

(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
27. Dezember 2018 (27.12.2018)



(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2018/234331 A1

(51) Internationale Patentklassifikation:

B22F 3/00 (2006.01) *G06N 99/00* (2010.01)
B22F 3/105 (2006.01) *G01N 25/72* (2006.01)
B33Y 30/00 (2015.01) *G01N 29/12* (2006.01)
B33Y 50/00 (2015.01) *G01N 29/24* (2006.01)
B33Y 50/02 (2015.01) *G01B 11/16* (2006.01)
B29C 64/393 (2017.01) *G01B 9/02* (2006.01)
G06F 17/50 (2006.01)

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2018/066304

(22) Internationales Anmeldedatum:
19. Juni 2018 (19.06.2018)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:
 10 2017 210 330.2
 20. Juni 2017 (20.06.2017) DE
 10 2017 124 100.0
 17. Oktober 2017 (17.10.2017) DE

(71) Anmelder: **CARL ZEISS AG** [DE/DE]; Carl-Zeiss-Strasse 22, 73447 Oberkochen (DE). **CARL ZEISS SMT GMBH** [DE/DE]; Rudolf-Eber-Strasse 2, 73447 Ober-

kochen (DE). **CARL ZEISS X-RAY MICROSCOPY INC.** [US/US]; 4385 Hopyard Road, Suite 100, Pleasanton, California 94588 (US). **CARL ZEISS INDUSTRIELLE MESSTECHNIK GMBH** [DE/DE]; Carl-Zeiss-Strasse 22, 73447 Oberkochen (DE).

(72) Erfinder: **TOTZECK, Michael**; Hardtstr. 49, 73525 Schwaebisch Gmuend (DE). **KRAUTZ, Danny**; Strassmannstr. 8, 10249 Berlin (DE). **SPENGLER, Diana**; Hirschbachstr. 73, 73431 Aalen (DE). **WOLF, Uwe**; Johannisring 58, 99441 Magdala (DE). **HAGEN, Christoph-Hilmar Graf vom**; c/o Familie Schwabe, Fritz-Strassmann-Str. 6, 40591 Duesseldorf (DE). **HOLZNER, Christian**; Burgweg 24, 91631 Wetrtingen (DE). **OMLOR, Lars**; Alte Heidenheimer Strasse 39, 73431 Aalen (DE).

(74) Anwalt: **WITTE, WELLER & PARTNER PATENTANWAELTE MBB**; Postfach 10 54 62, 70047 Stuttgart (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, DE, 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,

(54) Title: METHOD AND DEVICE FOR ADDITIVE MANUFACTURING

(54) Bezeichnung: VERFAHREN UND VORRICHTUNG ZUR ADDITIVEN FERTIGUNG

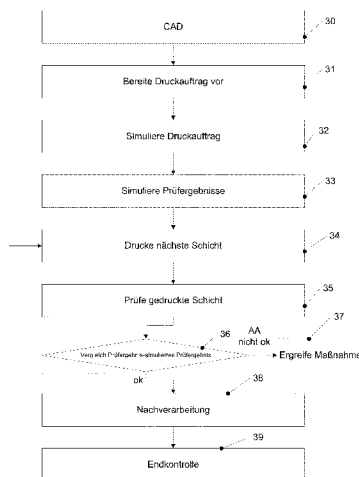


Fig. 3

- 30 CAD
- 31 Prepare print job
- 32 Simulate print job
- 33 Simulate test results
- 34 Print next layer
- 35 Check printed layer
- 36 Comparison test result-simulated test result
- 37 Take action
- 38 Post-processing
- 39 Final inspection
- AA not ok

(57) Abstract: The invention relates to methods and devices for additive manufacturing of workpieces ("3D print"). In this case, a test with a test method, for example by means of laser ultrasound, is carried out for analysis during the manufacturing. For analysis, the result of the test is compared with a result of the simulation of the test.

(57) Zusammenfassung: Es werden Verfahren und Vorrichtungen zur additiven Fertigung von Werkstücken („3D-Druck“) bereitgestellt. Dabei wird zur Analyse während der Fertigung eine Prüfung mit einem Prüfverfahren, beispielsweise mittels Laserultraschall, durchgeführt. Zur Analyse wird das Ergebnis der Prüfung mit einem Ergebnis der Simulation der Prüfung verglichen.



WO 2018/234331 A1

KP, 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, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM,
TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, 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)

Verfahren und Vorrichtung zur additiven Fertigung

[0001] Die vorliegende Anmeldung betrifft Verfahren und Vorrichtungen zur additiven Fertigung von Werkstücken. Eine derartige additive Fertigung wird häufig auch als 3D-Druck bezeichnet.

[0002] Bei der additiven Fertigung wird eine Form eines Werkstücks durch einen Auftrag, d.h. Hinzufügen, von Material realisiert. Insbesondere werden bei vielen additiven Fertigungsverfahren dreidimensionale Werkstücke schichtweise aufgebaut. Das unterscheidet die additive Fertigung von der subtraktiven Fertigung, bei der Material von einem Rohling abgetragen wird, um ein Werkstück mit einer gewünschten Form zu fertigen. Additive Verfahren gewinnen zunehmend an Bedeutung, da hier mittlerweile auch vergleichsweise komplexe Formen von Werkstücken durch entsprechende Programmierung einer Fertigungsvorrichtung, beispielsweise einem sogenannten 3D-Drucker, realisierbar sind.

[0003] Während in der klassischen subtraktiven Fertigung die Qualität und insbesondere die Homogenität des verwendeten Materials durch den Fertigungsprozess nur minimal beeinflusst wird und im Wesentlichen von der Qualität des Materials des verwendeten Rohlings abhängt, werden bei der additiven Fertigung Material, Struktur und Form des Werkstücks gleichzeitig erzeugt. Damit können bei dem Herstellungsprozess leichter Materialfehler auftreten. Derartige Materialfehler können im Inneren eines Werkstücks liegen und sich als reine Materialfehler bemerkbar machen. Zusätzlich können sie an der Oberfläche eines Werkstücks zu Formfehlern führen. Beispiele hierfür sind in den Figuren 1A, 1B und 2 dargestellt.

[0004] Die Figuren 1A und 1B zeigen jeweils schematisch ein mit einem additiven Fertigungsverfahren in mehreren Schichten gefertigtes Werkstück 10. Wie in Figur 1A gezeigt, können bei dem additiven Herstellungsprozess Materialfehler auftreten, zum Beispiel Mikroporen 11, größere Poren 12, Risse 13 oder Schichtablösungen 14, bei welchen die hergestellten Schichten nicht korrekt aneinander haften. Zusätzlich können wie in Figur 1B gezeigt Materialspannungen auftreten (mit dem Bezugszeichen 15 symbo-

lisiert), welche zu Oberflächenporen 17 oder Dellen 16 in der Oberfläche sowie zu Formfehlern führen können.

[0005] Ein typisches additives Fertigungsverfahren ist das Pulverbettverfahren, bei welchem einzelne Schichten eines Metallpulvers selektiv verhärtet werden. Auch hier können beim Verhärten Materialfehler auftreten, wie dies in Figur 2 schematisch dargestellt ist. Bei der Querschnittsansicht der Figur 2 befindet sich Metallpulver 21 auf einer Grundplatte 20. Durch schichtweises selektives Verhärten wird ein Werkstück 22 ausgebildet. Dieses schichtweise selektive Verhärten kann beispielsweise durch Sintern mit einem Laser 24 stattfinden (Lasersintern). Der Laser 24 in Fig. 2 dient dazu, das Metallpulver 21 lokal dort, wo eine Schicht des Werkstücks 22 zu erstellen ist, zu schmelzen, wobei sich das Metallpulver 21 dann nachfolgend verfestigt. Bei anderen Varianten kann ein Bindemittel verwendet werden. Dabei können sich Poren 23 oder andere bereits unter Bezugnahme auf die Figur 1A und 1B erläuterte Materialdefekte bilden.

[0006] Insbesondere bei sicherheitskritischen Anwendungen ist es wichtig, derartige Materialdefekte in Werkstücken erkennen zu können, um gegebenenfalls Maßnahmen ergreifen zu können, wie beispielsweise das Verwerfen eines Werkstücks.

[0007] Aus der EP 2 277 687 B1 und der EP 1 486 317 B1 sind Verfahren zur Bestimmung von Produktionsparametern für ein lasergesintertes Bauteil bekannt.

[0008] Bei diesen Verfahren wird die additive Fertigung simuliert, und physikalische Eigenschaften des gefertigten Bauteils werden aus dem simulierten Herstellungsprozess berechnet, wie beispielsweise geometrische Abmessungen des Werkstücks und mechanische Eigenschaften. Diese berechneten Eigenschaften werden dann mit Eigenschaften des tatsächlich hergestellten Bauteils verglichen. Um diese zu ermitteln, muss das tatsächlich hergestellte Bauteil teilweise zerstört werden, je nach verwendeten Analyseverfahren und vermessenen Eigenschaften. Basierend auf dem Vergleich können dann Produktionsparameter optimiert werden.

[0009] Dieses Verfahren dient also zur Optimierung von Produktionsparametern, erlaubt aber keine Kontrolle einer laufenden Produktion und insbesondere keine zerstörungsfreie Detektion von Materialfehlern der laufenden Bauteilproduktion.

[0010] Aus der JP 2017/094728 A1 ist ein ultraschallbasiertes Verfahren zur Prozesskontrolle bekannt, die Schallemissionen des Pulverbetts wie beispielsweise des Pulverbetts 21 der Figur 2 nutzen. In der US 2017/0144250 A1 wird eine Schallemission einer Vorrichtung zum Aufbringen einer Lage aus Metallpulver, dort als „Recoater“ bezeichnet, beschrieben. Aus der US 2017/0146489 A1 ist der Einsatz einer laserbasierten Ultraschallinspektion in einer additiven Fertigungsanlage basierend auf einem Pulverbettverfahren bekannt.

