

(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum  
Internationales Büro

(43) Internationales Veröffentlichungsdatum  
30. Dezember 2020 (30.12.2020)



(10) Internationale Veröffentlichungsnummer  
**WO 2020/259732 A1**

(51) Internationale Patentklassifikation:

G01N 21/91 (2006.01) G01N 21/95 (2006.01)  
G06T 7/00 (2017.01) G01N 21/88 (2006.01)

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/DE2020/000141

(22) Internationales Anmeldedatum:  
24. Juni 2020 (24.06.2020)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:  
10 2019 209 408.2  
27. Juni 2019 (27.06.2019) DE

(71) Anmelder: MTU AERO ENGINES AG [DE/DE]; Dachauer Strasse 665, 80995 München (DE).

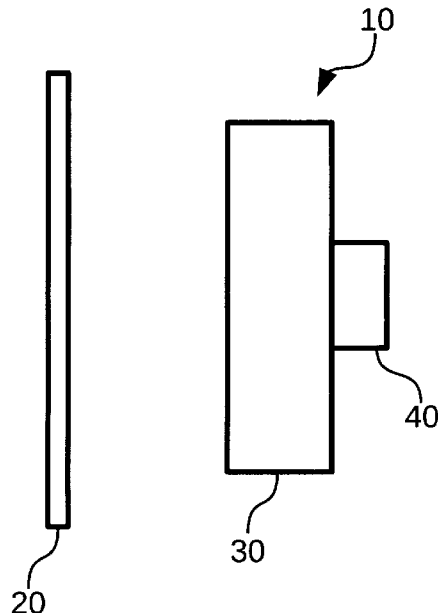
(72) Erfinder: **BONHAGE, Marius**; c/o MTU Aero Engines AG, Dachauer Strasse 665, 80995 München (DE). **ASCHERMANN, Lars**; c/o MTU Aero Engines AG, Dachauer Strasse 665, 80995 München (DE). **SEIDEL, Frank**; c/o MTU Aero Engines AG, Dachauer Strasse 665, 80995 München (DE). **SCHULZE, Uwe**; c/o MTU Aero Engines AG, Dachauer Strasse 665, 80995 München (DE). **LÜTKE, Matthias**; c/o MTU Aero Engines AG, Dachauer Strasse 665, 80995 München (DE). **DÖBBER, Philipp**; c/o MTU Aero Engines AG, Dachauer Strasse 665, 80995 München (DE).

(81) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare nationale Schutzrechtsart): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP,

(54) Title: METHOD FOR DETECTING DEFECTS IN A COMPONENT, METHOD FOR TRAINING A MACHINE LEARNING SYSTEM, COMPUTER PROGRAM PRODUCT, COMPUTER-READABLE MEDIUM, AND SYSTEM FOR DETECTING DEFECTS IN A COMPONENT

(54) Bezeichnung: VERFAHREN ZUM ERKENNEN VON FEHLSTELLEN IN EINEM BAUTEIL, VERFAHREN ZUM TRAINIEREN EINES MASCHINELLEN LERNSYSTEMS, COMPUTERPROGRAMMPRODUKT, COMPUTERLESBARES MEDIUM UND SYSTEM ZUM ERKENNEN VON FEHLSTELLEN IN EINEM BAUTEIL

Fig. 1



(57) Abstract: The invention relates to a method for detecting defects, in particular cracks and/or pores, in a component (20), in particular in a component (20) of a turbomachine, preferably in a component (20) of a drive unit, the method comprising the following steps: applying penetration means onto at least one sub-region of the component (20), such that the penetration means penetrates into any defects, in particular cracks and/or pores, present in the component (20); cleaning the surface of the component (20) of penetration means that has not penetrated into defects, in particular cracks and/or pores, of the component (20); capturing an image, in particular



WO 2020/259732 A1

KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW.

**(84) Bestimmungsstaaten** (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare regionale Schutzrechtsart): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), europäisches (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

**Veröffentlicht:**

— mit internationalem Recherchenbericht (Artikel 21 Absatz 3)

---

an entire image, of the component (20); inputting the captured image into a machine learning system (40) trained to detect defects, in particular cracks and/or pores; and detecting defects, in particular cracks and/or pores, in the component (20) by means of the machine learning system (40) on the basis of light emitted and/or reflected by the penetration means in the defects, in particular cracks and/or pores.

**(57) Zusammenfassung:** Es wird ein Verfahren zum Erkennen von Fehlstellen, insbesondere Rissen und/oder Poren, in einem Bauteil (20), insbesondere in einem Bauteil (20) einer Strömungsmaschine, vorzugsweise in einem Bauteil (20) eines Triebwerks, vorgeschlagen, wobei das Verfahren folgende Schritte umfasst: Aufbringen von Eindringmittel auf zumindest einen Teilbereich des Bauteils (20) derart, dass das Eindringmittel in vorhandene Fehlstellen, insbesondere Risse und/oder Poren, des Bauteils (20) eindringt; Säubern der Oberfläche des Bauteils (20) von Eindringmittel, das nicht in Fehlstellen, insbesondere Risse und/oder Poren, des Bauteils (20) eingedrungen ist; Aufnehmen eines Bilds, insbesondere eines Gesamtbilds, des Bauteils (20); Eingeben des aufgenommenen Bilds in ein zum Erkennen von Fehlstellen, insbesondere Rissen und/oder Poren, trainiertes maschinelles Lernsystem (40); und Erkennen von Fehlstellen, insbesondere Rissen und/oder Poren, in dem Bauteil (20) mittels des maschinellen Lernsystems (40) auf Grundlage von emittiertem und/oder reflektiertem Licht des Eindringmittels in den Fehlstellen, insbesondere Rissen und/oder Poren.

Verfahren zum Erkennen von Fehlstellen in einem Bauteil, Verfahren zum Trainieren eines maschinellen Lernsystems, Computerprogrammprodukt, computerlesbares Medium und System zum Erkennen von Fehlstellen in einem Bauteil

## Beschreibung

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Erkennen von Fehlstellen in einem Bauteil, ein Verfahren zum Trainieren eines maschinellen Lernsystems, ein Computerprogrammprodukt, ein computerlesbares Medium und ein System zum Erkennen von Fehlstellen in einem Bauteil.

