

(19)



(11)

EP 3 721 071 B1

(12)

EUROPÄISCHE PATENTSCHRIFT

(45) Veröffentlichungstag und Bekanntmachung des Hinweises auf die Patenterteilung:
28.12.2022 Patentblatt 2022/52

(51) Internationale Patentklassifikation (IPC):
F02M 65/00 ^(2006.01) **G01B 11/25** ^(2006.01)
B05B 12/08 ^(2006.01)

(21) Anmeldenummer: **18789061.1**

(52) Gemeinsame Patentklassifikation (CPC):
F02M 65/001; B05B 12/082

(22) Anmeldetag: **15.10.2018**

(86) Internationale Anmeldenummer:
PCT/EP2018/078014

(87) Internationale Veröffentlichungsnummer:
WO 2019/110169 (13.06.2019 Gazette 2019/24)

(54) **VERFAHREN UND VORRICHTUNG ZUR CHARAKTERISIERUNG DES EINSPRITZVERHALTENS EINES EINSPRITZVENTILS FÜR FLÜSSIGKEITEN**

METHOD AND DEVICE FOR CHARACTERIZING THE INJECTION BEHAVIOR OF AN INJECTION VALVE FOR LIQUIDS

PROCÉDÉ ET DISPOSITIF PERMETTANT DE CARACTÉRISER LE COMPORTEMENT À L'INJECTION D'UNE SOUPEPE D'INJECTION DE LIQUIDES

(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

- **BOERNER, Markus**
70437 Stuttgart (DE)
- **HARTUNG, Iris**
73614 Schorndorf (DE)

(30) Priorität: **08.12.2017 DE 102017222234**

(56) Entgegenhaltungen:
DE-A1-102011 007 611 DE-A1-102015 217 940
FR-A1- 2 719 871 JP-A- 2001 050 866

(43) Veröffentlichungstag der Anmeldung:
14.10.2020 Patentblatt 2020/42

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

- **HAEYOUNG JEONG ET AL:** "Investigation of the spray characteristics for a secondary fuel injection nozzle using a digital image processing method", **MEASUREMENT SCIENCE AND TECHNOLOGY.**, Bd. 18, Nr. 5, 3. April 2007 (2007-04-03), Seiten 1591-1602, XP055543025, GB ISSN: 0957-0233, DOI: 10.1088/0957-0233/18/5/051

- (72) Erfinder:
- **MAJER, Clemens**
74379 Ingersheim (DE)
 - **SANDER, Wolfgang**
71287 Weissach (DE)
 - **MUELDERS, Stefan**
70825 Muenchingen (DE)

EP 3 721 071 B1

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

Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Charakterisierung des Einspritzverhaltens eines Einspritzventils für Flüssigkeiten sowie eine Vorrichtung zur Durchführung eines derartigen Verfahrens.

5

Stand der Technik

[0002] Zur Funktionsprüfung bzw. Charakterisierung von Einspritzventilen, insbesondere von Common-Rail-Injektoren, ist in der Regel eine genaue Messung von Kenngrößen wie z.B. der Einspritzrate bei Einzel- oder Mehrfacheinspritzungen erforderlich, um beispielsweise Spritzbeginn und Spritzende eines Einspritzvorgangs erkennen zu können. Dazu werden z.T. unterschiedliche Messtechniken eingesetzt, unter denen die Erfassung von primären Kenngrößen wie der Einspritzrate basierend auf der Messung von Druck und Schallgeschwindigkeit in einer Messkammer relativ häufig eingesetzt wird. Bei diesem Stand der Technik ist jedoch eine relativ aufwendige Drucksensorsignalkonditionierung mittels einer Tiefpassfilterung nötig, um Störsignaleinflüsse aufgrund von Eigenschwingungen der Messkammer zu kompensieren.

10

15

[0003] Aus der DE 10 2011 007 611 A1 sind eine Vorrichtung und ein Verfahren zur Ermittlung zumindest der Spritzmenge und/oder der Spritzrate einer mit einem Ventil verspritzten Flüssigkeit bekannt. Die Vorrichtung weist eine Messkammer und eine Schnittstelle zur Aufnahme des Ventils, zumindest einen Sensor zum Messen eines in der Messkammer herrschenden Zustandes, sowie eine mit dem Sensor verschaltete Auswerteeinrichtung zur Bestimmung der Spritzmenge und/oder der Spritzrate zumindest in Abhängigkeit von dem gemessenen Zustand auf. Die Vorrichtung sowie das Verfahren zur Ermittlung der Spritzmenge und/oder der Spritzrate ermöglichen es, gleichzeitig einen weiteren Parameter der Flüssigkeit zu ermitteln und zu bewerten. Dieser weitere Parameter ist das Strahlbild der verspritzten Flüssigkeit und wird von einer Einrichtung zur Strahlbilderfassung der verspritzten Flüssigkeit aufgenommen. Hierfür wird eine optische Kammer verwendet, wobei das Strahlbild simultan zu der Spritzmenge und/oder der Spritzrate von der Auswerteeinrichtung ermittelt und bewertet wird.

20

25

[0004] FR 2 719 871 A1, DE 10 2015 217940 A1, sowie JP 2001 050866 A offenbaren weitere bildgebende Strahlanalyseverfahren.

Offenbarung

30

Vorteile der Erfindung

[0005] Das Verfahren mit den Merkmalen des Patentanspruchs 1 hat den Vorteil, dass es relativ einfach und kostengünstig realisierbar ist und zudem quantitative Resultate liefert. Dazu umfasst das Verfahren die Schritte des Einspritzens von Flüssigkeit durch das Einspritzventil in eine Messkammer, des Einstrahlens von Licht in die Messkammer auf von dem Einspritzventil als Sprühmuster ausgestoßene Flüssigkeit, des Detektierens und Ab tastens von zeitlich aufeinanderfolgenden Strahlbildern, die von an Grenzflächen des vom Einspritzventil ausgestoßenen Sprühmusters reflektiertem und auf eine Aufnahmeeinrichtung abgebildetem Licht erzeugt werden, um orts aufgelöste Intensitätsverteilungen zu erhalten, des Auswertens der zu den detektierten und abgetasteten Strahlbildern jeweils zugeordneten Intensitätsverteilungen, wobei in den jeweiligen Intensitätsverteilungen solche Bildmatrixelemente identifiziert werden, welche dem abgebildeten Sprühmuster zugeordnete Bildinformationen enthalten, und anhand der jeweils identifizierten Bildmatrixelemente bzw. Pixel und deren Zeitentwicklung ein Maß für das Einspritzverhalten ermittelt wird. Der Erfindung liegt mithin die Erkenntnis zugrunde, dass bei geeignetem Messkammerdruck an einer Phasengrenze zwischen einer einen Einspritzvorgang darstellenden Gasphase/Flüssigkeitsphase und einer in der Messkammer befindlichen Flüssigphase/Gasphase reflektiertes und dann als optische Momentaufnahme abgebildetes Licht einen zeitlich "eingefrorenen" Zustand des Einspritzverhaltens darstellt, da beim Einspritzvorgang in die mit dem flüssigen Medium gefüllte Messkammer eine sich als Sprühmuster manifestierende Kavitation auftritt, so dass Öffnen und Schließen des Einspritzventils eindeutig mit dem Auftreten und Verschwinden von Kavitation korreliert ist; die Auswertung von derart "eingefrorenen" Momentaufnahmen eines Kavitationsereignisses gibt somit Aufschluss über dessen zeitliche Entwicklung, woraus eine Kenngröße zur Charakterisierung des Einspritzverhaltens ableitbar ist. Mithin ist es möglich, Beginn und Ende eines Einspritzvorgangs aufgrund der dann auftretenden abrupten Änderungen der Intensitätsverteilungen der Strahlbilder eindeutig zu bestimmen. Das erfindungsgemäße Verfahren ist aufgrund der zugrundeliegenden optischen Messtechnik weitgehend unempfindlich gegenüber Eigenschwingungen der Messkammer. Weitere vorteilhafte Weiterbildungen und Ausgestaltungen der Erfindung ergeben sich durch die in den Unteransprüchen aufgeführten Maßnahmen.

35

40

45

50

55

[0006] Die Erfindung besteht weiterhin darin, dass als Maß für das Einspritzverhalten eine als Kenngröße dienende relative Einspritzrate anhand der nachstehenden Beziehung

$$n(t) = \frac{\sum_{j=1}^m [(I(P_j, t) \geq G) * K_j(I(P_j, t))]}{\sum_{j=1}^m [K_j(I(P_j, t))]}$$

5

10

ermittelt wird, wobei mit $n(t)$ die relative Einspritzrate in funktionaler Abhängigkeit von der Zeit t , mit G ein zwischen hohen und demgegenüber deutlich niedrigeren Intensitätswerten liegender Grenzwert, mit $I(P_j, t)$ die Intensität eines j -ten Bildmatrixelements eines jeweiligen zur Zeit t von der Aufnahmeeinrichtung detektierten und abgetasteten Strahlbilds, mit j ein sich von 1 bis m erstreckender

15

[0007] Summationsindex, wobei m die Gesamtzahl der ausgewerteten Bildmatrixelemente darstellt und mit K_j ein jeweiliger Korrelationsfaktor bezeichnet sind, welcher einen im jeweils zugeordneten Bildmatrixelement erfassten Lichtintensitätsinformationswert $I(P_j, t)$ berücksichtigt, wobei bei der Summenbildung nur solche Bildmatrixelemente P_j berücksichtigt werden, deren Lichtintensitätswerte größer als der Grenzwert G oder gleich dem Grenzwert G sind, um dem im jeweiligen Strahlbild enthaltenen Sprühmuster zugeordnete Bildmatrixelemente zu identifizieren.

20

[0008] Zweckmäßigerweise wird die Aufnahmeeinrichtung so eingestellt, dass eine Querschnittebene des ausgestoßenen Sprühmusters als Strahlbild scharf abgebildet wird, wodurch ein zweidimensionales Abbild des Sprühmusters darstellbar ist.

25

[0009] Eine Verfahrensvariante, mit welcher ein quasi dreidimensionales Abbild eines der optischen Detektion zugrundeliegenden Sprühmusters darstellbar ist, kann darin bestehen, dass in zeitlich aufeinanderfolgend erfassten Strahlbildern verschiedene Querschnittebenen abgebildet und abgetastet werden, wobei jeweils die Brennweite der Aufnahmeeinrichtung verändert wird und/oder die Aufnahmeeinrichtung hinsichtlich ihres optischen Abstands zur Messkammer verschoben wird.

30

[0010] Eine Weiterbildung der Erfindung, mit welcher eine weitere Kenngröße zur Charakterisierung des Einspritzverhaltens optisch gewinnbar ist, kann darin bestehen, dass als Maß für das Einspritzverhalten eine Strahlausbreitungsgeschwindigkeit in einer Querschnittebene des Sprühmusters (Strahlbild) anhand der nachstehenden Beziehung

$$v(t_{i+1}) = \frac{(r_{i+1} - r_i)}{(t_{i+1} - t_i)}$$

35

ermittelt wird, wobei mit $v(t_{i+1})$ die Strahlausbreitungsgeschwindigkeit zur Zeit t_{i+1} , mit i ein Index für ein jeweils zu verarbeitendes Strahlbild, mit r_i ein Strahlausbreitungsradius zum Zeitpunkt t_i für ein i -tes Strahlbild und mit r_{i+1} ein Strahlausbreitungsradius zum Zeitpunkt t_{i+1} für ein $(i+1)$ -tes Strahlbild bezeichnet sind, wobei wenigstens zwei zeitlich aufeinanderfolgende Strahlbilder detektiert und ausgewertet werden, indem in dem i -ten Strahlbild Bildmatrixelemente identifiziert werden, welche mit nach außen weisenden Enden von Strahlkeulen eines abgebildeten Sprühmusters korrespondieren und etwa auf einem gedachten Kreisring mit einem Strahlausbreitungsradius r_i angeordnet sind, und in dem $(i+1)$ -ten Strahlbild Bildmatrixelemente identifiziert werden, welche mit den nach außen weisenden Enden von Strahlkeulen des dann abgebildeten Sprühmusters korrespondieren und etwa auf einem gedachten Kreisring mit einem Strahlausbreitungsradius r_{i+1} angeordnet sind.

40

[0011] Dabei erfolgt eine Kalibrierung der Strahlausbreitungsradien, indem eine abbildungsrelevante Gegenstandsgröße, vorzugsweise ein Düsendurchmesser des zu prüfenden Einspritzventils, und/oder ein Abbildungsmaßstab der Aufnahmeeinrichtung und/oder ein Auflösungsvermögen der Aufnahmeeinrichtung berücksichtigt wird/werden, so dass die Kenngröße in absoluten Einheiten darstellbar ist.

45

[0012] Gemäß einer vorteilhaften Ausgestaltung der Erfindung werden simultan zum optischen Detektieren von Strahlbildern hydraulische Messungen zum Ermitteln einer hydraulisch gewonnenen Kenngröße wie die Einspritzrate und/oder die Einspritzmenge in der Messkammer durchgeführt, wobei optisch gewonnene Messdaten mit hydraulisch gewonnenen Messdaten bezüglich der Kenngröße korreliert werden. Dadurch sind die hydraulisch gewonnenen Messresultate unmittelbar mittels der zeitgleich durchgeführten optischen Erkennung überprüfbar und verifizierbar, so dass bei der hydraulischen Messwerterfassung aufgrund der dafür erforderlichen Tiefpassfilterung auftretende Messartefakte erkennbar sind. Weiterhin können aus der optisch ermittelten relativen Einspritzrate $n(t)$ eine auf ein Maximum von 1 normierte Einspritzrate $F(t)$ und durch Einbeziehung der hydraulischen Messresultate eine absolute Einspritzrate $A(t)$ ermittelt werden, indem eine Skalierung über die hydraulisch gemessene Einspritzrate, welche dem Integral über der Rate entspricht, erfolgt.

50

55

[0013] Bei dem kombinierten Einsatz von optischer und hydraulischer Messwerterfassung kann als weitere Kenngröße ein Strahlimpuls zur Charakterisierung des Einspritzverhaltens ermittelt werden, wobei der Strahlimpuls aus der optisch

gewonnenen Strahlausbreitungsgeschwindigkeit $v(t_i)$ und aus einer hydraulisch gewonnenen Einspritzmenge durch jeweilige Produktbildung ermittelt wird. Zweckmäßigerweise kann aus den verschiedenen Querschnittebenen zu jedem Zeitpunkt der Einspritzung ein dreidimensionales Bild des Sprühmusters erzeugt werden. Ferner wird eine Strahlausbreitungsgeschwindigkeit entlang der Strahlachse aus dem dreidimensionalen Bild des Sprühmusters ermittelt.

5 **[0014]** Die zur Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens bestimmte Vorrichtung gemäß dem Gegenstand des Anspruchs 10 ist einfach konzipiert und liefert zuverlässig quantitative Resultate zur Charakterisierung des Einspritzverhaltens eines Einspritzventils bzw. Kraftstoffinjektors. Dazu ist vorgesehen, dass die Vorrichtung eine Auswerteeinrichtung umfasst, welche eine Datenübertragungsverbindung zur Aufnahmeeinrichtung aufweist, um von der Aufnahmeeinrichtung detektierte und abgetastete Strahlbilder zu verarbeiten und auszuwerten, wobei die Auswerteeinrichtung in von der Aufnahmeeinrichtung erfassten Intensitätsverteilungen von jeweiligen Strahlbildern solche Bildmatrixelemente identifiziert, welche einem abgebildeten Sprühmuster zugeordnete Bildinformationen enthalten, und anhand der jeweils identifizierten Bildmatrixelemente und deren Zeitentwicklung ein Maß für das Einspritzverhalten ermittelt.

10 **[0015]** Gemäß einer Ausgestaltung der Erfindung ist die Aufnahmeeinrichtung entlang ihrer optischen Achse mittels einer zugeordneten Positioniereinrichtung verfahrbar ausgebildet, um die optische Weglänge zwischen der Aufnahmeeinrichtung und der Messkammer zu verändern. Dadurch ist es möglich, nacheinander verschiedene Querschnittebenen des vom Einspritzventil ausgestoßenen Sprühmusters optisch durchzufahren und zu erfassen, um mithin eine quasi dreidimensionale Darstellung zu erzielen. Zweckmäßigerweise ist die Aufnahmeeinrichtung als Digitalkamera ausgebildet, um für jedes detektierte und abgetastete Strahlbild jeweils einen orts aufgelösten Intensitätsverlauf zu erfassen, was die Auswertung der optisch gewonnenen Daten vereinfacht und einen kompakten Aufbau der Vorrichtung ermöglicht.

