%}$ der Drücke $p_{7|sl-min}$, $p_{7|sl-max}$ innerhalb des Segmentes berechnet und ebenfalls abgespeichert wird.

[0062] Gemäß der Figur 2A umfasst die volumenstrombasierte pumpensynchrone Regelstruktur zur Raildruckregelung der Hochdruckpumpe 1 einen Sollwertvorgabe-Baustein A1 zur Sollwertvorgabe des Raildrucks $p_{7|Soll}$ die in Form von Kennfelddaten im Computerprogramm des Motorsteuergerätes abgelegt sind, der aus dem jeweiligen applizierten Brennverfahren rührt und vorgegeben ist.

[0063] Dieser Soll-Raildruck $p_{7|Soll}$ wird von einem derzeitigen beliebigen Vorgabe Zeitraster erfindungsgemäß ebenfalls diskretisiert, das heißt es erfolgt eine Umrechnung aus den Zeit"scheiben" in die Segment"scheibe", zum Zeitpunkt n_{sync} dem (Triggerstartsignal), das heißt mit Beginn der Berechnung.

[0064] Das heißt explizit, dass der erste in der Segmentscheibe vorliegende Wert innerhalb des Zeitrasters als Soll-Raildruck $p_{7|Soll}$ "eingefroren" und somit diskretisiert wird. Diese Diskretisierung findet im Sollwert-Diskretisierungs-Baustein A2 statt.

[0065] Dadurch, dass Soll-Raildruck $p_{7|Soll}$ zum Zeitpunkt n_{sync} mit dem Beginn einer Zeitscheibe des Segmentes "eingefroren" wird, liegt, der aus dem vorhergehenden Segment gewünschte Soll-Raildruck $p_{7|Soll}$ (Ende des vorhergehendes Segmentes = Start nächstes Segment zum Zeitpunkt n_{sync}) diskretisiert vor, und wird

mit der Druckinformation $p_{7\text{Ist}}$ vom Raildruck-Sensor 7 aus dem aktuellen, das heißt dem nachfolgenden Segment innerhalb eines Arbeitsspieles diskretisiert und verglichen, wodurch eine diskrete Regelabweichung Δp_7 je Segment (segmentsynchron) bestimmt werden kann. Diese Vorgehensweise ist notwendig, weil das System stets einen zeitlichen Verzug aufweist. Der Stellwert einer Vorsteuerung erzeugt eine Volumenstromerhöhung in das Rail nachdem die Pumpe gefördert hat. Deshalb wird der zur Differenzbildung herangezogene Sollwert $p_{7\text{Soll}}$ um genau ein Arbeitsspiel verzögert und mit dem Ist-Wert $p_{7\text{Ist}}$ des darauffolgenden Arbeitsspieles verglichen.

[0066] Wie oben erläutert steht als diskreter Ist-Wert $p_{7\text{Ist}}$ der minimale Druck $p_{7\text{min}}$ oder der maximale ruck $p_{7\text{max}}$ oder der Mittelwert $p_{750\%}$ zur Verfügung.

[0067] In vorteilhafter Weise besteht innerhalb der Regelung die Möglichkeit (Auswahl mehrerer diskreter Signale aus dem Sollwert-Diskretisierungs-Baustein A2) für die Regelung als Ist-Wert $p_{7\text{Ist}}$ den minimalen diskreten Druck $p_{7\text{Ist-min}}$ oder den maximalen diskreten Druck $p_{7\text{Ist-max}}$ oder den diskreten Mittelwert $p_{7\text{Ist-50\%}}$ zu verwenden, um den gewählten Wert mit dem diskreten Soll-Raildruck $p_{7\text{Soll}}$ zu vergleichen, wodurch je nach Systemanforderung bei einem Druckaufbau der Wert $p_{7\text{Ist-max}}$ und bei einem Druckabbau der Wert $p_{7\text{Ist-min}}$ verwendet wird, um Regelschwingungen zu reduzieren beziehungsweise Über- oder Unterschwinger zu vermeiden.

[0068] Die entsprechende druckbezogene Berechnung erfolgt im Regelfehler-Berechnungs-Baustein A2/B2 (vergleiche Figur 2A) in den die diskretisierten Soll-Raildruck-Werte $p_{7\text{Soll}}$ und die diskretisierten Ist-Raildruck-Werte $p_{7\text{Ist}}$ eingehen und segmentsynchron verglichen und als Regelfehler berechnet ausgegeben und abgespeichert werden.

[0069] An dieser Stelle der Regelfehler-Berechnung erfolgt weiter erfindungsgemäß in einem Umrechnungs-Baustein A2', B2' aus der druckbasierten diskretisieren Regelabweichung $\Delta p_7 = \Delta p_{\text{Rail}}$ eine Umrechnung in eine volumenstrombasierte Regeldifferenz ΔV_{Rail} , das heißt eine Volumenstromdifferenz unter Auflösung einer Differentialgleichung, wobei E das druck- und temperaturabhängige spezifische Elastizitätsmodul des jeweiligen Kraftstoffs ist und V_H , wie zuvor erläutert, das Raumvolumen des Kraftstoff-Hochdrucksystems des Kraftstoffversorgungssystems 100 sind.

$$[1] \quad \Delta V_{\text{Rail}} = \frac{V_H}{E(p,T)} * \Delta p_{\text{Rail}}$$

[0070] Diese Umrechnung in den segmentsynchronen Volumenfehler ΔV_{Rail} hat den Vorteil, dass die nichtlinearen Kraftstoffeigenschaften des Kraftstoffs bei der Regelung berücksichtigt werden.

[0071] Die nichtlinearen Eigenschaften des Kraftstoffs hinsichtlich Druck und Temperatur und Kompressibilität werden in druckbasierten Systemen nicht abgebildet,

worin ein wesentlicher Vorteil des vorliegenden Verfahrens zu sehen ist, da diese Nichtlinearitäten durch die Umrechnung in den segmentsynchronen Volumenfehler ΔV_{Rail} berücksichtigt werden.

[0072] Dadurch ist eine exakte Versteuerung und Regelung mit geringsten Regelfehlern auch in hochdynamischen Fahrsituationen möglich, wodurch sich entscheidende Vorteile hinsichtlich Brennstabilität und Emissionen ergeben.

[0073] Als Zwischenzusammenfassung liegt somit gegenüber dem Stand der Technik eine Änderung in der Erfassung der Größen durch die Segmentierung in den Bausteinen A1, B1 und die Diskretisierung in den Bausteinen A2, B2 und eine Umrechnung von druckbasierten Größen auf volumenstrombasierte Größen in den Bausteinen A2/B2 sowie A2'/B2' vor.

[0074] Als Eingangsgröße für einen Regler-Baustein C, C1, C8 steht somit durch die Merkmale der beschriebenen Grundkonzeption eine diskrete Volumen Regeldifferenz ΔV_{Rail} zur Verfügung, die direkt für die volumenstrombasierenden Stellglieder E1, E8 (Hochdruckpumpe 1 und Druckregelventil 8) verwendet wird.

[0075] Auf die Erweiterung der Grundkonzeption, die "Zylinderselektive Regelung" wird nachfolgend noch unter der gleichlautenden Teilüberschrift noch detailliert eingegangen.

[0076] Der Regler-Baustein C, C1, C8 umfasst als Teil-Baustein eine Regler-Zustandsmaschine C, die je nach Anforderung den Druck volumenstrombasierend/volumenstrombasiert, das heißt in Abhängigkeit der diskreten im Umrechnungs-Baustein A2'/B2' ermittelten Volumen-Regeldifferenz ΔV_{Rail} erhöht oder verringert, und die darüber entscheidet, ob eine Regeleinwirkung über einen PID-Regler-Baustein C1 der Hochdruckpumpe 1 (vergleiche Figur 2A) "druckerhöhend" oder über einen PID-Regler-Baustein C8 des Druckregelventils 8 "druckerniedrigend" erfolgen soll.