## Stand der Technik

Es ist bekannt, bei Bauteilen, z.B. Bauteilen eines Triebwerks, eine Eindringprüfung durchzuführen, um Fehlstellen, insbesondere Risse und/oder Poren, in Bauteilen zu erkennen. Hierbei wird nach einer Reinigung der Oberfläche ein Eindringmittel auf die Oberfläche des Bauteils aufgebracht. Anschließend wird eine Einwirkungszeit abgewartet, in der das Eindringmittel in die Fehlstellen, insbesondere Risse und/oder Poren, des Bauteils kriecht. Danach wird das Eindringmittel von der Oberfläche entfernt, so dass das Eindringmittel nur in den Fehlstellen, insbesondere Rissen und/oder Poren, verbleibt. Das Eindringmittel kann anschließend optisch auf einem Bild des Bauteils erkannt werden.

Nachteilig an bisher bekannten Verfahren zum Erkennen von Fehlstellen, insbesondere Rissen und/oder Poren, ist, dass zum Erkennen der Fehlstellen, insbesondere Risse und/oder Poren, aufwendig bzw. über einen langen Zeitraum geschultes/trainiertes Personal bzw. intensiv trainierte/geschulte Personen mit Erfahrung notwendig sind. Durch das Erkennen von Fehlstellen durch Menschen wird pro Bauteil sehr viel Zeit zum Untersuchen des jeweiligen Bauteils auf Fehlstellen, insbesondere Risse und/oder Poren, benötigt. Des Weiteren geht durch Mitarbeiterfluktuationen Wissen und Erfahrung verloren. Darüber hinaus muss bei bisher bekannten Verfahren das Licht, das von den Eindringmittel reflektiert und/oder emittiert wird, für den Menschen sichtbares Licht umfassen bzw. sein. Hierdurch ist die Auswahl des Eindringmittels eingeschränkt.

## Offenbarung der Erfindung

Der Erfindung liegt die Aufgabe zu Grunde, ein Verfahren bzw. System aufzuzeigen, mittels dem technisch einfach und schnell Fehlstellen, insbesondere Risse und/oder Poren, in Bauteilen mittels eines Eindringmittels erkannt werden können.

Die Aufgabe wird durch ein Verfahren gemäß Anspruch 1, ein Verfahren gemäß Anspruch 5, ein Computerprogrammprodukt gemäß Anspruch 7, ein computerlesbares Medium gemäß Anspruch 8 und ein System gemäß Anspruch 9 gelöst.

Insbesondere wird die Aufgabe durch ein Verfahren zum Erkennen von Fehlstellen, insbesondere Rissen und/oder Poren, in einem Bauteil, insbesondere in einem Bauteil einer Strömungsmaschine, vorzugsweise in einem Bauteil eines Triebwerks, gelöst, wobei das Verfahren folgende Schritte umfasst: Aufbringen von Eindringmittel auf zumindest einen Teilbereich des Bauteils derart, dass das Eindringmittel in vorhandene Fehlstellen, insbesondere Risse und/oder Poren, des Bauteils eindringt; Säubern der Oberfläche des Bauteils von Eindringmittel, das nicht in Fehlstellen, insbesondere Risse und/oder Poren, des Bauteils eingedrungen ist; Aufnehmen eines Bilds, insbesondere eines Gesamtbilds, des Bauteils; Eingeben des aufgenommenen Bilds in ein zum Erkennen von Fehlstellen, insbesondere Rissen und/oder Poren, trainiertes maschinelles Lernsystem; und Erkennen von Fehlstellen, insbesondere Rissen und/oder Poren, in dem Bauteil mittels des maschinellen Lernsystems auf Grundlage von emittiertem und/oder reflektiertem Licht des Eindringmittels in den Fehlstellen, insbesondere Rissen und/oder Poren.

Ein Vorteil hiervon ist, dass das Bauteil schnell, automatisiert und technisch einfach auf Fehlstellen, insbesondere Risse und/oder Poren, untersucht werden kann. Darüber hinaus wird keine besonders geschulte Person zum Erkennen der Fehlstellen, insbesondere Risse und/oder Poren, benötigt. Dies senkt die Kosten des Verfahrens. Zudem ist es möglich, ein Eindringmittel zu verwenden, das Licht in einem für den Menschen nicht-sichtbaren Bereich reflektiert und/oder emittiert. Hierdurch kann das Erkennen von Fehlstellen, insbesondere Rissen und/oder Poren, noch weiter verbessert werden.

Insbesondere wird die Aufgabe auch durch ein Verfahren zum Trainieren eines maschinellen Lernsystems zum Erkennen von Fehlstellen, insbesondere Rissen und/oder Poren, in einem Bauteil, insbesondere in einem Bauteil einer Strömungsmaschine, vorzugsweise in einem Bauteil eines Triebwerks, gelöst, wobei das Verfahren folgende Schritte umfasst: Bereitstellen eines maschinellen Lernsystems, insbesondere umfassend ein neuronales Netzwerk; Eingeben eines Bilds, insbesondere eines Gesamtbilds, des Bauteils in das maschinelle Lernsystem, wobei das Bild emittiertes und/oder reflektiertes Licht von in Fehlstellen, insbesondere Rissen und/oder Poren, des Bauteils vorhandenen Eindringmittel umfasst; Erkennen von Fehlstellen, insbesondere Rissen und/oder Poren, in dem Bauteil mittels des maschinellen Lernsystems auf Grundlage von emittiertem und/oder reflektiertem Licht des Eindringmittels in den Fehlstellen, insbesondere Rissen und/oder Poren; Ausgeben einer Information, ob das Bauteil Fehlstellen, insbesondere Risse und/oder Poren, aufweist oder nicht, durch das maschinelle Lernsystem; und Eingeben von zutreffender Information, ob das Bauteil Fehlstellen, insbesondere Risse und/oder Poren, aufweist oder nicht, in das maschinelle Lernsystem zum Trainieren des maschinellen Lernsystems.