[0011] Die laserbasierte Ultraschallinspektion ist ein Verfahren, Ultraschall berührungslos mittels eines Lasers in einer Probe, beispielsweise einem durch ein additives Fertigungsverfahren hergestelltes Werkstück, zu erzeugen und wiederum berührungslos zu detektieren. Das Verfahren für sich ist beispielsweise in dem Kapitel „Optical Generation and Detection of Ultrasound“ von Jean-Pierre Monchalin im Buch *Physical Acoustics*, edited by O. Leroy and M. A. Breazeale, Plenum Press, New York, 1991, beschrieben. Der Laserstrahl erzeugt im Material der Probe eine akustische Welle, die sich mit der Schallgeschwindigkeit im Material ausbreitet. Das Prinzip der Anregung thermolelastischer Wellen durch modulierte Laserstrahlung ist beispielsweise auch in Wang, X.; Xu, X.: „Thermoelastic wave induced by pulsed laser heating“, *Applied Physics A* 73, 2001, S. 107–114, beschrieben.

[0012] Inhomogenitäten im Inneren der Probe streuen die Schallwelle, von der ein Teil dadurch wieder zur Objektoberfläche zurückgeleitet wird. Dort führt sie zu einem temporären lokalen Höhenversatz der Objektoberfläche, zu einem lateralen Versatz oder beidem. Diese Bewegung kann durch ein zweites optisches System detektiert werden, zum Beispiel durch eine Topographiemessung und Laservibrometrie, die die durch den Dopplereffekt verursachte Frequenzverschiebung von Licht, das an der bewegten Oberfläche reflektiert wird, ausnutzt. Eine Beschreibung von verschiedenen Verfahren zur Detektion von Ultraschall an Oberflächen findet sich zum Beispiel in R. J. Dewhurst

and Q. Shanddag, " Optical remote measurement of ultrasound", Measurement Science and Technology, Vol. 10, Nr. 11.

[0013] Derartige Ultraschallverfahren lassen sich jedoch nicht auf einfache Weise auf ein additiv gefertigtes Werkstück insbesondere in einem Pulverbett wie es in Figur 2 vorliegt, übertragen. In der üblichen Anwendung derartiger Verfahren zur zerstörungsfreien Materialprüfung ist das zu prüfende Objekt weitgehend homogen, und weist nur wenige Defekte auf. Im Gegensatz dazu stellt das Pulverbett 21 der Figur 2 eine hochgradig inhomogene Umgebung des Werkstücks 22 dar, in der Schallwellen stark gestreut werden. Der für den Streuquerschnitt relevante Impedanzsprung ist in einem Metallpulver sehr groß, da die Schallgeschwindigkeit in Luft ca. 330 m/s beträgt und in Stahl zum Beispiel 6000 m/s. Das entspricht einem Impedanzverhältnis von 20. Außerdem sind die Partikel des Metallpulvers frei (nicht aneinander gebunden), sodass neben Kristallgitterschwingungen wie in homogenen kristallinen Materialien auch makroskopische Bewegungen der Metallkörper des Metallpulvers möglich sind. Die Ausbreitung von Schallwellen in Pulvern ist zum Beispiel in Xiao Ping Jia, J. Laurent, Y. Khidas und V. Langlois, " Sound scattering in dense granular medium", Chinese Science Bulletin Vol. 54 Nr. 23, S. 4327–4336, 2009, oder in O. Mouraille and S. Luding: "Sound propagation in dense, frictional granular materials" in Powders and Grains 2005, Editors R. Garcia-Rojo, H. J. Herrmann und S. McNamara, S. 319, Leiden, 2005, A. A. Balkema Publishers beschrieben.

[0014] Ein wichtiger Skalierungsparameter für die Schallausbreitung ist dabei die Korngröße des Metallpulvers. Schallwellen mit einer Wellenlänge im Pulver von deutlich mehr als der Korngröße breiten sich im Pulver näherungsweise wie in einem homogenen Material aus, während Schallwellen mit einer Wellenlänge kleiner der Korngröße durch die Körner stark gestreut werden.

[0015] Die starke Streuung im Pulver führt zu einer Überlagerung des Signals, welches von Defekten in dem Werkstück herrührt, mit einem starken Untergrund. Erschwerend kommt dazu, dass mit additiven Fertigungsverfahren hergestellte Strukturen häufig filigran und komplex sind, d.h. sie weisen im Verhältnis zu ihrem Volumen eine große, komplex gestaltete Oberfläche auf, die ebenfalls Schallwellen stark streut.

[0016] Daher ist das mit derartigen Verfahren erfasste akustische Streusignal komplex und setzt sich aus einem großen Beitrag aus dem Pulverbett, einem mittelgroßen Beitrag aus der Oberfläche des Werkstücks und einem vergleichsweise kleinen Beitrag durch Materialdefekte zusammen. Daher kann es schwierig sein, aufgrund solcher Signale mit herkömmlichen Herangehensweisen Materialfehler korrekt zu detektieren. Bei der Analyse ist dabei zudem zu beachten, dass ein Teil der Fehler, die bei der additiven Fertigung auftreten können, kumulativ ist, d.h. sie zeigen erst Auswirkungen, nachdem eine Reihe von Schichten gefertigt wurden. Beispielsweise können durch Spannungen in einer obersten Lage Lagen darunter sich ablösen, oder es können sich darin Risse bilden. Ob sich bildende Poren kritisch sind, hängt auch davon ab, wie viele Poren sich in der Nachbarschaft befinden. Zudem bilden sich Spannungen im Material häufig erst nach mehreren Lagen aus.

[0017] Ein weiteres bekanntes Verfahren zur zerstörungsfreien Prüfung von Werkstücken ist die elektronische Speckle-Interferometrie (ESPI). Die DE 10 2014 202 020 B4 beschreibt den Einsatz der elektronischen Speckle-Interferometrie zum Ermitteln einer Oberflächenverspannung in einem Bereich um ein Schmelzbad, welches beim Lasersintern in einem Pulverbett erzeugt wird, ohne daraus Rückschlüsse auf sich unter der Oberfläche befindliche Materialfehler oder Materialverspannungen zu ziehen. Die ESPI wie oben beschrieben beschränkt sich auf eine Oberflächenanalyse zur Ermittlung von Verspannungen und oberflächlich vorhandenen Porenbildungen oder Einschlüssen.

[0018] Die US 6 043 870 B beschreibt ein ESPI-Gerät mit kompakter Faseroptik für industrielle Anwendungen, um durch thermische Anregungen Materialanomalien und Delaminierungen zu identifizieren. Auf mögliche materialspezifische Eigenschaften und Probleme, beispielsweise Probleme durch Signale aus einem Pulverbett, wird nicht eingegangen. Auch die US 6 043 870 A beschreibt ein ESPI-System für den Einsatz in der industriellen Materialanalyse im Allgemeinen, wobei eine thermische Anregung vorgenommen wird. Wissenschaftliche Veröffentlichungen, zum Beispiel H. Gerhard, G. Busse, WCU 2003, Paris, 7.-10. September 2003, beschreiben eine Variation des ESPI mittels akustischer und thermischer Anregung bei der Analyse von Polymeren und keramischen Werkstücken. Die Untersuchung dieser Anregungsmethoden sind in diesen wissenschaftlichen Publikationen auf Kunststoffe fokussiert.

[0019] Zudem werden in der Literatur Verfahren beschrieben, die eine 3D-Rekonstruktion eines Werkstücks aus thermischen Daten erlauben, zum Beispiel Fernando López Rodríguez, Vicente de Paulo Nicolau, Inverse heat transfer approach for IR image reconstruction: Application to thermal non-destructive evaluation, Applied Thermal Engineering, Vol. 33, 2012, S. 109-118, ISSN 1359-4311.

[0020] Es ist daher eine Aufgabe der vorliegenden Anmeldung, Verfahren und Vorrichtungen bereitzustellen, mit welchen eine Prüfung von mit additiven Verfahren hergestellten Werkstücken während der Herstellung möglich ist, wobei insbesondere die Besonderheiten der additiven Fertigung, insbesondere auf hohe Untergrundsignale, welche beispielsweise aus einem Pulverbett herrühren, berücksichtigt werden können.

[0021] Hierzu werden ein Verfahren nach Anspruch 1 oder 16 sowie eine Vorrichtung gemäß Anspruch 13 oder 18 bereitgestellt. Die Unteransprüche definieren weitere Ausführungsformen.

[0022] Gemäß einem ersten Aspekt der Erfindung wird ein Verfahren zur additiven Fertigung von Werkstücken bereitgestellt, umfassend:

Bereitstellen von Fertigungsdaten für ein Werkstück,

Simulieren der Fertigung des Werkstücks,

Simulieren von Prüfergebnissen während der Fertigung basierend auf der simulierten Fertigung,

Hinzufügen einer nächsten Gruppe von Schichten zu dem Werkstück,

Prüfen der Gruppe von Schichten um gemessene Prüfergebnisse zu erhalten ,

Auswerten des Prüfens basierend auf den simulierten Prüfergebnissen und den gemessenen Prüfergebnissen,

Wiederholen des Hinzufügens, des Prüfens und des Auswertens, falls das Auswerten eine akzeptable Fertigung anzeigt, und

Ergreifen einer Maßnahme, falls das Auswerten eine inakzeptable Fertigung anzeigt.

[0023] Durch eine derartige Kombination einer Simulation von Prüfergebnissen und einer tatsächlichen Prüfung, d.h. Messung des herzustellenden Werkstücks, kann auch für komplexere Situationen eine Abweichung aufgrund von Materialfehlern erkannt werden. Vorzugsweise wird die Fertigung des Werkstücks unter Verwendung der bereitgestellten Fertigungsdaten und unter Verwendung eines Modells zur additiven Fertigung simuliert. Besonders bevorzugt beinhaltet das Modell zur additiven Fertigung ein Modell zur Herstellung von aufeinander angeordneten und miteinander verbundenen Materialschichten, wobei die einzelnen Materialschichten beispielsweise durch Verschmelzen und/oder Verkleben von Pulverpartikeln hergestellt werden, die in einem Pulverbett angeordnet sind. Das Modell zur additiven Fertigung kann beispielsweise die Temperaturverteilung modellieren, die sich in Abhängigkeit von der Umgebungstemperatur und in Abhängigkeit von einer gezielten lokalen Energieeinstrahlung, wie etwa einer Lasereinstrahlung von einer Laserlichtquelle, in dem Pulverbett ergibt. Des Weiteren repräsentiert das Modell in den bevorzugten Ausführungsbeispiele Form und die Lage der einzelnen Materialschichten, Dimensionen, wie etwa die Länge oder Dicke ausgewählter Materialschichten und/oder deren Bindung aneinander. Vorzugsweise liefert der Schritt des Simulierens eine Repräsentation des herzustellenden Werkstücks, die in Abhängigkeit von den für die Simulation ausgewählten Fertigungsparametern, wie etwa Partikelgröße, Partikelhomogenität, Umgebungstemperatur, Bearbeitungstemperatur, Vorschubgeschwindigkeit des Werkzeugs, variiert.

