



(12) **Offenlegungsschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2018 131 252.0**
 (22) Anmeldetag: **07.12.2018**
 (43) Offenlegungstag: **10.06.2020**

(51) Int Cl.: **F02D 41/00 (2006.01)**
F02D 41/14 (2006.01)

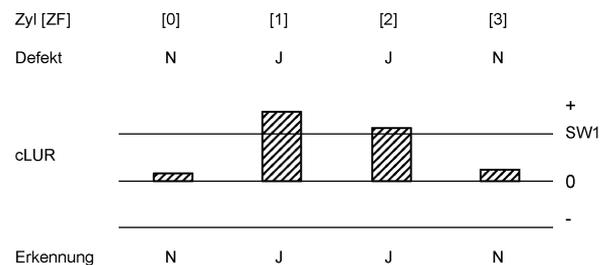
| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|--|----|-----------|----|----|-----------|----|----|-----------------|----|----|-----------|----|----|-----------|----|
| (71) Anmelder: Bayerische Motoren Werke Aktiengesellschaft, 80809 München, DE | (56) Ermittelter Stand der Technik: <table style="margin-left: 20px;"> <tr><td>DE</td><td>41 00 527</td><td>A1</td></tr> <tr><td>DE</td><td>41 18 580</td><td>A1</td></tr> <tr><td>DE</td><td>10 2012 203 559</td><td>A1</td></tr> <tr><td>EP</td><td>0 576 705</td><td>B1</td></tr> <tr><td>EP</td><td>0 622 542</td><td>A1</td></tr> </table> | DE | 41 00 527 | A1 | DE | 41 18 580 | A1 | DE | 10 2012 203 559 | A1 | EP | 0 576 705 | B1 | EP | 0 622 542 | A1 |
| DE | 41 00 527 | A1 | | | | | | | | | | | | | | |
| DE | 41 18 580 | A1 | | | | | | | | | | | | | | |
| DE | 10 2012 203 559 | A1 | | | | | | | | | | | | | | |
| EP | 0 576 705 | B1 | | | | | | | | | | | | | | |
| EP | 0 622 542 | A1 | | | | | | | | | | | | | | |
| (72) Erfinder: Grasreiner, Sebastian, 81379 München, DE | | | | | | | | | | | | | | | | |

Rechercheantrag gemäß § 43 PatG ist gestellt.

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen.

(54) Bezeichnung: **Verfahren zur rechnergestützten Bestimmung von mehrfachen Drehungleichförmigkeiten einer Verbrennungskraftmaschine**

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung beschreibt ein Verfahren zur rechnergestützten und absoluten Bestimmung von mehrfachen Drehungleichförmigkeiten einer Verbrennungskraftmaschine. Das erfindungsgemäße Verfahren umfasst eine Anzahl an Brennkammern mit sich bewegenden Kolben, die über eine Pleuellwelle mechanisch miteinander in Verbindung stehen, um die Pleuellwelle in Drehung zu versetzen, mit Hilfe von Laufunruhwerten (LUR_{n-1} , LUR_n), die während des Betriebs der Verbrennungskraftmaschine kontinuierlich und aufeinander folgend in der logischen Reihenfolge des Zündens der Brennkammern für jede Brennkammer gemäß einer vorgegebenen Berechnungsvorschrift aus Messgrößen der gerade betrachteten Brennkammer und Messgrößen der unmittelbar zuvor zündenden Brennkammer relativ bestimmt werden. Ein jeweiliger Laufunruhwert (LUR_{n-1} , LUR_n) repräsentiert ein Maß für eine Drehungleichförmigkeit der Pleuellwelle infolge der gerade gezündeten Brennkammer. Das erfindungsgemäße Verfahren umfasst in einem Schritt a) das Bestimmen (S1) des Laufunruhwerts (LUR_n) einer aktuell gezündeten Brennkammer, die in der logischen Reihenfolge des Zündens der Brennkammern unmittelbar nach einer logisch vorhergehenden Brennkammer gezündet wird, dessen für die vorhergehende Brennkammer ermittelter Laufunruhwert (LUR_{n-1}) einen vorgegebenen Schwellwert (SW1) überschritten hat und einen Fehler der vorhergehenden Brennkammer indiziert. In einem Schritt b) erfolgt das Bestimmen (S2) eines Kompensationsfaktors ...



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur rechnergestützten Bestimmung von mehrfachen Drehungleichförmigkeiten einer Verbrennungskraftmaschine. Die Verbrennungskraftmaschine umfasst eine Anzahl an Brennkammern mit sich bewegenden Kolben, die über eine Kurbelwelle mechanisch miteinander in Verbindung, um die Kurbelwelle in Drehung zu versetzen. Die Bestimmung der Drehungleichförmigkeiten erfolgt mit Hilfe von Laufunruhwerten, die während des Betriebs der Verbrennungskraftmaschine kontinuierlich und aufeinander folgend in der logischen Reihenfolge des Zündens der Brennkammern für jede Brennkammer gemäß einer vorgegebenen Berechnungsvorschrift aus Messgrößen der gerade betrachteten Brennkammer und Messgrößen der unmittelbar zuvor zündenden Brennkammer bestimmt werden, wobei ein jeweiliger Laufunruhwert ein Maß für eine Drehungleichförmigkeit der Kurbelwelle infolge der gerade gezündeten Brennkammer repräsentiert.

[0002] Bei Verbrennungskraftmaschinen wird chemische Energie in mechanische Arbeit umgewandelt. Hierzu wird in den Brennkammern eines jeweiligen Zylinders ein zündfähiges Gemisch aus einem Kraftstoff und Luft verbrannt und Verbrennungswärme erzeugt. Die Wärmeausdehnung des so entstehenden Heißgases wird genutzt, um den Kolben zu bewegen. Verbrennungskraftmaschinen, die dieses Prinzip der inneren Verbrennung nutzen, sind Otto- und Dieselmotoren. Dieses Prinzip findet analog bei Wankelmotoren Anwendung.

[0003] Eine Verbrennungskraftmaschine weist somit einen Zyklus auf, während dem ein Kraftstoff-Luft-Gemisch (im Falle eines Ottomotors) bzw. Luft (im Falle eines Dieselmotors) in der jeweiligen Brennkammer verdichtet wird. Dieser Zyklus ist die notwendige Vorbereitung der Verbrennungspartner für die spätere Entflammung. Ist die Kompression, beispielsweise durch mechanische Defekte der Verbrennungskraftmaschine, gestört, so kann keine ordnungsgemäße Verbrennung und damit keine gleichmäßige Drehmomenterzeugung stattfinden.