[0077] Die Struktur umfasst zudem gemäß Figur 2A einen Vorsteuer-Volumenstromwert-Baustein D als Störungsregler für die segmentsynchrone volumenstrombasierte Vorsteuerung (Führungsgröße mit Störgrößenkompensation) des Kraftstoffversorgungssystems, dessen Führungsgröße mit dem PID-Regler-Baustein C1 der Hochdruckpumpe 1 und dem PID-Regler-Baustein C8 des Druckregelventils 8 zusammengeführt ist, sodass die PID-Regler-Bausteine C1, C8 nur die Regelschwankungen des Kraftstoffversorgungssystems ausgleichen müssen.

[0078] Dem Vorsteuer-Volumenstromwert-Baustein D gehen als Vorsteuergrößen die unter a) bis d) genannten segmentsynchronen Volumenströmen in Addition zu, sodass in dem Vorsteuer-Volumenstromwert-Baustein D bereits die Führung der Regelstrecke gewährleistet ist.

[0079] Die durch die PID-Regler-Bausteine C1, C8 ausgeregelten Werte des Störungsreglers des Vorsteuer-Volumenstromwert-Bausteins D werden (vergleiche Figur 2) einem Ausgabe-Baustein E zugeführt, der die Stellglieder E1 und E8 der Hochdruckpumpe 1 und des

Druckregelventils 8 elektrisch ansteuert und die Stellglieder E1 und E8 nach Bedarf über die Regelstrecke pumpe-segmentsynchron volumenbasiert verstellt.

Erweiterung "Zylinderselektive Regelung":

[0080] Erfindungsgemäß wird die zuvor hinsichtlich der Grundkonzeption erläuterte Raildruckregelung auf eine sogenannte "Zylinderselektive Regelung" erweitert, wie nachfolgend anhand der Figur 2B erläutert wird.

[0081] Dazu wird für jeden Zylinder, n = Anzahl der Zylinder beziehungsweise der zugehörigen Injektoren 9_n (vergleiche Figur 1) eine separate zylinderselektive Regelabweichung ΔV_{Rail} , insbesondere ein Proportional-Anteil und/oder ein Integrator-Anteil und/oder ein Differential-Anteil berechnet und gemäß der zylinderselektive Regelabweichung ΔV_{Rail} werden die Stellwerte E1, E8 Zylinder für Zylinder beziehungsweise Injektor für Injektor 9_n beziehungsweise Einspritzevent für Einspritzevent segmentsynchron selektiert und wie zuvor erläutert volumenstrombasiert für die Hochdruckpumpe 1 oder das Druckregelventil 8 ausgegeben.

[0082] Da die Injektoren 9_n im stationären Betrieb von Zylinder zu Zylinder dieselben Mengen-Sollwerte erhalten, sich aber durch Injektorstreuungen unterschiedliche Mengenabnahmen V_{9_n} aus dem Rail 4 ergeben, zeigen erfindungsgemäß beispielsweise die einzelnen Integrator-Anteile der zylinderselektiven Regler $C1_n$, $C8_n$ die Mengenabweichungen zwischen den Injektoren 9_n , denen verschiedene Ursachen zugrunde liegen können. In Abhängigkeit der Art der Mengenabweichungen können die Ursachen mit großer Wahrscheinlichkeit bestimmten Fehlergruppen zugeordnet werden.

[0083] Gemäß Figur 2A steht als Eingangsgröße für einen Regler-Baustein C, C1, C8 somit in der erfindungsgemäßen Grundkonzeption eine diskrete Volumen-Regeldifferenz ΔV_{Rail} zur Verfügung, die direkt für die volumenstrombasierenden Stellglieder E1, E8 (Hochdruckpumpe 1 und Druckregelventil 8) verwendet wird, wobei segmentsynchron für jeden Zylinder beziehungsweise Injektor 9_n "nur eine" Regelstruktur wiederholend genutzt wird. Auf eine Erweiterung, die sogenannte "Zylinderselektive Regelung" bei der mehrere Regelstruktur zylinderselektiv (vergleiche Figur 2B) genutzt werden, wird nachfolgend weiter detailliert erläutert.

[0084] Analog zu der Grundkonzeption steht als Eingangsgröße für mehrere (n) Regler-Bausteine $C1_n$, $C8_n$ eine segmentsynchrone diskrete Volumen-Regeldifferenz ΔV_{Rail} zur Verfügung, die gemäß der Erweiterung "zylinderselektiv" direkt für die volumenstrombasierenden Stellglieder E1, E8 (Hochdruckpumpe 1 und Druckregelventil 8) verwendet wird.

[0085] Je Zylinder beziehungsweise Injektor 9_n stehen als Teil-Bausteine, die einer Regler-Zustandsmaschine C zugeordnet sind, mehrere Regler-Bausteine $C1_n$ (im Ausführungsbeispiel $n = 4$; C11, C12, C13, C14), $C8_n$ (im Ausführungsbeispiel $n = 4$; C81, C82, C83, C84) zur Verfügung, die je nach segmentweise Anforderung den

Druck volumenstrombasierend/volumenstrombasiert, das heißt in Abhängigkeit der im Umrechnungs-Baustein A2'/B2' ermittelten diskreten Volumen-Regeldifferenz ΔV_{Rail} erhöhen oder verringern, wobei die Regler-Zustandsmaschine C darüber entscheidet, ob die Regelein-griffe segmentsynchron über mehrere PID-Regler-Bausteine $C1_n$ der Hochdruckpumpe 1 (vergleiche Figur 2B) "druckerhöhend" oder über mehrere PID-Regler-Bausteine $C8_n$ des Druckregelventils 8 "druckerniedrigend" in zylinderselektiver Weise erfolgen sollen.

[0086] Die Struktur umfasst zudem gemäß Figur 2B einen Vorsteuer-Volumenstromwert-Baustein D als Störungsregler für die segmentsynchrone volumenstrombasierte Vorsteuerung (Führungsgröße mit Störgrößenkompensation) des Kraftstoffversorgungssystem 100, dessen Führungsgröße mit dem PID-Regler-Bausteinen $C1_n$ der Hochdruckpumpe 1 und dem PID-Regler-Bausteinen $C8_n$ des Druckregelventils 8 zusammengeführt ist, sodass die PID-Regler-Bausteine $C1_n$, $C8_n$ nur die Regelschwankungen des Kraftstoffversorgungssystem ausgleichen müssen.

Hierdurch ergeben sich folgende Effekte:

[0087] Die Hochdruckregelung kann durch die zylinderselektive Regelung jetzt - in Erweiterung der Grundkonzeption - zylinderselektiv geführt werden, das heißt jedem Zylinder beziehungsweise jedem Einspritzvorgang wird zylinderselektiv eine angepasste zylinderselektiv korrigierte Stellgröße als Stellgliedausgabe E1 der Hochdruckpumpe 1 oder Stellgliedausgabe E8 des Druckregelventils 8 ausgegeben.

[0088] Mit anderen Worten, die jeweiligen PID-Regler-Bausteine $C1_n$, $C8_n$ können jeder für sich ausgewertet separat kalibriert werden. Die Auswertung der im Ausführungsbeispiel vier einzelnen PID-Regler-Bausteine $C1_n$ oder $C8_n$, das heißt der Vergleich, der im stationären Betrieb beispielsweise unterschiedlichen Integrator-Anteile und Proportional-Anteile lässt in vorteilhafter Weise eine zylinderbezogene beziehungsweise injektorbezogene Fehleranalyse und Ursacheneingruppierung zu, wobei einerseits eine einfache Diagnosefunktion (OnBoard-Diagnose ohne Ausbau) oder eine Diagnosefunktion (OnBoard-Diagnose ohne Ausbau) mit einer Korrekturfunktion vorgesehen ist.

[0089] Beispielsweise kann über die Diagnosefunktion eine bestimmter zylinderbezogener beziehungsweise injektorbezogener Fehler bis zu einem vorgebbaren Schwellwert zugelassen werden und erst nach Überschreitendes Schwellwert erfolgt eine zylinderbezogene beziehungsweise injektorbezogene Fehlerkorrektur.