[0024] Das Simulieren von Prüfergebnissen beinhaltet vorzugsweise das rechnerische Bestimmen von Parametern, die die vorgenannte Repräsentation charakterisieren. Die Prüfergebnisse können einen oder mehrere der folgenden Parameter beinhalten: Rauigkeit einer oder mehrerer Oberflächen, Welligkeit einer oder mehrerer Oberflächen, Form einer oder mehrerer Oberflächen, Dimensionen wie Abstand, Durchmesser, Umfang von ausgewählten Werkstückbereichen, Temperatur oder Temperaturverteilung

an ausgewählten simulierten Messpunkten sowie das Vorhandensein und ggf. die Dimension von Poren, Rissen, Materialeinschlüssen u.a.. Mit anderen Worten wird hier eine simulierte Messung an dem simuliert hergestellten Werkstück rechnerisch durchgeführt, um individuelle Eigenschaften des simuliert hergestellten Werkstücks zu bestimmen. Es versteht sich, dass diese individuellen Eigenschaften in Abhängigkeit von den für die Simulation gewählten Fertigungsparametern variieren. Andererseits repräsentieren die individuellen Eigenschaften des simuliert hergestellten Werkstücks ein Referenzwerkstück für das real hergestellte Werkstück.

[0025] Das Hinzufügen einer nächsten Gruppe von Schichten beinhaltet, dass unter Verwendung eines additiven Fertigungsverfahrens eine neue Werkstückschicht „real“ auf bereits vorhandenen Werkstückschichten aufgebracht wird. In bevorzugten Ausführungsbeispielen erfolgt dies, wie oben angedeutet, durch Verschmelzen und/oder Verkleben von Pulverpartikeln, die auf bereits vorhandenen Werkstückschichten angeordnet werden.

[0026] Der Schritt des Prüfens beinhaltet das Bestimmen von individuellen Parametern, die die neue Werkstückschicht zusammen mit den darunter liegenden Werkstückschichten charakterisieren. Die individuellen Parameter können einen oder mehrere der folgenden Parameter beinhalten: Rauigkeit einer oder mehrerer Oberflächen, Welligkeit einer oder mehrerer Oberflächen, Form einer oder mehrerer Oberflächen, Dimensionen wie Abstand, Durchmesser, Umfang von ausgewählten Werkstückbereichen, Temperatur oder Temperaturverteilung an ausgewählten Messpunkten und ggf. die Dimension von Poren, Rissen, Materialeinschlüssen u.a.. Die Messung kann die Anregung der neuen Werkstückschicht zusammen mit den darunter liegenden Werkstückschichten mit Hilfe einer Energiequelle sowie die Messung von Reflexionen, Transmission oder Streuung der Energiestrahlung an den Werkstückschichten beinhalten. Die Energie kann mit Hilfe von Röntgenstrahlung, UV-Strahlung, IR-Strahlung, sichtbarer Lichtstrahlung und/oder mit Schall einschließlich Ultraschall auf die Werkstückschichten gebracht werden.

[0027] Das Auswerten kann ein Auswerten unter Verwendung eines mittels maschinellen Lernens trainierten Systems umfassen. Dabei kann mittels Trainingsbeispielen ein Lernen erfolgen, was das Auswerten erleichtert.

[0028] Das Auswerten kann ein Vergleichen der simulierten Prüfergebnisse mit den gemessenen Prüfergebnissen umfassen. So kann beispielsweise ein Anteil eines Pulverbetts herausgerechnet werden. Insbesondere beinhaltet der Schritt des Auswertens einen Vergleich der individuellen Parameter der vorgenannte Repräsentation und der jeweils entsprechenden individuellen Parameter der neuen Werkstückschicht zusammen mit den jeweils darunter liegenden Werkstückschichten. Dementsprechend beinhaltet das neue Verfahren in einigen Ausführungsbeispielen einen schichtweisen Vergleich von durch Simulation bestimmten Parametern und durch Messung bestimmten Parametern. Das durch additive Fertigung hergestellte Werkstück wird vorzugsweise zwischen der Herstellung einzelner Werkstückschichten mit einer durch Simulation bestimmten erwarteten Werkstückstruktur verglichen. Die durch Simulation bestimmten Parameter repräsentieren Werkstückschichten, die unter idealen, modellhaften Bedingungen entstehen. Die im Schritt des Prüfens bestimmten individuellen Parameter repräsentieren das reale Herstellungsergebnis. Durch einen Vergleich der jeweiligen Parameter können Abweichungen des Fertigungsprozesses vom idealen Fertigungsprozess auf effiziente Weise erkannt werden.

[0029] Das Ergreifen einer Maßnahme kann ein Ändern von Prozessparametern für ein folgendes Hinzufügen einer Gruppe von Schichten umfassen. Dies kann ein Hinzufügen für ein nächstes zu fertigendes Werkstück oder für das gleiche Werkstück sein. So kann das Auswerten zur Prozessverbesserung benutzt werden.

[0030] Das Ergreifen einer Maßnahme kann auch ein Verwerfen des Werkstücks umfassen, wenn zum Beispiel das Auswerten ergibt, dass das Werkstück wegen Materialfehlern Qualitätsanforderungen nicht genügt.

[0031] Die Gruppe von Schichten kann eine einzige Schicht, mehrere Schichten oder einen Teil einer Schicht umfassen. Je nach Anforderungen kann das Prüfen und Auswerten also verschieden häufig durchgeführt werden.

[0032] Das Auswerten kann eine Verwendung einer vorgegebenen Korrelation von Unterschieden zwischen den gemessenen Prüfergebnissen und den simulierten

Prüfergebnissen zu Bauteileigenschaften umfassen. Es können also beispielsweise aus Kalibriermessungen derartige Korrelationen bestimmt werden und dann auf das Auswerten angewendet werden.

[0033] Das Prüfen kann eine Durchführung eines Laserultraschallverfahrens umfassen. Dabei wird bei einem Pulverbettverfahren bevorzugt ein Laserstrahl mit einer Pulsfrequenz unterhalb von $f_{\max} = v_M / (d_M + s_M)$ verwendet, wobei v_M die Schallgeschwindigkeit im homogenen Pulvermaterial und d_M ein mittlerer Partikeldurchmesser des Pulvers und s_M eine einfache Standardabweichung der Größenverteilung der Partikel ist.

[0034] Das Prüfen kann auch eine Durchführung einer elektronischen Laser-Speckle-Interferometrie umfassen.

[0035] Das Prüfen kann auch eine Durchführung einer Infrarot-Thermografie oder einer Röntgen-Untersuchung, beispielsweise Röntgen-Scatterometrie, umfassen.

[0036] Durch die Verwendung einer Simulation können auch komplexe Messdaten aus diesen Verfahren ausgewertet werden.

[0037] Gemäß einem zweiten Aspekt wird eine Vorrichtung zur additiven Fertigung von Werkstücken bereitgestellt, umfassend:

eine Simulationseinrichtung zum Simulieren einer additiven Fertigung eines Werkstücks und zum Simulieren von Prüfergebnissen während der Fertigung,

eine Fertigungseinrichtung zum additiven Fertigen des Werkstücks, und

eine Prüfeinrichtung zum Prüfen des Werkstücks während der additiven Fertigung, um gemessene Prüfergebnisse zu erlangen,

wobei die Prüfeinrichtung eingerichtet ist, das Werkstück jeweils nach dem Hinzufügen einer nächsten Gruppe von Schichten zu prüfen, und die Simulationseinrich-

tung eingerichtet ist, ein Auswerten auf Basis der simulierten Prüfergebnisse und der gemessenen Prüfergebnisse durchzuführen und zu bewirken, dass eine Maßnahme ergriffen wird, wenn das Auswerten eine inakzeptable Fertigung des Werkstücks anzeigt.

[0038] Die Prüfeinrichtung kann insbesondere eine Laserultraschallprüfeinrichtung, eine elektronische Laser-Speckle-Interferometrieprüfeinrichtung, eine Infrarot-Thermografieprüfeinrichtung und/oder eine Röntgen-Untersuchungseinrichtung umfassen.

[0039] Die Vorrichtung, insbesondere die Simulationseinrichtung, kann zur Durchführung eines der oben beschriebenen Verfahren eingerichtet sein.

[0040] Gemäß einem dritten Aspekt wird ein Verfahren zur additiven Fertigung von Werkstücken bereitgestellt, umfassend:

Fertigen des Werkstücks mit einem additiven Fertigungsverfahren, und

Analysieren des Werkstücks während der Fertigung mit einer Kombination aus Infrarot-Thermografie und elektronischer Speckle-Interferometrie.

Durch die Kombination von Infrarotthermographie und elektronischer Laser-Speckle-Interferometrie kann eine genaue Analyse erfolgen.

Das Analysieren kann eine Auswertung mittels maschinellem Lernen umfassen.

[0041] Gemäß einem vierten Aspekt wird eine Vorrichtung zur Fertigung eines Werkstücks bereitgestellt, umfassend:

eine Fertigungsvorrichtung zur additiven Fertigung des Werkstücks, und

eine Analysevorrichtung zur Analyse des Werkstücks während der Fertigung, wobei die Analysevorrichtung eine Einrichtung zur elektronischen Laser-Speckle-Interferometrie und eine Einrichtung zur Infrarot-Thermografie umfasst.

[0042] Die Erfindung wird nachfolgend anhand von verschiedenen Ausführungsbeispielen ausführlich erläutert. Es zeigen:

Figuren 1A und 1B Beispiele für Materialfehler bei additiver Fertigung,

Figur 2 ein Beispiel für Materialfehler bei einem Pulverbettverfahren zur additiven Fertigung,

Figur 3 ein Flussdiagramm zur Veranschaulichung eines Verfahrens gemäß einem Ausführungsbeispiel,

Figur 4 eine Darstellung zur Veranschaulichung der Verwendung von Simulationen in manchen Ausführungsbeispielen,

Figur 5 eine Vorrichtung zur Durchführung eines laserultraschallbasierten Prüfens eines Werkstücks gemäß einem Ausführungsbeispiel,

Figur 6 ein Flussdiagramm eines Verfahrens gemäß einem Ausführungsbeispiel,

Figur 7 eine Vorrichtung zum Prüfen eines Werkstücks gemäß einem Ausführungsbeispiel, und

Figur 8 eine Vorrichtung zum Prüfen eines Werkstücks gemäß einem weiteren Ausführungsbeispiel.