Ein Vorteil hiervon ist, dass das maschinelle Lernsystem technisch einfach, schnell und zuverlässig zum Erkennen von Fehlstellen, insbesondere Rissen und/oder Poren, in dem Bauteil trainiert werden kann.

Insbesondere wird die Aufgabe auch durch ein Computerprogrammprodukt gelöst, das von einem Prozessor eines Computers lesbare Instruktionen aufweist, die, wenn sie von dem Prozessor ausgeführt werden, den Prozessor veranlassen, eines der oben beschriebenen Verfahren auszuführen. Insbesondere wird die Aufgabe auch durch ein computerlesbares Medium gelöst, auf dem dieses Computerprogrammprodukt gespeichert ist.

Insbesondere wird die Aufgabe auch durch ein System zum Erkennen von Fehlstellen, insbesondere Rissen und/oder Poren, in einem Bauteil, insbesondere in einem Bauteil einer Strömungsmaschine, vorzugsweise in einem Bauteil eines Triebwerks, gelöst, wobei das System folgendes umfasst: eine Bilderfassungsvorrichtung zum Aufnehmen eines Bilds, insbesondere eines Gesamtbilds, des Bauteils, wobei das Bild emittiertes und/oder reflektiertes Licht von in Fehlstellen, insbesondere Rissen und/oder Poren, des Bauteils vorhandenen Eindringmittel umfasst; und ein trainiertes maschinelles Lernsystem zum Erkennen von Fehlstellen, insbesondere Rissen und/oder Poren, in dem Bauteil auf

Grundlage des emittierten und/oder reflektierten Lichts des Eindringmittels in den Fehlstellen, insbesondere Rissen und/oder Poren, des Bauteils.

Vorteilhaft hieran ist, dass das System automatisiert, technisch einfach und schnell das Bauteil auf Fehlstellen, insbesondere Risse und/oder Poren, untersuchen kann. Darüber hinaus wird kein besonders geschultes Personal benötigt, das die Fehlstellen, insbesondere Risse und/oder Poren, erkennt. Zudem kann das Eindringmittel Licht im für den Menschen nicht-sichtbaren Bereich reflektieren und/oder emittieren. Hierdurch kann die Zuverlässigkeit der Erkennung von Fehlstellen, insbesondere Rissen und/oder Poren, erhöht werden.

Gemäß einer Ausführungsform des Verfahrens zum Erkennen von Fehlstellen, insbesondere Rissen und/oder Poren, emittiert und/oder reflektiert das Eindringmittel für den Menschen sichtbares Licht.

Vorteilhaft hieran ist, dass das Ergebnis des Verfahrens bzw. die Zuverlässigkeit des Verfahrens durch den Menschen technisch einfach und schnell überprüft werden kann. Dies erhöht das Vertrauen in das Verfahren.

Gemäß einer Ausführungsform des Verfahrens zum Erkennen von Fehlstellen, insbesondere Rissen und/oder Poren, umfasst das Verfahren ferner folgenden Schritt: Ausgeben eines Bilds des Bauteils durch das maschinelle Lernsystem, wobei in dem Bild die von dem maschinellen Lernsystem erkannten Fehlstellen, insbesondere Risse und/oder Poren, gekennzeichnet sind.

Ein Vorteil hiervon ist, dass auf Grundlage der ausgegebenen Information weitere Maßnahmen automatisiert durchgeführt werden können. Beispielsweise können die Bauteile, bei denen das Vorhandensein von Fehlstellen, insbesondere Rissen und/oder Poren, festgestellt wurde, näher untersucht und/oder die Fehlstellen, insbesondere die Risse und/oder Poren, können automatisiert repariert werden.

Gemäß einer Ausführungsform des Verfahrens zum Erkennen von Fehlstellen, insbesondere Rissen und/oder Poren, umfasst das maschinelle Lernsystem ein neuronales Netzwerk umfasst, insbesondere ist das maschinelle Lernsystem ein neuronales Netzwerk.

Vorteilhaft hieran ist, dass das Verfahren besonders zuverlässig und schnell ist.

Gemäß einer Ausführungsform des Verfahrens zum Trainieren des maschinellen Lernsystems wird die zutreffende Information auf Grundlage von von einem Menschen auf dem Gesamtbild erkannten Fehlstellen, insbesondere Rissen und/oder Poren, erstellt.

Vorteilhaft hieran ist, dass das System technisch einfach trainiert werden kann. Es kann insbesondere technisch einfach erreicht bzw. sichergestellt werden, dass das maschinelle Lernsystem Fehlstellen, insbesondere Risse und/oder Poren, besonders zuverlässig erkennt.

Gemäß einer Ausführungsform des Systems emittiert und/oder reflektiert das Eindringmittel für den Menschen sichtbares Licht.

Vorteilhaft hieran ist, dass das Resultat, das vom System ausgegeben wird, technisch einfach durch den Menschen schnell überprüft werden kann. Somit kann die Zuverlässigkeit des Systems durch den Menschen einfach überprüft werden, wodurch das Vertrauen in das System besonders einfach erhöht werden kann.

Bevorzugte Ausführungsformen ergeben sich aus den Unteransprüchen. Nachfolgend wird die Erfindung anhand von einer Zeichnung eines Ausführungsbeispiels näher erläutert.

Hierbei zeigt

Fig. 1 eine schematische Ansicht einer Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Systems zum Erkennen von Fehlstellen, insbesondere Rissen und/oder Poren, in einem Bauteil.

Bei der nachfolgenden Beschreibung werden für gleiche und gleich wirkende Elemente dieselben Bezugsziffern verwendet.

Fig. 1 zeigt eine schematische Ansicht einer Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Systems 10 zum Erkennen von Fehlstellen, insbesondere Rissen und/oder Poren, in einem Bauteil 20, insbesondere in einem Bauteil 20 einer Strömungsmaschine, vorzugsweise in einem Bauteil 20 eines Triebwerks. Das System 10 zum Erkennen von Fehlstellen, insbesondere Rissen und/oder Poren, in einer Oberfläche eines Bauteils 20, z.B. in Schaufeln eines Rotors des Triebwerks, umfasst eine Bilderfassungsvorrichtung 30 und ein maschinelles Lernsystem 40.