20 Kurze Beschreibung der Zeichnungen

[0016] Ausführungsbeispiele der Erfindung sind in der nachfolgenden Beschreibung und in den beigefügten Zeichnungen näher erläutert. Letztere zeigen in schematisch gehaltenen Ansichten:

25 Fig. 1A eine Schnittansicht einer erfindungsgemäßen Vorrichtung, die eine Messkammer mit einem darin aufgenommenen Injektor, eine an einen optischen Zugang der Messkammer angeordnete Beleuchtungseinrichtung und eine außerhalb der Messkammer angeordnete Aufnahmeeinrichtung aufweist,

30 Fig. 1B ein Schaubild, das für eine erste und eine darauf erfolgende zweite Einspritzung jeweils während der Einspritzdauer erfasste hydraulische Messungen anhand von zwei Diagrammen und zeitlich koinzidierend dazu optisch erfasste Kavitationsbilder zusammen mit einer Impulsfolge für die Einspritzung des zu testenden Injektors und einem Steuersignal zur Ansteuerung der Beleuchtungseinrichtung darstellt, wobei die Zeitachse entlang der Abszisse verläuft und in den Diagrammen die hydraulisch erfasste Einspritzmasse und deren zeitliche Ableitung als Funktion der Zeit aufgetragen sind,

35 Fig. 2A ein Flussdiagramm mit den wesentlichen Verfahrensschritten einer ersten Ausführungsform des erfindungsgemäßen Steuerungsverfahrens,

40 Fig. 2B ein Flussdiagramm mit den wesentlichen Verfahrensschritten einer zweiten Ausführungsform des erfindungsgemäßen Steuerungsverfahrens,

45 Fig. 2C ein Flussdiagramm mit den wesentlichen Verfahrensschritten einer dritten Ausführungsform des erfindungsgemäßen Steuerungsverfahrens,

Fig. 3A ein Flussdiagramm mit den wesentlichen Verfahrensschritten einer ersten Ausführungsform des erfindungsgemäßen Auswerteverfahrens, um ein Maß für eine relative Einspritzrate eines zu testenden Injektors zu ermitteln,

50 Fig. 3B ein als Kavitationsbild optisch detektiertes Sprühmuster eines Injektors, das als Grundlage für die erste Ausführungsform des Auswerteverfahrens dient,

55 Fig. 4A ein Flussdiagramm mit den wesentlichen Verfahrensschritten einer zweiten Ausführungsform des erfindungsgemäßen Auswerteverfahrens, um ein Maß für die Strahlausbreitung in einer Bildebene eines von einem zu testenden Injektor ausgestoßenen Sprühmusters zu ermitteln,

Fig. 4B eine Projektion von zwei zeitlich unmittelbar aufeinanderfolgend detektierten Kavitationsbildern als Grundlage für die zweite Ausführungsform des Auswerteverfahrens,

Fig. 4C ein Flussdiagramm mit den wesentlichen Verfahrensschritten einer dritten Ausführungsform des erfindungsgemäßen Auswerteverfahrens, um ein Maß für die Strahlausbreitung entlang der Strahlachse eines von einem zu testenden Injektor ausgestoßenen Sprühmusters zu ermitteln,

5 Fig. 4D ein Schema zur groben Veranschaulichung des prinzipiellen zeitlichen Divergenzverhaltens eines vom Injektor ausgestoßenen Sprühmusters, das anhand seines zu verschiedenen Zeitpunkten jeweils zugeordneten Außenradius vereinfachend und skizzenhaft dargestellt ist, als Berechnungsgrundlage für die zu ermittelnde Strahlausbreitungsgeschwindigkeit,

10 Fig. 4E ein Schema zur Veranschaulichung des prinzipiellen zeitlichen Divergenzverhaltens eines vom Injektor ausgestoßenen Sprühmusters als Berechnungsgrundlage für die zu ermittelnde Strahlausbreitungsgeschwindigkeit in einer einzigen Bildebene,

15 Fig. 5A eine anhand eines Kavitationsbilds veranschaulichte Auswertemaske zur Auswertung, um unerwünschte Reflexionen an der Messkammerwand bei der Auswertung zu unterdrücken,

Fig. 5B eine anhand eines Kavitationsbilds veranschaulichte Auswertemaske, die bei der Auswertung eingesetzt wird, um strahlfremde Reflexionsanteile zu unterdrücken,

20 Fig. 5C eine anhand eines Kavitationsbilds veranschaulichte Auswertemaske, die zur Auswertung eingesetzt wird, um selektiv einzelne Strahlkeulen im Kavitationsbild zu analysieren, sowie

25 Fig. 6 ein gemäß dem erfindungsgemäßen Verfahren erfasstes und ausgewertetes Messdiagramm, bei dem entlang der Ordinate eine normierte Einspritzrate $F(t)$ aufgetragen ist, während entlang der Abszisse die Zeitachse verläuft, wobei Gruppen von optisch erfassten Messdaten dargestellt sind, indem der Anteil heller Bildmatrixelemente einzelner Sensorbilder einer zeitlichen Sequenz in funktionaler Abhängigkeit von der Aufnahmezeit der Aufnahmeeinrichtung während eines Einspritzvorgangs dargestellt sind, und im Vergleich dazu eine gleichzeitig hydraulisch erfasste Messkurve dargestellt ist.

30 Beschreibung der Ausführungsformen

[0017] Fig. 1A veranschaulicht in einer stark schematisch gehaltenen Schnittansicht die im Ganzen mit 10 bezeichnete Vorrichtung, welche eine Messkammer 11 und eine optische Aufnahmeeinrichtung 12 sowie eine Beleuchtungseinrichtung 13 aufweist. Die Messkammer 11 dient zum Prüfen von Injektoren und weist ein Gehäuse 14 auf, das zur Aufnahme eines zu prüfenden Injektors 15 vorgesehen ist, welcher mittig in einer dafür vorgesehenen Öffnung in einer oben angeordneten Wandung des Gehäuses 14 eingesetzt ist, so dass das mit Spritzlöchern versehene Injektorende in die Messkammer 11 hineinragt.

[0018] In dem Gehäuse 14 sind ein Drucksensor 16 und eine Ultraschallwandlereinrichtung 17 aufgenommen, welche aus einer Ultraschallquelle und einem Ultraschallsensor gebildet ist. Dadurch weist die Messkammer 11 eine Funktionalität als hydraulischer Druckanstiegsanalysator auf; wenn der Injektor 15 durch seine Einspritzöffnungen bzw. Spritzlöcher Flüssigkeit in die mit Flüssigkeit gefüllte Messkammer 11 einspritzt und dadurch der Druck in der Messkammer 11 ansteigt, kann in herkömmlicher Weise durch gleichzeitige Messung des Drucks und der Schallgeschwindigkeit in der Messkammer 11 mittels des Drucksensors 16 und der Ultraschallwandlereinrichtung 17 eine charakteristische Kenngröße des Injektors, nämlich die Einspritzrate, ermittelt werden.

[0019] Indem die Beleuchtungseinrichtung 13 und die optische Aufnahmeeinrichtung 12 mit der Messkammer 11 zusammenwirken, weist die Vorrichtung 10 eine optische Sensorfunktionalität auf, um das beim Einspritzvorgang an den Spritzlöchern des Injektors 15 als Querschnittebene des Sprühmusters 18 durch den dort austretenden Kraftstoff erzeugte Strahlbild 30 optisch zu detektieren und mittels einer nicht dargestellten Auswerteeinrichtung quantitativ zu analysieren. Dazu weist das Gehäuse 14 auf seiner dem Injektor 15 gegenüberliegend angeordneten Bodenseite 14' einen etwa mittig darin aufgenommenen optischen Zugang 20 auf, der als optisch transparentes Fenster ausgebildet ist. Die Beleuchtungseinrichtung 13 ist als ringförmige Leuchtdiodenanordnung (LED-Anordnung) ausgebildet und außenseitig derart an der Bodenseite 14' des Gehäuses 14 angeordnet, dass die Ringinnenfläche der LED-Anordnung 13 einen aus der Bodenseite 14' herausragenden Abschnitt des optischen Fensters 20 umschließt. Von der ringförmigen LED-Anordnung 13 abgestrahltes Licht gelangt dann über das optische Fenster 20 in die Messkammer 11. Um unerwünschte Reflexionen des in die Messkammer abgestrahlten Lichts an der Innenwandung der Messkammer 11 weitestgehend zu unterdrücken, ist die Innenwandung der Messkammer 11 geschwärzt ausgebildet, so dass in die Messkammer 11 eingestrahlichtes Licht im Wesentlichen an Phasengrenzen reflektiert wird, welche durch Kavitation während des Einspritzvorgangs aus den Spritzlöchern des zu prüfenden Injektors 15 in Form von Strahlkeulen entstehen und

ein Sprühmuster 18 bilden. Zumindest ein Teil des daran zurückgeworfenen bzw. reflektierten Lichts tritt durch das optische Fenster 20 und durch den Innenring der LED-Anordnung 13 hindurch nach außen und wird dann über einen Umlenkspiegel 21 um 90° umgelenkt, um von einer Aufnahmeeinrichtung 12 als Strahlbild bzw. Kavitationsbild 30 detektiert zu werden, wobei ein vorgeordnetes Objektiv 22 das vom Umlenkspiegel 21 her einfallende Lichtstrahlenbündel auf einen Bildsensor (nicht dargestellt) der Aufnahmeeinrichtung 12 abbildet, welche im Ausführungsbeispiel als Hochgeschwindigkeits-Digitalkamera mit einem CMOS- bzw. CCD-("charge coupled device")-Array als Bildsensor ausgebildet ist. Zweckmäßigerweise sind dabei die ringförmige LED-Anordnung 13, das optische Fenster 20 und der Injektor 15 konzentrisch zueinander entlang der Längsachse 11' der Messkammer 11 angeordnet. Die Aufnahmeeinrichtung 12 ist zusammen mit dem vorgeordneten Objektiv 22 auf einem Positionierschlitten 24 befestigt, der entlang einer Führung 25 horizontal verschiebbar ausgebildet ist, um die Bildebene der Aufnahmeeinrichtung 12 unabhängig von deren Fokuseinstellung variieren zu können. Eine Steuer- und Auswerteeinrichtung (nicht dargestellt) dient einerseits zum Ansteuern des Positionierschlittens 24, zur Steuerung des Einspritzverhaltens des Injektors 15, zur gepulsten Steuerung der Lichtemission der LED-Anordnung und zum darauf zeitlich abgestimmten Aufnahmeverhalten der Aufnahmeeinrichtung 12 und andererseits zur Auswertung der vom Bildsensor der Aufnahmeeinrichtung 12 detektierten Lichtintensitäten; dazu ist die Steuer- und Auswerteeinrichtung über Steuer- und Datenleitungen (nicht dargestellt) mit einer Steuerelektronik des Injektors, mit der LED-Anordnung, mit der Aufnahmekamera und deren Objektiv und einer Steuerelektronik des Positionierschlittens elektrisch verbunden. Außerdem führt die Steuer- und Auswerteeinrichtung eine Korrelation der optisch gewonnenen Daten mit den dazu simultan aus der Druck- und Schallgeschwindigkeitsmessung hydraulisch gewonnenen Daten durch.

[0020] Fig. 1B zeigt ein Schaubild 27, in welchem mit der erfindungsgemäßen Vorrichtung 10 erzielte Messungen dargestellt sind, die einerseits hydraulisch erfasste Messungen in zwei Diagrammen 28, 28' für zwei zeitlich aufeinanderfolgende Einspritzungen des zu testenden Injektors und jeweils zeitlich dazu korrelierte und optisch erfasste Kavitationsbilder 30', 30" umfassen. In den beiden Diagrammen 28, 28' sind die anhand des in der Messkammer laufend gemessenen Drucks p und der gemessenen Schallgeschwindigkeit c ermittelte Einspritzmasse m und die Einspritzrate dm/dt als Funktion der Zeit t während einer Mehrfacheinspritzung bestehend aus beispielsweise dargestellter Vor-, Haupt- und Nacheinspritzung dargestellt. Jedem der beiden Diagramme 28, 28' ist eine Steuerimpulsfolge zugeordnet, mit welcher die Einspritzung des Injektors steuerbar ist, indem für die Voreinspritzung beispielsweise ein dreieckförmiger Sägezahnimpuls 29, für die Haupteinspritzung ein trapezförmiger Impuls 29' und für die Nacheinspritzung ein trapezförmiger Impuls 29" von gegenüber der Haupteinspritzung kürzerer Impulsdauer verwendet wird. Ferner ist zu jedem der beiden Diagramme 28, 28' ein Steuersignal 39 zur Ansteuerung der Leuchtdioden der Beleuchtungseinrichtung dargestellt, mit dem eine synchron zur Einspritzung erfolgende Beleuchtung der Messkammer bewirkt wird, wobei das Steuersignal eine im Wesentlichen rechteckförmige Impulsform aufweist, deren Impulslänge so bemessen ist, dass diese sich über die Vor-, Haupt- und Nacheinspritzung erstreckt. Wie Fig. 1B weiterhin veranschaulicht, ist ein Kavitationsereignis desto ausgeprägter, je höher die Einspritzrate dm/dt ist, denn das zeitgleich mit einer Voreinspritzung aufgezeichnete Kavitationsbild 30' ist deutlich schwächer ausgeprägt als das während einer Haupteinspritzung bei hoher Einspritzrate aufgezeichnete Kavitationsbild 30", dessen in radialer Richtung verlaufende Strahlkeulen demgegenüber eine deutlich längere Reichweite aufweisen.

[0021] Fig. 2A zeigt anhand eines stark schematisch gehaltenen Flussdiagramms 100 die wesentlichen Verfahrensschritte des erfindungsgemäßen Steuerungsverfahrens gemäß einer ersten Verfahrensvariante, die dazu dient, verschiedene Vorrichtungskomponenten, d.h. die Aufnahmekamera, deren Objektiv und die LED-Anordnung mit dem Einspritzvorgang des zu testenden Injektors zu synchronisieren. In einem ersten Verfahrensschritt 101 wird ein Steuerimpuls synchron an die Elektronik des Injektors 15, die LED-Anordnung 13, die Aufnahmekamera 12, das Objektiv 22 übermittelt, so dass der Injektor 15 Kraftstoff aus seinen Spritzlöchern ausstößt und in die Messkammer 11 injiziert; gleichzeitig emittiert der LED-Ring 13 einen Lichtimpuls, stellt das Objektiv 22 Blende und Fokus ein und öffnet die Aufnahmekamera 12 für eine vorbestimmte Belichtungszeit ihren Verschluss, damit Licht, das von dem LED-Ring 13 emittiert, an der Phasengrenze des von dem Injektor als Sprühmuster 18 ausgestoßenen Kraftstoffs reflektiert wird, aus der Messkammer 11 über das optische Fenster 20, den Umlenkspiegel 21 und das Objektiv 22 auf den Bildsensor der Aufnahmekamera 12 gelangt bzw. abgebildet wird. In einem zweiten Verfahrensschritt 102, welcher noch während der Belichtungsphase erfolgt, wird die Bildebene des Objektivs 11 auf die Ebene der Spritzlöcher des Injektors 15 scharfgestellt, um das beim Einspritzvorgang des Injektors typischerweise erzeugte Sprühmuster bzw. Kavitationsbild scharf auf den Bildsensor abzubilden. Nach diesen beiden Justageschritten 101 und 102 wird, um eine Sequenz von zeitlich aufeinanderfolgenden Einzelbildern zu starten, in einem daran anschließenden Verfahrensschritt 103 erneut ein Steuerimpuls an die Elektronik des Injektors 15, die LED-Anordnung 13 und an die Aufnahmekamera 12 abgegeben, worauf in einem folgenden Verfahrensschritt 104 ein erstes Einzelbild erfasst wird. In einem nächsten Verfahrensschritt 105 wird das unmittelbar zuvor aktuell erfasste Einzelbild als Bildmatrix mit Bildmatrizelementen bzw. Pixel, in denen die jeweiligen Lichtintensitäten erfasst sind, auf einem Speichermedium abgespeichert. In einem daran anschließenden Prüfschritt 106 wird laufend abgefragt, ob die voreingestellte Sequenz von Einzelbildern schon abgearbeitet ist, wobei bei negativem Abfrageresultat ein Rücksprung zu Schritt 103 erfolgt und die Prozedur mit den Schritten 104 und 105 zum Erfassen und Abspeichern

eines jeweils nächsten Einzelbilds innerhalb einer Schritte 103 bis 106 umfassenden Schleife, unter Inkrementierung eines Schleifenindex um einen Zähler 1 zyklisch durchlaufen wird, während demgegenüber bei positivem Abfrageresultat, d.h. wenn eine Sequenz von Einzelbildern erfasst und abgespeichert ist, die Schleife beendet bzw. verlassen wird, um in einem anschließenden Verfahrensschritt 107 einen Sprung in ein Auswerteverfahren einzuleiten. Die bei dieser Ausführungsform des Steuer- und Messdatenerfassungsverfahrens gewonnenen Einzelbilder sind aufgrund der optischen Vorrichtungskonfiguration Querschnitte durch die vom Injektor erzeugte Kavitation entlang der am Objektiv 22 konstant eingestellten Bildebene.