[0004] Eine Überprüfung, ob eine gleichmäßige Drehmomenterzeugung stattfindet, erfolgt mit Hilfe von Laufunruhwerten, die ein Maß für eine Drehungleichförmigkeit der Kurbelwelle in Folge unterschiedlicher Drehmomenterzeugung der jeweiligen Brennkammern darstellen. Die typische Ermittlung der Laufunruhwerte basiert auf einer Drehzahlermittlung der Kurbelwelle mittels einer Geberrad-Messung. Ein Geberrad, das drehfest mechanisch mit der Kurbelwelle verbunden ist, ist hierzu in geometrische Segmente unterteilt, um jeder Brennkammer des Verbrennungsmotors einen „Drehmomenten“-Anteil ihrer Verbrennung zuzuordnen. Einer je-

weiligen Brennkammer ist dabei ein bestimmtes geometrisches Segment als sog. Mess-Segment zugeordnet, das von einer Sensorik erfasst wird, wenn die betreffende Brennkammer ein Drehmoment erzeugt.

[0005] Im Rahmen des Erfassens jeweiliger geometrischer Segmente erfolgt für sämtliche Brennkammern über das Geberrad eine Ermittlung jeweiliger Segmentzeiten, wobei aus den Segmentzeiten über einen Vergleich der Segmentzeiten der Brennkammern untereinander die Laufunruhe ermittelt werden kann. Die Segmentzeit ist dabei diejenige Zeit, die ein einer Brennkammer zugeordnetes geometrisches Segment benötigt, um sich an dem Sensor vorbeizubewegen. Da in einer gegebenen Berechnungsvorschrift eine relative Abhängigkeit zwischen den Segmentzeiten zweier logisch unmittelbar hintereinander zündender Brennkammern besteht, ergibt sich eine Beeinflussung der Laufunruhwerte der logisch unmittelbar hintereinander zündenden Brennkammern. Das Verfahren der Laufunruhebestimmung ermöglicht es somit, zuverlässig einfache Fehler, welche singulär durch eine einzelne Brennkammer hervorgerufen sind, zu bestimmen. Mehrfache Drehungleichförmigkeiten können aufgrund der wechselweisen Beeinflussung der Laufunruhwerte untereinander jedoch nicht robust detektiert werden.

[0006] Hieraus ergibt sich das Problem, dass mehrfache Drehungleichförmigkeiten, d.h. bei mehreren Zylindern gleichzeitig auftretende Fehler, welche eine von einem Sollwert abweichende Drehmomenterzeugung mittels Geberrademittelter Laufunruhe nach sich ziehen, nur schwer auffindbar sind, wenn entsprechende Zylinder nacheinander feuern. Hierdurch können Fehler entweder nicht einwandfrei lokalisiert werden, oder es sind aufwändige, zum Teil auch kostenintensive und iterative Fehlerbehebungsversuche erforderlich.

[0007] Es ist Aufgabe der Erfindung, ein Verfahren anzugeben, das die Bestimmung von mehrfachen Drehungleichförmigkeiten einer Verbrennungskraftmaschine auf einfache und zuverlässigere Weise ermöglicht.

[0008] Diese Aufgabe wird gelöst durch ein Verfahren gemäß den Merkmalen des Patentanspruches 1. Vorteilhafte Ausgestaltungen ergeben sich aus den abhängigen Patentansprüchen.

[0009] Es wird ein rechnergestütztes Verfahren zur Bestimmung von mehrfachen Drehungleichförmigkeiten einer gattungsgemäßen Verbrennungskraftmaschine, die eine Anzahl an Brennkammern mit sich bewegenden Kolben umfasst, die über eine Kurbelwelle mechanisch miteinander in Verbindung stehen, um die Kurbelwelle in Drehung zu versetzen, vorgeschlagen. Die rechnergestützte Bestimmung von mehrfachen Drehungleichförmigkeiten erfolgt mit Hil-

fe von Laufunruhwerten, die während des Betriebs der Verbrennungskraftmaschine kontinuierlich aufeinander folgend in der logischen Reihenfolge des Zündens der Brennkammern für jede Brennkammer gemäß einer vorgegebenen Berechnungsvorschrift aus Messgrößen der gerade betrachteten Brennkammer und Messgrößen der unmittelbar zuvor zündenden Brennkammer bestimmt werden. Dabei repräsentiert ein jeweiliger Laufunruhwert ein Maß für eine Drehungleichförmigkeit der Kurbelwelle in Folge der gerade gezündeten Brennkammer.

[0010] Das Verfahren umfasst den Schritt a) des Bestimmens des Laufunruhwerts einer aktuell gezündeten Brennkammer, die in der logischen Reihenfolge des Zündens der Brennkammern unmittelbar nach einer logisch vorhergehenden Brennkammer gezündet wird, dessen für die vorhergehende Brennkammer ermittelter Laufunruhwert einen vorgegebenen Schwellwert überschritten hat, wobei das Überschreiten des Schwellwerts einen Fehler der vorhergehenden Brennkammer indiziert. In einem Schritt b) erfolgt das Bestimmen eines Kompensationsfaktors, der die Beeinflussung der Laufunruhwerte der aktuell gezündeten Brennkammer und der vorhergehenden Brennkammer untereinander abbildet. In Schritt c) erfolgt das Bestimmen eines kompensierten Laufunruhwerts der aktuell gezündeten Brennkammer aus dem Laufunruhwert der aktuell gezündeten Brennkammer und dem Kompensationsfaktor mittels einer Offsetaddition. Schließlich erfolgt in Schritt d) ein Vergleich des kompensierten Laufunruhwerts der aktuell gezündeten Brennkammer mit dem vorgegebenen Schwellwert zur Bestimmung, ob die aktuell gezündete Brennkammer einen Fehler aufweist oder nicht.

[0011] Das erfindungsgemäße Verfahren basiert auf einer rechnerischen Kompensation der voneinander abhängigen Laufunruhwerte, um die Beeinflussung der Laufunruhwerte untereinander herausrechnen zu können. Dies bedeutet, der Einfluss einer unruhig laufenden Brennkammer wird bei der nächsten zündenden Brennkammer herausgerechnet, so dass dann für alle Brennkammern nur die jeweils eigene Laufunruhe erkennbar wird. Dies ermöglicht eine robuste Diagnose von mehrfachen Drehungleichförmigkeiten, insbesondere von Brennkammern, die unmittelbar logisch hintereinander zünden und die einen Fehler aufweisen. Hierdurch können Reparaturen der Verbrennungskraftmaschine beschleunigt werden, da mehrfache Drehungleichförmigkeiten der Verbrennungskraftmaschine ohne weiteres sofort lokalisierbar sind. Darüber hinaus wird eine Validierung von Reparaturen vereinfacht. Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass weniger Gewährleistungskosten im Service entstehen. Ferner treten weniger Wiederholreparaturen auf. Ein weiterer Vorteil ist, dass Fahrzeugausfallzeiten kürzer sind.