Die Bilderfassungsvorrichtung 30, z.B. eine Digitalkamera, erfasst ein optisches Bild, insbesondere ein Gesamtbild, des Bauteils 20. Gesamtbild bedeutet insbesondere, dass nicht ein Bild eines Teilbereichs des Bauteils 20 erzeugt wird, sondern dass ein optisches Bild des gesamten bzw. vollständigen Bauteils 20 (aus einer Perspektive) erzeugt wird.

Das maschinelle Lernsystem 40 ist zum Erkennen von Fehlstellen, insbesondere Rissen und/oder Poren, in dem Bauteil 20 ausgebildet und trainiert.

Eine Eindringprüfung (Dye penetrant inspection; DP) wird an dem Bauteil 20 durchgeführt, z.B. nach DIN EN ISO 3452-1:2014-09. Durch die Eindringprüfung können Fehlstellen, insbesondere Risse und/oder Poren, in der Oberfläche des Bauteils 20 erkannt werden.

Zunächst wird die Oberfläche zumindest eines Teilbereichs der Oberfläche des Bauteils 20, insbesondere die gesamte Oberfläche des Bauteils 20, gereinigt. Dann wird ein Eindringmittel auf den gereinigten Teilbereich der Oberfläche des Bauteils 20 aufgebracht. Nach einer Einwirkungszeit, die von dem jeweiligen Eindringmittel abhängen kann, wird das Eindringmittel von der Oberfläche des Bauteils 20 derart entfernt, dass das Eindringmittel nur in Fehlstellen, insbesondere Rissen bzw. Vertiefungen, des Bauteils 20 verbleibt.

Nun wird ein Bild, insbesondere ein Gesamtbild, des Bauteils 20 erzeugt. Hierbei kann natürliches Licht bzw. Licht des für Menschen sichtbaren Spektrums und/oder Ultraviolettlicht und/oder Infrarotlicht auf das Bauteil 20 bzw. den Teilbereich des Bauteils 20 gestrahlt werden bzw. fallen. Das von dem in den Rissen und/oder Poren verbliebene Eindringmittel emittierte und/oder reflektierte Licht und das von der Oberfläche des Bauteils 20 emittierte

und/oder reflektierte Licht wird zum Erzeugen des Bilds verwendet. Dieses Bild des Bauteils 20 wird in das maschinelle Lernsystem 40 eingegeben. Das Gesamtbild kann aus mehreren erstellten Einzelbildern des Bauteils 20 zusammengesetzt sein.

Das Eindringmittel kann ein Farbeindringmittel und/oder ein Fluoreszenzeindringmittel umfassen oder sein. Während der Einwirkungszeit kriecht das Eindringmittel in die gegebenenfalls vorhandenen Fehlstellen, insbesondere Risse und/oder Poren. Das Licht, das ein Emittieren des Eindringmittels anregt, oder das (teilweise) von dem Eindringmittel reflektiert wird, kann sichtbares Licht, UV-Licht und/oder Infrarotlicht umfassen oder sein. Das Eindringmittel kann für den Menschen sichtbares Licht emittieren und/oder reflektieren. Es ist jedoch auch möglich, dass das Farbeindringmittel für den Menschen nicht-sichtbares Licht emittiert und/oder reflektiert, z.B. Licht im Infrarotbereich und/oder Licht im Ultraviolettbereich. Auch eine Kombination von sichtbarem und nicht-sichtbarem Licht ist möglich.

Das maschinelle Lernsystem 40 ist darauf trainiert, Fehlstellen, insbesondere Risse und/oder Poren, in dem Bauteil 20 bzw. in der Oberfläche des Bauteils 20 auf Grundlage des Eindringmittels, das sich beim Aufnehmen des Gesamtbilds, in den Fehlstellen, insbesondere Rissen und/oder Poren, befindet, zu erkennen bzw. zu identifizieren. Das Eindringmittel sorgt dafür, dass die Fehlstellen, insbesondere Risse und/oder Poren, aufgrund des in den Fehlstellen, insbesondere Rissen und/oder Poren, vorhandenen Eindringmittels in einer anderen Farbe bzw. einem anderen Farbton und/oder einer anderen Helligkeit im Vergleich zu der übrigen Oberfläche des Bauteils 20 erscheinen.

Das maschinelle Lernsystem 40 läuft üblicherweise auf einem Computer bzw. Rechner.

Das maschinelle Lernsystem 40 kann eine support vector machine (SVM), ein neuronales Netzwerk, ein deep neural network (DNN), ein convolutional neural network (CNN) und ähnliches umfassen.

Das maschinelle Lernsystem 40 gibt zumindest eine Information aus, nämlich ob das Gesamtbild des Bauteils 20 bzw. das Bauteil 20 mindestens eine Fehlstelle bzw. mindestens einen Riss oder mindestens eine Pore aufweist oder nicht. Wenn das maschinelle

Lernsystem 40 keine Fehlstelle bzw. keinen Riss und/oder keine Pore in dem Gesamtbild erkannt hat, kann das Bauteil 20 als fehlerfrei gekennzeichnet werden. Daraufhin kann anschließend das nächste Bauteil 20 untersucht werden.

Bei Erkennen mindestens einer Fehlstelle bzw. mindestens eines Risses und/oder mindestens einer Pore in der Oberfläche durch das maschinelle Lernsystem 40 kann das Bauteil 20 als fehlerhaft gekennzeichnet werden. Hierauf kann ein Benutzer des Systems 10 aufmerksam gemacht werden. Denkbar ist, dass der Benutzer das Bauteil 20 händisch bzw. manuell auf Fehlstellen, insbesondere Risse und/oder Poren, untersucht, z.B. an den vom System 10 angegebenen Stellen bzw. Bereichen. Auch ist denkbar, dass die erkannten Fehlstellen, insbesondere Risse und/oder Poren, automatisiert repariert werden. Danach kann z.B. erneut eine Eindringprüfung durchgeführt werden.