[0043] Nachfolgend werden verschiedene Ausführungsbeispiele detailliert erläutert. Diese Ausführungsbeispiele dienen lediglich der Veranschaulichung und sind nicht

als einschränkend auszulegen. So weisen manche beschriebenen Ausführungsbeispiele eine Vielzahl von Merkmalen oder Komponenten auf. Dies ist nicht dahingehend auszulegen, dass alle diese Merkmale oder Komponenten zur Implementierung notwendig sind. Vielmehr können andere Ausführungsbeispiele weniger Komponenten oder Merkmale oder auch alternative Merkmale oder Komponenten aufweisen. Zusätzlich zu den explizit dargestellten und beschriebenen Merkmalen und Komponenten können auch weitere Merkmale oder Komponenten, insbesondere Merkmale oder Komponenten herkömmlicher Systeme zur additiven Fertigung oder zur Analyse von Werkstücken, bereitgestellt sein.

[0044] Merkmale verschiedener Ausführungsbeispiele können miteinander kombiniert werden, sofern nichts anderes angegeben ist. Variationen und Abwandlungen, welche für eines der Ausführungsbeispiele beschrieben werden, sind auch auf andere Ausführungsbeispiele anwendbar.

[0045] Die Figur 3 zeigt ein Flussdiagramm eines Verfahrens zum additiven Herstellen eines Werkstücks gemäß einem Ausführungsbeispiel. Eine derartige additive Fertigung wird nachfolgend auch als 3D-Druck oder kurz als Druck bezeichnet. Als Verfahren zur Herstellung können dabei pulverbettbasierte Verfahren wie beispielsweise Lasersintern oder auch Verfahren, bei denen ein Pulver, insbesondere Metallpulver, durch ein Bindemittel schichtweise verfestigt wird, zum Einsatz kommen. Dieses und folgende Ausführungsbeispiele sind jedoch auch auf andere Herstellungsverfahren als pulverbettbasierte Verfahren anwendbar.

[0046] Bei dem Verfahren wird in Schritt 30 ein computergestützter Entwurf (CAD, vom englischen computer aided design) eines Werkstücks bereitgestellt. In Schritt 31 wird dann ein Druckauftrag vorbereitet, indem der computergestützte Entwurf aus Schritt 30 in Anweisungen für eine bestimmte Vorrichtung zum 3D-Druck, beispielsweise eine pulverbettbasierte Vorrichtung wie eingangs unter Bezugnahme auf Fig. 2 erläutert, umgewandelt wird.

[0047] In Schritt 32 wird dann der Druckauftrag simuliert, d.h. das Herstellen des Werkstücks wird Schicht für Schicht inklusive des umgebenden Pulverbetts simuliert. In Schritt 33 werden dann Prüfergebnisse für den jeweiligen Stand der Herstellung, d.h. nach einer jeweiligen Anzahl von aufgetragenen Schichten, simuliert, d.h. Messergebnisse eines Messverfahrens, welches zum Prüfen des Werkstücks verwendet wird, werden simuliert. Derartige Messverfahren können, wie später erläutert werden wird, beispielsweise ultraschallbasierte Verfahren, thermographische Verfahren, Röntgen-Scatterometrie und/oder interferometrische Verfahren wie die elektronische Laser-Speckle-Interferometrie umfassen.

[0048] Die Schritte 32 und 33 stellen also eine Simulation einer Herstellung eines fehlerfreien Werkstücks dar, und die in Schritt 33 erhaltenen Prüfergebnisse entsprechen simulierten Prüfergebnissen für ein fehlerfreies Werkstück.

[0049] In Schritt 34 beginnt dann der eigentliche additive Herstellungsprozess mit dem Drucken einer nächsten anstehenden Schicht (beim ersten Durchlauf des Schrittes 34 der ersten Schicht). In Schritt 35 wird dann die bei 34 gedruckte Schicht mit einem Messverfahren geprüft, für welches in Schritt 33 auch die Simulation durchgeführt wurde. In Schritt 36 wird dann das Prüfergebnis des Schrittes 35 mit dem simulierten Prüfergebnis des Schrittes 33 verglichen. Indem hier sowohl eine Simulation eines fehlerfreien Druckes als auch eine tatsächliche Prüfung erfolgt und die Ergebnisse verglichen werden, können beispielsweise Effekte von einem Untergrund wie beispielsweise durch ein Pulverbett wie eingangs erläutert gleich herausgerechnet werden, und Signalanteile, die von Materialdefekten herrühren, können leichter identifiziert werden. Es können also Störeinflüsse, die sich aus dem Prozess der additiven Fertigung ergeben, auch bei großen Datenmengen aus den Prüfmessungen herausgefiltert werden.

[0050] Das Vergleichen des Schrittes 36 kann dabei ein einfaches Subtrahieren von jeweiligen Signalen umfassen. Bevorzugt wird jedoch ein Analysesystem zunächst trainiert und führt dann den Vergleich durch, um nähere Informationen über vorliegende Defekte zu erhalten. Hierzu können insbesondere Verfahren des maschinellen Lernens verwendet werden, zum Beispiel zum Trainieren eines künstlichen neuronalen Netzwerkes. Verfahren des maschinellen Lernens sind in dem Wikipedia-Artikel „Maschinelles

Lernen, Stand 27.09.2017, beschrieben. Hierfür werden in einem Lernprozess die gefertigten Werkstücke dann mit anderen Messverfahren analysiert, die auch zerstörende Verfahren sein können. Beispielsweise können Schnitte des hergestellten Werkstücks mikroskopisch, einschließlich elektronenmikroskopisch, untersucht werden, um verschiedene Materialdefekte zu identifizieren. Diese identifizierten Merkmale werden dann zusammen mit den in Schritt 35 ermittelten Ergebnissen der tatsächlichen Messung und der in Schritt 33 simulierten Prüfergebnisse als Trainingsbeispiele für das maschinelle Lernen verwendet. Während der tatsächlichen Herstellung kann ein so trainiertes System dann in Schritt 36 auf Basis des Prüfergebnisses des Schritts 35 und der simulierten Prüfergebnisse des Schritts 33 genauere Aussagen über vorhandene Materialdefekte machen. Für das maschinelle Lernen können beispielsweise Verfahren des bestärkenden Lernens (Reinforcement Learning), oder andere Lernverfahren verwendet werden. Bei anderen Ausführungsformen können zusätzlich oder alternativ Korrelationsanalysen zwischen den Ergebnissen des Schrittes 35 und den Simulationsergebnissen des Schrittes 33 vorgenommen werden.

[0051] Wenn der Vergleich in Schritt 36 ergibt, dass inakzeptable Fehler vorliegen (nicht okay in Schritt 36; inakzeptable Fertigung), beispielsweise eine zu hohe Anzahl von Materialdefekten oder zu große Materialdefekte, können in Schritt 37 entsprechende Maßnahmen ergriffen werden. Eine derartige Maßnahme kann beispielsweise ein Verwerfen des gerade hergestellten Werkstücks sein, kann aber zusätzlich oder alternativ auch ein Anpassen von Prozessparametern umfassen, um bei einer nächsten Schicht weniger Materialdefekte zu erzeugen. Durch die Anpassung von Prozessparametern in Schritt 39 während des Prozesses kann ein Bauteil gegebenenfalls noch „gerettet werden“, indem Fehler auf eine Schicht beschränkt werden können, was noch zu akzeptablen Werkstücken führen kann, je nach Erfordernissen an das Werkstück. Auch kann je nach Fertigungsverfahren eine Prozessierung einer Schicht, bei der zu viele Materialfehler aufgetreten sind, wiederholt werden. Hierfür wird die fehlerhafte Schicht abgetragen und mit korrigierten Prozessparametern erneut aufgetragen. Hier ist also eine Korrektur während des Herstellungsprozesses und/oder für folgende Herstellungsprozesse möglich. Derartige Herangehensweisen bei der Korrektur werden auch als holistisch bezeichnet, da hier nicht unbedingt die Ursache der Störung behoben wird, sondern die Auswirkung (zum Beispiel Materialdefekte) erkannt wird und durch eine Gegenwirkung, beispielsweise

durch Ändern von Prozessparametern, kompensiert wird. Für die Korrektur können weitere dezidierte numerische Korrelationsanalysen bei der Simulation durchgeführt werden. Insbesondere können dabei auch gemessene Maschinenparameter und die Daten weiterer Sensoren z.B. zur Überwachung der Umweltbedingungen berücksichtigt werden, indem z.B. eine Korrelation zwischen den Messergebnissen und den Sensordaten durchgeführt wird. Außerdem kann z.B. die Auswirkung der Korrektur vor dem eigentlichen additiven Fertigungsprozess simuliert werden. Diese Simulation kann Teil eines Optimierungsalgorithmus sein, um einen optimalen Korrekturprozess zu bestimmen.

[0052] Zum Vergleichen in Schritt 36 kann auch eine vorgegebene „Übersetzungstabelle“ herangezogen werden, welche auf Basis von vorherigen Kalibrierungen (Analysen von Werkstücken, beispielsweise zerstörungsbehaftete Analyse) eine Korrelation zwischen Unterschieden zwischen Simulation und tatsächlichem Prüfen und Baueigenschaften des Werkstücks angibt.

[0053] Wenn der Vergleich bei 36 hingegen ergibt, dass die Schicht nach Qualitätserfordernissen in Ordnung ist (beispielsweise hinreichend wenig Materialdefekte vorliegen; akzeptable Fertigung), wird entweder zu Schritt 34 zurückgesprungen, um eine nächste Schicht zu drucken, oder, wenn keine weitere Schicht zu drucken ist, d.h. der Druck abgeschlossen ist, in Schritt 38 eine etwaig notwendige Nachverarbeitung des Werkstücks (beispielsweise Reinigen von haftendem Pulver, Polieren etc.) durchgeführt. In Schritt 39 kann dann noch eine Endkontrolle des hergestellten Werkstücks erfolgen.