[0090] Es besteht erfindungsgemäß insbesondere die Möglichkeit die Einspritzmengenfehler ursachenabhängig zu gruppieren, wobei die Injektoren 9_n beispielsweise im Betrieb einer Fehlergruppe mit einem Injektordefekt (OnBoard-Diagnose eines Injektordefektes ohne Ausbau), oder einer andere Fehlergruppe mit einer alterungsbedingten Injektor drift (OnBoard-Diagnose der In-

jektordrift ohne Ausbau) oder einer anderen Fehlergruppe mit einer sich ändernden Schaltleckagemenge V_{SLeck} (OnBoard-Diagnose einer zu hohen Schaltleckage ohne Ausbau) zugeordnet werden können, wobei die Einspritzmengenfehler in vorteilhafter Weise innerhalb der OnBoard-Diagnose zu einem Austausch des defekten Injektors 9n aufrufen oder innerhalb der zylinderselektiven Regelung berücksichtigt und korrigiert werden können.

[0091] Zudem können generell die zylinderselektiven Regelungsinformationen, das heißt die individualen Einspritzmengenfehler der einzelnen Injektoren 9n adaptiert werden und zur Verbesserung der Vorsteuerung D der Injektoren 9n genutzt werden.

[0092] Die jeweilige zylinderselektive Regelgröße C1n, C8n kann ferner in vorteilhafter Weise in eine andere Führungsgröße umgerechnet werden, wobei insbesondere an das innere Motormoment der jeweiligen Zylinder gedacht wird, sodass durch Unterstützung der zylinderselektiven Raildruckregelung eine zylinderselektive momentenabhängige Regelung ermöglicht wird, bei der die zylinderselektiven Regelungsinformationen insbesondere für die Momenten-Zylindergleichstellung genutzt werden können, indem beispielsweise einem zylinderselektiven Momenten-Regler ein entsprechender Vorsteuerwert aus der zylinderselektiven Raildruckregelung übergeben wird.

Erweiterung "Stromerfassung und Stromregelung der Stellglieder":

[0093] Ein weiterer Aspekt der Erfindung besteht darin, dass die Hochdruckregelung bei der beschriebenen nichtzylinderselektiven Regelung oder bei der beschriebenen zylinderselektiven Regelung eine angepasste korrigierte Stellgröße in einer Stellgliederausgabe E1 der Hochdruckpumpe 1 oder in einer Stellgliederausgabe E8 des Druckregelventils 8 ausgibt.

[0094] Um die erfindungsgemäßen Vorteile der nichtzylinderselektiven Regelung oder der beschriebenen zylinderselektiven Regelung ohne Systemschwäche im Bereich der Stromerfassung und Stromregelung des Druckregelventils 8 und der Hochdruckpumpe 1 in vollem Umfang nutzen zu können, wird nachfolgend ein Verfahren zur verbesserten Stromregelung mittels eines Beobachter-Modells für eine Raildruckregelung mit einem Druckregelventil 8 und/oder einer Hochdruckpumpe 1 erläutert.

[0095] Bisher werden Stromregelungen von Komponenten, insbesondere Hochdruck-Komponenten in der Automobilindustrie durch Pulsweitenmodulation (PWM) eines schnellen Schalters im Motorsteuergerät realisiert. Durch die PWM-Modulation stellt sich ein mittlerer Strom im Stellglied ein, der für eine Stromregelung mit einem analog zu digital Umsetzer (AD-Umsetzer) gemessen wird um diesen dann einem Regler als Ist-Größe bereitzustellen. Der gemessene Strom enthält durch die PWM-Modulation Frequenzen/Oszillationen die einem Vielfa-

chen der PWM-Grundfrequenz entsprechen. Um den Strom fehlerfrei erfassen zu können gibt es zwei etablierte Verfahren.

[0096] Man unterscheidet in "PWM-synchrone Stromerfassungssysteme" und "Zeitsynchrone Stromerfassungssysteme".

[0097] PWM-synchrone Stromerfassungssysteme, bei denen ein Hardware-Filter mit hoher Grenzfrequenz zur Eliminierung hochfrequenter Störungen zum Einsatz kommt, haben folgende Nachteile: Es kann keine mittwertfreie Erfassung durchgeführt werden. Es erfolgt eine Abtastung die im Frequenzbereich des HW-Filters liegt mit hoher CPU-Last da die Abtastfrequenz an die PWM Grundfrequenz gekoppelt ist. Bei kleinen PWM-Tastverhältnissen kann es durch Aliasfehler zu Unterabtastungen kommen was zu einer Mittwertverschiebung führt. Das Verfahren wird daher selten angewendet.

[0098] Zeitsynchrone Stromerfassungssysteme, bei denen ein HW-Filter mit geringer Grenzfrequenz zur Glättung der PWM-Oszillation auf dem Stromsignal zum Einsatz kommt, haben folgende Nachteile: Durch die geringe Grenzfrequenz und hohe Filterzeitkonstante weisen diese HW-Filter eine hohe Phasenverschiebung auf. Die Regleranpassung muss an einen relativ langsamen HW-Filter erfolgen. Die zeitsynchronen Stromerfassungssysteme weisen ferner bei Störungen ein schlechtes Regelverhalten auf, weil der Ist-Wert durch die langsame HW-Filterung verzögert den Regler erreicht.

[0099] Generell wird bei den Stromerfassungssystemen mithilfe eines Messwiderstands der Spannungsabfall über dem Messwiderstand benutzt um den Strom in dem Stellglied zu bestimmen. Dieser Wert wird mittels eines AD-Umsetzers zyklisch erfasst und der Stromregelung als Ist-Wert bereitgestellt. In einer geschlossenen Regelschleife wird auf diesen Strommesswert geregelt. Für die Abtastung muss dieser Messwert vor dem Analog/Digital Umsetzer mittels analogem Hardware (HW)-Tiefpass-Filter mit einer entsprechend festzulegenden Grenzfrequenz (üblicherweise zwischen 10Hz und 50Hz bei zeitsynchroner Stromerfassung) gefiltert werden. Üblicherweise ist dieser Filter, zumeist ein RC-Glied. Dadurch werden, eine Signalverzögerung und ein Phasengang erzeugt, der für die Regelschleife von großem Nachteil ist, weshalb die (inneren) Stromregelungen verhältnismäßig langsam ausgelegt werden.

[0100] Dabei wird wie bisher bereits beachtet, dass in der hier vorliegenden spezifischen Anwendung "Raildruckregelung" in einer Reglerkaskade der Raildruckregelung die inneren Regelkreise (Regelkreise der Steller Stromregler) grundsätzlich schneller auszulegen sind, als die äußeren Regelkreise (Regelkreise basierend auf Raildruck) um eine zeitliche Entkopplung zu erreichen.

[0101] Die Stellglieder für die Stellgliederausgabe E1, E8 der Hochdruckpumpe 1 und des Druckregelventils 8 der Hochdruckregelung sind dabei die inneren Regelkreise, wobei die eigentliche bereits erläuterte hydraulische Druckregelung (vergleiche die Bausteine der hydraulischen Druckregelung in den Figuren 2A und 2B und die

zugehörige Beschreibung) die äußeren Regelkreise darstellen.

[0102] Nach alledem wird deutlich, dass bei der Stromerfassung und der darauf basierenden Stromregelung des Druckregelventils 8 und der Hochdruckpumpe 1 Verbesserungspotential vorliegt, wobei nachfolgend eine verbesserte Vorgehensweise erläutert wird.

[0103] Die erfindungsgemäße Lösung besteht in einer geänderten Signalverarbeitung beziehungsweise Signalverarbeitungskette, die erfindungsgemäß ein in Figur 3 dargestelltes Beobachter-Modell umfasst.

[0104] Mit anderen Worten, in die Signalverarbeitungskette ist ein Beobachter-Baustein W, kurz Beobachter genannt, integriert angeordnet, der in vorteilhafter Weise in der Signalverarbeitungskette zur Ansteuerung der Komponenten 1 und 8 zum Einsatz kommt.

[0105] Dieser in die Signalverarbeitungskette integrierte Beobachter W verbessert die Stromerfassung des Hochdruckpumpe 1 und des Druckregelventils 8 und deren Stromregelung in der beschriebenen nichtzylinderselektiven Raildruckregelung und in der zylinderselektive Raildruckregelung gleichermaßen.