Darüber hinaus kann das maschinelle Lernsystem 40 ein Bild ausgeben bzw. erzeugen, auf dem die erkannten bzw. identifizierten Fehlstellen, insbesondere Risse und/oder Poren, in der Oberfläche des Bauteils 20 gekennzeichnet sind. Diese Kennzeichnungen können z.B. durch farbige Elemente, die der Form der Fehlstelle, des Risses bzw. der Pore entsprechen, Beschriftungen oder ähnliches umfassen.

Insbesondere ist es möglich, dass nur ein einziges Gesamtbild des Bauteils 20 (und nicht mehrere Einzelbilder von Teilbereichen des Bauteils 20) in das maschinelle Lernsystem 40 eingegeben wird, um das jeweilige Bauteil 20 auf Fehlstellen, insbesondere Risse und/Poren, zu untersuchen. Üblicherweise werden keine wiederholten Bildaufnahmen desselben Bauteils 20 (aus derselben Perspektive und/oder aus zueinander ähnlichen Perspektiven) durchgeführt. Beim Eingeben eines Gesamtbilds in das maschinelle Lernsystem werden üblicherweise keine Teilbereiche des Bauteils 20 nacheinander, d.h. Stück für Stück bzw. schrittweise, von dem maschinellen Lernsystem 40 untersucht bzw. verarbeitet. Die Fehlstellen, insbesondere Risse und/oder Poren, werden im Gesamtkontext des Bauteils 20 von dem maschinellen Lernsystem 40 erkannt.

Das maschinelle Lernsystem 40 wird auf das Erkennen von Fehlstellen, insbesondere Rissen und/oder Poren, mittels des Eindringmittels folgendermaßen trainiert:

Ein Bild bzw. eine Bildaufnahme bzw. ein Gesamtbild eines Bauteils wird in das maschinelle Lernsystem 40 eingegeben. Auf dem Bild bzw. Gesamtbild ist eine Aufnahme des Bauteils 20 zu sehen, bei dem nach einer Reinigung der Oberfläche ein Eindringmittel auf die Oberfläche aufgetragen wurde und nach einer Einwirkungszeit das Eindringmittel derart von der Oberfläche des Bauteils 20 wieder entfernt wurde, dass das Eindringmittel nur in gegebenenfalls vorhandenen Fehlstellen, insbesondere Rissen und/oder Poren, des Bauteils 20 verblieben ist. Das Bauteil 20 wurde bei der Bildaufnahme derart beleuchtet, dass die Oberfläche, wo keine Fehlstellen, insbesondere Risse und/oder Poren, vorhanden sind, und das Eindringmittel in unterschiedlichen Farben und/oder Farbtönen und/oder Helligkeiten erscheinen.

Anschließend gibt das maschinelle Lernsystem 40 die Information aus, ob das Bauteil 20 Fehlstellen, insbesondere Risse oder Poren, aufweist oder nicht. Zusätzlich kann das maschinelle Lernsystem 40 ein Bild ausgeben, auf dem die Fehlstellen, insbesondere Risse und/oder Poren, gekennzeichnet sind. Ein Trainer, z.B. ein Mensch, berichtet bzw. gibt zutreffend an, ob das jeweilige Bauteil 20 (in der Perspektive des Bilds oder Gesamtbilds) Fehlstellen, insbesondere Risse und/oder Poren, enthält oder nicht. Dies wird in das maschinelle Lernsystem 40 eingegeben, so dass das maschinelle Lernsystem 40 lernen kann.

Der Trainer kann zudem die von dem maschinellen Lernsystem 40 erkannten bzw. identifizierten Fehlstellen, insbesondere Risse und/oder Poren, mit den Fehlstellen, insbesondere Rissen und/oder Poren, die er auf dem Gesamtbild bzw. Bild erkennt, das in das maschinelle Lernsystem 40 eingegeben wurde, vergleichen. Unterschiede zwischen diesen beiden Bildern werden in das maschinelle Lernsystem 40 eingegeben, so dass das maschinelle Lernsystem 40 lernt, welche Fehlstellen, insbesondere Risse und/oder Poren, zutreffend erkannt wurden, welche Fehlstellen, insbesondere Risse und/oder Poren, nicht erkannt wurde und an welchen Stellen, eine Fehlstelle bzw. ein Riss und/oder eine Pore erkannt wurde, obwohl keine Fehlstelle bzw. kein Riss bzw. keine Pore vorhanden ist.

Dieses Training des maschinellen Lernsystems 40 kann mit einer Vielzahl von Bildern, insbesondere Gesamtbildern, möglichst von unterschiedlichen Bauteilen 20, wiederholt werden.

Denkbar ist auch, dass Bilder, die vom Menschen zutreffend als Fehlstellen, insbesondere Rissen und/oder Poren, „aufweisend“ (auch als „eine Anzeige haben“ bezeichnet) oder „nicht aufweisend“ (auch als „keine Anzeige haben“ bezeichnet) markiert wurden, in das maschinelle Lernsystem 40 als Truth/Wahrheit eingegeben werden. Vorstellbar ist auch, dass das Bild, bei dem ein Mensch die Stellen bzw. Positionen der Fehlstellen, insbesondere Risse und/oder Poren, zutreffend markiert hat, als Truth/Wahrheit in das maschinelle Lernsystem 40 eingegeben wird und das maschinelle Lernsystem 40 die Unterschiede zwischen dem erzeugten Bild, auf dem die vom maschinellen Lernsystem 40 erkannten Fehlstellen, insbesondere Risse und/oder Poren, gekennzeichnet sind, und dem Bild, auf dem die von dem Menschen zutreffend erkannten Fehlstellen, insbesondere Risse und/oder Poren, gekennzeichnet sind, selbständig feststellt und auf diese Weise lernt.