[0022] Fig. 2B zeigt anhand eines stark schematisch gehaltenen Flussdiagramms 100' die wesentlichen Verfahrensschritte des erfindungsgemäßen Steuerungsverfahrens gemäß einer zweiten Verfahrensvariante, die dazu dient, verschiedene Vorrichtungskomponenten, d.h. die Aufnahmekamera, deren Objektiv und die LED-Anordnung und den Positionierschlitten mit dem Einspritzvorgang des zu testenden Injektors zu synchronisieren. Im Unterschied zur ersten Ausführungsform des Steuer- und Messdatenerfassungsverfahrens 100 wird bei der zweiten Ausführungsform des Steuerungsverfahrens 100' zusätzlich noch der Positionierschlitten 24 angesteuert, um die darauf befestigte Aufnahmekamera 12 zusammen mit vorgeordnetem Objektiv 22 unabhängig von der eingestellten Objektivbrennweite entlang der Führungsschiene 25 verfahren zu können. In einem initialisierenden Verfahrensschritt 101' wird der Positionierschlitten in eine Anfangs- bzw. Startposition gefahren. Daraufhin wird in einem nächsten Verfahrensschritt 102' ein Steuerimpuls synchron an die Elektronik des zu testenden Injektors 15, die LED-Anordnung 13, die Aufnahmekamera 12, und deren Objektiv 22 abgegeben, so dass der Injektor 15 Kraftstoff aus seinen Spritzlöchern ausstößt und in die Messkammer 11 injiziert; gleichzeitig emittiert der LED-Ring 13 einen Lichtimpuls, stellt das Objektiv 22 Blende und Fokus ein und öffnet die Aufnahmekamera 12 für eine vorbestimmte Belichtungszeit ihren Verschluss, damit Licht, das von dem LED-Ring 13 emittiert, an der Phasengrenze des von dem Injektor als Sprühmuster 18 freigesetzten Kraftstoffs reflektiert und aus der Messkammer 11 über die optischen Komponenten 20, 21, und 22 auf den Bildsensor der Aufnahmekamera 12 gelangt bzw. abgebildet wird. In einem noch während der Belichtungsphase erfolgenden Verfahrensschritt 103' wird die Bildebene des Objektivs 22 auf die Ebene der Spritzlöcher des Injektors 15 scharfgestellt, um das beim Einspritzvorgang des Injektors typischerweise erzeugte Sprühmuster als Kavitationsbild scharf auf den Bildsensor abzubilden. Nach diesen Justageschritten 101', 102' und 103' wird, um eine Sequenz von zeitlich aufeinanderfolgenden Einzelbildern zu starten, in einem daran anschließenden Verfahrensschritt 104' ein Steuerimpulssignal an die Elektronik des Injektors 15, an die LED-Anordnung 13, an die Aufnahmekamera 12 und an das Objektiv abgegeben, worauf in einem unmittelbar folgenden Verfahrensschritt 105' ein Einzelbild erfasst und in einem weiteren Verfahrensschritt 106' als Bildmatrix in einem Speichermedium abgespeichert wird. Nach dem Abspeichern 106' wird in einem daran anschließenden Verfahrensschritt 107' ein Steuerimpulssignal an die Positioniereinrichtung bzw. den Positionierschlitten abgegeben, um den bei Schritt 101' auf eine Startposition x_0 eingestellten Positionierschlitten um einen Vorschub Δx zu einer neuen Position $x := x_0 + \Delta x$ zu verfahren; dadurch ändert sich die Bildebene um Δx . In einem daran anschließenden Prüfschritt 108' wird laufend abgefragt, ob die voreingestellte Sequenz schon abgearbeitet ist, wobei bei negativem Abfrageresultat ein Rücksprung zu Schritt 104' erfolgt und die Prozedur mit den Schritten 105' und 106' zum Erfassen und Abspeichern eines jeweils nächsten Einzelbilds innerhalb einer Schritte 104' bis 108' umfassenden Schleife zyklisch durchlaufen wird, wobei der Schleifenindex zum Zählen der Einzelbilder um jeweils einen Zähler von 1 erhöht bzw. inkrementiert wird, während demgegenüber bei positivem Abfrageresultat, d.h. wenn die Sequenz von Einzelbildern erfasst und abgespeichert ist, die Schleife beendet bzw. verlassen wird, um in einem anschließenden Verfahrensschritt 109' einen Sprung in ein - nachstehend noch zu erläuterndes - Auswerteverfahren einzuleiten. Da sich bei jedem Durchlauf der Schleife 104' bis 108' die Position des Positionierschlittens um jeweils ein Δx ändert, sind die bei dieser Ausführungsform des Steuer- und Messdatenerfassungsverfahrens gewonnenen Einzelbilder einer Sequenz zueinander versetzte Querschnitte, welche das vom jeweils vom in der Messkammer befindlichen Injektor erzeugte Sprühmuster sukzessive ab-rastern, so dass - im Unterschied zu der ersten Steuerungsverfahrensvariante gemäß Flussdiagramm 100 - mittels einer einzigen Sequenz das Sprühmuster des Injektors praktisch dreidimensional zu einer Zeit darstellbar ist.

[0023] Fig. 2C zeigt anhand eines stark schematisch gehaltenen Flussdiagramms 100" die wesentlichen Verfahrensschritte des erfindungsgemäßen Steuerungsverfahrens gemäß einer dritten Verfahrensvariante, die dazu dient, verschiedene Vorrichtungskomponenten, d.h. die Aufnahmekamera, deren Objektiv und die LED-Anordnung und den Positionierschlitten mit dem Einspritzvorgang des zu testenden Injektors zu synchronisieren. Im Unterschied zu der ersten Ausführungsform des Steuer- und Messdatenerfassungsverfahrens 100 wird bei der dritten Ausführungsform des Steuerungsverfahrens 100" zusätzlich noch der Positionierschlitten 24 angesteuert, um die darauf befestigte Aufnahmekamera 12 zusammen mit vorgeordnetem Objektiv 22 unabhängig von der eingestellten Objektivbrennweite entlang der Führungsschiene 25 verfahren zu können. In einem initialisierenden Verfahrensschritt 101" wird der Positionierschlitten in eine Anfangs- bzw. Startposition gefahren. Daraufhin wird in einem nächsten Verfahrensschritt 102" ein Steuerimpuls synchron an die Elektronik des zu testenden Injektors 15, die LED-Anordnung 13, die Aufnahmekamera 12, und deren Objektiv 22 abgegeben, so dass der Injektor 15 Kraftstoff aus seinen Spritzlöchern ausstößt und in die Messkammer 11 injiziert; gleichzeitig emittiert der LED-Ring 13 einen Lichtimpuls, stellt das Objektiv 22 Blende und Fokus ein und öffnet die Aufnahmekamera 12 für eine vorbestimmte Belichtungszeit ihren Verschluss, damit Licht, das von dem LED-

Ring 13 emittiert, an der Phasengrenze des von dem Injektor als Sprühmuster freigesetzten Kraftstoffs reflektiert und aus der Messkammer 11 über die optischen Komponenten 20, 21, und 22 auf den Bildsensor der Aufnahmekamera 12 gelangt bzw. abgebildet wird. In einem noch während der Belichtungsphase erfolgenden Verfahrensschritt 103" wird die Bildebene des Objektivs 22 auf die Ebene der Spritzlöcher des Injektors 15 scharfgestellt, um das beim Einspritzvorgang des Injektors typischerweise erzeugte Sprühmuster als Kavitationsbild scharf auf den Bildsensor abzubilden. Nach diesen Justageschritten 101", 102" und 103" wird, um eine Sequenz von zeitlich aufeinanderfolgenden Einzelbildern zu starten, in einem daran anschließenden Verfahrensschritt 104" ein Steuerimpulssignal an die Elektronik des Injektors 15, an die LED-Anordnung 13, an die Aufnahmekamera 12 und an das Objektiv abgegeben, worauf in einem unmittelbar folgenden Verfahrensschritt 105" ein Einzelbild erfasst und in einem weiteren Verfahrensschritt 106" als Bildmatrix in einem Speichermedium abgespeichert wird. In einem daran anschließenden Prüfschritt 107" wird laufend abgefragt, ob die voreingestellte zeitliche Sequenz von Einzelbildern einer Bildebene schon abgearbeitet ist, wobei bei negativem Abfrageresultat ein Rücksprung zu Schritt 104" erfolgt und die Prozedur mit den Schritten 105" und 106" zum Erfassen und Abspeichern eines jeweils nächsten Einzelbilds innerhalb einer Schritte 104" bis 107" umfassenden Schleife unter Inkrementierung eines Schleifenindex um einen Zähler 1 zyklisch durchlaufen wird, während demgegenüber bei positivem Abfrageresultat, d.h. wenn eine zeitliche Sequenz von Einzelbildern einer Bildebene erfasst und abgespeichert ist, die Schleife beendet bzw. verlassen wird, um in einem anschließenden Verfahrensschritt 108" ein Steuerimpulssignal an die Positioniereinrichtung bzw. den Positionierschlitten abzugeben, um den bei Schritt 101" auf eine Startposition x_0 eingestellten Positionierschlitten um einen Vorschub Δx zu einer neuen Position $x := x_0 + \Delta x$ zu verfahren; dadurch ändert sich die Bildebene um Δx . In einem daran anschließenden Prüfschritt 109" wird laufend abgefragt, ob die voreingestellte Sequenz von Bildebenen schon abgearbeitet ist, wobei bei negativem Abfrageresultat ein Rücksprung zu Schritt 104" erfolgt und die Prozedur mit den Schritten 105" und 106" zum Erfassen und Abspeichern eines jeweils nächsten Einzelbilds der nächsten Bildebene sowie deren zeitliche Sequenz innerhalb einer Schritte 104" bis 109" umfassenden Schleife zyklisch durchlaufen wird, wobei der Schleifenindex zum Zählen der Einzelbilder um jeweils einen Zähler von 1 erhöht bzw. inkrementiert wird, während demgegenüber bei positivem Abfrageresultat, d.h. wenn die Sequenz von Einzelbildern aller Bildebenen erfasst und abgespeichert ist, die Schleife beendet bzw. verlassen wird, um in einem anschließenden Verfahrensschritt 110" einen Sprung in ein - nachstehend noch zu erläuterndes - Auswerteverfahren einzuleiten. Da sich bei jedem Durchlauf der Schleife 104" bis 109" die Position des Positionierschlittens um jeweils ein Δx ändert, sind die bei dieser Ausführungsform des Steuer- und Messdatenerfassungsverfahrens gewonnenen Einzelbilder einer Sequenz zueinander versetzte Querschnitte, welche das vom jeweils in der Messkammer befindlichen Injektor erzeugte Sprühmuster sukzessive abrastern, so dass - im Unterschied zu der ersten Steuerungsverfahrensvariante gemäß Flussdiagramm 100 - mittels einer einzigen Sequenz das Sprühmuster des Injektors praktisch dreidimensional darstellbar ist.

[0024] Fig. 3A zeigt ein Flussdiagramm mit den wesentlichen Verfahrensschritten des erfindungsgemäßen Auswerteverfahrens 200 gemäß einer ersten Ausführungsform, wobei auf der Grundlage von als Kavitationsbilder optisch detektierten Sprühmustern eine jeweilige Einspritzrate des Injektors ermittelt wird. Fig. 3B zeigt exemplarisch ein derartiges Sensorbild bzw. Kavitationsbild 30, das von dem Bildsensor der Aufnahmeeinrichtung digital erfasst ist und Strahlkeulen 31 aufweist, die anhand von Bildmatrixelementen bzw. Pixeln mit hohen Lichtintensitätswerten gegenüber einem überwiegend dunklen Bildhintergrund kenntlich sind, wobei die Intensitätsverteilung innerhalb der die Strahlkeulen 31 wiedergebenden Pixel Graustufen bis beispielsweise maximal 255 bei einer 8-Bit-Tiefe umfasst. In einem ersten Verfahrensschritt 201 wird ein erstes Sensorbild aus einer Sequenz von zeitlich aufeinanderfolgend detektierten Aufnahmebildern analysiert, wobei die Bildmatrix elementweise im Hinblick auf die jeweils enthaltene bzw. abgetastete Lichtintensitätsinformation ausgelesen wird. In einem daran anschließenden Verfahrensschritt 202 wird in dem ersten Sensorbild ein Intensitätsschwellwert G festgesetzt, um eine Hell-Dunkel-Grenze innerhalb des Intensitätsverlaufs des ersten Sensorbilds festzulegen, die im Wesentlichen dazu dient, einen auf Reflexionen an der Messkammerinnenwand zurückzuführenden Störuntergrund zu unterdrücken. In einem darauf folgenden Verfahrensschritt 203 erfolgt ein Erkennen bzw. Identifizieren von denjenigen Bildmatrixelementen P_i des ersten Sensorbilds, deren zugeordnet abgespeicherter Lichtintensitätsinformationswert den vorbestimmten Intensitätsschwellwert erreicht oder überschreitet. Der sich unmittelbar daran anschließende Verfahrensschritt 204 dient zum Ermitteln einer relativen Einspritzrate einer definierten Anzahl m der zuvor erkannten Bildmatrixelemente bzw. Pixel P_i im ersten Sensorbild gemäß der nachstehend aufgeführten Gleichung:

$$n(t) = \frac{\sum_{j=1}^m [(I(P_j, t) \geq G) * K_j(I(P_j, t))]}{\sum_{j=1}^m (K_j(I(P_j, t)))} \quad \text{Gleichung (1)}$$

[0025] Dabei sind mit $n(t)$ die relative Einspritzrate in funktionaler Abhängigkeit von der Zeit t , mit P_j das j -te Pixel bzw. Bildmatrixelement eines jeweiligen von dem Bildsensor erfassten Strahlbilds mit m -Elementen, mit G ein zwischen hohen und demgegenüber niedrigeren Intensitätswerten liegender Grenzwert, mit j ein sich von 1 bis m erstreckender Summationsindex und mit K_j ein jeweiliger Korrelationsfaktor bezeichnet. Der Korrelationsfaktor berücksichtigt einen im jeweils zugeordneten Bildmatrixelement gespeichert erfassten Lichtintensitätsinformationswert $I(P_j, t)$ und bewirkt eine Normierung der Bildmatrixelementbeiträge zu $n(t)$. In der Summenbildung werden nur solche Bildmatrixelemente P_j berücksichtigt, deren Lichtintensitätsinformationswerte größer als der Grenzwert G oder gleich dem Grenzwert G sind. In einem weiteren Verfahrensschritt 205 erfolgt ein Speichern des ermittelten $n(t)$ für das erste Sensorbild zur Zeit t als Maß für die mit dem optisch detektierten Kavitationsbild korrespondierende Einspritzrate. Ein darauf erfolgreicher Verfahrensschritt 206 inkrementiert einen internen Zähler um 1 und löst einen Rücksprung zu Verfahrensschritt 201 aus, um ein nächstes Sensorbild zur Zeit $t+\Delta t$ mit dem Ziel zu analysieren, eine diesbezügliche Einspritzrate $n(t+\Delta t)$ in den sich daran anschließenden Verfahrensschritten 202 bis 205 zu ermitteln. Dieses Procedere wiederholt sich zyklisch für die übrigen Sensorbilder der Sequenz, so dass schließlich zu jedem Sensorbild zu einer Zeit t einer Aufnahmezeitpunkt eine jeweils zugeordnete Einspritzrate $n(t)$ vorliegt. In einem abschließenden Verfahrensschritt 207 wird die jeweilige Einspritzrate $n(t)$ für alle analysierten Sensorbilder dargestellt und mit dazu jeweils zeitlich koinzidierend erfassten Einspritzraten aus hydraulischer Messwerterfassung anhand des Drucks p und der Schallgeschwindigkeit c korreliert.