[0012] Eine zweckmäßige Ausgestaltung sieht vor, dass ein jeweiliger Laufunruhwert aus gemessenen Segmentzeiten der aktuell gezündeten Brennkammer und der logisch vorhergehend gezündeten Brennkammer mittels eines Geberrades bestimmt wird, das zur Bestimmung einer Kurbelwellendrehzahl drehfest mit der Kurbelwelle verbunden ist. Dabei ist eine jeweilige Segmentzeit die Zeit, die das Geberrad für die Drehung eines vorgegebenen Winkelsegments, das einer jeweiligen Brennkammer zugeordnet ist, benötigt. Die jeweiligen Segmentzeiten werden in der vorgegebenen Berechnungsvorschrift zur unmittelbaren Bestimmung eines Laufunruhwertes der aktuell gezündeten Brennkammer (in dieser Beschreibung auch als „gemessene Brennkammer“ bezeichnet) verarbeitet.

[0013] Der Kompensationsfaktor ist zweckmäßigerweise ein proportionaler Faktor, der sich aus dem Verhältnis der Segmentzeit der fehlerhaften Brennkammer zu der Segmentzeit derselben, nicht fehlerhaften Brennkammer, theoretisch ergibt. Da der Kompensationsfaktor für eine gerade betrachtete Brennkammer nicht aus den beiden genannten Segmentzeiten messtechnisch ermittelt werden kann, da die Brennkammer entweder einen Fehler aufweist oder auch nicht, erfolgt die Ermittlung des Kompensationsfaktors auf indirekte Weise.

[0014] Zweckmäßigerweise wird der Kompensationsfaktor ermittelt aus einer rechnerisch ermittelten Segmentzeit der angenommenen, nicht fehlerhaften vorhergehenden Brennkammer und einem Laufunruhe-Unterschiedswert. Der Laufunruhe-Unterschiedswert ergibt sich aus der Differenz des gemessenen Laufunruhwerts der angenommenen, nicht fehlerhaften vorhergehenden Brennkammer und einem Laufunruhwert der angenommenen, fehlerhaften vorhergehenden Brennkammer, d.h. mit anderen Worten durch die Beeinflussung durch die fehlerhafte unmittelbar zuvor zündende Brennkammer.

[0015] Sämtliche angegebenen Werte bzw. Parameter können messtechnisch bzw. rechnerisch unmittelbar während des Betriebs der Verbrennungskraftmaschine ermittelt werden. Die Ermittlung des Kompensationsfaktors kann somit zur Laufzeit des Betriebs der Verbrennungskraftmaschine erfolgen.

[0016] Es ist weiterhin zweckmäßig, wenn zur Bestimmung des kompensierten Laufunruhwerts aus dem Kompensationsfaktor und dem zuvor für die vorhergehende Brennkammer ermittelten Laufunruhe-Unterschiedswert ein Laufunruhe-Unterschiedswert für die (aktuell gezündete) Brennkammer ermittelt wird, wobei der errechnete Laufunruhe-Unterschiedswert als Offset und der zuletzt gemessene Laufunruhwert addiert werden. Im Ergebnis ergibt sich der kompensierte Laufunruhwert, wie wenn die

unmittelbar vorhergehend gezündete Brennkammer keinerlei Fehler aufweisen würde.

[0017] Der Kompensationsfaktor wird für jedes Paar an Brennkammern, die in der logischen Reihenfolge des Zündens der Brennkammern unmittelbar aufeinander folgen, neu berechnet. Hierdurch ist es möglich, für jede Brennkammer einen kompensierten Laufunruhwert zu ermitteln.

[0018] Es ist weiterhin zweckmäßig, den Kompensationsfaktor, ebenso wie die Laufunruhwerte, zur Laufzeit des Betriebs der Verbrennungskraftmaschine kontinuierlich zu bestimmen. Auf diese Weise ist es möglich, in Echtzeit mehrfache Drehungleichförmigkeiten der Verbrennungskraftmaschine zu ermitteln.

[0019] Es wird ferner ein Computerprogrammprodukt vorgeschlagen, das direkt in den internen Speicher eines digitalen Rechners geladen werden kann und Softwarecodeabschnitte umfasst, mit denen die Schritte des hierin beschriebenen Verfahrens ausgeführt werden, wenn das Produkt auf dem Rechner läuft. Der Rechner kann beispielsweise eine Steuer- und Recheneinheit des Fahrzeugs sein. Der Rechner kann auch eine fahrzeugexterne Recheneinheit, insbesondere ein Motortester, sein. Das Computerprogrammprodukt kann auf einem tragbaren Datenträger, z.B. einer DVD, einer CD-ROM oder einem USB-Speicherstick, verkörpert sein. Ebenso kann das Computerprogrammprodukt als ein über ein drahtloses oder leitungsgebundenes Netzwerk ladbares Signal vorliegen.

[0020] Die Erfindung wird nachfolgend näher anhand eines Ausführungsbeispiels unter Bezugnahme auf die Zeichnungen beschrieben. Es zeigen:

Fig. 1 eine schematische Darstellung von nicht kompensierten Laufunruhwerten einer beispielhaft vier Brennkammern aufweisenden Verbrennungskraftmaschine, wobei einer der Zylinder eine Drehungleichförmigkeit aufweist;

Fig. 2 eine schematische Darstellung von nicht kompensierten Laufunruhwerten der vier Brennkammern aufweisenden Verbrennungskraftmaschine, wobei zwei Brennkammern, die in einer logischen Zündreihenfolge unmittelbar hintereinander gezündet werden, eine Drehungleichförmigkeit aufweisen;

Fig. 3 eine schematische Darstellung von erfindungsgemäß kompensierten Laufunruhwerten der vier Brennkammern aufweisenden Verbrennungskraftmaschine, wobei zwei Brennkammern, die in einer logischen Zündreihenfolge unmittelbar hintereinander gezündet werden, eine Drehungleichförmigkeit aufweisen; und

Fig. 4 ein Ablaufdiagramm, das das Vorgehen des erfindungsgemäßen Verfahrens zur rechnergestützten Bestimmung von mehrfachen Drehungleichförmigkeiten illustriert.

[0021] **Fig. 4** zeigt den prinzipiellen Ablaufplan des erfindungsgemäßen Verfahrens zur rechnergestützten Bestimmung von mehrfachen Drehungleichförmigkeiten von zwei in logischer Reihenfolge des Zündens unmittelbar aufeinanderfolgender Brennkammern einer Verbrennungskraftmaschine. Das Verfahren kann unabhängig von der Anzahl der Brennkammern, nachfolgend auch Zylinder genannt, der Verbrennungskraftmaschine durchgeführt werden. Die Anzahl an Zylindern kann beispielsweise drei, vier, fünf, sechs, acht, zehn oder zwölf betragen. Das Verfahren kann bei Ottomotoren oder bei Dieselmotoren zum Einsatz kommen. Das Verfahren könnte auch in einem Wankelmotor zur Anwendung gelangen.