[0106] Die Stromerfassung wird mittels des Beobachter-Modells dahingehend verbessert, dass die Verzögerungszeiten und Phasenverschiebungen der Stromerfassung, die durch die analoge Filterung (HW-Filter) des Signals entstehen, umgangen werden, wobei in dem Modell sichergestellt ist, dass der Beobachter W ständig nachgeführt wird, indem ein sogenannter Beobachtungsfehler gegen Null konvergiert, wobei der Beobachtungsfehler als Differenz zwischen dem gemessenen Wert und dem beobachteten Wert definiert ist.

[0107] Das erfindungsgemäße System zur Stromerfassung ist in Figur 3 in dem Ausgabemodul-Baustein E angeordnet und in Figur 3 in einem schematisch dargestellten aus dem Ausgabemodul-Baustein E herausgezogenen Systemschaubild verdeutlicht.

[0108] Das erfindungsgemäße System zur Stromerfassung basiert auf einer zeitsynchronen Stromerfassung und einer sogenannten Zustandsrekonstruktion beziehungsweise Zustandsvektorkonstruktion.

[0109] Das aus Ausgabemodul-Baustein E herausgezogenen Systemschaubild verdeutlicht einen Spannungswert u (die einem pulsierenden Spulenstrom beziehungsweise einer pulsierenden Spulenspannung einer herkömmlichen PWM-synchronen Stromerfassung entspricht), welche die Eingangsgröße des System zur Stromerfassung darstellt.

[0110] Die Spannung u stellt die Eingangsgröße dar, die der Spule $\frac{1}{Ls+R}$ der Steuereinheit der anzusteuern den Komponenten 1, 8 zugeführt wird.

[0111] Das Ausgangssignal der Spule $\frac{1}{Ls+R}$ ist ein Stromwert i_1 , der als sogenannter Effektivwert der Spule

$\frac{1}{Ls+R}$ als Regelstrom zur Ansteuerung der Komponente

1, 8 gesucht wird, der messtechnisch nicht ohne entsprechende Aufbereitung des Signales erfasst werden kann.

[0112] Der Stromwert i_1 beziehungsweise Effektivwert

der Spule $\frac{1}{Ls+R}$ stellt die Eingangsgröße für einen

Hardware-Filter HW zur Filterung des Stromwertes i_1 darstellt, der wiederum den Stromwert i_2 ausgibt, der schließlich die Eingangsgröße für einen Software-Filter SW zur Dämpfung des Signals des Stromwertes i_2 im Steuergerät darstellt, sodass nach dieser Signalverarbeitungskette ein Signal eines Stromwertes i_3 zur Verfügung steht.

[0113] Der Spannungswert u stellt somit den Eingangswert in den Beobachter-Baustein W dar, wobei der Stromwert i_3 den Ausgangswert der Signalverarbeitungskette darstellt, der ebenfalls dem Beobachter-Baustein W zur Verfügung gestellt wird, wobei der Beobachter-Baustein W über das zugrunde liegende Beobachter-Modell parallel zu der zuvor erläuterten Signalverarbeitungskette ein neuen Spannungswert u berechnet.

[0114] Das heißt, der Beobachter W wird ständig nachgeführt, indem der sogenannte Beobachtungsfehler gegen Null konvergiert, wobei der Beobachtungsfehler als Differenz zwischen dem gemessenen Wert i_1 und dem beobachteten Wert i_3 definiert ist.

[0115] Durch diese erfindungsgemäße Lösung ist eine den Anforderungen entsprechend hohe Performance und Stabilität der Stromerfassung möglich wodurch die inneren Stromregelkreise mit hoher Performance im Detail folgende vorteilhafte Eigenschaften der erfindungsgemäßen Stromerfassung mittels Beobachter W zu verstehen sind: Diese Art der Stromerfassung weist nur eine geringe Phasenverschiebung da auf den Modellwert des Beobachters geregelt wird welche dem realen Stromwert entspricht der jedoch durch die Nachteile des Phasengangs der Filterung erst nach der Filterlaufzeit erfasst werden würde. Die Erfassung mit Beobachter ist schneller, sodass schließlich auch die darauf basierende Regelung schneller ist. Die erfindungsgemäße Stromerfassung benötigt keine Mittelwertbildung, das heißt sie ist insbesondere im Gegensatz zu der allseits verwendeten PWM-synchronen Stromerfassung (mit Mittelwertbildung) genauer. Bei der erfindungsgemäßen Stromerfassung treten keine Aliasing-Effekte auf, das heißt eine falsche Signalermittlung mit Unterabtastung, wie es bei anderen Stromerfassungsverfahren der Fall ist, tritt nicht auf.

Bezugszeichenliste

[0116]

100 Kraftstoffversorgungssystem
1 Hochdruckpumpe

2	Vorförderpumpe
3	Kraftstofftank
4	Kraftstoffspeicher, Rail
ΔV_{Rail}	Volumen-Regeldifferenz, diskrete Regelabweichung
5	Filtereinheit
6	Duo-Sensor (p, T)
T6	Kraftstofftemperatur
7	Raildruck-Sensor
p7	Raildruck
$p7_{\text{Ist}}$	Ist-Raildruck
$p7_{\text{Ist-max}}$	Ist-Raildruck (diskretisiert Max)
$p7_{\text{Ist-min}}$	Ist-Raildruck (diskretisiert Min)
$p7_{\text{Ist-50\%}}$	Ist-Raildruck (diskretisiert Mittelwert)
$p7_{\text{Soll}}$	Soll-Raildruck (diskretisiert)
$\Delta p7 = \Delta p_{\text{Rail}}$	diskrete Regelabweichung (druckbezogen)
E	Elastizitätsmodul
8	Druckregelventil
V8	abgesteuerter Volumenstrom über Rücklaufleitung 8.2.1
9n	Injektoren (n-ter Injektor)
91	erster Injektor
92	zweiter Injektor
93	dritter Injektor
94	vierter Injektor
1.4	Hochdruckleitung zwischen 1 und 4
2.1	Niederdruckleitung zwischen 2 und 1
4.9	Injektorleitungen zwischen 4 und 9n
8.2.1	Rücklaufleitung zwischen 8 und 2.1
9.3	Leckagerücklaufleitung zwischen 9n und 3
1.3	HDP-Rücklaufleitung zwischen 1 und 3
S1	erstes Steuergerät
S2	zweites Steuergerät
V_{Ges}	Gesamt-Volumen ($V_{9n} + V_{\text{DLack}} + V_{\text{SLack}} + V_{\Delta p\text{-Rail-Vorgabe}}$)
V_{9n}	Einspritzvolumen des jeweiligen n-ten Injektors
V_{DLack}	Dauerleckagevolumenstrom des Hochdruck-Kraftstoffversorgungssystems
V_{SLack}	Schaltleckagevolumenstrom der Injektoren
$V_{\Delta p\text{-Rail-Vorgabe}}$	Druckänderungswunsch systembedingt
V_{ZU}	zugeführtes Volumen in Abhängigkeit des Druckänderungswunsches Druckerhöhung
$V_{\text{Ges-Ab}}$	abgeführtes Volumen in Abhängigkeit des Druckänderungswunsches Druckabsenkung
V_{H}	konstantes Raumvolumen des Hochdruck-Kraftstoffversorgungssystems
nsync	Startzeitpunkt der Berechnung
A1	Sollwertvorgabe-Baustein des Raildrucks $p7_{\text{Soll}}$
A2	Sollwert-Diskretisierungs-Baustein
B1	Istwert-Signalerfassungs-Baustein Raildruck

$p7_{\text{Ist}}$	
B2	Istwert-Diskretisierungs-Baustein
A2/B2	Regelfehler-Berechnungs-Baustein
A2'/B2'	Umrechnungs-Baustein
5	C Regler-Zustandsmaschine
C1	Regel-Baustein der Hochdruckpumpe
C8	Regel-Baustein des Druckregelventils
C1n	Regel-Baustein der Hochdruckpumpe (n-ter Regel-Baustein)
10	C8n Regel-Baustein des Druckregelventils (n-ter Regel-Baustein)
D	Vorsteuer-Baustein
E	Ausgabe-Baustein
E1	Stellgliedausgabe Hochdruckpumpe
15	E8 Stellgliedausgabe Druckregelventil
	<u>1</u>
	Ls+R Spule
u	Spulenspannung
i1	Spulenstrom hinter der Spule
20	HW Hardware-Filter
i2	Spulenstrom nach Hardware-Filter
SW	Software-Filter
i3	Spulenstrom nach Software-Filter
25	W Beobachter-Baustein