[0026] Fig. 4A zeigt ein Flussdiagramm 300 mit den wesentlichen Verfahrensschritten des erfindungsgemäßen Auswerteverfahrens gemäß einer zweiten Ausführungsform, was im Wesentlichen dazu dient, die Strahlausbreitungsgeschwindigkeit durch die Kavitation zu bestimmen. Dabei wird in einem Initialisierungsschritt 301 ein interner Zähler i auf Null gesetzt, worauf in einem weiteren Verfahrensschritt 302 der Zähler i um 1, d.h. $i := i + 1$ inkrementiert wird, um in einem daran anschließenden Verfahrensschritt 303 ein erstes indiziertes Sensorbild S_1 aus einer Sequenz bzw. Folge von m erfassten Sensorbildern $S_1, S_2, \dots, S_i, \dots, S_m$ zu bearbeiten bzw. auszuwerten. In einem darauf folgenden Verfahrensschritt 304 wird eine Hell/Dunkel-Intensitätsschwelle in denjenigen Bildmatrixelementen des aktuell in Bearbeitung befindlichen Sensorbilds S_i ermittelt, welche mit den sich radial nach außen wegerstreckenden Enden der Strahlkeulen eines identifizierten Kavitationsmusters korrespondieren, wobei die mit dieser Hell-Dunkel-Intensitätsschwelle assoziierten Bildmatrixelemente bzw. Pixel etwa entlang eines gedachten - radial im Sensorbild verlaufenden - Kreisrings mit Radius R_i angeordnet sind. Der daran anschließende Verfahrensschritt 305 dient dazu, einen realen Strahlausbreitungsradius r_i in Einheiten von mm auf der Basis des im vorherigen Schritt 304 ermittelten und in Einheiten des Pixelabstands berechneten R_i , des Abbildungsmaßstabs und der Objektgröße, welche im Ausführungsbeispiel der Düsendurchmesser des zu prüfenden Injektors sein kann, zu errechnen bzw. bestimmen. In einem weiteren Verfahrensschritt 306 wird der so errechnete Strahlausbreitungsradius r_i mit dem zugeordneten Aufnahmezeitpunkt t_i des aktuellen Sensorbilds i als Wertepaar abgespeichert. Da zum Durchführen eines weiteren Auswerteschritts wenigstens zwei zeitlich aufeinanderfolgende Sensorbilder zu analysieren sind, erfolgt zunächst in einem Zwischenschritt 307 eine Prüfung, ob der Zähler i größer oder gleich 2 ist, wobei bei einem Zählerstand von $i := 1$ ein Rücksprung zu Schritt 302 erfolgt, um den Zählerstand zu inkrementieren und das nächste Sensorbild in Bearbeitung zu nehmen und sodann die Schritte 304 bis 306 durchzuführen, oder andernfalls zum nächsten Verfahrensschritt 308 überzugehen. Denn in dem Verfahrensschritt 308 wird aus der Auswertung von zwei zeitlich aufeinanderfolgenden Sensorbildern S_{i+1} und S_i für die dafür jeweils ermittelten Wertepaare ein Quotient v gebildet gemäß der nachstehenden Gleichung:

$$v(t_{i+1}) = \frac{(r_{i+1} - r_i)}{(t_{i+1} - t_i)} \quad \text{Gleichung (2)}$$

[0027] Dabei sind mit $v(t_{i+1})$ der Quotient, mit r_i der für ein jeweiliges Sensorbild ermittelte Strahlradius und mit t_i der jeweilige Aufnahmezeitpunkt eines Sensorbilds bezeichnet, während r_{i+1} der für ein zeitlich nachfolgend zum Zeitpunkt t_{i+1} aufgezeichnetes Sensorbild ermittelte Strahlausbreitungsradius darstellt; somit ist Gleichung (2) aus $v = \Delta r / \Delta t$ abgeleitet. Der Quotient $v(t_{i+1})$ ist ein Maß für die zirkulare Ausbreitung der - jeweils an den radial nach außen wegweisenden Enden der Strahlkeulen einer Kavitation existierenden - Hell/Dunkel-Intensitätsschwelle zwischen jeweils zwei zeitlich unmittelbar aufeinanderfolgend erfassten Sensorbildern bzw. Aufnahmebildern und repräsentiert somit die Strahlausbreitungsgeschwindigkeit v in einer Querschnittebene, welche zum Ermitteln des entsprechenden Strahlimpulses p unter Berücksichtigung der simultan durchgeführten hydraulischen Messung der Einspritzmenge dient; zur Veranschaulichung zeigt Fig. 4B eine Projektion 26 von zwei zeitlich unmittelbar aufeinanderfolgend erfassten Kavitationsbildern, wobei der Radius der Hell-Dunkel-Intensitätsschwelle bezüglich der Enden der Strahlkeulen 31 bei dem ersten Kavitationsbild mit r_1 und bei dem zweiten Kavitationsbild mit r_2 bezeichnet ist. In einem daran anschließenden Verfahrensschritt 309 wird der zuvor jeweils ermittelte Quotient als Maß für die Strahlausbreitungsgeschwindigkeit v in einer Querschnittebene und der daraus berechnete Strahlimpuls p in einer Querschnittebene abgespeichert und dargestellt. Ein anschließender Zwischenschritt 310 dient dazu, den aktuellen Zählerstand zu überprüfen und für den Fall, dass noch nicht alle Sensor-

bilder einer Sequenz analysiert bzw. ausgewertet sind, einen Rücksprung zu Schritt 302 auszuführen; andernfalls erfolgt in einem abschließenden Schritt 311 ein Stopp dieses Verfahrensblocks 300 und ein Rücksprung in das übergeordnete Steuerverfahren.

[0028] Fig. 4C zeigt ein Flussdiagramm 300' mit den wesentlichen Verfahrensschritten des erfindungsgemäßen Auswerteverfahrens gemäß einer dritten Ausführungsform, was im Wesentlichen dazu dient, die Strahlausbreitungsgeschwindigkeit durch die Kavitation entlang der Strahlachse $v_s(t_i)$ im Gegensatz zu dem Auswerteverfahren gemäß Fig. 4A, das die Strahlausbreitungsgeschwindigkeit in einer Bildebene ermittelt, zu bestimmen. Dazu werden in einem Initialisierungsschritt 301' ein interner Zähler i und ein interner Zähler j jeweils auf Null gesetzt, d.h. $i:=0$ und $j:=0$, wobei der Zähler i als zeitlicher Index dazu dient, Einzelbildaufnahmen bzw. Sensorbilder S für eine bestimmte Bildebene in zeitlicher Hinsicht zu indizieren, während der Zähler j als Index zur räumlichen Indizierung der Einzelbildaufnahmen S dient, also eine Position bzw. Lage einer jeweiligen Bildebene von entsprechenden Einzelbildaufnahmen indiziert. Im Anschluss daran wird in Verfahrensschritten 302' und 303' zunächst der Zähler i um 1, d.h. $i:=i+1$, und dann der Zähler j um 1, d.h. $j:=j+1$, inkrementiert, um daraufhin in einem weiteren Verfahrensschritt 304' ein entsprechend indiziertes Sensorbild S_{ij} aus der Menge erfasster und abgespeicherter Sensorbilder herauszuselektieren und zu bearbeiten bzw. auszuwerten. Gemäß einem sich unmittelbar daran anschließenden Verfahrensschritt 305' wird anhand der Bildmatrixelemente des aktuell in Bearbeitung genommenen Sensorbilds S_{ij} der Radius R_{ij} (in Pixelabstandseinheiten) ermittelt, um im nächsten Verfahrensschritt 305'' daraus einen realen Strahlausbreitungsradius r_{ij} in Einheiten von mm zu berechnen. In einem weiteren Verfahrensschritt 306' wird der errechnete Strahlausbreitungsradius r_{ij} zusammen mit dem zugeordneten Aufnahmezeitpunkt t_i und der Bildebenenposition x_j des aktuell in Bearbeitung befindlichen Sensorbilds als Werte-Tupel (r_{ij}, t_i, x_j) abgespeichert. Um wenigstens zwei Sensorbilder analysieren bzw. miteinander vergleichen zu können, erfolgt in einem Zwischenschritt 307' eine Prüfung, ob der Zähler j größer oder gleich 2 ist, wobei bei negativem Resultat ein Rücksprung zu Schritt 303' erfolgt, um den Zählerstand für j um 1 zu inkrementieren und das nächste Sensorbild zu bearbeiten, wobei die Schritte 304' bis 306' erneut durchlaufend ausgeführt werden, oder andernfalls zum nächsten Verfahrensschritt 308' überzugehen. Dieser Verfahrensschritt 308' dient als Prüfschritt dazu, eine Abfrage durchzuführen, ob bei zwei einander zur Analyse zugeordneten Sensorbildern für die entsprechenden Strahlausbreitungsradien r_{ij} und $r_{i,j-1}$ die Ungleichung $r_{ij} \geq r_{i,j-1}$ erfüllt ist, um die Bildebene mit maximalem Radius zum Aufnahmezeitpunkt t_i zu finden; bei negativem Abfrageresultat erfolgt ein Rücksprung zu Schritt 306' zum Abspeichern eines Werte-Tupels (r_{ij}, t_i, x_j) , während bei positivem Abfrageresultat ein Übergang zum nächsten Schritt 309' erfolgt, wo der Zähler j auf Null gesetzt wird, d.h. $j:=0$, worauf in einem nächsten Schritt 310' eine Abfrage für paarweise zu analysierende Sensorbilder durchgeführt wird, ob der Zähler i größer oder gleich 2 ist. Bei negativem Abfrageresultat erfolgt ein Rücksprung zu Schritt 302', wo eine Zählerinkrementierung für i durchgeführt wird, also $i:=i+1$, während bei positivem Abfrageresultat ein Übergang zu Schritt 311' erfolgt, in welchem die Strahlausbreitungsgeschwindigkeit $v_s(t_i)$ entlang der Strahlachse berechnet wird, wie nachfolgend noch erläutert werden wird. In einem daran anschließenden Schritt 312' wird dann die berechnete Strahlausbreitungsgeschwindigkeit zusammen mit dem daraus errechneten Strahlausbreitungsimpuls p_s abgespeichert. In einem weiteren Schritt 313' erfolgt eine Abfrage, ob eine Sequenz fertiggestellt bzw. abgearbeitet ist, d.h. der aktuelle Zählerstand i der Dimension m der abgespeicherten Sensorbilder entspricht; bei negativem Abfrageresultat erfolgt ein Rücksprung zu Schritt 302' mit Inkrementierung des Zählers i um 1, also $i:=i+1$, während bei positivem Abfrageresultat ein Übergang zum letzten Schritt 314' erfolgt, in welchem ein Rücksprung zum übergeordneten Steuerungsverfahren erfolgt.

[0029] Fig. 4D veranschaulicht ein graphisches Schema als Berechnungsgrundlage für die in Verfahrensschritt 311' gemäß Fig. 4C erfolgende Bestimmung der Strahlausbreitungsgeschwindigkeit $v_s(t)$. Dabei ist skizzenhaft dargestellt, wie ein von einem Injektor 15 ausgestoßenes Sprühmuster sich abhängig von der Zeit entlang seiner Strahlachse 18-3 räumlich ausbreitet, wobei das Sprühmuster in einem ersten Zustand 18-1 zu einem Zeitpunkt t_i und in einem zweiten Zustand 18-2 zu einem Zeitpunkt t_{i+1} anhand der jeweiligen Außenradien r_i und r_{i+1} kenntlich gemacht ist; diesen Außenradien der Sprühmuster-Zustände 18-1, 18-2 sind verschiedene entlang der z-Achse eines x, y, z-Koordinatensystems voneinander beabstandete Bildebenen z_{j+1} und z_{j+3} zugeordnet. Dazu ist für das graphisch dargestellte Ausführungsbeispiel ein rechtwinkliges Dreieck 18-4 im Koordinatensystem zwischen den beiden Zuständen 18-1, 18-2 entlang der Strahlachse 18-3 konstruierbar, in welchen für die beiden Katheten die Beziehungen

$$dz = z_{j+3} - z_{j+1} \quad \text{Gleichung (3)}$$

und

$$dx = dr = r_{i+1} - r_i \quad \text{Gleichung (4)}$$

gelten, wobei mit dz das Differential der Variablen z, mit dx das Differential von x, mit dr das Differential von r und mit

ds das Differential der Variablen s bezeichnet sind.

[0030] Für die Hypotenuse gilt dann:

$$ds = \sqrt{dr^2 + dz^2}$$

Gleichung (5);

[0031] Dadurch ergibt sich für die Strahlausbreitungsgeschwindigkeit $v_s(t_{i+1})$ durch Einsetzen von Gl. 3 bis 5 in die Basisformel $v_s(t_{i+1}) = ds/dt$ mit $dt = t_{i+1} - t_i$ eine entsprechende Auswertgleichung für $v_s(t_{i+1})$, die für das Ausführungsbeispiel als Funktion $f(z_{i+3}, z_{i+1}, r_{i+1}, r_i, t_{i+1}, t_i)$ darstellbar ist.

[0032] Fig. 4E zeigt ein Schema zur Veranschaulichung des zeitlichen Divergenzverhaltens eines von einem Injektor 15 ausgestoßenen Sprühmusters, welches - im Unterschied zu dem in Fig. 4D dargestellten Schema - als Berechnungsgrundlage für die zu ermittelnde Strahlausbreitungsgeschwindigkeit in lediglich einer einzigen Bildebene gemäß Fig. 4A und 4B dient. Dabei ist das sich entlang seiner Strahlachse 18-3 ausbreitende Sprühmuster in einem ersten Zustand 18-1 zum Zeitpunkt t_i und einem zweiten Zustand 18-2 zum Zeitpunkt t_{i+1} anhand der jeweiligen Außenradien r_i und r_{i+1} kenntlich gemacht, welche sich durch ihre jeweiligen Schnittpunkte mit der Bildebene z' in einem x, y, z-Koordinatensystem ergeben. Dadurch ergibt sich für die Berechnung der Wegdifferenz dr zwischen den beiden Zuständen 18-1 und 18-2 die Beziehung $dr = r_{i+1} - r_i$, wobei die Zeitdifferenz $dt = t_{i+1} - t_i$ ist; für die Berechnung von $v(t_{i+1})$ gilt mithin die Beziehung $v(t_{i+1}) = dr/dt$.

[0033] Fig. 5A zeigt ein mit der erfindungsgemäßen Vorrichtung 10 optisch erfasstes Kavitationsbild 30, das neben den im zentralen Bildbereich symmetrisch angeordneten Strahlkeulen 31, die anhand von Bildmatrixelementen bzw. Pixeln des Bildsensors mit hohen Intensitätswerten (hell dargestellt) kenntlich sind, an den Bildrändern Bereiche 33 aufweist, deren zugeordnete Bildmatrixelemente ebenfalls hohe Intensitätswerte enthalten und auf unerwünschte Reflexionen des abgestrahlten Lichts an der Innenwand der Messkammer zurückzuführen sind. Um innerhalb des erfindungsgemäßen Auswerteverfahrens den Einfluss derartiger Reflexionen zu reduzieren, wird jedem Sensorbild bzw. Kavitationsbild eine Auswertemaske 32 zugeordnet, um solche Bildmatrixelemente bei der Auswertung auszusparen, also den Auswertebereich in der Bildmatrix des jeweiligen Kavitationsbilds entsprechend einzuschränken. Dazu wird gemäß der in Fig. 5A dargestellten Variante zwischen den dem Bildzentrum 34 abgewandten Enden der Strahlkeulen 31 und den die Reflexionen enthaltenden Randbereichen des digital abgetasteten bzw. erfassten Kavitationsbilds eine radial verlaufende Auswertemaske 32 eingesetzt, deren Radius bezüglich des Bildzentrums 34 größer als die radiale Erstreckung der Strahlkeulen 31, jedoch kleiner als die radiale Lage der Randbereiche 33 bemessen ist, so dass die Bildmatrixelemente in den Randbereichen 33 der Bildmatrix bei der Auswertung gemäß Gleichung (1) außer Betracht bleiben und mithin lediglich die Bildmatrixelemente, die innerhalb des Radius der Auswertemaske 32 liegen, bei der Auswertung gemäß Gleichung (1) berücksichtigt werden.