Das maschinelle Lernsystem 40 kann von unterschiedlichen Personen trainiert werden. Dies bedeutet, dass unterschiedliche Menschen Fehlstellen, insbesondere Risse und/oder Poren, in dem Gesamtbild identifizieren und diese Information in das maschinelle Lernsystem 40 eingegeben wird.

Insbesondere kann das maschinelle Lernsystem 40 trainiert werden, bis das maschinelle Lernsystem 40 Fehlstellen, insbesondere Risse und/oder Poren, in dem Bauteil 20 mindestens so gut wie ein (hierfür geschulter bzw. trainierter) Mensch erkennt.

Das maschinelle Lernsystem 40 kann das Bild, insbesondere das Gesamtbild, des Bauteils 20 klassifizieren. Z.B. kann das Bild bzw. Gesamtbild in die Klasse „Bauteil ohne Fehlstellen“ bzw. „Bauteil ohne Risse und Poren“ oder in die Klasse „Bauteil mit Fehlstelle“ bzw. „Bauteil mit Rissen und/oder Poren“ klassifizieren. Auch ist es möglich, die Länge der Fehlstelle bzw. der Fehlstellen, insbesondere des Risses oder der Risse bzw. der Pore bzw. Poren, die Breite der Fehlstelle oder der Fehlstellen, insbesondere des Risses oder der Risse, die Größe bzw. Durchmesser der Fehlstelle bzw. Pore und/oder Anzahl der Fehlstellen, insbesondere Risse und/oder Poren, als Klassifikationseigenschaft zu verwenden.

Nach dem Trainieren des maschinellen Lernsystems 40 bzw. bei der Verwendung des Systems 10 wird keine Person benötigt, die die Fehlstellen, insbesondere Risse und/oder Poren, mittels des Eindringmittels erkennt, sondern die Person muss nur den Betrieb des Systems 10 mit dem maschinellen Lernsystem 40 überwachen bzw. bedienen.

Das Bauteil 20 kann z.B. ein Bauteil eines Triebwerks sein. Das Bauteil 20 kann z.B. ein Rotor bzw. eine Schaufel eines Hochdruckkompressors (high pressure compressor, HPC) oder ein Rotor bzw. eine Schaufel einer Hochdruckturbine (high pressure turbine, HPT) eines Triebwerks sein. Das Triebwerk kann insbesondere ein Triebwerk eines Flugzeugs sein. Das Triebwerk kann ein Düsentriebwerk sein.

Das Eindringmittel kann insbesondere ein Rissprüfmittel sein.

Es ist möglich, dass keine Datenbank beim Erkennen der Fehlstellen, insbesondere Risse und/oder Poren, verwendet wird. Typischerweise wird keine Interferometrie zum Erkennen der Fehlstellen, insbesondere Risse und/oder Poren, eingesetzt. Es ist möglich, dass zum Aufnehmen eines Bilds oder des Gesamtbilds eines Bauteils nur eine Bilderfassungsvorrichtung verwendet wird.

#### Bezugszeichenliste

10	System
20	Bauteil
30	Bilderfassungsvorrichtung
40	maschinelles Lernsystem

## Ansprüche

1. Verfahren zum Erkennen von Fehlstellen, insbesondere Rissen und/oder Poren, in einem Bauteil (20), insbesondere einem Bauteil (20) einer Strömungsmaschine, vorzugsweise einem Bauteil (20) eines Triebwerks, wobei das Verfahren folgende Schritte umfasst:  
Aufbringen von Eindringmittel auf zumindest einen Teilbereich des Bauteils (20) derart, dass das Eindringmittel in vorhandene Fehlstellen, insbesondere Risse und/oder Poren, des Bauteils (20) eindringt;  
Säubern der Oberfläche des Bauteils (20) von Eindringmittel, das nicht in Fehlstellen des Bauteils (20) eingedrungen ist;  
Aufnehmen eines Bilds, insbesondere eines Gesamtbilds, des Bauteils (20);  
Eingeben des aufgenommenen Bilds in ein zum Erkennen von Fehlstellen, insbesondere Rissen und/oder Poren, trainiertes maschinelles Lernsystem (40); und  
Erkennen von Fehlstellen, insbesondere Rissen und/oder Poren, in dem Bauteil (20) mittels des maschinellen Lernsystems (40) auf Grundlage von emittiertem und/oder reflektiertem Licht des Eindringmittels in den Fehlstellen, insbesondere Rissen und/oder Poren.
2. Verfahren nach Anspruch 1, wobei das Eindringmittel für den Menschen sichtbares Licht emittiert und/oder reflektiert.
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, ferner folgenden Schritt umfassend:  
Ausgeben eines Bilds des Bauteils (20) durch das maschinelle Lernsystem (40), wobei in dem Bild die von dem maschinellen Lernsystem (40) erkannten Fehlstellen, insbesondere Risse und/oder Poren, gekennzeichnet sind.
4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei das maschinelle Lernsystem (40) ein neuronales Netzwerk umfasst, insbesondere ein neuronales Netzwerk ist.
5. Verfahren zum Trainieren eines maschinellen Lernsystems (40) zum Erkennen von Fehlstellen, insbesondere Rissen und/oder Poren, in einem Bauteil (20), insbesondere in einem Bauteil (20) einer Strömungsmaschine, vorzugsweise in einem Bauteil (20) eines Triebwerks, wobei das Verfahren folgende Schritte umfasst:

Bereitstellen eines maschinellen Lernsystems (40), insbesondere umfassend ein neuronales Netzwerk;

Eingeben eines Bilds, insbesondere eines Gesamtbilds, des Bauteils (20) in das maschinelle Lernsystem (40), wobei

das Bild emittiertes und/oder reflektiertes Licht von in Fehlstellen, insbesondere Rissen und/oder Poren, des Bauteils (20) vorhandenen Eindringmittel umfasst;

Erkennen von Fehlstellen, insbesondere Rissen und/oder Poren, in dem Bauteil (20) mittels des maschinellen Lernsystems (40) auf Grundlage von emittiertem und/oder reflektiertem Licht des Eindringmittels in den Fehlstellen, insbesondere Rissen und/oder Poren;

Ausgeben einer Information, ob das Bauteil (20) Fehlstellen, insbesondere Risse und/oder Poren, aufweist oder nicht, durch das maschinelle Lernsystem; und

Eingeben von zutreffender Information, ob das Bauteil (20) Fehlstellen, insbesondere Risse und/oder Poren, aufweist oder nicht, in das maschinelle Lernsystem (40) zum Trainieren des maschinellen Lernsystems (40).