Patentansprüche

- 30 1. Verfahren zum Regeln eines durch eine Hochdruckpumpe (1) in einem Kraftstoffspeicher (4) bewirkten Raildrucks ($p7_{\text{Soll}}$) für ein Kraftstoffversorgungssystem (100) einer Brennkraftmaschine, wobei eine kurbelwinkelbezogene oder nockenwinkelbezogene feste Winkeldifferenz der Brennkraftmaschine zwischen einer Oberen-Totpunkt-Position eines Zylinderkolbens eines Zylinders der Brennkraftmaschine und einer Oberen-Totpunkt-Position des Pumpenkolbens der Hochdruckpumpe (1) des Kraftstoffversorgungssystems (100) bei der Zumessung des Förder Volumens der Hochdruckpumpe (1) berücksichtigt wird, wobei wiederkehrend pumpensynchron je Segment, das einer Umdrehung einer Kurbelwelle und somit der Bewegung des Pumpenkolbens der Hochdruckpumpe (1) von der Oberen-Totpunkt-Position des Pumpenkolbens zur nächsten Oberen-Totpunkt-Position entspricht, eine Diskretisierung einer Regelabweichung ($\Delta p7$) des Raildrucks ($p7$) im Kraftstoffspeicher (4) vorgenommen und von der diskreten Regelabweichung ($\Delta p7$) ausgehend eine volumenbezogene diskrete Volumen-Regeldifferenz (ΔV_{Rail}) berechnet wird, **dadurch gekennzeichnet, dass** die diskrete Regelabweichung ($\Delta p7$) als Differenz aus dem diskretisierten Ist-Raildrucks ($p7_{\text{Ist}}$) und dem diskretisierten Soll-Raildruck ($p7_{\text{Soll}}$), insbesondere zylinderselektiv berechnet wird, indem eine diskretisierte Druckinformation ($p7_{\text{Ist}}$) eines Raildruck-Sensor (7) des aktiv erfassten

- pumpensynchronen Segmentes mit dem diskretisierten Soll-Raildruck ($p_{7\text{Soll}}$) des um ein Arbeitsspiel vorhergehenden pumpensynchronen Segmentes verglichen wird, um die diskrete Regelabweichung (Δp_7), insbesondere die diskrete zylinderselektive Regelabweichung (Δp_7) zu bestimmen.
2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** die diskrete Regelabweichung (Δp_7) als Differenz aus dem diskretisierten Ist-Raildrucks ($p_{7\text{Ist}}$) und dem diskretisierten Soll-Raildruck ($p_{7\text{Soll}}$) zylinderselektiv berechnet wird, indem eine diskretisierte Druckinformation ($p_{7\text{Ist}}$) eines Raildruck-Sensor (7) des aktiv erfassten pumpensynchronen Segmentes mit dem diskretisierten Soll-Raildruck ($p_{7\text{Soll}}$) des um ein Arbeitsspiel vorhergehenden pumpensynchronen Segmentes verglichen wird, um die diskrete zylinderselektive Regelabweichung (Δp_7) zu bestimmen.
 3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet, dass** die volumenbezogene diskrete Volumen-Regeldifferenz (ΔV_{Rail}) als Eingangsgröße, insbesondere als zylinderselektive Eingangsgröße einem Regelbaustein (C1n) für die Hochdruckpumpe (1) und einem Regelbaustein (C8n) für ein dem Kraftstoffspeicher (4) zugeordnetes Druckregelventil (8) zugeführt wird, wobei die diskrete Volumen-Regeldifferenz (ΔV_{Rail}) mit einem Vorsteuer-Baustein (D) verknüpft wird, wodurch pumpensynchron, insbesondere pumpensynchron und zylinderselektiv je Segment die Stellgrößen für die Hochdruckpumpe (1) und das Druckregelventil (8) in einem Ausgabe-Baustein (E8) berechnet und den Stellgliedern (E1, E8) der Hochdruckpumpe (1) und des Druckregelventils (8) zur volumenbasierten, insbesondere volumenbasierten und zylinderselektiven Einstellung des Raildrucks ($p_{7\text{Soll}}$) zugeführt werden.
 4. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Soll-Raildruck ($p_{7\text{Soll}}$) zu einem Zeitpunkt diskretisiert wird, der mit einem Triggerstartsignal (n_{sync}) festgelegt wird, das wiederkehrend zu Beginn eines pumpensynchronen Segmentes ausgegeben wird.
 5. Verfahren nach den Ansprüchen 1 oder 2 und 4, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Ist-Raildruck ($p_{7\text{Ist}}$) innerhalb des durch das Triggerstartsignal (n_{sync}) gestarteten Segmentes wiederkehrend erfasst und diskretisiert wird.
 6. Verfahren nach Anspruch 5, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Ist-Raildruck ($p_{7\text{Ist}}$), der innerhalb des pumpensynchronen Segmentes wiederkehrend erfasst wird, als
 - in dem Segment maximaler Ist-Raildruck ($p_{7\text{Ist-max}}$) und
 - in dem Segment minimaler Ist-Raildruck ($p_{7\text{Ist-min}}$) und
 - in dem Segment berechneter Mittelwert ($p_{7\text{Ist-50\%}}$)
- diskretisiert und wahlweise mit dem diskretisierten Soll-Raildruck ($p_{7\text{Soll}}$) zur Bestimmung der diskreten Regelabweichung (Δp_7), insbesondere der diskreten zylinderselektiven Regelabweichung (Δp_7) verglichen wird.
7. Verfahren nach Anspruch 6, **dadurch gekennzeichnet, dass** für die Regelung als Ist-Wert ($p_{7\text{Ist}}$) der erfasste minimale diskrete Druck ($p_{7\text{Ist-min}}$) oder der erfasste maximale diskrete Druck ($p_{7\text{Ist-max}}$) oder der diskrete Mittelwert ($p_{7\text{Ist-50\%}}$) zum Vergleich mit dem diskreten Soll-Raildruck ($p_{7\text{Soll}}$) verwendet wird, wobei je nach Systemanforderung bei einem Druckaufbau der maximale diskrete Druck ($p_{7\text{Ist-max}}$) und bei einem Druckabbau der minimale diskrete Druck ($p_{7\text{Ist-min}}$) verwendet wird, um Regelschwingungen, insbesondere die Regelschwingungen zylinderselektiv zu reduzieren beziehungsweise Über- oder Unterschwinger, insbesondere Über- oder Unterschwinger zylinderselektiv zu vermeiden.
 8. Verfahren nach Anspruch 6 oder 7, **dadurch gekennzeichnet, dass** die diskrete Regelabweichung (Δp_7), insbesondere die diskrete zylinderselektive Regelabweichung (Δp_7) in die volumenstrombasierte diskrete Volumen-Regeldifferenz ($\Delta V_7 = \Delta V_{\text{Rail}}$) insbesondere die volumenstrombasierte diskrete zylinderselektive Volumen-Regeldifferenz (ΔV_{Rail}) umgerechnet wird, wobei zusätzlich eine Kraftstoff-Dauerleckage (V_{DLleck}) des Hochdrucksystems des Kraftstoffversorgungssystems durch Addition berücksichtigt.
 9. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet, dass** die druckbasierte diskretisierte Regelabweichung ($\Delta p_7 = \Delta p_{\text{Rail}}$) in eine volumenstrombasierte Volumen-Regeldifferenz (ΔV_{Rail}) umgerechnet wird, wobei bei der Umrechnung das druck- und temperaturabhängige spezifische Elastizitätsmodul (E) des jeweiligen Kraftstoffs und das Raumvolumen (V_{H}) des Kraftstoff-Hochdrucksystems des Kraftstoffversorgungssystems (100) gemäß der Umrechnungsformel

$$\Delta V_{\text{Rail}} = \frac{V_{\text{H}}}{E(p,T)} * \Delta p_{\text{Rail}},$$
 insbesondere zylinderselektiv berücksichtigt wird.
 10. Verfahren nach den Ansprüchen 1 und 9, **dadurch gekennzeichnet, dass** bei der pumpensynchronen segmentweise wiederkehrenden Umrechnung der

druckbasierten diskreten Regelabweichung (Δp_7) in die volumenbezogene diskrete Volumen-Regeldifferenz (ΔV_{Rail}),