[0034] Fig. 5B zeigt eine demgegenüber abgewandelte Auswertemaske 35, die - im Unterschied zu jener von Fig. 5A - eine im Wesentlichen sternförmige Struktur aufweist und so konturiert ist, dass jedem Konturenelement der sternförmigen Struktur jeweils einer Strahlkeule 31 zugeordnet ist, so dass jede einzelne Strahlkeule eng eingerahmt ist, wobei der jeweilige Zwischenraum zwischen jeweils zueinander benachbarten abgegrenzt ist und die radiale Erstreckung jedes Konturenelements größer als die in radialer Richtung gesehene Lage des Endes der jeweiligen Strahlkeule 31, jedoch deutlich kleiner als die in radialer Richtung gesehene Lage der Randbereiche 33 bemessen ist. Dadurch bleiben bei der Auswertung nach Gleichung (1) Bildmatrixelemente von Bildbereichen außer Betracht, welche zwischen den jeweils benachbarten Strahlkeulen 31 und zwischen den Enden der Strahlkeulen und den Bildrändern 33 liegen, was bei der Auswertung eine Hervorhebung von strahlrelevanten Bildanteilen gegenüber dem Bildhintergrund bewirkt.

[0035] Fig. 5C zeigt eine abermals abgewandelte Auswertemaske 36, welche - im Unterschied zu den in Fig. 5A und 5B dargestellten Ausführungsformen - eine Struktur aufweist, der selektiv nur eine einzige Strahlkeule 31 im Kavitationsbild zugeordnet ist und die Strahlkeule 31 so einrahmt, dass die Maskenstruktur etwa von Ursprung der Strahlkeule 31 ausgeht und die Strahlkeule an ihren Außenrändern bis hin zu ihrem Ende eng eingrenzt, wobei die radiale Erstreckung der Struktur der Auswertemaske 36 geringfügig größer als die in radialer Richtung gesehene Lage des Endes der Strahlkeule 31 bemessen ist. Dadurch bleiben bei der Auswertung gemäß Gleichung (1) Bildmatrixelemente von Bildbereichen außer Betracht, die deutlich außerhalb jener Bildmatrixelemente liegen, welche die Intensitätsverteilung der einzelnen Strahlkeulen 31 wiedergeben. Aufgrund der selektiven Anwendung einer derartigen Maskenstruktur auf einzelne Strahlkeulen 31 eines Kavitationsbildes sind Asymmetrieeffekte, also Abweichungen der Intensitätsverteilungen der einzelnen Strahlkeulen 31 zueinander quantitativ analysierbar und bewertbar, um im Hinblick auf die zugeordneten Spritzlöcher z.B. Fertigungstoleranzen beurteilen und/oder Fertigungsfehler lokalisieren zu können.

[0036] Fig. 6 zeigt ein Messdiagramm 40, bei dem optisch gewonnene und nach dem erfindungsgemäßen Verfahren ausgewertete Messdaten 41 als Maß für eine normierte Einspritzrate jeweils in funktionaler Abhängigkeit von der entlang der Abszissenachse verlaufenden Zeit t während eines Einspritzvorgangs und zum Vergleich dazu eine hydraulisch erfasste und auf ein Maximum von 1 normierte Einspritzrate anhand einer durchgezogenen Messkurve 42 aufgetragen sind. Die optisch erfassten und gemäß dem erfindungsgemäßen Verfahren nach dem Ablaufdiagramm 200 ausgewer-

teten Messdaten 41 sind in Gruppen unterteilt, die sich jeweils voneinander bezüglich des eingestellten Intensitätsschwellwerts unterscheiden und in Fig. 6 durch unterschiedliche Symbole dargestellt sind, wobei für eine erste Gruppe, bei der die zugeordneten Messdaten mit Bezugssymbol \square bezeichnet sind, nur solche Pixel im jeweiligen Kavitationsbild mit Intensitätswerten ab einer Schwelle von beispielsweise 150 in einer beispielsweise von 0 bis 255 reichenden 8-Bit-Grauwerttiefe in der Zählung berücksichtigt sind, für eine zweite Gruppe, bei der die zugeordneten Messdaten mit Bezugssymbol \circ bezeichnet sind, nur solche Pixel mit Intensitätswerten ab einer Schwelle von 220, und für eine dritte Gruppe, bei der die zugeordneten Messdaten mit Bezugssymbol \bigcirc bezeichnet sind, nur solche Pixel mit Intensitätswerten ab einer Schwelle von 250. Alle drei Gruppen der optisch erfassten und ausgewerteten Messdaten 41 liegen, wie Fig. 6 zeigt, dicht beieinander und weisen entlang der Zeitachse t eine etwa glockenförmige Verteilung auf, deren ansteigende Flanke 44 mit dem Beginn und deren abfallende Flanke 44' mit dem Ende des Einspritzvorgangs korrespondiert. Die simultan dazu hydraulisch erfasste Einspritzrate ist entlang der Ordinatenachse als durchgezogene Messkurve 42 dargestellt, wobei die Einspritzrate im Wesentlichen als Funktion des zeitlichen Verlaufs des laufend gemessenen Drucks $p(t)$ in der Messkammer und der gemessenen druckabhängigen Schallgeschwindigkeit $c(p)$ ermittelt wird. Sowohl die gemäß optischer Erkennung bzw. Abtastung gewonnenen Messdaten als auch die zeitgleich hydraulisch erfasste Messkurve sind bezüglich der Ordinatenachse $F(t)$ normiert auf ein Maximum von 1, um einen direkten Vergleich zu ermöglichen. Weiterhin zeigt Fig. 6 eine wesentliche Übereinstimmung zwischen dem zeitlichen Verlauf der optisch gewonnenen Messdaten 41 und dem Verlauf der hydraulisch gewonnenen Messkurve 42. Auch der Einspritzbeginn und das Einspritzende ist - in annähernd zeitlicher Übereinstimmung mit der simultan erfolgten hydraulischen Messung - eindeutig anhand der ansteigenden Flanke 44 und der abfallenden Flanke 44' bestimmbar. Die höhere Flankensteilheit bei der optischen Erkennung bzw. Abtastung im Unterschied zur hydraulischen Messung ist darauf zurückzuführen, dass bei der hydraulischen Messung ein Tiefpassfilter in der Messelektronikeinheit eingesetzt wird, der zum Ausfiltern von Eigenschwingungen in der Messkammer dient und als Nebeneffekt einerseits für einen deutlich flacheren Verlauf im Flankenbereich der durchgezogenen Messkurve und andererseits für Messwertstreuungen bzw. Messartefakte im zwischen den beiden Flanken 44, 44' liegenden Plateaubereich 45 sorgt.

Patentansprüche

1. Verfahren zur Charakterisierung des Einspritzverhaltens eines Einspritzventils für Flüssigkeiten mit folgenden Verfahrensschritten:

- Einspritzen von Flüssigkeit durch das Einspritzventil (15) in eine Messkammer (11),
- Einstrahlen von Licht in die Messkammer (11) auf von dem Einspritzventil (15) als Sprühmuster (18) ausgestoßene Flüssigkeit,
- Detektieren und Abtasten von zeitlich aufeinanderfolgenden Strahlbildern, die von an Phasengrenzen des vom Einspritzventil (15) ausgestoßenen Sprühmusters (18) reflektiertem und auf eine Aufnahmeeinrichtung (12, 22) abgebildetem Licht erzeugt werden, um orts aufgelöste Intensitätsverteilungen zu erhalten,
- Auswerten der zu den detektierten und abgetasteten Strahlbildern (30) jeweils zugeordneten Intensitätsverteilungen, wobei in den jeweiligen Intensitätsverteilungen solche Bildmatrixelemente identifiziert werden, welche dem abgebildeten Sprühmuster (18) zugeordnete Bildinformationen enthalten, und anhand der jeweils identifizierten Bildmatrixelemente und deren Zeitentwicklung ein Maß für das Einspritzverhalten ermittelt wird, **dadurch gekennzeichnet, dass** als Maß für das Einspritzverhalten eine als Kenngröße dienende relative Einspritzrate anhand der nachstehenden Beziehung

$$n(t) = \frac{\sum_{j=1}^m [(I(P_j, t) \geq G) * K_j(I(P_j, t))]}{\sum_{j=1}^m [K_j(I(P_j, t))]}$$

ermittelt wird, wobei mit $n(t)$ die relative Einspritzrate in funktionaler Abhängigkeit von der Zeit t , mit G ein zwischen hohen und demgegenüber deutlich niedrigeren Intensitätswerten liegender Grenzwert, mit P_j ein j -tes Bildmatrixelement eines jeweiligen von der Aufnahmeeinrichtung detektierten und abgetasteten Strahlbilds, mit j ein sich von 1 bis m erstreckender Summationsindex und mit K_j ein jeweiliger Korrelationsfaktor bezeichnet sind, wobei K_j einen im jeweils zugeordneten Bildmatrixelement erfassten Lichtintensitätsinformationswert I berücksichtigt, wobei bei der Summenbildung nur solche Bildmatrixelemente P_j berücksichtigt werden, deren

EP 3 721 071 B1

Lichtintensitätswerte größer als der Grenzwert G oder gleich dem Grenzwert G sind, um dem im jeweiligen Strahlbild enthaltenen Sprühmuster zugeordnete Bildmatrixelemente zu identifizieren.

- 5
2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Aufnahmeeinrichtung (12, 22) so eingestellt wird, dass eine Querschnittebene des ausgestoßenen Sprühmusters (18) als Strahlbild (30) scharf abgebildet wird.
- 10
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet, dass** in zeitlich aufeinanderfolgend erfassten Strahlbildern verschiedene Querschnittebenen abgebildet und abgetastet werden, wobei jeweils die Brennweite der Aufnahmeeinrichtung (12, 22) verändert wird und/oder die Aufnahmeeinrichtung (12, 22) hinsichtlich ihres optischen Abstands zur Messkammer (11) verschoben wird.
- 15
4. Verfahren nach Anspruch 3, **dadurch gekennzeichnet, dass** aus den verschiedenen Querschnittebenen zu jedem Zeitpunkt der Einspritzung ein dreidimensionales Bild des Sprühmusters erzeugt werden kann.
5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, **dadurch gekennzeichnet, dass** als Maß für das Einspritzverhalten eine Strahlausbreitungsgeschwindigkeit in einer Querschnittebene anhand der nachstehenden Beziehung

20

$$v(t_{i+1}) = \frac{(r_{i+1} - r_i)}{(t_{i+1} - t_i)}$$

ermittelt wird, wobei mit $v(t_{i+1})$ die Strahlausbreitungsgeschwindigkeit, mit i ein Index für ein jeweils zu verarbeitendes Strahlbild, mit r_i ein Strahlausbreitungsradius zum Zeitpunkt t_i für ein i -tes Strahlbild und mit r_{i+1} ein Strahlausbreitungsradius zum Zeitpunkt t_{i+1} für ein $(i+1)$ -tes Strahlbild bezeichnet sind, wobei wenigstens zwei zeitlich aufeinanderfolgende Strahlbilder detektiert und ausgewertet werden, indem in dem i -ten Strahlbild Bildmatrixelemente identifiziert werden, welche mit nach außen weisenden Enden von Strahlkeulen eines abgebildeten Sprühmusters (18) korrespondieren und etwa auf einem gedachten Kreisring mit einem Strahlausbreitungsradius r_i angeordnet sind, und in dem $(i+1)$ -ten Strahlbild Bildmatrixelemente identifiziert werden, welche mit den nach außen weisenden Enden von Strahlkeulen des dann abgebildeten Sprühmusters (18) korrespondieren und etwa auf einem gedachten Kreisring mit einem Strahlausbreitungsradius r_{i+1} angeordnet sind.

25

30

- 35
6. Verfahren nach Anspruch 4 oder 5, **dadurch gekennzeichnet, dass** eine Strahlausbreitungsgeschwindigkeit entlang der Strahlachse aus dem dreidimensionalen Bild des Sprühmusters ermittelt wird.
- 40
7. Verfahren nach Anspruch 5, **dadurch gekennzeichnet, dass** eine Kalibrierung der Strahlausbreitungsradien erfolgt, indem eine abbildungsrelevante Gegenstandsgröße, vorzugsweise ein Düsendurchmesser des zu prüfenden Einspritzventils, und/oder ein Abbildungsmaßstab der Aufnahmeeinrichtung (12, 22) und/oder ein Auflösungsvermögen der Aufnahmeeinrichtung (12, 22) berücksichtigt wird/werden.
- 45
8. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 7, **dadurch gekennzeichnet, dass** simultan zum optischen Detektieren von Strahlbildern hydraulische Messungen zum Ermitteln einer hydraulisch gewonnenen Kenngröße in der Messkammer (11) durchgeführt werden, wobei optisch gewonnene Messdaten mit hydraulisch gewonnenen Messdaten bezüglich der Kenngröße korreliert werden.
- 50
9. Verfahren nach Anspruch 8, soweit rückbezogen auf Anspruch 5, 6 oder 7, **dadurch gekennzeichnet, dass** als weitere Kenngröße ein Strahlimpuls ermittelt wird, wobei der Strahlimpuls aus der optisch gewonnenen Strahlausbreitungsgeschwindigkeit in einer Querschnittebene $v(t_{i+1})$ oder entlang der Strahlachse und aus einer hydraulisch gewonnenen Einspritzmenge durch jeweilige Produktbildung ermittelt wird.
- 55
10. Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 9 mit einer Messkammer, einer Beleuchtungseinrichtung zum Einstrahlen von Licht über einen optischen Zugang in die Messkammer, einer Aufnahmeeinrichtung zum Detektieren von aus der Messkammer über den optischen Zugang zurückkommendem Licht und einer Auswerteeinrichtung, wobei die Auswerteeinrichtung eine Datenübertragungsverbindung zur Aufnahmeeinrichtung (12, 22) aufweist, um von der Aufnahmeeinrichtung (12, 22) detektierte und abgetastete Strahlbilder zu verarbeiten und auszuwerten, wobei die Auswerteeinrichtung in von der Aufnahmeeinrichtung (12, 22) erfassten Intensitätsverteilungen von jeweiligen Strahlbildern solche Bildmatrixelemente identifiziert, welche einem abgebildeten Sprühmuster (18) zugeordnete Bildinformationen enthalten, und anhand der jeweils identifizierten Bildmatri-

elemente und deren Zeitentwicklung ein Maß für das Einspritzverhalten ermittelt, **dadurch gekennzeichnet, dass** als Maß für das Einspritzverhalten eine als Kenngröße dienende relative Einspritzrate anhand der nachstehenden Beziehung

$$n(t) = \frac{\sum_{j=1}^m [(I(P_j, t) \geq G) * K_j(I(P_j, t))]}{\sum_{j=1}^m [K_j(I(P_j, t))]}$$

ermittelt wird, wobei mit $n(t)$ die relative Einspritzrate in funktionaler Abhängigkeit von der Zeit t , mit G ein zwischen hohen und demgegenüber deutlich niedrigeren Intensitätswerten liegender Grenzwert, mit P_j ein j -tes Bildmatrixelement eines jeweiligen von der Aufnahmeeinrichtung detektierten und abgetasteten Strahlbilds, mit j ein sich von 1 bis m erstreckender Summationsindex und mit K_j ein jeweiliger Korrelationsfaktor bezeichnet sind, wobei K_j einen im jeweils zugeordneten Bildmatrixelement erfassten Lichtintensitätsinformationswert I berücksichtigt, wobei bei der Summenbildung nur solche Bildmatrixelemente P_j berücksichtigt werden, deren Lichtintensitätswerte größer als der Grenzwert G oder gleich dem Grenzwert G sind, um dem im jeweiligen Strahlbild enthaltenen Sprühmuster zugeordnete Bildmatrixelemente zu identifizieren.

11. Vorrichtung nach Anspruch 10, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Aufnahmeeinrichtung (12, 22) entlang ihrer optischen Achse mittels einer zugeordneten Positioniereinrichtung (24, 25) verfahrbar ausgebildet ist, um die optische Weglänge zwischen der Aufnahmeeinrichtung (12, 22) und der Messkammer (11) zu verändern.
12. Vorrichtung nach Anspruch 10 oder 11, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Aufnahmeeinrichtung (12, 22) als Digitalkamera ausgebildet ist, um für jedes detektierte und abgetastete Strahlbild jeweils einen orts aufgelösten Intensitätsverlauf zu erfassen.