6. Verfahren nach Anspruch 5, wobei die zutreffende Information auf Grundlage von von einem Menschen auf dem Gesamtbild erkannten Fehlstellen, insbesondere Rissen und/oder Poren, erstellt wird.
7. Computerprogrammprodukt, das von einem Prozessor eines Computers lesbare Instruktionen aufweist, die, wenn sie von dem Prozessor ausgeführt werden, den Prozessor veranlassen, das Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche auszuführen.
8. Computerlesbares Medium, auf dem das Computerprogrammprodukt nach Anspruch 7 gespeichert ist.
9. System (10) zum Erkennen von Fehlstellen, insbesondere Rissen und/oder Poren, in einem Bauteil (20), insbesondere in einem Bauteil (20) einer Strömungsmaschine, vorzugsweise in einem Bauteil (20) eines Triebwerks, wobei das System (10) folgendes umfasst:

eine Bilderfassungsvorrichtung (30) zum Aufnehmen eines Bilds, insbesondere eines Gesamtbilds, des Bauteils (20), wobei das Bild emittiertes und/oder reflektiertes Licht von in Fehlstellen, insbesondere Rissen und/oder Poren, des Bauteils (20) vorhandenen Eindringmittel umfasst; und

ein trainiertes maschinelles Lernsystem (40) zum Erkennen von Fehlstellen,

insbesondere Rissen und/oder Poren, in dem Bauteil (20) auf Grundlage des emittierten und/oder reflektierten Lichts des Eindringmittels in den Fehlstellen, insbesondere Rissen und/oder Poren, des Bauteils (20).

10. System (10) nach Anspruch 9, wobei das Eindringmittel für den Menschen sichtbares Licht emittiert und/oder reflektiert.

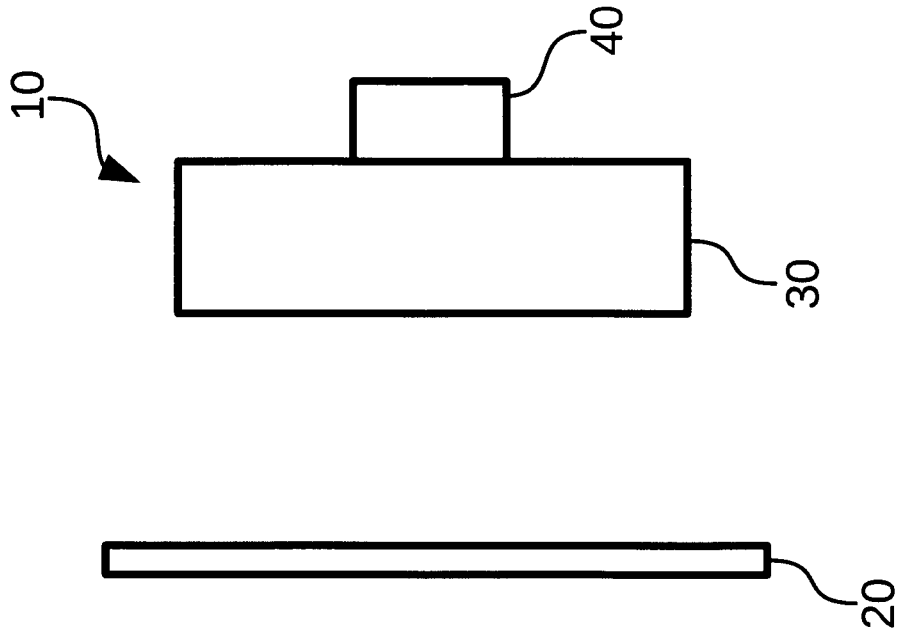


Fig. 1

## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/DE2020/000141

<b>A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER</b>		
<i>G01N 21/91</i> (2006.01)i; <i>G06T 7/00</i> (2017.01)i; <i>G01N 21/95</i> (2006.01)i; <i>G01N 21/88</i> (2006.01)i		
According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC		
<b>B. FIELDS SEARCHED</b>		
Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols) G01N; G06T		
Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched		
Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used) EPO-Internal, WPI Data		
<b>C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT</b>		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	US 10054552 B1 (FRUTUOSO SERGIO S [US] ET AL) 21 August 2018 (2018-08-21) column 1, line 6 - line 38; figures 1-3D column 3, line 66 - column 4, line 16 column 6, line 19 - column 9, line 30 column 10, line 31 - line 46; claims 1-20	1-10
Y	DE 19645377 A1 (TIEDE GMBH & CO RISSPRUEFANLAGEN [DE]) 07 May 1998 (1998-05-07) column 14, line 14 - column 15, line 33; claims 1-12; figure 6	1-10
Y	DE 102018211212 A1 (FANUC CORP [JP]) 10 January 2019 (2019-01-10) paragraph [0039] - paragraph [0042]; claims 1-14; figures 1-3	1-10
A	DE 19708582 A1 (BAUER ERNST & SOHN GMBH CO KG [DE]) 10 September 1998 (1998-09-10) column 14, line 14 - line 38; claims 1-38; figure 6	1-10
A	DE 102013213369 B3 (MTU AERO ENGINES AG [DE]) 23 October 2014 (2014-10-23) paragraph [0023]; figures 1a-1f	1-10
<input type="checkbox"/> Further documents are listed in the continuation of Box C. <input checked="" type="checkbox"/> See patent family annex.		
* Special categories of cited documents: "A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance "E" earlier application or patent but published on or after the international filing date "L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified) "O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed "T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention "X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone "Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art "&" document member of the same patent family		
Date of the actual completion of the international search <b>24 September 2020</b>		Date of mailing of the international search report <b>05 October 2020</b>
Name and mailing address of the ISA/EP <b>European Patent Office p.b. 5818, Patentlaan 2, 2280 HV Rijswijk Netherlands</b> Telephone No. (+31-70)340-2040 Facsimile No. (+31-70)340-3016		Authorized officer <b>Koll, Hermann</b> Telephone No.