- a) die Kraftstoff-Einspritzmengen (V_{9n}) der Injektoren (9n) und
 b) die Kraftstoff-Schaltleckagen (V_{SLeck}) der Injektoren (9n) und
 c) ein Druckänderungswunsch ($V_{\Delta p\text{-Rail-Vorgabe}}$) bezüglich des Soll-Raildrucks ($p_{7\text{Soll}}$) des Kraftstoffspeichers (4) berücksichtigt werden, wobei
 d) die Kraftstoff-Dauerleckage (V_{DLeck}) des Hochdrucksystems des Kraftstoffversorgungssystems (100) durch eine pumpensynchrone segmentweise wiederkehrende separate Umrechnung mit einer Z-Transformation ermittelt und der volumenbezogenen diskreten Volumen-Regeldifferenz ($\Delta V_7 = \Delta V_{\text{Rail}}$) hinzugefügt wird.
11. Verfahren nach den Ansprüchen 2 und 9, **dadurch gekennzeichnet, dass** bei der pumpensynchronen segmentweise wiederkehrenden Umrechnung der druckbasierten diskreten zylinderselektiven Regelabweichung (Δp_7) in die volumenbezogene diskrete Volumen-Regeldifferenz (ΔV_{Rail}),
- a) zylinderselektiv die Kraftstoff-Einspritzmengen (V_{9n}) der Injektoren (9n) und
 b) zylinderselektiv die Kraftstoff-Schaltleckagen (V_{SLeck}) der Injektoren (9n) und
 c) zylinderselektiv ein Druckänderungswunsch ($V_{\Delta p\text{-Rail-Vorgabe}}$) bezüglich des Soll-Raildrucks ($p_{7\text{Soll}}$) des Kraftstoffspeichers (4) berücksichtigt wird, wobei
 d) die Kraftstoff-Dauerleckage (V_{DLeck}) des Hochdrucksystems des Kraftstoffversorgungssystems (100) durch eine pumpensynchrone segmentweise wiederkehrende separate Umrechnung mit einer Z-Transformation ermittelt und der volumenbezogenen diskreten Volumen-Regeldifferenz ($\Delta V_7 = \Delta V_{\text{Rail}}$) hinzugefügt wird.
12. Verfahren nach Anspruch 11, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Injektoren (9n) im stationären Betrieb von Zylinder zu Zylinder dieselben Mengensollwerte erhalten, die zylinderselektiv mit den Mengenanahmen (V_{9n}) aus dem Rail (4) verglichen werden, wobei zylinderselektiv Einspritzmengenfehler festgestellt werden, die den Injektoren (9n) zugeordnet werden, wobei eine Art der Mengenanabweichungen bestimmten Fehlergruppen zugeordnet wird.
13. Verfahren nach Anspruch 12, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Einspritzmengenfehler ursachenabhängig, insbesondere in Abhängigkeit der
- Höhe, des sich im Soll/Ist-Vergleich ergebenden Einspritzmengenfehler gruppiert werden, wobei die Injektoren (9n) im Betrieb einer Fehlergruppe mit einem Injektordefekt, einer Fehlergruppe mit einer alterungsbedingten Injektordrift oder einer Fehlergruppe mit einer sich ändernden Schaltleckagemenge (V_{SLeck}) zugeordnet werden, wobei die Einspritzmengenfehler innerhalb der zylinderselektiven Regelung im Regler ($C1_n$, $C8_n$) ermittelt und im Einspritzsystem korrigiert werden und/oder zu einem Austausch des/der jeweiligen Injektors/Injektoren (9n) führen.
14. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Stellgrößen der Stellglieder der Komponenten (1, 8) zum Regeln des Raildrucks ($p_{7\text{Soll}}$) in dem Kraftstoffspeicher (4) einem Ausgabe-Baustein (E1, E8) zugeführt und in dem Ausgabe-Baustein (E1, E8) zur volumenbasierten Einstellung des Raildrucks ($p_{7\text{Soll}}$) berechnet werden, wobei eine Stromerfassung und Stromregelung der Stellglieder (1, 8) auf der Basis eines Beobachter-Modells durchgeführt werden.
15. Kraftstoffversorgungssystem (100) eingerichtet zur Durchführung des Verfahrens nach mindestens einem der Ansprüche 1 und 3 bis 10, **dadurch gekennzeichnet, dass** das Kraftstoffversorgungssystem (100) zur Ermittlung einer
- diskreten Eingangsgröße für einen Regler-Baustein (C1) für die Hochdruckpumpe (1) und zur Ermittlung einer diskreten Eingangsgröße für einen Regler-Baustein (C8) für ein dem Kraftstoffspeicher (4) zugeordnetes Druckregelventil (8) folgende weitere Bausteine umfasst,
 - einen Sollwertvorgabe-Baustein (A1) des Raildrucks ($p_{7\text{Soll}}$) und eine zugehörigen Sollwert-Diskretisierungs-Baustein (A2) und
 - einen Istwert-Signalerfassungs-Baustein (B1) des Raildruck ($p_{7\text{Ist}}$) und einen Istwert-Diskretisierungs-Baustein (B2),
 - sowie einen Regelfehler-Berechnungs-Baustein (A2/B2) und
 - einen Umrechnungs-Baustein (A2'/B2') umfasst, der aus einer druckbasierten diskretisieren Regelabweichung ($\Delta p_7 = \Delta p_{\text{Rail}}$) eine Umrechnung in eine volumenstrombasierte Regeldifferenz (ΔV_{Rail}) vornimmt, wobei
 - der Umrechnungs-Baustein (A2'/B2') mit einer Regler-Zustandsmaschine (C) verknüpft ist, welche die diskrete Eingangsgröße für den Regler-Baustein (C1) der Hochdruckpumpe (1) und die diskreten Eingangsgröße für den Regler-Baustein (C8) des Druckregelventils (8) ausgibt,
 - wobei die Regler-Bausteine (C1, C8) mit einem Vorsteuer-Baustein (D) verknüpft sind, wodurch mittels des Vorsteuer-Bausteins (D) und der auf-

geschalteten Regler-Bausteine (C1, C8) pum-
pensynchron je Segment die Stellgrößen für die
Hochdruckpumpe (1) und das Druckregelventil
(8) einem Ausgabe-Baustein (E8) zugeführt und
berechnet werden, und den Stellgliedern (E1,
E8) der Hochdruckpumpe (1) und des Druckre-
gelventils (8) zur volumenbasierten Einstellung
des Raildrucks ($p_{7\text{Soll}}$) zugeführt werden.

16. Kraftstoffversorgungssystem (100) eingerichtet zur
Durchführung des zylinderselektiven Verfahrens
nach mindestens einem der Ansprüche 1 bis 14, **da-
durch gekennzeichnet, dass** das Kraftstoffversor-
gungssystem (100)

- zur Ermittlung der jeweiligen diskreten Ein-
gangsgröße des jeweiligen Zylinders zylinder-
selektiv mehrere (n) Regler-Bausteine (C1n) für
die Hochdruckpumpe (1) und zur Ermittlung der
jeweiligen diskreten Eingangsgröße des jewei-
ligen Zylinders zylinderselektiv mehrere (n)
Regler-Bausteine (C8n) für ein dem Kraftstoff-
speicher (4) zugeordnetes Druckregelventil (8),
und

- einen Sollwertvorgabe-Baustein (A1) des Rail-
drucks ($p_{7\text{Soll}}$) und eine zugehörigen Sollwert-
Diskretisierungs-Baustein (A2) und

- einen Istwert-Signalerfassungs-Baustein (B1)
des Raildruck ($p_{7\text{Ist}}$) und einen Istwert-Diskreti-
sierungs-Baustein (B2),

- sowie einen Regelfehler-Berechnungs-Bau-
stein (A2/B2) und

- einen Umrechnungs-Baustein (A2'/B2') um-
fasst, der aus einer druckbasierten diskretisie-
ren Regelabweichung ($\Delta p_7 = \Delta p_{\text{Rail}}$) eine Um-
rechnung in eine volumenstrombasierte Regel-
differenz (ΔV_{Rail}) vornimmt, wobei