[0022] Das erfindungsgemäße Verfahren ermöglicht eine Prüfung, ob zwei in logischer Reihenfolge unmittelbar hintereinander zündende Zylinder einen Drehmomentbeitrag erzeugen, der von einem erwarteten Drehmomentbeitrag abweicht. Dies könnte beispielsweise aufgrund von einer nicht ordnungsgemäßen Verbrennung, z.B. aufgrund einer späteren Entflammung eines Kraftstoff-Luft-Gemischs der Fall sein. Bei gestörter Kompression kann keine ordnungsgemäße Verbrennung und damit keine gleichmäßige Drehmomenterzeugung durch die Verbrennungskraftmaschine stattfinden. Drehungleichförmigkeiten können auch durch mechanische Defekte hervorgerufen sein, beispielsweise bei einer fehlerhaften Installation einer Zylinderkopfdichtung, Defekten an Kolbenringen oder einer fehlerhaften Installation von Einlass- oder Auslassventilen während der Produktion der Verbrennungskraftmaschine. Die Folgen derartiger Fehler können aufgrund der unsteady Kompression bzw. Verbrennung eine unruhige Motordrehzahl, ein lautes Motorgeräusch, verringerte Leistungsabgabe und Fehlzündungen sein.

[0023] Während die Bestimmung einer Drehungleichförmigkeit aufgrund eines einzelnen fehlerhaften Zylinders im Stand der Technik zuverlässig gelöst ist, ermöglicht es das vorliegende Verfahren, derartige Fehler robust aufzufinden, bei denen mehrfache Drehungleichförmigkeiten von Zylindern, die in logischer Reihenfolge des Zündens unmittelbar aufeinander folgen, auftreten. Das Verfahren kann beispielsweise bei der Endmontage der Verbrennungskraftmaschine, aber auch im Rahmen einer Wartung in der Werkstatt und sogar im regulären Fahrbetrieb durchgeführt werden.

[0024] Die rechnergestützte Bestimmung von mehrfachen Drehungleichförmigkeiten der Verbrennungskraftmaschine basiert auf der Erkennung von Drehzahlschwankungen (sog. Engine Speed Roughness)

im Falle eines ausbleibenden oder reduzierten Verbrennungsmoments, wobei die Drehzahlschwankungen z.B. eine Folge von Kompressions- oder Füllungsabweichungen sind.

[0025] In der nachfolgenden Beschreibung wird beispielhaft von einem 4-Zylinder-Verbrennungsmotor als Verbrennungskraftmaschine ausgegangen, dessen Zylinder in einer logischen Reihenfolge nacheinander gezündet werden, um eine Kurbelwelle des Verbrennungsmotors, die mit sich hin- und her bewegenden Kolben in den Zylindern in Verbindung steht, in Drehung zu versetzen.

[0026] In einem ersten Schritt **S1** des erfindungsgemäßen Verfahrens erfolgt während des Drehens der Kurbelwelle der Verbrennungskraftmaschine das Erfassen von Laufunruhwerten **LUR** der Anzahl an Zylindern. Die Erfassung der Laufunruhwerte erfolgt dabei in der logischen Reihenfolge des Zündens der Zylinder (sog. Zündfolge **ZF**), welche in den **Fig. 1** bis **Fig. 3** jeweils in der ersten Zeile mit $Zyl[ZF]$ angegeben ist, wobei **ZF** für die Zündfolge 0, 1, 2 oder 3 des beispielhaft angenommenen 4-Zylinder-Verbrennungsmotors steht. Die Laufunruhwerte **LUR** werden in bekannter Weise durch ein Steuerggerät der Verbrennungskraftmaschine, der sog. Motorsteuerung, zur Auswertung der Drehungleichförmigkeit zwischen den einzelnen Zylindern **Zyl** erfasst. Die Laufunruhwerte **LUR** werden im vorliegenden Verfahren genutzt.

[0027] Eine robuste Erfassung der Laufunruhe erfolgt zumeist im quasistationären Betrieb, d.h. in einem Betrieb, in dem keine oder nur minimale Beschleunigung oder Verzögerung der Kurbelwelle angefordert wird. Die Erfassung der Laufunruhwerte **LUR** erfolgt wie nachfolgend beschrieben.

[0028] Die Erfassung der Laufunruhwerte **LUR** erfolgt beispielsweise gemäß der Formel

$$LUR_n = \frac{t_n - t_{n-1} - t_c}{t_n^3}, \quad (1)$$

die darauf basiert, dass durch einen Fehler eines Zylinders, z.B. durch einen Kompressionsverlust eine Drehzahlschwankung hervorgerufen wird, die proportional zur Veränderung einer Winkelbeschleunigung ist. In Formel (1) bezeichnen t_n und t_{n-1} sog. Segmentzeiten eines aktuell gezündeten Zylinders **n** sowie des unmittelbar logisch zuvor gezündeten Zylinders **n-1**. Der Index **n** bezeichnet somit die Nummer der logischen Zündfolge **ZF**. In Formel (1) ist t_c eine konstante Zeit, welche für eine optionale Kalibration genutzt wird. Der Laufunruhwert LUR_n des aktuell gezündeten (oder gemessenen) Zylinders korreliert damit eine aktuelle Segmentzeit t_n des aktuell gezündeten Zylinders mit der Segmentzeit t_{n-1} des vorherge-

hend gezündeten Zylinders **n-1**. Somit können mittels der Laufunruhwerte **LUR** Relativanstiege der Zeitmessungen erfasst werden. Weist die Verbrennungskraftmaschine keine Fehler auf, so sind die Unterschiede zwischen den Winkelbeschleunigungen der einzelnen Zylinder nahezu 0. Hieraus ergibt sich - abhängig von der gewählten Kompensationszeit - ein Laufunruhwert **LUR** von etwa 0, d.h. $LUR \approx 0$.

[0029] Liegt demgegenüber z.B. bei dem Zylinder mit der Zündfolge **ZF** = **n-1** ein Fehler, z.B. ein Kompressionsverlust, vor, so verlängert sich dessen Segmentzeit t_{n-1} . Dies macht sich in einem Anstieg des Laufunruhwert LUR_{n-1} bemerkbar, d.h. $LUR_{n-1} \gg 0$. Übersteigt der Laufunruhwert LUR_{n-1} einen vorgegebenen Schwellwert **SW1** (siehe **Fig. 1** bis **Fig. 3**), indiziert dies das Vorliegen eines Fehlers, z.B. einen Kompressionsverlust und dergleichen. Der vorgegebene Schwellwert **SW1** kann z.B. vorab durch Versuche oder eine numerische Bestimmung ermittelt worden sein. Da die Segmentzeit t_{n-1} auch in die Berechnung des logisch darauffolgenden Zylinders (**ZF** = **n**) einfließt, wird dessen Laufunruhwert LUR_n kleiner als 0, d.h. $LUR_n < 0$. Allerdings kann der absolute Laufunruhwert LUR_n des logisch darauffolgenden Zylinders (**ZF** = **n**) nicht für eine Aussage über den Zustand des Zylinders **n** verwendet werden.