Claims

1. Method for characterizing the injection behaviour of an injection valve for liquids, having the following method steps:

- injecting liquid through the injection valve (15) into a measurement chamber (11),
- radiating light into the measurement chamber (11) onto liquid that is expelled by the injection valve (15) in the form of a spray pattern (18),
- detecting and scanning temporally successive spray images produced by light that is reflected at phase boundaries of the spray pattern (18) expelled by the injection valve (15) and that is imaged onto a recording device (12, 22), in order to obtain spatially resolved intensity distributions,
- evaluating the intensity distributions assigned in each case to the detected and scanned spray images (30), wherein such image matrix elements containing image information assigned to the imaged spray pattern (18) are identified in the respective intensity distributions and a measure of the injection behaviour is ascertained on the basis of the respectively identified image matrix elements and their time evolution, **characterized in that** a relative injection rate that serves as a characteristic variable is ascertained, as a measure of the injection behaviour, on the basis of the following relationship

$$n(t) = \frac{\sum_{j=1}^m [(I(P_j, t) \geq G) * K_j(I(P_j, t))]}{\sum_{j=1}^m [K_j(I(P_j, t))]}$$

wherein $n(t)$ denotes the relative injection rate in functional dependence on the time t , G denotes a limit value between high and, by comparison, significantly lower intensity values, P_j denotes a j -th image matrix element of a respective spray image detected and scanned by the recording device, j denotes a summation index extending from 1 to m , and K_j denotes a respective correlation factor, wherein K_j takes into account a light intensity information value I captured in the respectively assigned image matrix element, wherein only such image matrix elements P_j having light intensity values that are greater than the limit value G or are equal to the

limit value G are taken into account in the summation in order to identify image matrix elements assigned to the spray pattern contained in the respective spray image.

- 5
10
15
2. Method according to Claim 1, **characterized in that** the recording device (12, 22) is set such that a cross-sectional plane of the expelled spray pattern (18) is sharply imaged as spray image (30).
 3. Method according to Claim 1 or 2, **characterized in that** different cross-sectional planes are imaged and scanned in temporally successively captured spray images, wherein in each case the focal length of the recording device (12, 22) is changed and/or the recording device (12, 22) is displaced in terms of its optical distance from the measurement chamber (11).
 4. Method according to Claim 3, **characterized in that** a three-dimensional image of the spray pattern can be produced from the different cross-sectional planes at any time of the injection.
 5. Method according to any of Claims 1 to 3, **characterized in that** a spray spreading speed is ascertained, as a measure of the injection behaviour, in a cross-sectional plane on the basis of the following relationship

20

$$v(t_{i+1}) = \frac{(r_{i+1} - r_i)}{(t_{i+1} - t_i)}$$

25
30

wherein $v(t_{i+1})$ denotes the spray spreading speed, i denotes an index for a spray image that is to be processed in each case, r_i denotes a spray spreading radius at the time t_i for an i -th spray image, and r_{i+1} denotes a spray spreading radius at the time t_{i+1} for an $(i+1)$ -th spray image, wherein at least two temporally successive spray images are detected and evaluated by identifying image matrix elements in the i -th spray image that correspond to outwardly pointing ends of spray lobes of an imaged spray pattern (18) and are arranged for example on an imaginary circular ring with a spray spreading radius r_i , and in which $(i+1)$ -th spray image image matrix elements are identified that correspond to the outwardly pointing ends of spray lobes of the then imaged spray pattern (18) and are arranged for example on an imaginary circular ring with a spray spreading radius r_{i+1} .

- 35
40
45
50
55
6. Method according to Claim 4 or 5, **characterized in that** a spray spreading speed along the spray axis is ascertained from the three-dimensional image of the spray pattern.
 7. Method according to Claim 5, **characterized in that** the spray spreading radii are calibrated by taking into account an imaging-relevant object size, preferably a nozzle diameter of the injection valve to be checked and/or an imaging scale of the recording device (12, 22) and/or a resolution of the recording device (12, 22).
 8. Method according to any of Claims 1 to 7, **characterized in that**, simultaneously with the optical detection of spray images, hydraulic measurements are performed for ascertaining a hydraulically obtained characteristic variable in the measurement chamber (11), wherein optically obtained measurement data are correlated to hydraulically obtained measurement data with respect to the characteristic variable.
 9. Method according to Claim 8, where it refers back to Claim 5, 6 or 7, **characterized in that** a spray pulse is ascertained as a further characteristic variable, wherein the spray pulse is ascertained from the optically obtained spray spreading speed in a cross-sectional plane $v(t_{i+1})$ or along the spray axis and from a hydraulically obtained injection quantity by respective product formation.
 10. Apparatus for carrying out the method according to any of Claims 1 to 9, having a measurement chamber, an illumination device for radiating light via an optical access into the measurement chamber, a recording device for detecting light returning from the measurement chamber via the optical access and an evaluation device, wherein the evaluation device has a data transmission connection to the recording device (12, 22) in order to process and evaluate spray images detected and scanned by the recording device (12, 22), wherein the evaluation device identifies, in intensity distributions of respective spray images captured by the recording device (12, 22), such image matrix elements that contain image information assigned to an imaged spray pattern (18), and a measure of the injection behaviour is ascertained on the basis of the respectively identified image matrix elements and their time evolution, **characterized in that** a relative injection rate that serves as a characteristic variable is ascertained, as a measure of the injection behaviour, on the basis of the following relationship

$$n(t) = \frac{\sum_{j=1}^m [(I(P_j, t) \geq G) * K_j (I(P_j, t))]}{\sum_{j=1}^m [K_j (I(P_j, t))]}$$

wherein $n(t)$ denotes the relative injection rate in functional dependence on the time t , G denotes a limit value between high and, by comparison, significantly lower intensity values, P_j denotes a j -th image matrix element of a respective spray image detected and scanned by the recording device, j denotes a summation index extending from 1 to m , and K_j denotes a respective correlation factor, wherein K_j takes into account a light intensity information value I captured in the respectively assigned image matrix element, wherein only such image matrix elements P_j having light intensity values that are greater than the limit value G or are equal to the limit value G are taken into account in the summation in order to identify image matrix elements assigned to the spray pattern contained in the respective spray image.

11. Apparatus according to Claim 10, **characterized in that** the recording device (12, 22) is configured to be displaceable along its optical axis by means of an assigned positioning device (24, 25) in order to modify the optical path length between the recording device (12, 22) and the measurement chamber (11).

12. Apparatus according to Claim 10 or 11, **characterized in that** the recording device (12, 22) is configured as a digital camera in order to capture in each case a spatially resolved intensity profile for each detected and scanned spray image.

Revendications

1. Procédé de caractérisation du comportement d'injection d'une soupape d'injection de liquides, ledit procédé comprenant les étapes suivantes :

- injecter du liquide par le biais de la soupape d'injection (15) dans une chambre de mesure (11),
- injecter de la lumière dans la chambre de mesure (11) sur le liquide éjecté de la soupape d'injection (15) sous la forme d'un motif de pulvérisation (18),
- détecter et balayer des images de jet temporellement successives qui sont générées par la lumière qui est réfléchiée au niveau de limites de phase du motif de pulvérisation (18) éjecté de la soupape d'injection (15) et reproduite sur une unité d'enregistrement (12, 22) afin d'obtenir des distributions d'intensité à résolution spatiale,
- évaluer les distributions d'intensité associées respectivement aux images de jet détectées et balayées (30), des éléments de matrice d'image, qui contiennent des informations d'image associées au motif de pulvérisation (18) reproduit, étant identifiés dans les distributions d'intensité respectives et une mesure du comportement d'injection étant déterminée sur la base des éléments de matrice d'image respectivement identifiés et de leur développement dans le temps, **caractérisé en ce qu'**un taux d'injection relatif servant de paramètre est déterminé comme mesure du comportement d'injection à l'aide de la relation suivante,

$$n(t) = \frac{\sum_{j=1}^m [(I(P_j, t) \geq G) * K_j (I(P_j, t))]}{\sum_{j=1}^m [K_j (I(P_j, t))]}$$

$n(t)$ étant le taux d'injection relatif en fonction du temps t , G étant une valeur limite située entre des valeurs d'intensité élevées et, en comparaison, nettement inférieures, P_j étant un j -ième élément de matrice d'image d'une image de jet respective détectée et balayée par l'unité d'enregistrement, j étant un indice de sommation allant de 1 à m et K_j étant un facteur de corrélation respectif, K_j prenant en compte une valeur d'information d'intensité lumineuse I détectée dans l'élément de matrice d'image respectivement associé, seuls des éléments de matrice d'image P_j dont les valeurs d'intensité lumineuse sont supérieures à la valeur limite G ou sont égales à la valeur limite G , étant prises en compte lors de la formation de la somme afin d'identifier des éléments de matrice d'image associés au motif de pulvérisation contenu dans l'image de jet respective.

EP 3 721 071 B1

2. Procédé selon la revendication 1, **caractérisé en ce que** l'unité d'enregistrement (12, 22) est réglée de manière qu'un plan en coupe transversale du motif de pulvérisation éjecté (18) soit reproduit de manière nette sous la forme d'une image de jet (30).
- 5 3. Procédé selon la revendication 1 ou 2, **caractérisé en ce que** différents plans en coupe transversale sont reproduits et balayés dans des images de jet détectées successivement dans le temps, la distance focale de l'unité d'enregistrement (12, 22) étant modifiée et/ou l'unité d'enregistrement (12, 22) étant décalée en termes de distance optique par rapport à la chambre de mesure (11).
- 10 4. Procédé selon la revendication 3, **caractérisé en ce qu'**une image tridimensionnelle du motif de pulvérisation peut être générée à partir des différents plans en coupe transversale à tout moment de l'injection.
5. Procédé selon l'une des revendications 1 à 3, **caractérisé en ce qu'**une vitesse de diffusion de jet dans un plan en coupe transversale est déterminée comme mesure du comportement d'injection à l'aide de la relation suivante,
- 15

$$v(t_{i+1}) = \frac{(r_{i+1} - r_i)}{(t_{i+1} - t_i)}$$

20 $v(t_{i+1})$ étant la vitesse de diffusion de jet, i étant un indice pour une image de jet particulier à traiter, r_i étant un rayon de diffusion de jet à l'instant t_i pour une i -ième image de jet et r_{i+1} étant un rayon de diffusion de jet à l'instant t_{i+1} pour une $(i+1)$ -ième image de jet, au moins deux images de jet temporellement successives étant détectées et évaluées par identification, dans la i -ième image de jet, d'éléments de matrice d'image qui correspondent à des extrémités, pointant vers l'extérieur, de lobes de jet d'un motif de pulvérisation reproduit (18) et qui sont disposés approximativement sur un anneau circulaire imaginaire ayant un rayon de diffusion de jet r_i et par identification, dans la $(i+1)$ -ième image de jet, d'éléments de matrice d'image qui correspondent aux extrémités, pointant vers l'extérieur, de lobes de jet du motif de pulvérisation reproduit (18) et qui sont disposés approximativement sur un anneau circulaire imaginaire de rayon de diffusion de jet r_{i+1} .

25

30

6. Procédé selon la revendication 4 ou 5, **caractérisé en ce qu'**une vitesse de diffusion de jet selon l'axe de jet est déterminée à partir de l'image tridimensionnelle du motif de pulvérisation.
- 35 7. Procédé selon la revendication 5, **caractérisé en ce que** les rayons de diffusion de jet sont calibrés par prise en compte d'une dimension d'objet pertinente pour la reproduction, de préférence un diamètre de buse de la soupape d'injection à tester, et/ou une échelle de reproduction de l'unité d'enregistrement (12, 22) et/ou une capacité de résolution de l'unité d'enregistrement (12, 22).
- 40 8. Procédé selon l'une des revendications 1 à 7, **caractérisé en ce que** des mesures hydrauliques sont réalisées en même temps que la détection optique d'images de jet pour déterminer un paramètre obtenu hydrauliquement dans la chambre de mesure (11), les données de mesure obtenues optiquement étant corrélées en ce qui concerne le paramètre avec des données de mesure obtenues hydrauliquement.
- 45 9. Procédé selon la revendication 8, dans la mesure où elle renvoie à la revendication 5, 6 ou 7, **caractérisé en ce qu'**une impulsion de jet est déterminée comme autre paramètre, l'impulsion de jet étant déterminée à partir de la vitesse de diffusion de jet $v(t_{i+1})$, obtenue optiquement, dans un plan en coupe transversale ou le long de l'axe du jet et à partir d'une quantité d'injection obtenue hydrauliquement par formation de produit respectif.
- 50 10. Dispositif destiné à mettre en œuvre le procédé selon l'une des revendications 1 à 9, ledit dispositif comprenant une chambre de mesure, une unité d'éclairage destinée à injecter de la lumière dans la chambre de mesure par le biais d'un accès optique, une unité d'enregistrement destinée à détecter la lumière revenant de la chambre de mesure par le biais de l'accès optique et une unité d'évaluation, l'unité d'évaluation comportant une liaison de transmission de données à l'unité d'enregistrement (12, 22) afin de traiter et d'évaluer des images de jet détectées et balayées par l'unité d'enregistrement (12, 22), l'unité d'évaluation identifiant, dans les distributions d'intensité d'images de jet respectives détectées par l'unité d'enregistrement (12, 22), des éléments de matrice d'image qui contiennent des informations d'image associées à un motif de pulvérisation reproduit (18) et déterminant une mesure du comportement d'injection à l'aide des éléments de matrice d'image respectivement identifiés et de leur dévelop-
- 55

pement dans le temps, **caractérisé en ce qu'**un taux d'injection relatif servant de paramètre est déterminé comme mesure du comportement d'injection à l'aide de la relation suivante,

$$n(t) = \frac{\sum_{j=1}^m [(I(P_j, t) \geq G) * K_j(I(P_j, t))]}{\sum_{j=1}^m [K_j(I(P_j, t))]}$$

$n(t)$ étant le taux d'injection relatif en fonction du temps t , G étant une valeur limite située entre des valeurs d'intensité élevées et, en comparaison, nettement inférieures, P_j étant un j -ième élément de matrice d'image d'une image de jet respective détectée et balayée par le dispositif d'enregistrement, j étant un indice de sommation allant de 1 à m et K_j étant un facteur de corrélation respectif, K_j prenant en compte une valeur d'information d'intensité lumineuse I détectée dans l'élément de matrice d'image respectivement associé, seuls des éléments de matrice d'image P_j dont les valeurs d'intensité lumineuse sont supérieures à la valeur limite G ou sont égales à la valeur limite G , étant prises en compte lors de la formation de la somme afin d'identifier des éléments de matrice d'image associés au motif de pulvérisation contenu dans l'image de jet respective.

11. Dispositif selon la revendication 10, **caractérisé en ce que** l'unité d'enregistrement (12, 22) est conçue pour être déplaçable le long de son axe optique au moyen d'une unité de positionnement associée (24, 25) afin de faire varier la longueur du trajet optique entre l'unité d'enregistrement (12, 22) et la chambre de mesure (11).

12. Dispositif selon la revendication 10 ou 11, **caractérisé en ce que** l'unité d'enregistrement (12, 22) est conçue comme une caméra numérique afin de détecter un profil d'intensité à résolution spatiale pour chaque image de jet détectée et balayée.