- der Umrechnungs-Baustein (A2'/B2') mit einer
Regler-Zustandsmaschine (C) verknüpft ist,
welche die diskrete Eingangsgröße zylinderse-
lektiv dem jeweiligen Regler-Baustein (C1n) der
Hochdruckpumpe (1) und die diskreten Ein-
gangsgröße zylinderselektiv dem jeweiligen
dem jeweiligen Regler-Baustein (C8n) des
Druckregelventils (8) ausgibt,

- wobei die Regler-Bausteine (C1n, C8n) jeweils
zylinderselektiv mit einem Vorsteuer-Baustein
(D) verknüpft sind, wodurch mittels des Vorsteu-
er-Bausteins (D) und der aufgeschalteten zylind-
erselektiven Regler-Bausteine (C1, C8) pum-
pensynchron je Segment die Stellgrößen für die
Hochdruckpumpe (1) und das Druckregelventil
(8) einem Ausgabe-Baustein (E8) zugeführt und
berechnet werden, und den Stellgliedern (E1,
E8) der Hochdruckpumpe (1) und des Druckre-
gelventils (8) zur volumenbasierten zylinderse-
lektiven Einstellung des Raildrucks ($p_{7\text{Soll}}$) zu-
geführt werden.

17. Kraftstoffversorgungssystem (100) nach Anspruch
15 oder 16, **dadurch gekennzeichnet, dass** das
Kraftstoffversorgungssystem (100) einen Beobach-
ter-Baustein (W) umfasst, der eine Signalverarbei-
tungskette ($\frac{1}{Ls+R}$, HW, SW) zur Stromerfassung
und Stromregelung der Stellglieder (1, 8) des Kraft-
stoffversorgungssystems (100) beobachtet.