[0054] Mit dem Verfahren der Figur 3 kann also jede gedruckte Schicht überwacht werden und anhand von Simulationen können auch komplexe Messsignaturen beim Prüfen analysiert werden.

[0055] Es ist zu bemerken, dass bei anderen Ausführungsformen das Prüfen und der Vergleich des Prüfergebnisses mit dem simulierten Prüfergebnis nicht nach jeder Schicht, sondern auch im Abstand mehrerer Schichten (beispielsweise jede zweite Schicht, jede dritte Schicht etc.) oder auch für Teile von Schichten vorgenommen werden kann. Zudem ist zu bemerken, dass das Simulieren nicht wie in Figur 3 dargestellt vor

dem Drucken erfolgen muss, sondern auch gleichzeitig mit diesem erfolgen kann, sodass zum Beispiel beim, vor oder nach dem Drucken jeder Schicht in Schritt 34 das Drucken der jeweiligen Schicht auch simuliert wird und die entsprechenden Prüfergebnisse simuliert werden. Die in Figur 3 dargestellte Reihenfolge dient daher nur der Veranschaulichung und ist nicht als einschränkend zu sehen.

[0056] Zusätzlich zu der Überwachung des Herstellungsprozesses wie in Fig. 3 dargestellt kann die Simulation des Wachstumsprozesses und der Messungen auch noch für weitere Zwecke verwendet werden. Dies ist in Fig. 4 schematisch dargestellt.

[0057] Ausgehend von einer Simulation eines Herstellungsprozesses 40, welcher das Simulieren der Schritte 32 und 33 der Fig. 4 umfassen kann, können verschiedene weitere Vorgänge gesteuert, dokumentiert oder ausgeführt werden. In die Simulation bei 40 können dabei Kalibrierdaten der verwendeten Vorrichtung zur additiven Fertigung, und des Pulverbettes ebenso wie die bereits schon erwähnten für das Drucken aufbereiteten CAD-Daten eingehen.

[0058] Bei 41 wird die Prozesssteuerung wie unter Fig. 3 erläutert durchgeführt, d.h. es werden Prüfergebnisse während des Prozesses mit der Simulation verglichen und entsprechende Ausgaben vorgenommen. Zudem können bei 42 Hinweise für die Nachverarbeitung in Schritt 38 der Fig. 3 auf Basis der Simulation gegeben werden. Bei 43 kann auf Basis der Simulation eine Dokumentation erstellt werden, beispielsweise in Form einer CAD-Datei des gefertigten Bauteils, gegebenenfalls unter Berücksichtigung der Nachverarbeitung. Schließlich können bei 44, wie bereits eingangs erläutert und wie für sich genommen bekannt, Druckparameter optimiert werden.

[0059] Ein Beispiel für ein Prüfverfahren, welches in dem Verfahren der Fig. 3 zur Anwendung kommen kann, ist eine Laser-Ultraschallmessung. Eine solche Messung wird unter Bezugnahme auf Fig. 5 erläutert. Die Vorrichtung der Fig. 5 dient zum schichtweisen Prüfen eines Werkstücks 57, welches mit einem additiven Verfahren, beispielsweise einem Pulverbettverfahren, hergestellt werden kann. Als additives Verfahren können konventionelle Techniken zur additiven Fertigung zum Einsatz kommen. Diese

Fertigung ist in Fig. 5 durch den Laser 24 zum Lasersintern, der unter Bezugnahme auf Fig. 2 beschrieben wurde, angedeutet. Die Fertigung sowie das Prüfen wird von einer Steuereinrichtung 59, insbesondere einem Computer oder einer anderen geeigneten Steuerung, überwacht. Die Steuerung 59 führt bei dem Ausführungsbeispiel der Fig. 5 auch die Simulationen (Schritte 32 und 33 der Fig. 3) durch und vergleicht die Prüfergebnisse mit den simulierten Prüfergebnissen (Schritt 36 der Fig. 3). Es können jedoch auch separate Vorrichtungen, beispielsweise separate Computer, für Steuerung und Simulation bereitgestellt werden.

[0060] Bei dem Ausführungsbeispiel der Fig. 5 wird die Oberfläche des Werkstücks 57 zur Prüfung einer oder mehrerer Schichten oder Teilen davon mittels eines KurzpulsLasers 50 mit einem gepulsten Laserstrahl 51 bestrahlt, welcher im Femtosekunden- bis Pikosekundenbereich gepulst ist. Der Laserstrahl 51 wird dabei durch eine (nicht dargestellte) geeignete Optik auf das Werkstück fokussiert und mittels einer Scaneinheit (ebenfalls nicht dargestellt) über die Oberfläche des Werkstücks 57 gescannt. Der Laserstrahl 51 induziert Schallwellen, welche wie durch Pfeile 58 dargestellt an Materialdefekten reflektiert werden und eine Änderung der (insbesondere Deformation) der Oberfläche des Werkstücks bewirken. Diese Änderung wird durch ein Detektorsystem, beispielsweise ein Homodyn-Interferometer oder ein Heterodyn-Interferometer, nachgewiesen. Dies ist schematisch durch einen Detektionsstrahl 54, welcher auf die Probe trifft, dargestellt. Mit einem Detektor 53 wird ein vorwärtsreflektierter Strahl 52 nachgewiesen. Alternativ oder zusätzlich wird über einen Detektor 45 ein rückwärtsreflektierter Strahl, welcher über einen Strahlteiler 56 ausgekoppelt wird, detektiert. Jeder bei Laser-Ultraschallvorrichtungen verwendete herkömmliche Detektionsmechanismus kann hier verwendet werden, siehe hierzu die eingangs zitierten Dokumente zum Laser-Ultraschall.

[0061] Für typische Schallgeschwindigkeiten, die bei Teflon beispielsweise 1400 m/s und bei Titan 6100 m/s betragen, ergibt sich für eine maximal abbildbare Strukturtiefe von 0,5 mm eine Pulslaufzeit von $\Delta t = 2d/c_{\text{sound}}$ vom 0,2 bis 1 μs , wobei d die Strukturtiefe und c_{sound} die Schallgeschwindigkeit ist. Das bedeutet, dass mit einem im Megahertzbereich arbeitenden Scansystem 1000 · 1000 Pixel über typische betrachtete Flächen abgebildet werden können. Die Gesamtfläche kann größer sein, wenn der Scanbereich auf einen entsprechend kleineren interessierenden Bereich eingeschränkt

wird. Für eine Tiefenauflösung von 1 μm ist eine Zeitauflösung der Detektion im Gigahertzbereich notwendig, was mit heute verwendeten Laser-Doppler-Vibrometern möglich ist.

[0062] Die gefundenen Messergebnisse (durch die Detektoren 53 und/oder 55 detektiert) werden dann wie beschrieben schichtweise mit entsprechenden Simulationen verglichen und ausgewertet. Dies ist für den Fall einer Pulverbettfertigung in der Fig. 6 nochmals erläutert. Fig. 6 zeigt also eine Anwendung des Verfahrens der Fig. 3 auf eine Pulverbettfertigung und der Verwendung von Laser-Ultraschall.

[0063] In Schritt 60 wird eine neue Lage eines Metallpulvers aufgebracht, insbesondere verfestigt. Dann wird eine Laser-Ultraschallmessung durchgeführt und das Messergebnis in Schritt 61 mit einer numerischen Simulation des Messprozesses an einem idealen (fehlerfreien) Zustand des Werkstücks im Pulverbett durchgeführt. Hieraus wird ein bereinigter Messdatensatz erhalten, indem beispielsweise auf Basis der Simulation von dem Pulverbett herrührender Untergrund herausgerechnet wird. Auf Basis der Auswertung wird in Schritt 63 entschieden, ob eine Maßnahme ergriffen werden muss. Wenn keine Maßnahme notwendig ist, wird das Verfahren in Schritt 60 mit der nächsten Lage fortgesetzt. Falls eine Maßnahme ergriffen werden muss, erfolgt dies in Schritt 64. Dabei können die bereits unter Bezugnahme auf Schritt 37 der Fig. 3 diskutierten Maßnahmen ergriffen werden.

[0064] Bevorzugt wird für die Messung eine Schallwellenlänge (induziert durch den Kurzpuls-Laser) verwendet, deren Wellenlänge in dem Material, aus dem das Pulver gefertigt ist, deutlich größer ist als der mittlere Pulverkorndurchmesser. Damit können insbesondere Defekte, die größer sind als die Korndurchmesser, detektiert werden und auch die geometrischen Abmessungen des Werkstücks detektiert werden. Für ein Pulver aus einem Material M mit einer Schallgeschwindigkeit v_M im homogenen Material und einer Partikelgrößenverteilung gekennzeichnet durch einen mittleren Partikeldurchmesser (Pulverkorndurchmesser) von d_M und einer einfachen Standardabweichung der Größenverteilung der Pulverkörner von s_M wird bevorzugt ein Kurzpuls-Laser mit einer maximalen Frequenz $f_{\text{max}} < v_M / (d_M + s_M)$ verwendet. Als Beispiel bedeutet dies für ein Titanpulver mit

20 µm Korngröße und 5 µm Standardabweichung wegen der Schallgeschwindigkeit von 6100 m/s eine maximale Frequenz von 244 MHz.

[0065] Sämtliche angegebenen Zahlenwerte sind dabei lediglich zur Veranschaulichung angegeben und können insbesondere je nach verwendeten Materialien und Messverfahren variieren.