[0030] Dies wird anhand der **Fig. 1** und **Fig. 2** nochmals veranschaulicht. Wie oben ausgeführt, ergibt sich aufgrund der Bestimmung der Laufunruhwerte **LUR** gemäß Formel (1), dass der Zylinder, der auf einen fehlerhaften Zylinder in der logischen Reihenfolge unmittelbar danach zündet, einen wesentlich kleineren, insbesondere einen deutlich negativen Laufunruhwert, aufweist. Dies ist eine Folge der gegenseitigen Beeinflussung der Laufunruhwerte zweier in logischer Reihenfolge unmittelbar aufeinanderfolgend zündender Zylinder gemäß Formel (1).

[0031] Dies kann beispielsweise in der Darstellung gemäß **Fig. 1** erkannt werden. In **Fig. 1** sind nicht kompensierte Laufunruhwerte **LUR** für den beispielhaft angenommenen 4-Zylindermotor in der logischen Zündreihenfolge $Zyl[ZF]$ dargestellt. Es wird dabei davon ausgegangen, dass der logisch zündende Zylinder [1] einen Defekt aufweist (Defekt = „J“), während die anderen Zylinder der Zündfolge **ZF** = 0, 2, 3 keinen Defekt (Defekt = „N“) aufweisen. Die Berechnung der Laufunruhwerte **LUR** erfolgt gemäß Formel (1), so dass aufgrund der größeren Segmentzeit des logischen Zylinders [1] sich ein deutlich erhöhter Laufunruhwert $LUR[1]$ ergibt, der den vorgegebenen Schwellwert **SW1** übersteigt. Aufgrund der größeren Segmentzeit t_1 für den logisch zündenden Zylinder [1] ergibt sich ein deutlich negativer Laufunruhwert $LUR[2]$ für den unmittelbar darauf zündenden Zylinder [2]. Erst der sich daran anschließende zündende Zylinder [3] weist dann wiederum einen stabilen Laufunruhwert $LUR[3]$ nahe 0 auf.

[0032] Aufgrund der Kenntnis der Bestimmung der Laufunruhwerte **LUR** ist ohne weiteres rechnergestützt bestimmbar, dass der logisch zündende Zylinder [1] einen Fehler aufweist.

[0033] Fig. 2 zeigt den Fall, in dem sowohl der logisch zündende Zylinder [1] und der unmittelbar darauf zündende logische Zylinder [2] einen Defekt (Defekt = „J“) aufweisen. Da nunmehr auch der logisch zündende Zylinder [2] eine vergrößerte Segmentzeit t_2 aufweist, ergibt sich ein gegenüber dem in Fig. 1 gezeigten Fall erhöhter Laufunruhwert $LUR[2]$, der lediglich beispielhaft nahezu 0 gewählt ist. Eine eindeutige Erkennung des Fehlers des logisch zündenden Zylinders [2] ist daher nicht möglich, da der Absolutwert des Laufunruhwerts $LUR[2]$ des Zylinders der Zündfolge [2] nicht aussagefähig ist, da $LUR[2] \approx 0$ auf keinen Defekt hindeutet.

[0034] Dieses aus dem Stand der Technik soweit bekannte Vorgehen erlaubt daher lediglich die sichere Feststellung einer Drehungleichförmigkeit, die von einem einzelnen fehlerhaften Zylinder der Anzahl an Zylindern der Verbrennungskraftmaschine verursacht ist. Das geschilderte Problem geht auf den relativen Vergleichscharakter der Detektionsmethode zurück und soll mit obliegendem Verfahren in Richtung einer absoluten Auswertung einzelner Zylinder gelöst werden.

[0035] Das erfindungsgemäße Verfahren erweitert dieses Vorgehen um eine Kompensation, um auch für den Zylinder, der in der logischen Zündreihenfolge auf einen fehlerhaften Zylinder folgt, eine Aussage über seinen Zustand treffen zu können.

[0036] In dem ersten Schritt **S1** wird als aktuell gezündeter Zylinder derjenige Zylinder betrachtet, der in der logischen Reihenfolge des Zündens der Zylinder unmittelbar nach einem logisch vorhergehenden Zylinder gezündet wird, dessen für die vorhergehenden Zylinder ermittelter Laufunruhwert LUR_{n-1} den vorgegebenen Schwellwert **SW1** (siehe Fig. 1 bis Fig. 3) überschritten hat. Mit anderen Worten würde im vorangegangenen Beispiel davon ausgegangen werden, dass der Zylinder der Zündfolge **ZF** = n-1 einen Fehler aufweist, der zu einer verringerten Drehmomenterzeugung führt. Im vorher beschriebenen Ausführungsbeispiel wäre der aktuell zündende Zylinder der Zylinder der Zündfolge [2], der nach dem logisch vorhergehenden Zylinder [1], der einen Fehler aufweist, gezündet wird.

[0037] Erfindungsgemäß erfolgt gemäß Schritt **S2** die Bestimmung eines Kompensationsfaktors f , der die Beeinflussung der Laufunruhwerte des aktuell gezündeten Zylinders (hier [2]) und des vorhergehenden Zylinders (d.h. des in logischer Reihenfolge des Zündens unmittelbar vorhergehenden Zylinders, hier [1]) untereinander abbildet. In Schritt **S3** erfolgt dann

die Bestimmung eines kompensierten & absoluten Laufunruhwertes $cLUR[2]$ (siehe Fig. 3) des aktuell gezündeten Zylinders (hier: [2]) aus dem (nicht kompensierten & relativen) Laufunruhwert $LUR[2]$ des aktuell gezündeten Zylinders und dem Kompensationsfaktor f . Schließlich erfolgt dann in Schritt **S4** ein Vergleich des kompensierten & absoluten Laufunruhwerts **cLUR** des aktuell gezündeten Zylinders (hier: [2]) mit dem vorgegebenen Schwellwert **SW1** zur Bestimmung, ob der aktuell gezündete Zylinder (der unmittelbar auf einem fehlerhaften logisch vorhergehend gezündeten Zylinder zündet) einen Fehler aufweist oder nicht.

[0038] Nachfolgend wird die Bestimmung des Kompensationsfaktors f im Detail erläutert.