Fig. 1A

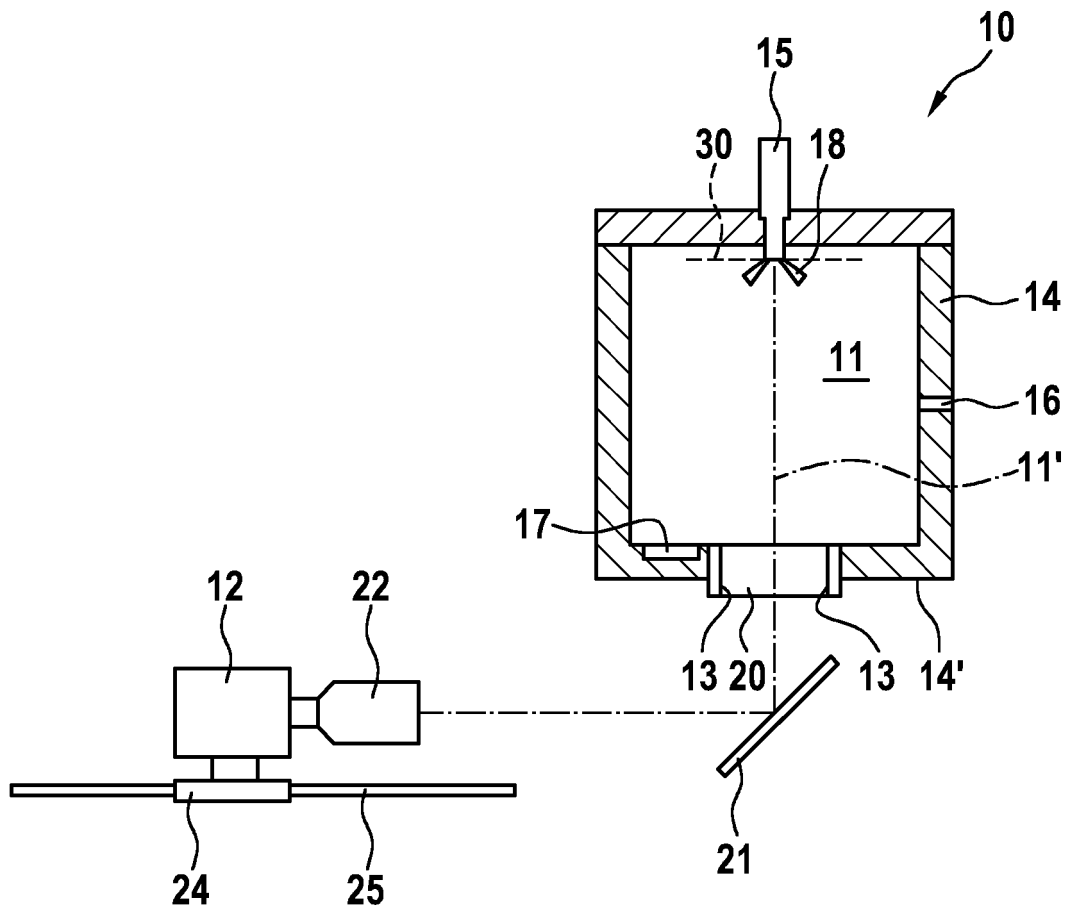


Fig. 1B

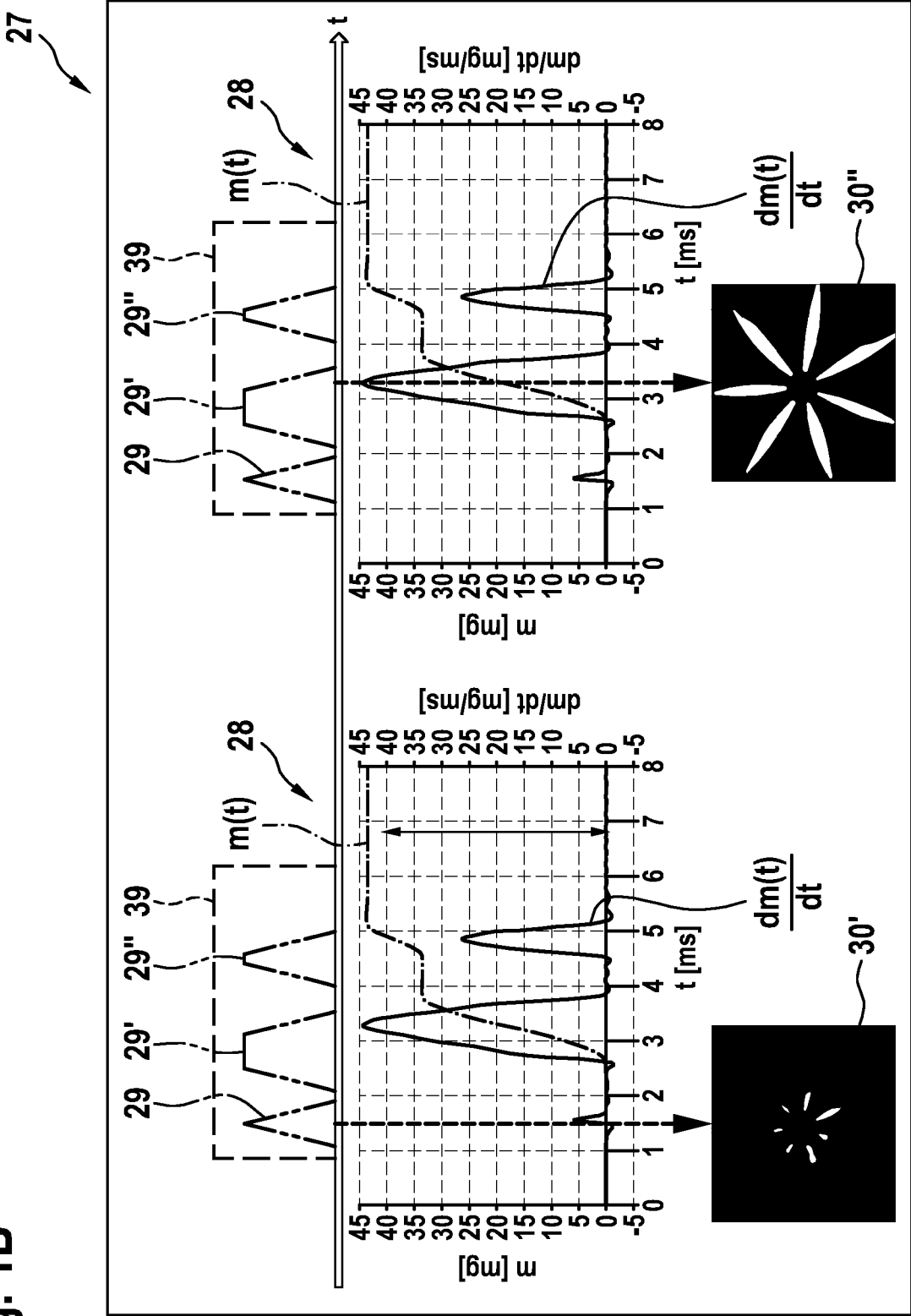


Fig. 2A

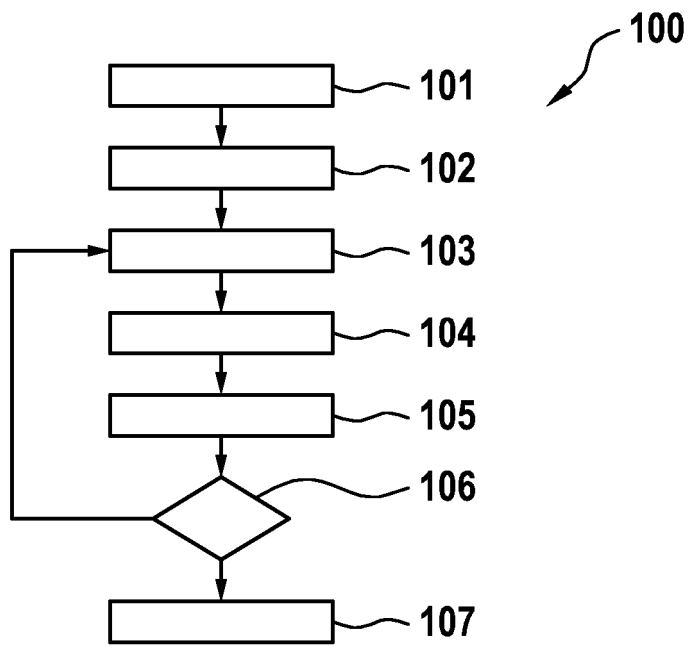


Fig. 2B

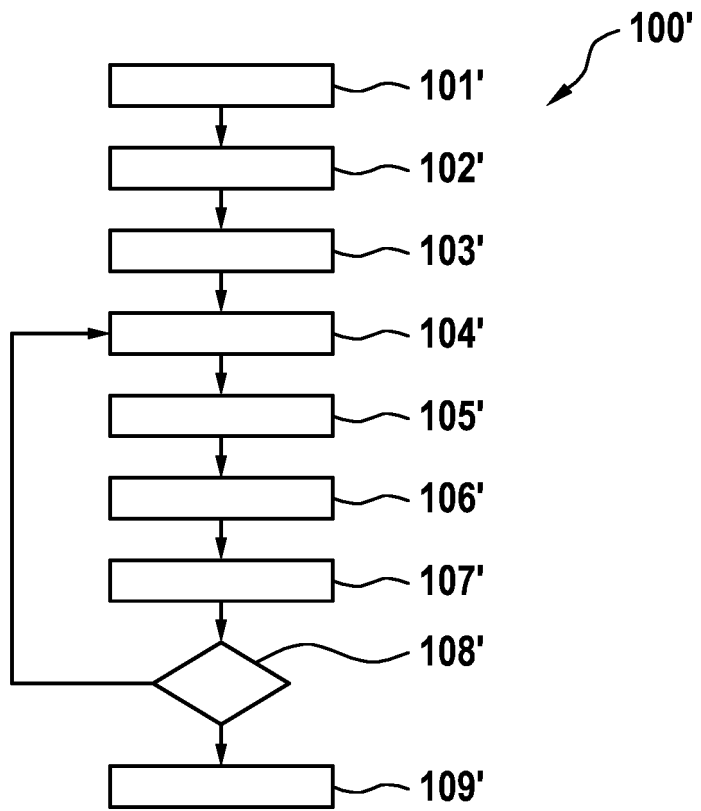


Fig. 2C

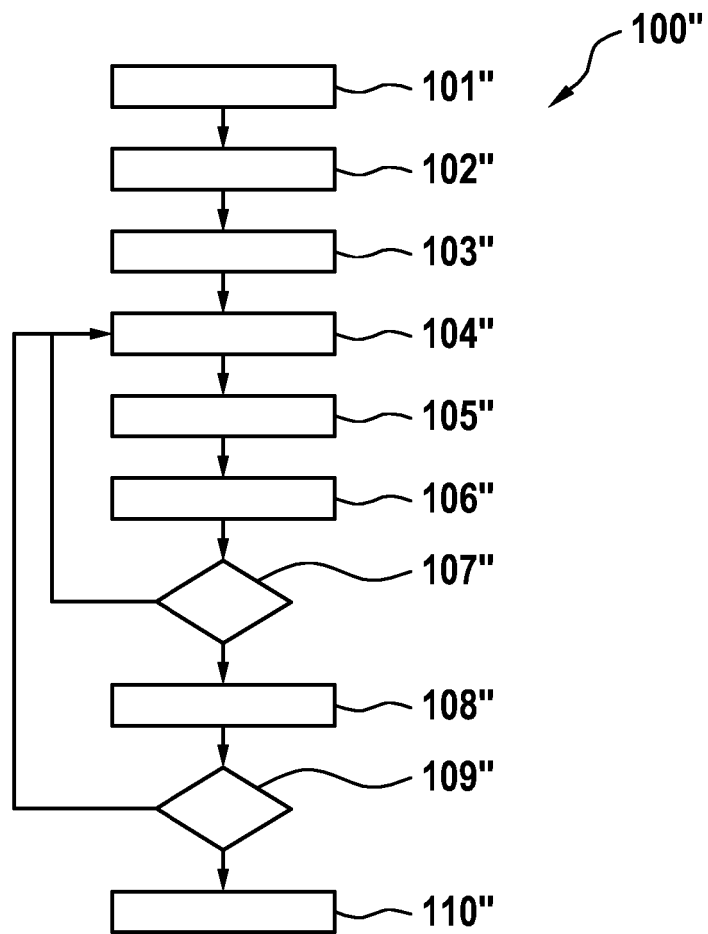


Fig. 3A

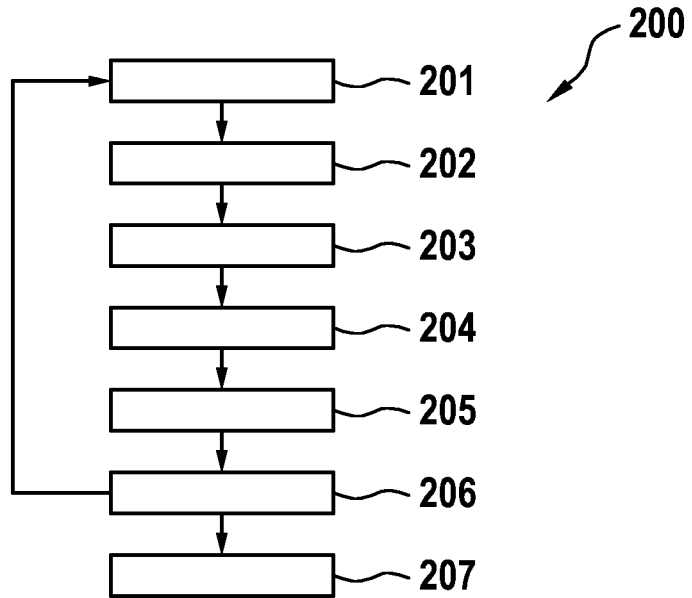


Fig. 3B

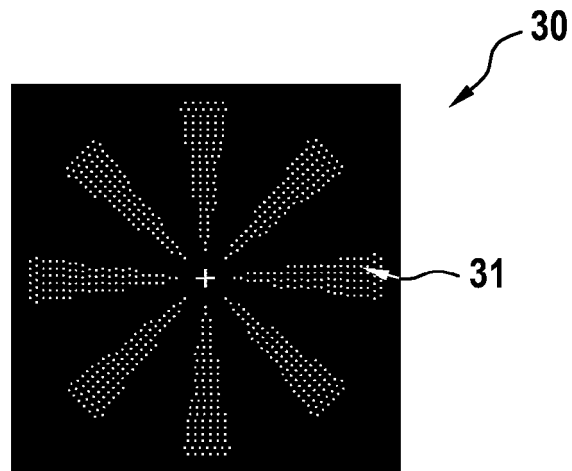


Fig. 4A

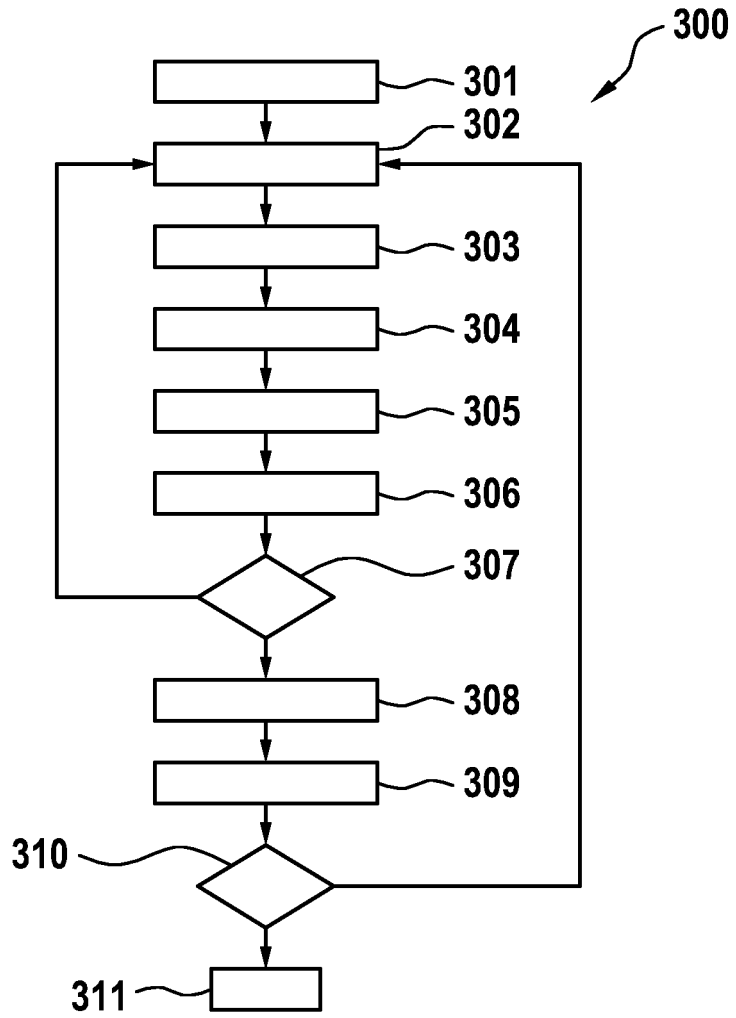


Fig. 4B