[0066] Ein weiteres Beispiel für ein Prüfverfahren, welches in Schritt 35 der Fig. 3 verwendbar ist, ist eine Kombination einer elektronischen Speckle-Interferometrie (ESPI) mit einer Infrarot-Thermografie. Die ESPI ist in der Lage, die Oberflächentopografie des zu prüfenden Werkstücks zu detektieren. Durch die kombinierte Anregung mittels Infrarotthermografie können Poren, Risse, Lunkern, Delaminationen (Schichtablösungen) und andere sich unter der Oberfläche befindliche Defekte im Werkstück analysiert werden. Die Kombination beider Prüfverfahren erlaubt somit eine schnelle flächenhafte Analyse der in Fertigung befindlichen Schichten. Durch die ESPI kann insbesondere auch die Topografie des Schmelzbades beim Verwenden eines Lasersinterns charakterisiert werden, während durch die Infrarot-Thermografie eine derzeit gedruckte Schicht oder eine Gruppe von Schichten auf Defekte analysiert wird. Die Analyse erfolgt dann bei Verwendung des Verfahrens der Fig. 3 wiederum durch Abgleich mit einer Simulation, wobei insbesondere wie erläutert auch maschinelle Lernverfahren zum Einsatz kommen können, um eine Analyse zu ermöglichen. Auch eine Prüfung, nachdem nur ein Teil einer Schicht gedruckt wurde, ist möglich. ES-PI hat den Vorteil, dass parallel das Pulverbett durch ESPI auf Änderungen während des Druckprozesses überwacht werden kann.

[0067] Die Fig. 7 veranschaulicht eine Vorrichtung zur Durchführung einer kombinierten ESPI mit Infrarot-Thermografie eines mit einem additiven Fertigungsverfahren hergestellten Werkstücks 78. Das Werkstück 78 kann beispielsweise mittels eines Pulverbettverfahrens wie beispielsweise Lasersintern hergestellt werden, wie es unter Bezugnahme auf Fig. 2 kurz beschrieben wurde und wie es auch in Fig. 5 angedeutet ist.

[0068] Auch andere herkömmliche additive Fertigungsverfahren sind verwendbar. Daher sind in Fig. 7 diejenigen Komponenten, welche für die additive Fertigung selbst verwendet werden, nicht explizit dargestellt.

[0069] Zur ESPI weist die Vorrichtung der Fig. 7 eine ESPI-Kamera 71 auf. Diese umfasst einen Laser 75. Ein Teil des vom Laser 75 erzeugten Laserstrahls wird über eine Optik 76 aufgeweitet und auf eine Oberfläche des Werkstücks 78 gelenkt.

[0070] Von der Oberfläche, insbesondere Rauigkeiten an der Oberfläche, gestreutes Licht gelangt über eine Abbildungsoptik 73, welche durch eine Blende 74 begrenzt sein kann, zu einem Bildsensor 72. Der Bildsensor 72 kann beispielsweise ein CCD-Sensor oder ein CMOS-Sensor sein.

[0071] Zusätzlich wird ein Teil des von dem Laser 75 erzeugten Laserlicht als Referenz auf den Bildsensor 17 gelenkt und interferiert dort mit dem von der Oberfläche des Werkstücks 78 gestreuten Lichts. Der Bildsensor 72 nimmt das entstehende Interferenzmuster auf und führt es einer Prozessoreinheit 70 zu, welche das aufgenommene Interferenzbild analysiert, insbesondere mit einer Simulation vergleicht und gegebenenfalls auf Basis eines vorherigen maschinellen Lernens analysiert.

[0072] Insbesondere entsteht durch die Interferenz ein charakteristisches Speckle-Muster, welches durch Manipulationen der Oberfläche des Werkstücks 78 durch Verformungen, Partikel, Defekte etc. von einer Ursprungsform abweicht. Während einer kontrollierten Manipulation des Werkstücks werden nun ohne Änderung der relativen Position von Werkstück 78 und ESPI-Kamera 71 aufeinanderfolgende Bilder aufgenommen. Die Manipulation kann dabei insbesondere durch parallele IR-Thermografie wie folgend beschrieben erfolgen. Diese Manipulation führt zu kleinen Verformungen des Objekts und lässt dabei Speckle-Punkte auf den aufgenommenen Interferenzmustern wandern. Die Analyse durch die Prozessoreinheit 70 kann dann durch die Manipulation hervorgerufene Verformungen analysieren und dadurch insbesondere Oberflächendefekte des Werkstücks 78 identifizieren.

[0073] Zur IR-Thermografie wird das Werkstück 78 mit einer Wärmequelle 79, beispielsweise einer Infrarotlampe, bestrahlt, und eine Infrarotstrahlungsverteilung an der Oberfläche wird über eine Infrarotkamera 710 aufgenommen. Das Bild der Infrarotkamera 710 wird ebenso in der beschriebenen Weise, d. h. mittels Vergleich mit Simulationen, durch die Prozessoreinheit 70 ausgewertet. Mittels der Infrarot-Thermografie können oberflächennahe Defekte schnell detektiert werden. Wie durch Pfeile 711 angedeutet, kommt es durch Poren, Risse, Lunker, Delaminationen und dergleichen zu einem inhomogenen Wärmefluss innerhalb des Werkstücks 78. Dies führt zu Änderungen in der Abstrahlung von Infrarotstrahlung, wie durch Pfeile 712 angedeutet. Ein Defekt ist dabei nur in einem gewissen Zeitfenster während der Fertigung sichtbar. Zu einer bestimmten Zeit t_{max} tritt ein maximaler thermischer Kontrast $dT_{max}=T_2-T_1$ aus, wobei T_2 , T_1 Temperaturen sind. Das Zeitfenster wird durch die Abkühlzeit für das beobachtete Oberflächenelement bestimmt: Die eingebrachte Wärme, die zu einer erhöhten Temperatur des Oberflächenelementes geführt hat, fließt durch die Wärmeleitfähigkeit des restlichen Werkstücks, des Pulverbettes, des Schutzgases darüber, sowie durch Wärmestrahlung ab. Die so entstehende thermische Emission ist eine materialspezifische Kenngröße.

[0074] Diese Temperaturunterschiede, d.h. die thermische Emission, werden mit der Infrarotkamera 710 erfasst und ausgewertet. Von der erfassten thermischen Emission wird dann ein entsprechender materialspezifischer Emissionsparameter (dieser kann zwischen Poren, Einschlüssen, Metalloxide, etc. stark variieren,) abgezogen. Aus dieser Differenz kann ich die Art und Lage des Defektes ermitteln.

[0075] Als Anregungsquelle 79 kann beispielsweise ein Laser, eine Leuchtdiodenanordnung, ein Blitzlicht oder ein Infrarotstrahler dienen. Bei manchen Ausführungsbeispielen arbeitet die Anregungsquelle 79 gepulst (in Pulsthermografie), d. h. die Wärme wird impulsartig in die Oberfläche eingepreßt und synchron das Infrarotbild der Oberfläche gemessen.

[0076] Durch die Infrarot-Thermografie kann das Werkstück 78 beispielsweise bis zu einer Tiefe d , wie durch einen Pfeil 77 angedeutet, zuverlässig auf Defekte untersucht werden. Wie bei anderen dargestellten Prüfverfahren kann die Untersuchung bei

oder nach jeder Schicht, bei oder nach mehreren Schichten oder auch Teilschichten vorgenommen werden.

[0077] Ein weiteres Beispiel für ein Prüfverfahren während des 3D-Drucks ist die Nutzung von Röntgenstrahlung. In der konventionellen Computer-Tomographie (CRT) wird das Werkstück vollständig durchstrahlt und ein Bild im Schattenwurf, genannt Projektion, erstellt und aus der Kombination mehrerer Projektionen durch mathematische Verfahren wie der Radon-Transformation ein dreidimensionales Modell des untersuchten Objektes rekonstruiert. Dieses Verfahren kann für die in-situ Kontrolle während des 3D-Drucks für leichte Materialien wie Kunststoffe verwendet werden. Für dichte Materialien wie Stahl reicht in der Regel die Durchdringungsfähigkeit der Röntgenstrahlung nicht aus. Hier können Verfahren in Reflexion eingesetzt werden, z.B. Röntgen-Scatterometrie, wofür ein Beispiel in Figur 8 dargestellt ist. In Figur 8 sind Komponenten zum Fertigen eines Werkstücks 80 nicht dargestellt (z.B. der Laser 24 der Fig. 2 oder 5), es können herkömmliche additive Fertigungsverfahren zum Einsatz kommen. Das Werkstück 80 wird von einer Röntgenquelle 81 mit Röntgenstrahlung beleuchtet und die am Werkstück 80 gestreute Strahlung (z.B. durch elastische Streuung oder Compton-Streuung gestreute Strahlung) wird mit einem flächigen Detektor 82 erfasst. Wie bei den vorherigen Ausführungsbeispielen wird das Messergebnis zudem simuliert, und auf Basis des simulierten und tatsächlichen Messergebnisses können Materialdefekte erfasst werden.

[0078] Ein limitierender Aspekt dieser Messtechnik ist der notwendige Ausgleich aus Teilegröße und Bildauflösung: Für große Teile wird hochenergetische Röntgenstrahlung benötigt, die zu einer verschlechterten räumlichen Auflösung führt. Kleine Teile können dagegen mit hoher Auflösung mit Röntgenstrahlung mit niedriger Energie abgebildet werden. Eine hohe Energie ist hier z.B. Röntgenstrahlung mit 100eV Photonenenergie. Niedrige Energie liegt z.B. bei 10eV Photonenenergie.

[0079] Zur Auswertung werden die Messergebnisse mit den beschriebenen Verfahren, insbesondere Vergleich mit einer Simulation und/oder mit Verfahren des maschinellen Lernens analysiert. Hierdurch können insbesondere die großen Datenmengen, die bei diesem Messverfahren entstehen, abgeglichen werden, um dadurch Störeinflüsse bedingt aus dem Prozess der additiven Fertigung herauszufiltern. Ein solcher

Ansatz des maschinellen Lernens lässt sich mit anderen algorithmischen Verfahren kombinieren, die aus den gemessenen Daten eine direkte Rekonstruktion erlauben. Eine solche Kombination aus mehreren Auswerteverfahren kann eine verbesserte Auflösung und/oder ein verbessertes Signalrauschverhältnis ergeben.

[0080] Zudem ist zu bemerken, dass die oben beschriebene Kombination aus Thermografie und ESPI auch ohne Simulationen für die Analyse und Bewertung von additiv gefertigten Werkstücken während der Herstellung verwenden, auch wenn hier die Auswertung schwieriger sein kann. Details zu derartigen herkömmlichen Auswertungen lassen sich aus den oben erläuterten Referenzen entnehmen.

[0081] Die dargestellten Prüfverfahren dienen lediglich der Veranschaulichung und sind nicht als einschränkend auszulegen.