[0039] Im Falle eines Defekts im Zylinder 1 erhöht sich die neue Segmentzeit t_1^* des Zylinders [1] gegenüber einem fehlerfrei arbeitenden Zylinder [1] um den Faktor f , der den gesuchten Kompensationsfaktor darstellt:

$$t_1^* = t_1 * f \quad (2),$$

wobei der Kompensationsfaktor f größer als 1 ist, d.h. $f \geq 1$. Für den aktuell zündenden Zylinder [1] ergibt sich dann ein Laufunruhwert

$$LUR_1 = \frac{t_1 - t_0 - t_c}{t_1^3},$$

wenn kein Defekt vorliegt und ein Laufunruhwert

$$LUR_1^* = \frac{f * t_1 - t_0 - t_c}{f^3 * t_1^3},$$

wenn im Zylinder [1] ein Defekt vorliegt. Der hochgestellte Index * kennzeichnet das Vorliegen eines Defekts. Die durch den Defekt hervorgerufene Differenz in den Werten der Laufunruhwerte LUR_1 und LUR_1^* für den aktuell zündenden Zylinder [1] wird als Laufunruhe-Unterschiedswert ΔLUR_1 bezeichnet und ergibt sich dann zu

$$\Delta LUR_1 = LUR_1 - LUR_1^* = \frac{1}{f^3} * \left((f^3 - 1) * LUR_1 - \frac{f - 1}{t_1^2} \right) \quad (3).$$

[0040] Für den darauffolgenden zündenden Zylinder [2] (der den nachfolgenden Zylinder darstellt), ergibt sich ohne jeglichen Defekt

$$LUR_2 = \frac{t_2 - t_1 - t_c}{t_2^3},$$

und mit Defekt des Zylinders [1]

$$LUR_2^* = \frac{t_2 - f * t_1 - t_C}{t_2^3}.$$

[0041] Der Laufunruhe-Unterschiedswert ΔLUR_2 für den Zylinder [2] ergibt sich dann zu

$$\Delta LUR_2 = LUR_2 - LUR_2^* = (f - 1) * \frac{t_1}{t_2^3} \quad (4).$$

[0042] Für den Fall, dass kein Fehler vorliegt, kann angenommen werden, dass alle Segmentzeiten t_1, t_2 in etwa gleich groß sind und der Laufunruhwert des ersten Zylinders [1] in etwa 0 entspricht, d.h. $t_2 \approx t_1$ und $LUR_1 \approx 0$, da bei einem Zylinder, der keinen Fehler aufweist, der Laufunruhwert gemäß Formel (1) etwa 0 ergibt. Hieraus ergeben sich Laufunruhe-Unterschiedswerte ΔLUR_1 für den ersten zündenden Zylinder [1] und ΔLUR_2 für den darauffolgenden zündenden Zylinder [2] gemäß

$$\Delta LUR_1 \approx -\frac{1}{f^3} * \frac{f - 1}{t_1^2} \quad (5),$$

$$\Delta LUR_2 \approx \frac{f - 1}{t_1^2} \quad (6).$$

[0043] Die relative Veränderung der Laufunruhwerte zwischen zwei in logischer Reihenfolge unmittelbar aufeinanderfolgend zündenden Zylinder ergibt sich daher durch die Verrechnung der Formeln (5) und (6) zu

$$\frac{\Delta LUR_2}{\Delta LUR_1} \approx -f^3 \quad (7).$$

[0044] Hieraus ergibt sich für den zweiten Laufunruhe-Unterschiedswert ΔLUR_2

$$\Delta LUR_2 \approx -f^3 * \Delta LUR_1.$$

[0045] Ein erhöhter Laufunruhwert eines Zylinders beeinflusst somit den darauffolgenden Zylinder der logischen Zündreihenfolge in proportionaler Weise mit dem Kompensationseinfluss von $-f^3$.

[0046] Die Bestimmung des Kompensationsfaktors f ist nun wie folgt: der Laufunruhe-Unterschiedswert ΔLUR_1 des einen Fehler aufweisenden Zylinders [1] kann durch eine Analyse der Messungen der Verbrennungskraftmaschine ermittelt werden, indem sein Verhalten der Laufunruhwerte bei keinem De-

fekt im Verhältnis zur gegenwärtigen Situation, in der ein Fehler vorliegt, vorgenommen wird. Die Segmentzeit t_1 für den Fall, dass kein Fehler vorliegt, kann durch Formel (8) ermittelt werden:

$$t_1 \approx \frac{\alpha_1}{6 * n_{mot}} \quad (8),$$

worin t_1 die gemessene Segmentzeit des zündenden Zylinders [1], α_1 eine vordefinierte Segmentbreite für eine Fehlzündungserkennung und n_{mot} die mittlere Motor- bzw. Kurbelwellendrehzahl ist, insbesondere die anliegende mittlere Drehzahl für das vorhandene Segment [1]. Der Kompensationsfaktor f kann dann mit Hilfe der Formeln (3) unter Annahme von $LUR[1] \approx 0$ ohne Defekt und Gleichung (8) ermittelt werden.

[0047] Damit erlaubt es der Kompensationsfaktor f , die Laufunruhe-Unterschiedswerte ΔLUR_n und ΔLUR_{n+1} für zwei logisch aufeinander folgend zündende Zylinder entsprechend der Gleichung (7) zu ermitteln. Durch die Kenntnis des Kompensationsfaktors f kann ein kompensierter Laufunruhwert $cLUR[2]$ für den Zylinder [2] ermittelt werden, indem der Laufunruhe-Unterschiedswert ΔLUR_2 auf den gemessenen Laufunruhwert LUR_2 aufaddiert wird. Hieraus ergibt sich ein im Vergleich zu **Fig. 2** absolut erhöhter Laufunruhwert, der im Falle eines Fehlers oberhalb der vorgegebenen Schwelle **SW1** zum Liegen kommt und damit eindeutig einen Fehler indiziert. Liegt im Zylinder [2] hingegen kein Fehler vor, wird der kompensierte Laufunruhwert $cLUR_2$ in etwa 0, jedoch wesentlich unterhalb des vorgegebenen Schwellwerts **SW1** liegen. Ausgewertet wird dann der kompensierte Laufunruhwert $cLUR_2$ indem dieser mit dem vorgegebenen Schwellwert **SW1** verglichen wird.

[0048] Das oben beschriebene Verfahren kann zur Laufzeit der Verbrennungskraftmaschine am Ende eines Produktionsvorgangs der Verbrennungskraftmaschine, im Rahmen einer Werkstattprüfung oder auch im Fahrbetrieb durchgeführt werden. Durch das beschriebene Verfahren ist keine Zerlegung oder Teilerlegung der Verbrennungskraftmaschine erforderlich, bevor man das komplette Fehlerausmaß verstehen konnte.

[0049] Das Verfahren lässt sich auf Basis vorhandener Steuergerätefunktionen in der Verbrennungskraftmaschine durchführen, da hierzu die Erkennung von Verbrennungsaussetzern, die gesetzlich gefordert ist, genutzt werden kann. Diese benötigt die Auswertung der Drehungleichförmigkeit zwischen einzelnen Zylindern, welche der Ermittlung der Laufunruhwerte entspricht.