**INTERNATIONAL SEARCH REPORT**  
**Information on patent family members**

International application No.

**PCT/DE2020/000141**

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
US	10054552	B1	21 August 2018	EP	3462165	A1	03 April 2019
				US	10054552	B1	21 August 2018
DE	19645377	A1	07 May 1998	NONE			
DE	102018211212	A1	10 January 2019	CN	109242820	A	18 January 2019
				DE	102018211212	A1	10 January 2019
				JP	6705777	B2	03 June 2020
				JP	2019015654	A	31 January 2019
				US	2019012579	A1	10 January 2019
DE	19708582	A1	10 September 1998	NONE			
DE	102013213369	B3	23 October 2014	DE	102013213369	B3	23 October 2014
				EP	2824447	A2	14 January 2015
				US	2015017736	A1	15 January 2015

A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES  
 INV. G01N21/91 G06T7/00 G01N21/95 G01N21/88  
 ADD.  
 Nach der Internationalen Patentklassifikation (IPC) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPC

B. RECHERCHIERTE GEBIETE  
 Recherchierter Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole )  
 G01N G06T

Recherchierte, aber nicht zum Mindestprüfstoff gehörende Veröffentlichungen, soweit diese unter die recherchierten Gebiete fallen

Während der internationalen Recherche konsultierte elektronische Datenbank (Name der Datenbank und evtl. verwendete Suchbegriffe)  
 EPO-Internal, WPI Data

C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
X	US 10 054 552 B1 (FRUTUOSO SERGIO S [US] ET AL) 21. August 2018 (2018-08-21) Spalte 1, Zeile 6 - Zeile 38; Abbildungen 1-3D Spalte 3, Zeile 66 - Spalte 4, Zeile 16 Spalte 6, Zeile 19 - Spalte 9, Zeile 30 Spalte 10, Zeile 31 - Zeile 46; Ansprüche 1-20	1-10
Y	DE 196 45 377 A1 (TIEDE GMBH & CO RISSPRUEFANLAGEN [DE]) 7. Mai 1998 (1998-05-07) Spalte 14, Zeile 14 - Spalte 15, Zeile 33; Ansprüche 1-12; Abbildung 6 ----- -/--	1-10

Weitere Veröffentlichungen sind der Fortsetzung von Feld C zu entnehmen  Siehe Anhang Patentfamilie

- \* Besondere Kategorien von angegebenen Veröffentlichungen :
- "A" Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert, aber nicht als besonders bedeutsam anzusehen ist
- "E" frühere Anmeldung oder Patent, die bzw. das jedoch erst am oder nach dem internationalen Anmeldedatum veröffentlicht worden ist
- "L" Veröffentlichung, die geeignet ist, einen Prioritätsanspruch zweifelhaft erscheinen zu lassen, oder durch die das Veröffentlichungsdatum einer anderen im Recherchenbericht genannten Veröffentlichung belegt werden soll oder die aus einem anderen besonderen Grund angegeben ist (wie ausgeführt)
- "O" Veröffentlichung, die sich auf eine mündliche Offenbarung, eine Benutzung, eine Ausstellung oder andere Maßnahmen bezieht
- "P" Veröffentlichung, die vor dem internationalen Anmeldedatum, aber nach dem beanspruchten Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist
- "T" Spätere Veröffentlichung, die nach dem internationalen Anmeldedatum oder dem Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist und mit der Anmeldung nicht kollidiert, sondern nur zum Verständnis des der Erfindung zugrundeliegenden Prinzips oder der ihr zugrundeliegenden Theorie angegeben ist
- "X" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann allein aufgrund dieser Veröffentlichung nicht als neu oder auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden
- "Y" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann nicht als auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese Verbindung für einen Fachmann naheliegend ist
- "&" Veröffentlichung, die Mitglied derselben Patentfamilie ist

Datum des Abschlusses der internationalen Recherche	Absenddatum des internationalen Recherchenberichts
24. September 2020	05/10/2020

Name und Postanschrift der Internationalen Recherchenbehörde Europäisches Patentamt, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016	Bevollmächtigter Bediensteter  Koll, Hermann
--	--

C. (Fortsetzung) ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN		
Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
Y	DE 10 2018 211212 A1 (FANUC CORP [JP]) 10. Januar 2019 (2019-01-10) Absatz [0039] - Absatz [0042]; Ansprüche 1-14; Abbildungen 1-3 -----	1-10
A	DE 197 08 582 A1 (BAUER ERNST & SOHN GMBH CO KG [DE]) 10. September 1998 (1998-09-10) Spalte 14, Zeile 14 - Zeile 38; Ansprüche 1-38; Abbildung 6 -----	1-10
A	DE 10 2013 213369 B3 (MTU AERO ENGINES AG [DE]) 23. Oktober 2014 (2014-10-23) Absatz [0023]; Abbildungen 1a-1f -----	1-10

**INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT**

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

Internationales Aktenzeichen

PCT/DE2020/000141

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument		Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
US 10054552	B1	21-08-2018	EP 3462165 A1	03-04-2019
			US 10054552 B1	21-08-2018
-----				
DE 19645377	A1	07-05-1998	KEINE	
-----				
DE 102018211212	A1	10-01-2019	CN 109242820 A	18-01-2019
			DE 102018211212 A1	10-01-2019
			JP 6705777 B2	03-06-2020
			JP 2019015654 A	31-01-2019
			US 2019012579 A1	10-01-2019
-----				
DE 19708582	A1	10-09-1998	KEINE	
-----				
DE 102013213369	B3	23-10-2014	DE 102013213369 B3	23-10-2014
			EP 2824447 A2	14-01-2015
			US 2015017736 A1	15-01-2015
-----				