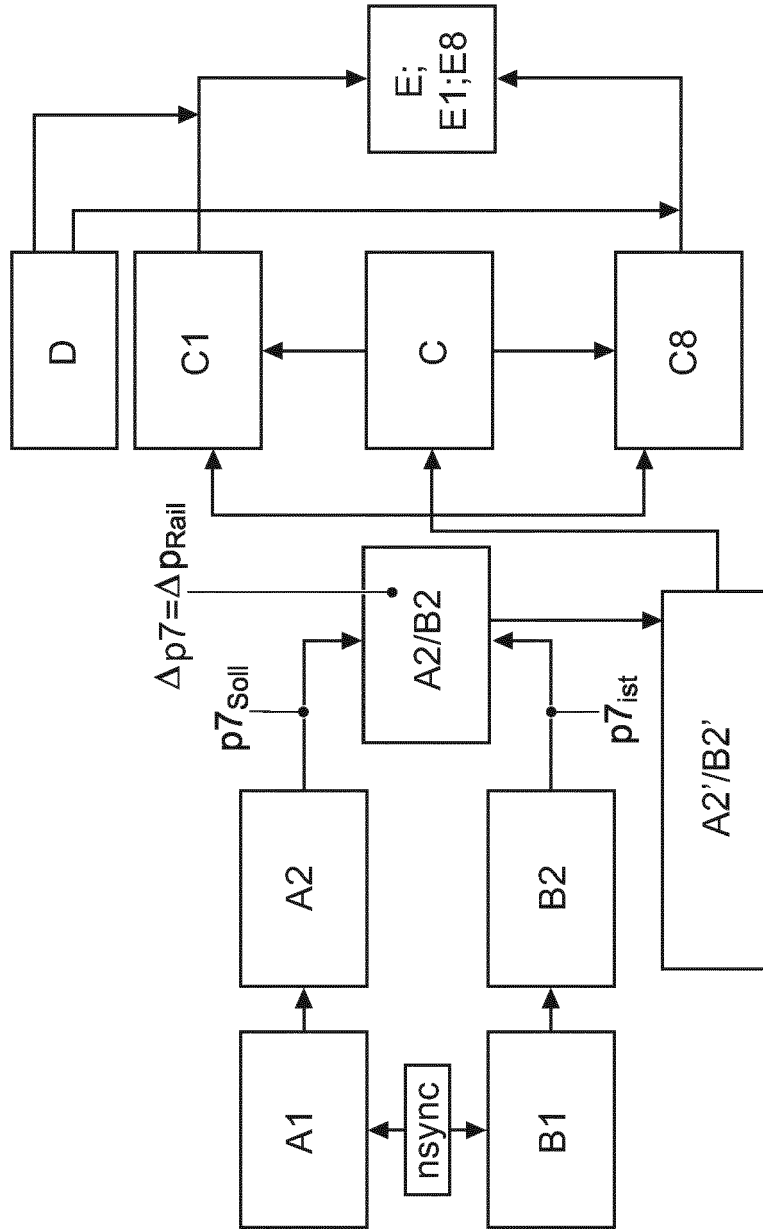


Fig. 2A

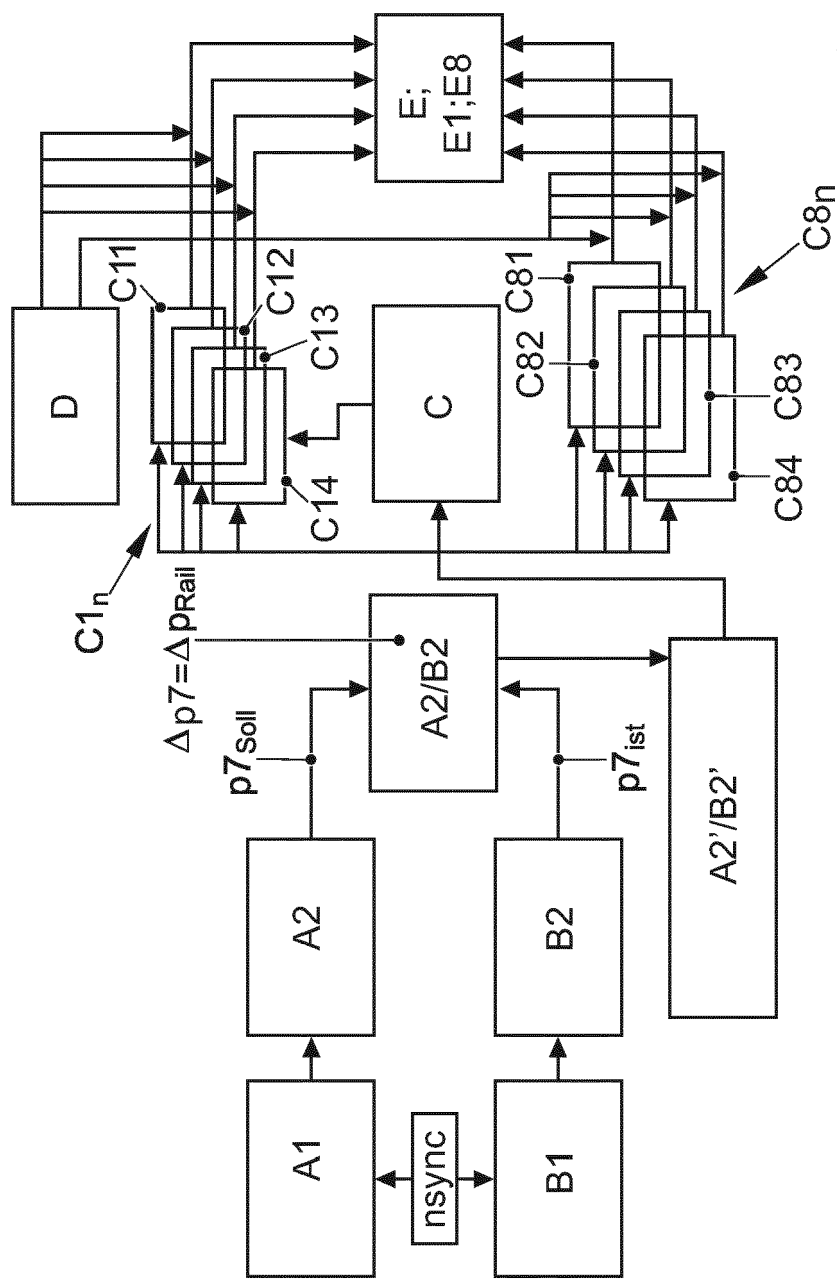


Fig. 2B

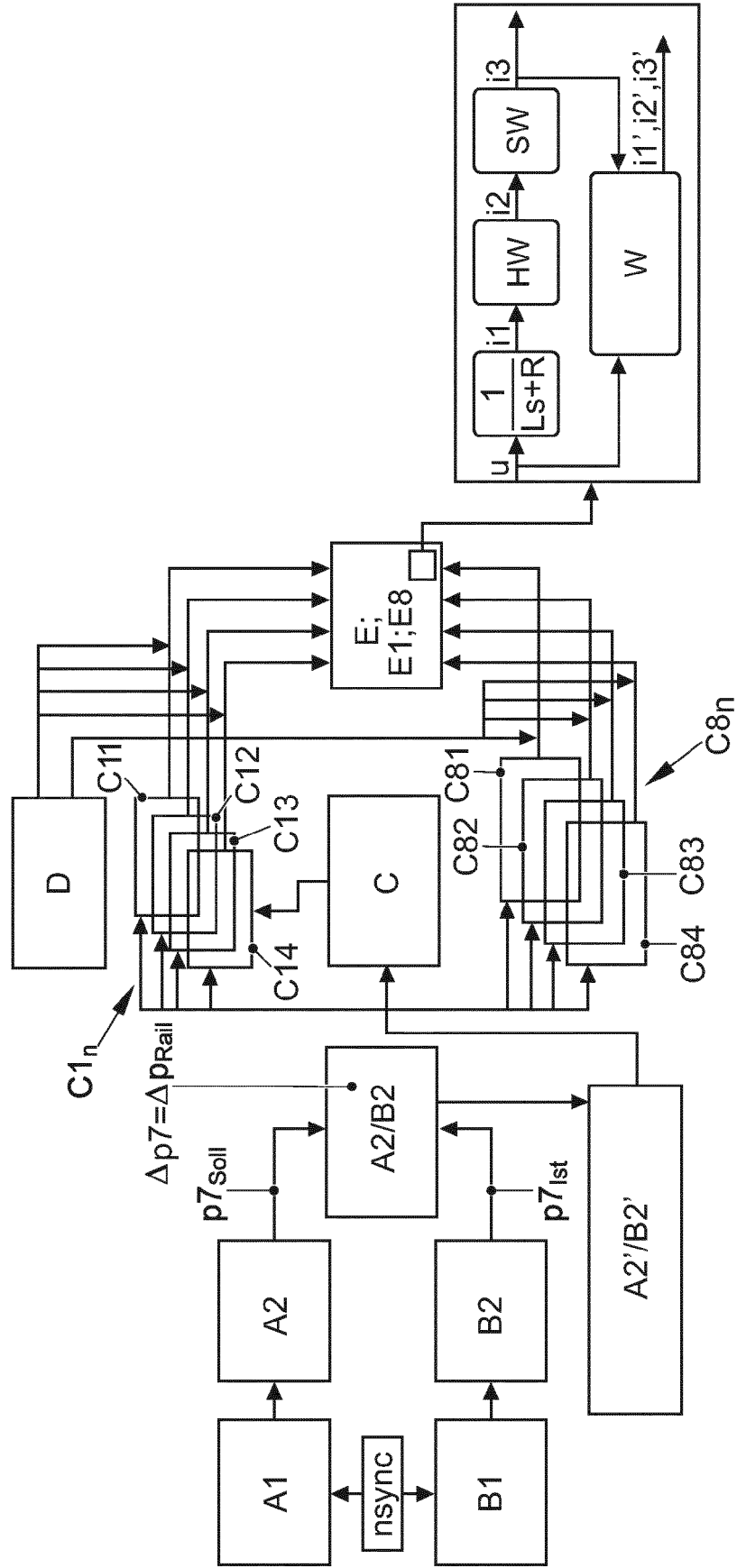


Fig. 3



EUROPÄISCHER RECHERCHENBERICHT

Nummer der Anmeldung
EP 20 18 4711

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

EINSCHLÄGIGE DOKUMENTE			
Kategorie	Kennzeichnung des Dokuments mit Angabe, soweit erforderlich, der maßgeblichen Teile	Betrifft Anspruch	KLASSIFIKATION DER ANMELDUNG (IPC)
Y,D A	DE 10 2016 204386 A1 (BOSCH GMBH ROBERT [DE]) 21. September 2017 (2017-09-21) * Absätze [0006] - [0020], [0030] - [0031]; Abbildungen 1,2 *	1,2,4,5,9 3,6-8,10-17	INV. F02D41/38 F02D41/00
Y	EP 1 710 638 A1 (HONDA MOTOR CO LTD [JP]) 11. Oktober 2006 (2006-10-11) * Absätze [0037] - [0039], [0050] - [0055]; Abbildung 1 *	1,2,4,5,9	ADD. F02D41/14 F02M59/36 F02M63/02
Y	DE 10 2011 004031 A1 (CONTINENTAL AUTOMOTIVE GMBH [DE]) 16. August 2012 (2012-08-16) * Absätze [0006] - [0012] *	9	
A	DE 10 2016 211128 A1 (BOSCH GMBH ROBERT [DE]) 28. Dezember 2017 (2017-12-28) * Absätze [0030] - [0033]; Abbildung 1 *	1,15,16	
A	DE 10 2008 041577 A1 (DENSO CORP [JP]) 9. April 2009 (2009-04-09) * Absätze [0069] - [0088]; Abbildungen 6,7 *	1,15,16	RECHERCHIERTE SACHGEBIETE (IPC) F02D F02M
Der vorliegende Recherchenbericht wurde für alle Patentansprüche erstellt			
Recherchenort Den Haag		Abschlußdatum der Recherche 6. November 2020	Prüfer Deseau, Richard
KATEGORIE DER GENANNTEN DOKUMENTE X : von besonderer Bedeutung allein betrachtet Y : von besonderer Bedeutung in Verbindung mit einer anderen Veröffentlichung derselben Kategorie A : technologischer Hintergrund O : nichtschriftliche Offenbarung P : Zwischenliteratur		T : der Erfindung zugrunde liegende Theorien oder Grundsätze E : älteres Patentedokument, das jedoch erst am oder nach dem Anmeldedatum veröffentlicht worden ist D : in der Anmeldung angeführtes Dokument L : aus anderen Gründen angeführtes Dokument & : Mitglied der gleichen Patentfamilie, übereinstimmendes Dokument	

EPO FORM 1503 03.82 (P04C03)

**ANHANG ZUM EUROPÄISCHEN RECHERCHENBERICHT
 ÜBER DIE EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG NR.**

EP 20 18 4711

5 In diesem Anhang sind die Mitglieder der Patentfamilien der im obengenannten europäischen Recherchenbericht angeführten Patentdokumente angegeben.
 Die Angaben über die Familienmitglieder entsprechen dem Stand der Datei des Europäischen Patentamts am
 Diese Angaben dienen nur zur Unterrichtung und erfolgen ohne Gewähr.

06-11-2020

10	Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
	DE 102016204386 A1	21-09-2017	KEINE	

15	EP 1710638 A1	11-10-2006	CN 1854501 A	01-11-2006
			DE 602006000128 T2	17-01-2008
			EP 1710638 A1	11-10-2006
			JP 4376202 B2	02-12-2009
			JP 2006291764 A	26-10-2006
			US 2006229794 A1	12-10-2006
20	-----			
	DE 102011004031 A1	16-08-2012	KEINE	

	DE 102016211128 A1	28-12-2017	KEINE	

25	DE 102008041577 A1	09-04-2009	DE 102008041577 A1	09-04-2009
			JP 4591490 B2	01-12-2010
			JP 2009057885 A	19-03-2009

30				
35				
40				
45				
50				
55				

EPO FORM P0461

Für nähere Einzelheiten zu diesem Anhang : siehe Amtsblatt des Europäischen Patentamts, Nr.12/82

IN DER BESCHREIBUNG AUFGEFÜHRTE DOKUMENTE

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

In der Beschreibung aufgeführte Patentdokumente

- DE 102016204386 A1 [0002]