[0050] Es ist unerheblich, mit welchem Drehzahl-basiertem Verfahren die relativen Laufunruhwerte ermittelt werden. Ein wesentliches Kennzeichen

des hier vorliegenden Verfahrens besteht darin, eine Kompensation der erfassten Laufunruhwerte zu ermitteln und in Kenntnis eines Kompensationswerts den Einfluss eines unruhig laufenden Zylinders beim nächstzündenden Zylinder herauszurechnen. Dadurch wird für den nächstzündenden Zylinder jeweils der eigene Anteil der Laufunruhe erkennbar.

Bezugszeichenliste

| | |
|----------------------------------|--|
| LUR_{n-1}, LUR_N | Laufunruhwerte |
| LUR | nicht kompensierte Laufunruhwerte |
| $cLUR$ | kompensierte Laufunruhwerte |
| $\Delta LUR_{n-1}, \Delta LUR_n$ | Laufunruhe-Unterschiedswerte |
| $SW1$ | Schwellenwert |
| f | Kompensationsfaktor |
| $S1$ | Bestimmen der relativen Laufunruhwerte |
| $S2$ | Bestimmen eines Kompensationsfaktors |
| $S3$ | Bestimmen eines kompensierten und absoluten Laufunruhwerts |
| $S4$ | Vergleich eines kompensierten Laufunruhwerts |
| t_{n-1}, t_n | Segmentzeiten |

Patentansprüche

1. Verfahren zur rechnergestützten Bestimmung von mehrfachen Drehungleichförmigkeiten einer Verbrennungskraftmaschine, die eine Anzahl an Brennkammern mit sich bewegenden Kolben umfasst, die über eine Kurbelwelle mechanisch miteinander in Verbindung stehen, um die Kurbelwelle in Drehung zu versetzen, mit Hilfe von Laufunruhwerten (LUR_{n-1}, LUR_N), die während des Betriebs der Verbrennungskraftmaschine kontinuierlich und aufeinander folgend in der logischen Reihenfolge des Zündens der Brennkammern für jede Brennkammer gemäß einer vorgegebenen Berechnungsvorschrift aus Messgrößen der gerade betrachteten Brennkammer und Messgrößen der unmittelbar zuvor zündenden Brennkammer bestimmt werden, wobei ein jeweiliger Laufunruhwert (LUR_{n-1}, LUR_n) ein Maß für eine Drehungleichförmigkeit der Kurbelwelle infolge der gerade gezündeten Brennkammer repräsentiert, mit den Schritten:

a) Bestimmen (S1) des Laufunruhwerts (LUR_n) einer aktuell gezündeten Brennkammer, die in der logischen Reihenfolge des Zündens der Brennkam-

mern unmittelbar nach einer logisch vorhergehenden Brennkammer gezündet wird, dessen für die vorhergehende Brennkammer ermittelter Laufunruhwert (LUR_{n-1}) einen vorgegebenen Schwellwert ($SW1$) überschritten hat und einen Fehler der vorhergehenden Brennkammer indiziert;

b) Bestimmen (S2) eines Kompensationsfaktors (f), der die Beeinflussung der Laufunruhwerte (LUR_{n-1}, LUR_n) der aktuell gezündeten Brennkammer durch die vorhergehende Brennkammer abbildet;

c) Bestimmen (S3) eines kompensierten Laufunruhwerts ($cLUR_n$) der aktuell gezündeten Brennkammer aus dem Laufunruhwert (LUR_n) der aktuell gezündeten Brennkammer und dem Kompensationsfaktor (f);

d) Vergleich (S4) des kompensierten Laufunruhwerts ($cLUR_n$) der aktuell gezündeten Brennkammer mit dem vorgegebenen Schwellwert ($SW1$) zur Bestimmung, ob die aktuell gezündete Brennkammer einen Fehler aufweist oder nicht.

2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass ein jeweiliger Laufunruhwert (LUR_{n-1}, LUR_n) aus gemessenen Segmentzeiten (t_{n-1}, t_n) der aktuell gezündeten Brennkammer und der logisch vorhergehend gezündeten Brennkammer mittels eines Geberrades bestimmt wird, das zur Bestimmung einer Kurbelwellendrehzahl drehfest mit der Kurbelwelle verbunden ist, wobei eine jeweilige Segmentzeit (t_{n-1}, t_n) die Zeit ist, die das Geberrad für die Drehung eines vorgegebenen Winkelsegments benötigt.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Kompensationsfaktor (f) ein proportionaler Faktor ist, der sich aus dem Verhältnis der Segmentzeit (t_n^*) der fehlerhaften Brennkammer zu der Segmentzeit (t_n) derselben, nicht fehlerhaften Brennkammer ergibt.

4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Kompensationsfaktor (f) ermittelt wird aus einer rechnerisch ermittelten Segmentzeit (t_{n-1}) der angenommenen, nicht fehlerhaften vorhergehenden Brennkammer und einem Laufunruhe-Unterschiedswert (ΔLUR_{n-1}), der sich ergibt aus der Differenz des gemessenen Laufunruhwerts (LUR_{n-1}) der angenommenen, nicht fehlerhaften vorhergehenden Brennkammer und einem Laufunruhwert (LUR_{n-1}^*) der angenommenen, fehlerhaften vorhergehenden Brennkammer.

5. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass zur Bestimmung des kompensierten Laufunruhwerts ($cLUR_n$) aus dem Kompensationsfaktor (f) und dem zuvor für die vorhergehende Brennkammer ermittelten Laufunruhe-Unterschiedswert (ΔLUR_{n-1}) ein Laufunruhe-Unterschiedswert (ΔLUR_n) für die Brenn-

kammer ermittelt wird, wobei der Laufunruhe-Unterschiedswert (ΔLUR_n) und der ermittelte Laufunruhewert (LUR_n) addiert werden.

6. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Kompensationsfaktor (f) für jedes Paar an Brennkammern, die in der logischen Reihenfolge des Zündens der Brennkammern unmittelbar aufeinander folgen, neu berechnet wird.

7. Computerprogrammprodukt, das direkt in den internen Speicher eines digitalen Computers geladen werden kann und Softwarecodeabschnitte umfasst, mit denen die Schritte gemäß einem der vorhergehenden Ansprüche ausgeführt werden, wenn das Produkt auf einem Computer läuft.