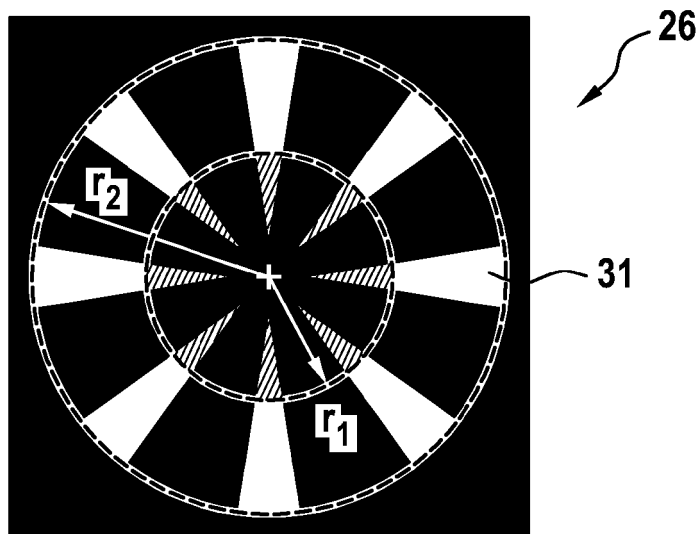


Fig. 4C

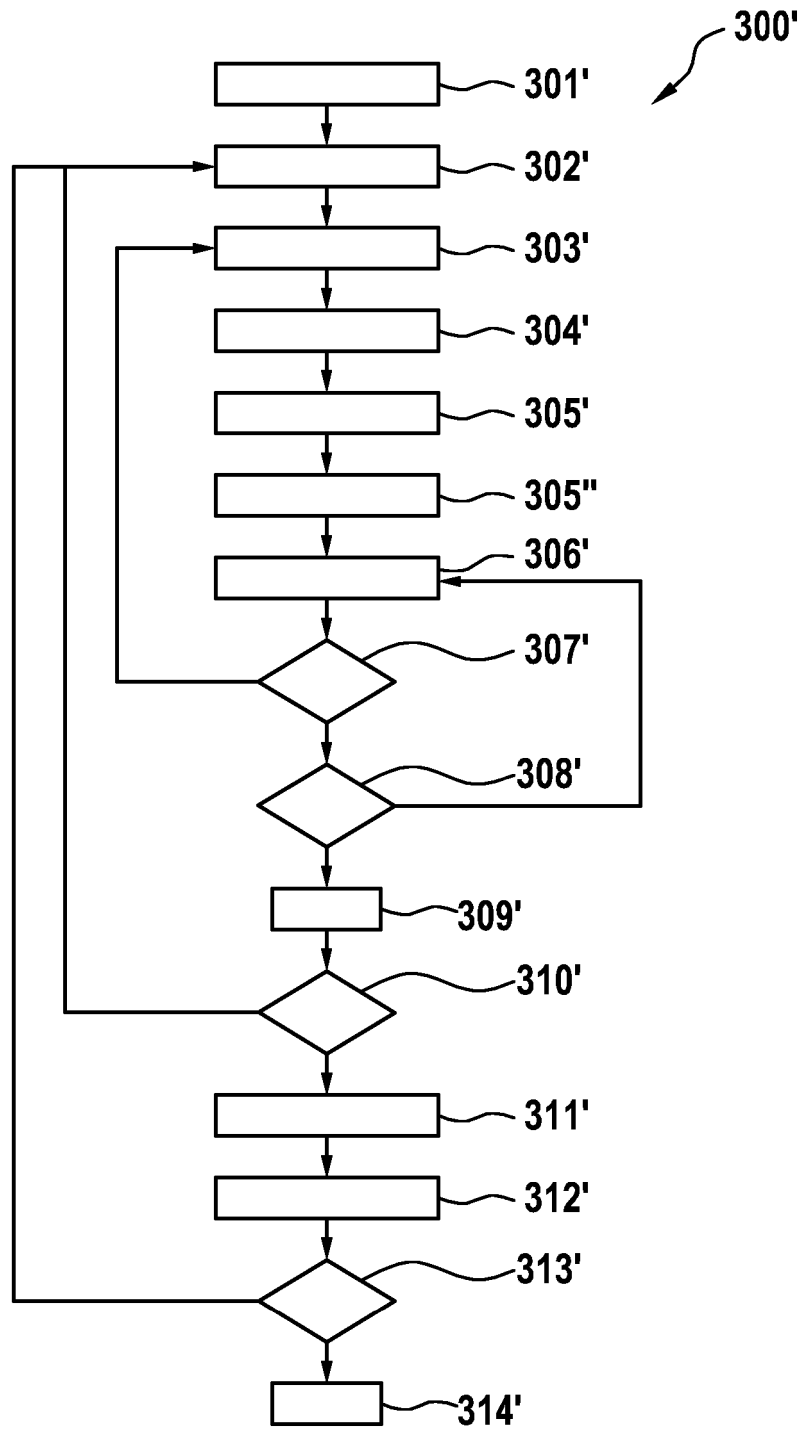


Fig. 4D

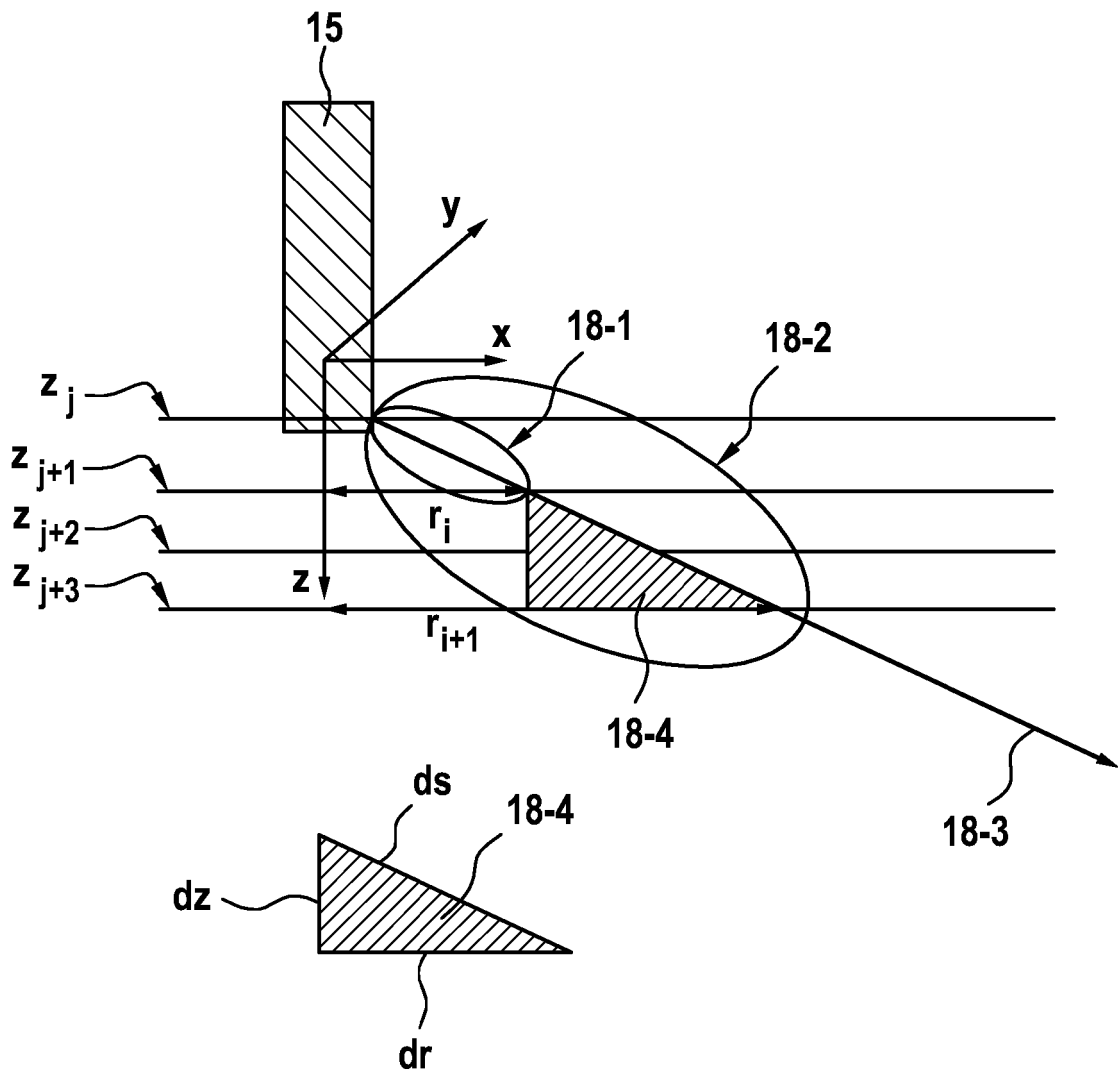


Fig. 4E

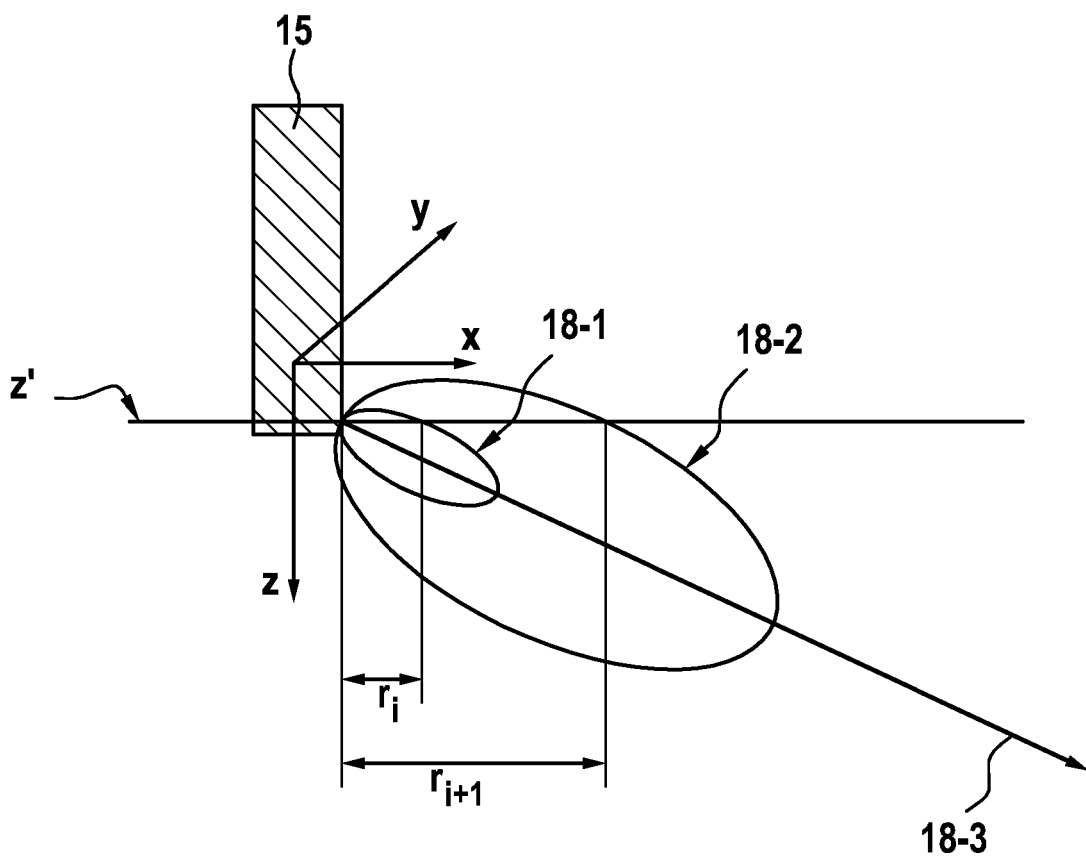


Fig. 5A



Fig. 5B

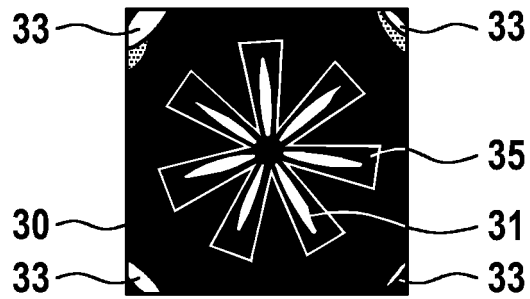
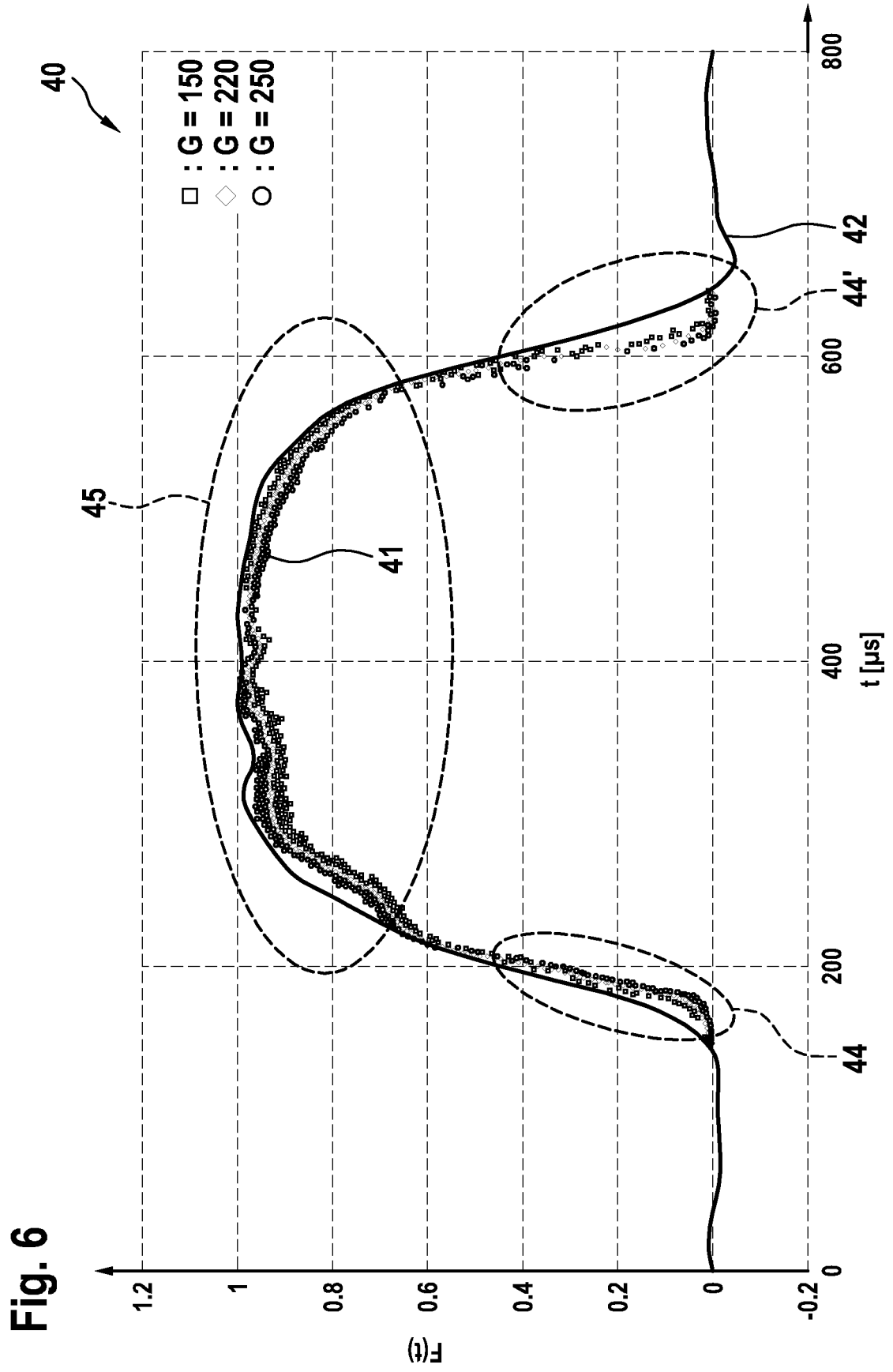


Fig. 5C





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 102011007611 A1 [0003]
- FR 2719871 A1 [0004]
- DE 102015217940 A1 [0004]
- JP 2001050866 A [0004]