Patentansprüche

1. Verfahren zur additiven Fertigung von Werkstücken (10; 22; 57; 78), umfassend:

Bereitstellen (30, 31) von Fertigungsdaten für ein Werkstück (10; 22; 57; 78),

Simulieren (32) der Fertigung des Werkstücks (10; 22; 57; 78),

Simulieren (33) von Prüfergebnissen während der Fertigung basierend auf der simulierten Fertigung,

Hinzufügen (34) einer nächsten Gruppe von Schichten zu dem Werkstück (10; 22; 57; 78),

Prüfen (35) der Gruppe von Schichten, um gemessene Prüfergebnisse zu erhalten,

Auswerten (36) des Prüfens basierend auf den simulierten Prüfergebnissen und den gemessenen Prüfergebnissen,

Wiederholen des Hinzufügens, des Prüfens und des Auswertens, falls das Auswerten eine akzeptable Fertigung anzeigt, und

Ergreifen einer Maßnahme, falls das Auswerten eine inakzeptable Fertigung anzeigt.
2. Verfahren nach Anspruch 1, wobei das Auswerten ein Auswerten unter Verwendung eines mittels maschinellen Lernens trainierten Systems umfasst.
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, wobei das Auswerten ein Vergleichen der simulierten Prüfergebnisse mit den gemessenen Prüfergebnissen umfasst.

4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, wobei das Ergreifen einer Maßnahme ein Ändern von Prozessparametern für ein folgendes Hinzufügen einer Gruppe von Schichten umfasst.
5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, wobei das Ergreifen einer Maßnahme ein Verwerfen des Werkstücks umfasst.
6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, wobei die Gruppe von Schichten eine einzige Schicht, mehrere Schichten oder einen Teil einer Schicht umfasst.
7. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 6, wobei das Auswerten eine Verwendung einer vorgegebenen Korrelation von Unterschieden zwischen dem gemessenen Prüfergebnissen und den simulierten Prüfergebnissen zu Bauteileigenschaften umfasst.
8. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 7, wobei das Prüfen (35) ein Durchführen eines Laserultraschallverfahrens umfasst.
9. Verfahren nach Anspruch 8, wobei das Hinzufügen in einem Pulverbett erfolgt, wobei beim Laserultraschallverfahren ein Laserstrahl mit einer Pulsfrequenz kleiner als $f_{\max} = v_M / (d_M + s_M)$ verwendet wird, wobei v_M die Schallgeschwindigkeit im homogenen Pulvermaterial, d_M ein mittlerer Partikeldurchmesser des Pulvers des Pulverbettes und s_M eine einfache Standardabweichung der Größenverteilung der Partikel des Pulvers ist.
10. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 9, wobei das Prüfen eine Durchführung einer elektronische Laser-Speckle-Interferometrie umfasst.
11. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 10, wobei das Prüfen ein Durchführen einer Infrarot-Thermografie umfasst.

12. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 10, wobei das Prüfen ein Durchführen einer Röntgenuntersuchung umfasst.
13. Vorrichtung zur additiven Fertigung von Werkstücken (10; 22; 57; 78), umfassend:

eine Simulationseinrichtung (59; 70) zum Simulieren einer additiven Fertigung eines Werkstücks (10; 22; 57; 78) und zum Simulieren von Prüfergebnissen während der Fertigung,

eine Fertigungseinrichtung (24) zum additiven Fertigen des Werkstücks, und

eine Prüfeinrichtung (50, 53, 55; 71; 79; 710) zum Prüfen des Werkstücks während der additiven Fertigung, um gemessene Prüfergebnisse zu erhalten,

wobei die Prüfeinrichtung eingerichtet ist, das Werkstück jeweils nach dem Hinzufügen einer nächsten Gruppe von Schichten zu prüfen, und die Simulationseinrichtung eingerichtet ist, ein Auswerten auf Basis der simulierten Prüfergebnisse und der gemessenen Prüfergebnisse durchzuführen und zu bewirken, dass eine Maßnahme ergriffen wird, wenn das Auswerten eine inakzeptable Fertigung des Werkstücks anzeigt.
14. Vorrichtung nach Anspruch 13, wobei die Prüfeinrichtung eine Laserultraschallprüfeinrichtung, eine elektronische Laser-Speckle-Interferometrieprüfeinrichtung, eine Infrarot-Thermografieprüfeinrichtung oder eine Röntgen-Prüfeinrichtung umfasst.
15. Vorrichtung nach Anspruch 13 oder 14, wobei die Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 12 eingerichtet ist.
16. Verfahren zur additiven Fertigung von Werkstücken, umfassend:

Fertigen eines Werkstücks mit einem additiven Fertigungsverfahren, und

Analysieren des Werkstücks während der Fertigung mit einer Kombination aus Infrarot-Thermografie und elektronischer Laser-Speckle-Interferometrie.

17. Verfahren nach Anspruch 16, wobei das Analysieren eine Auswertung mittels maschinellem Lernen umfasst.

18. Vorrichtung zur Fertigung eines Werkstücks, umfassend:

eine Fertigungsvorrichtung (24) zur additiven Fertigung des Werkstücks, und

eine Analysevorrichtung zur Analyse des Werkstücks während der Fertigung, wobei die Analysevorrichtung eine Einrichtung zur elektronischen Laser-Speckle-Interferometrie (71) und eine Einrichtung zur Infrarot-Thermografie (79; 710) umfasst.