Es folgen 2 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

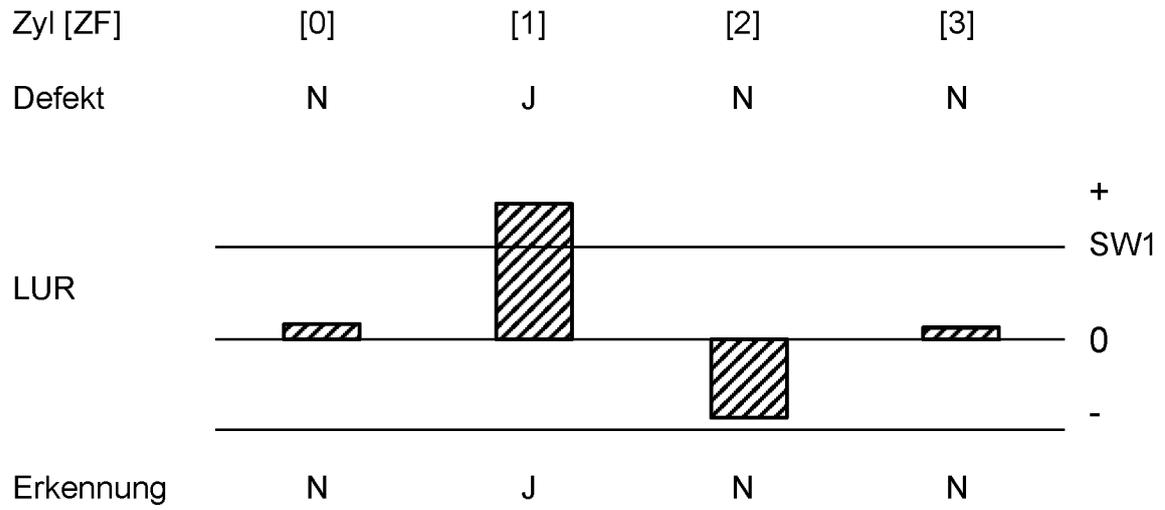


Fig. 1

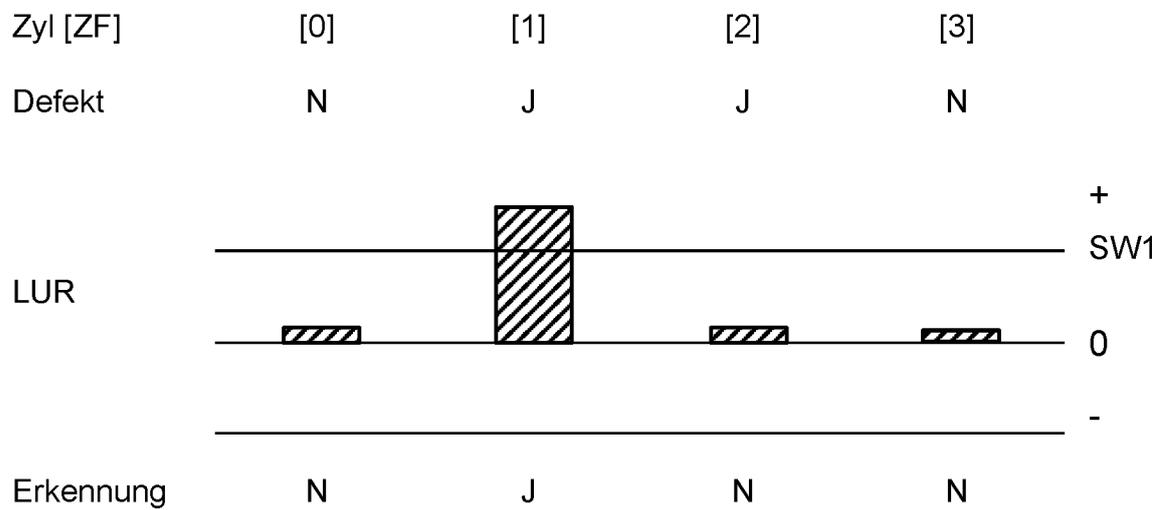


Fig. 2

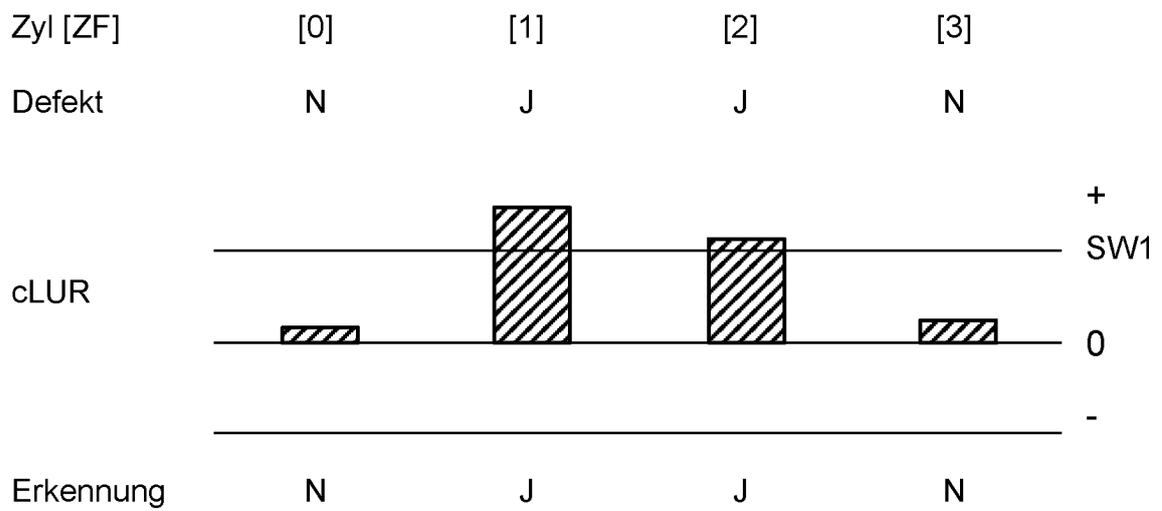


Fig. 3

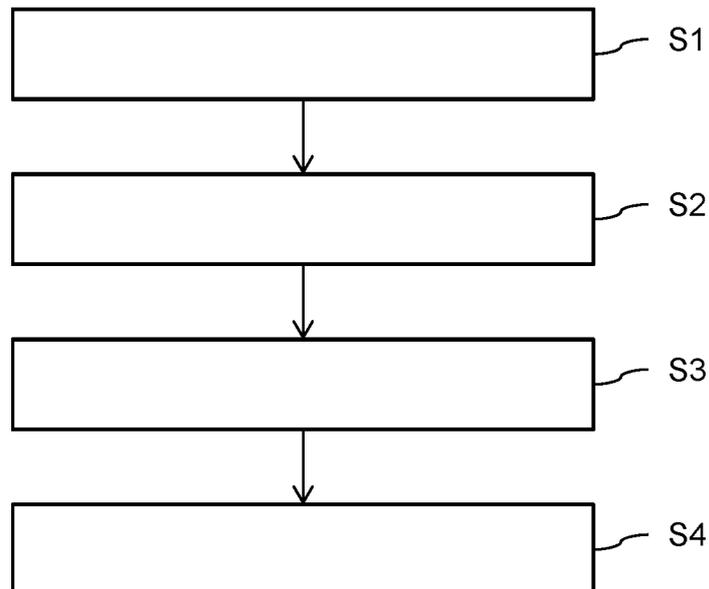


Fig. 4