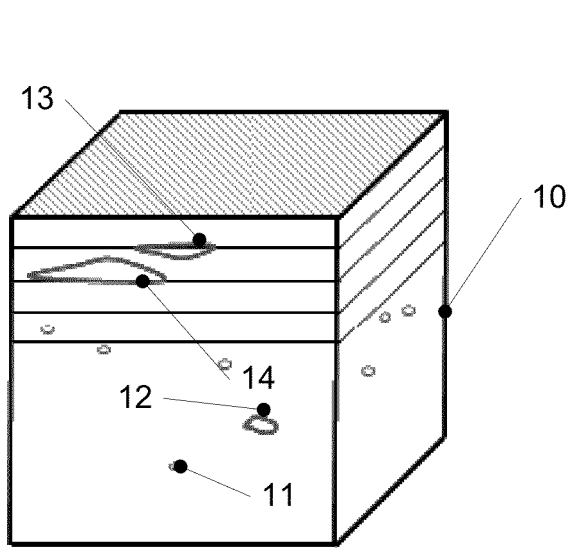


Fig. 1A

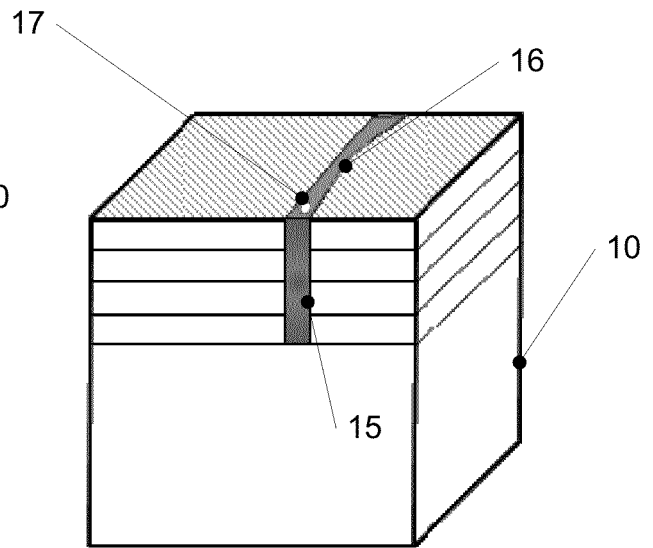


Fig. 1B

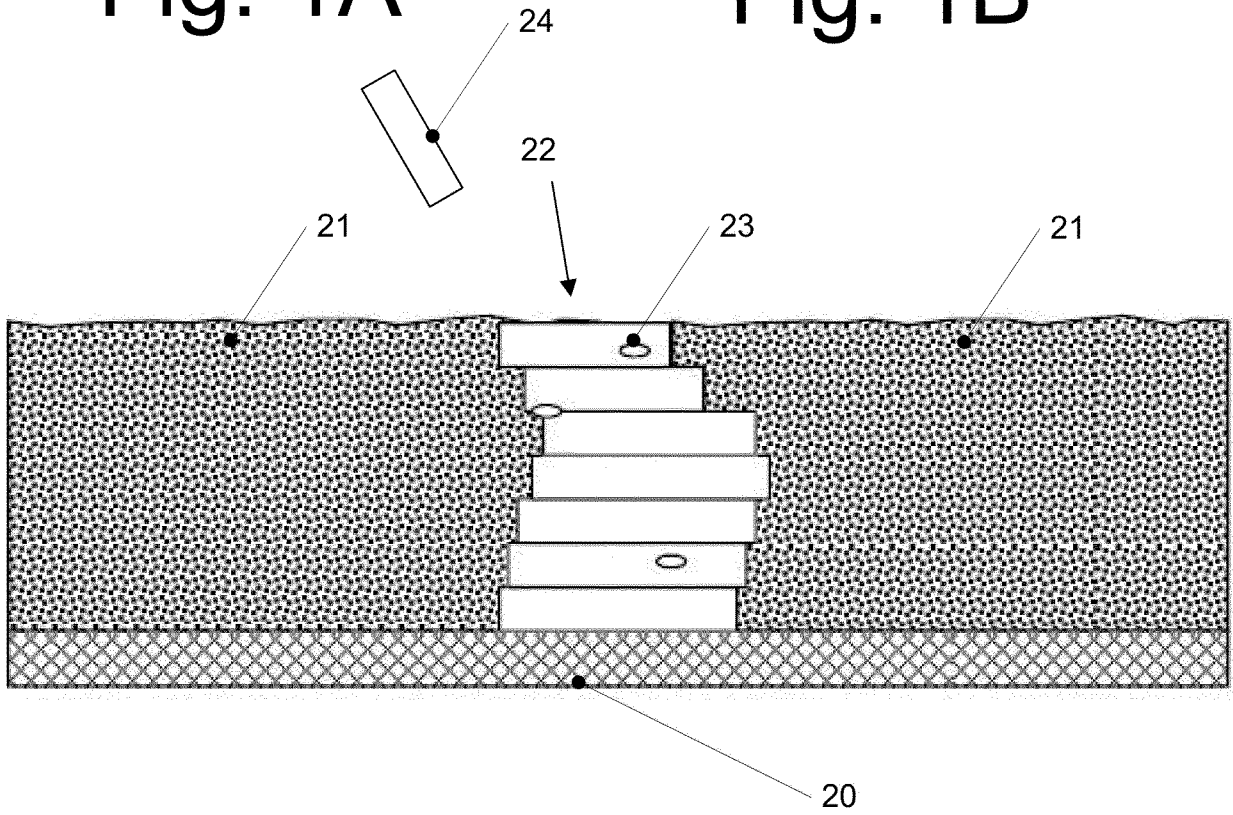


Fig. 2

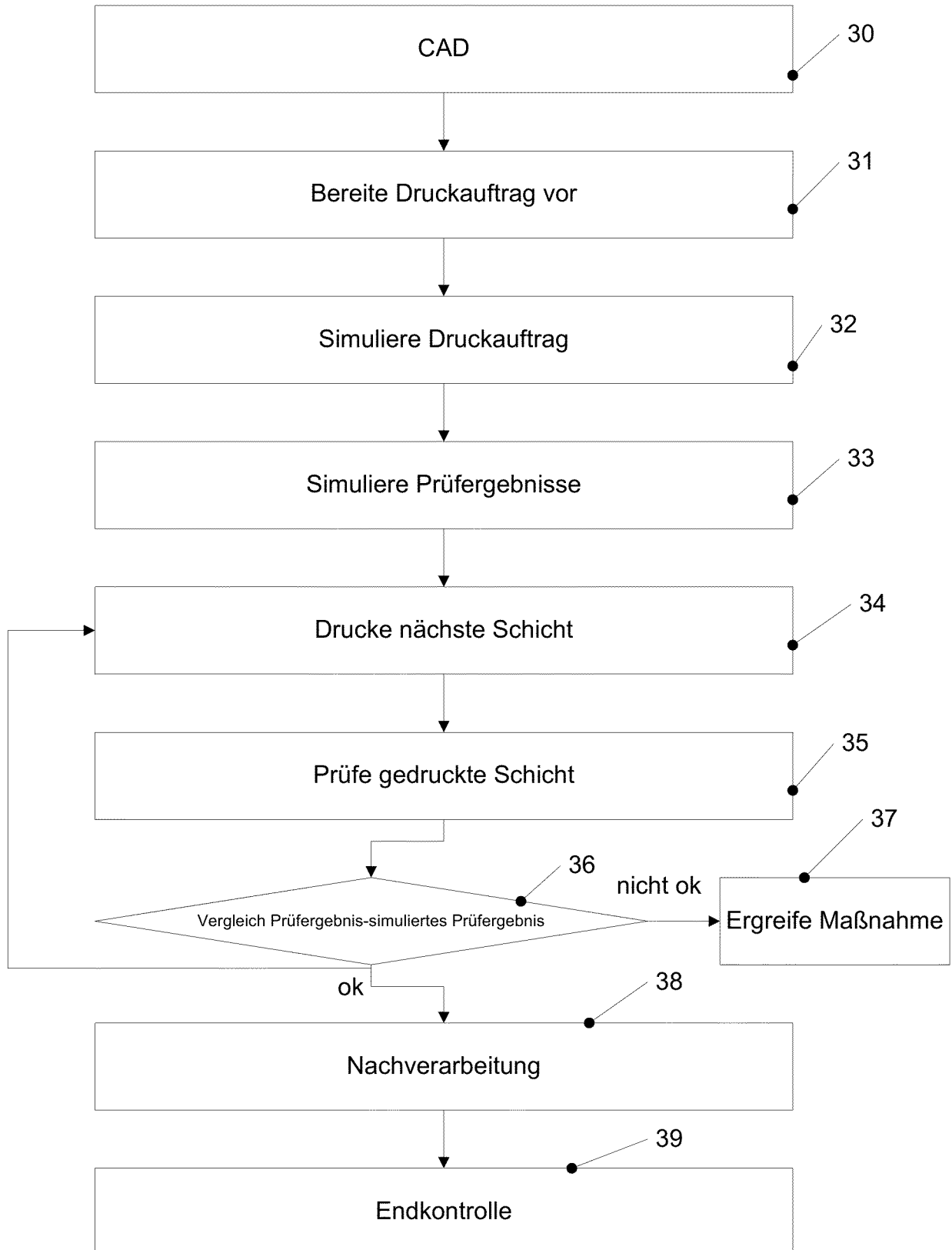


Fig. 3

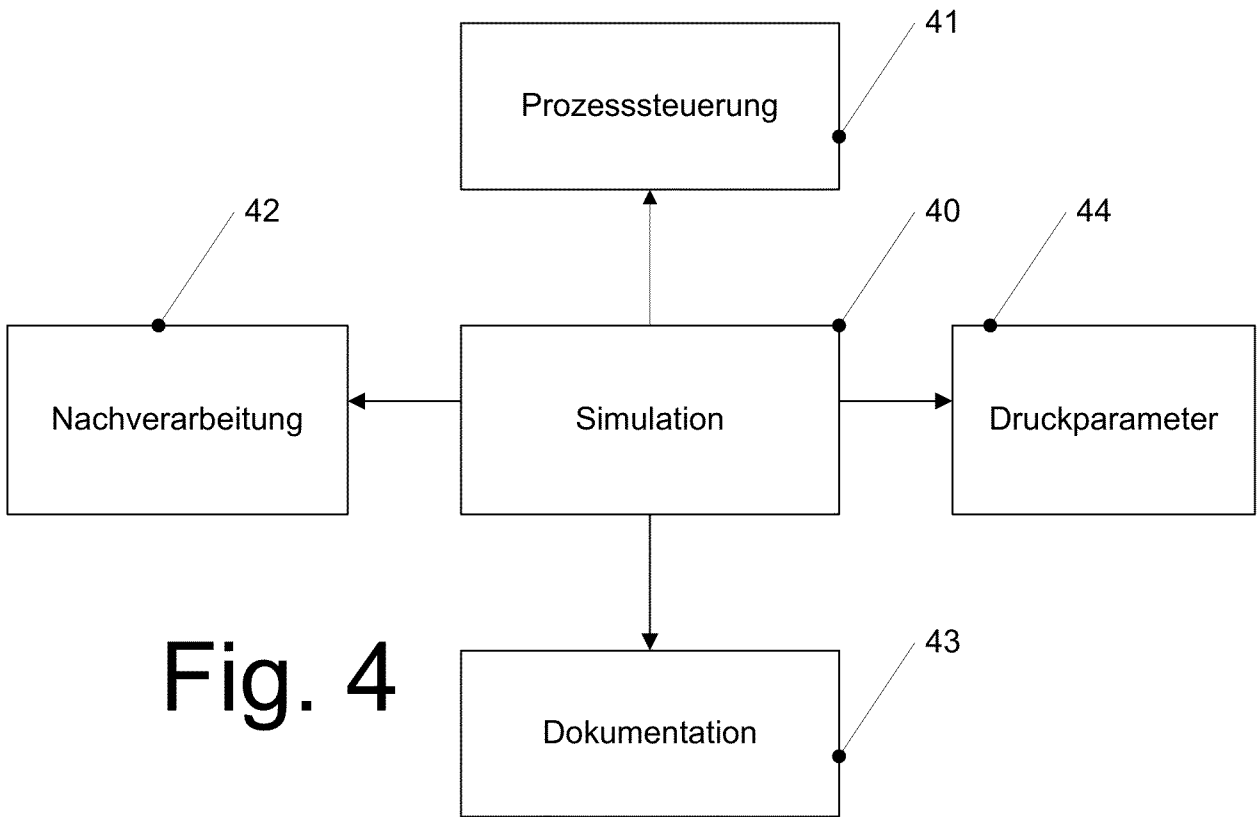


Fig. 4

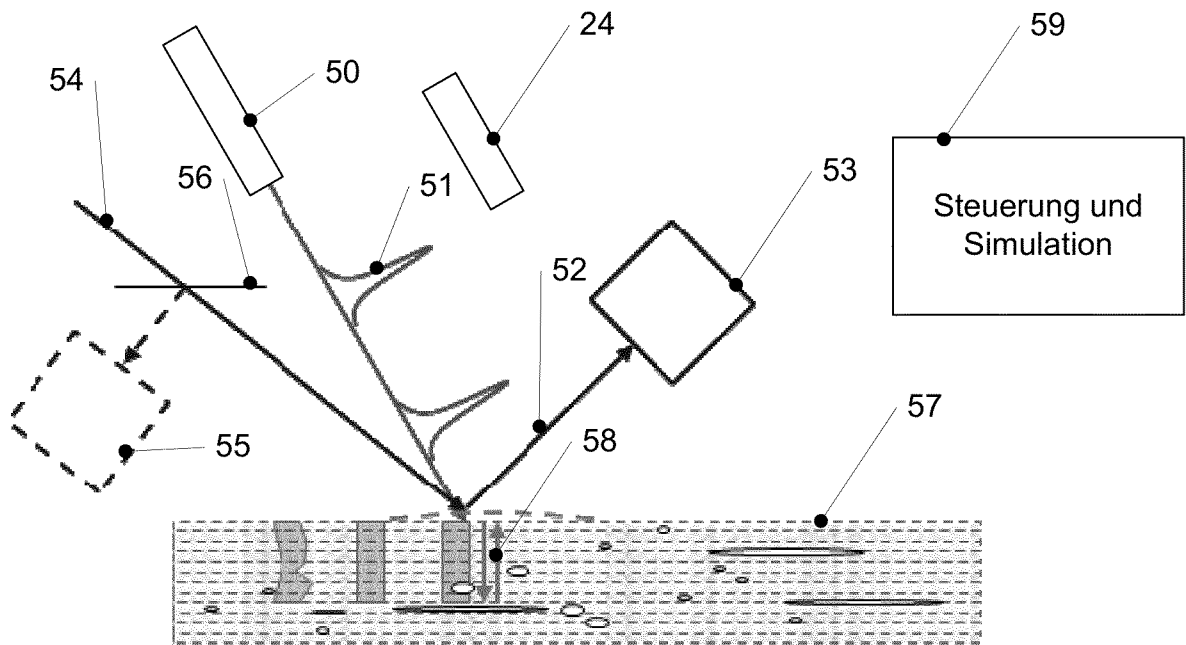


Fig. 5

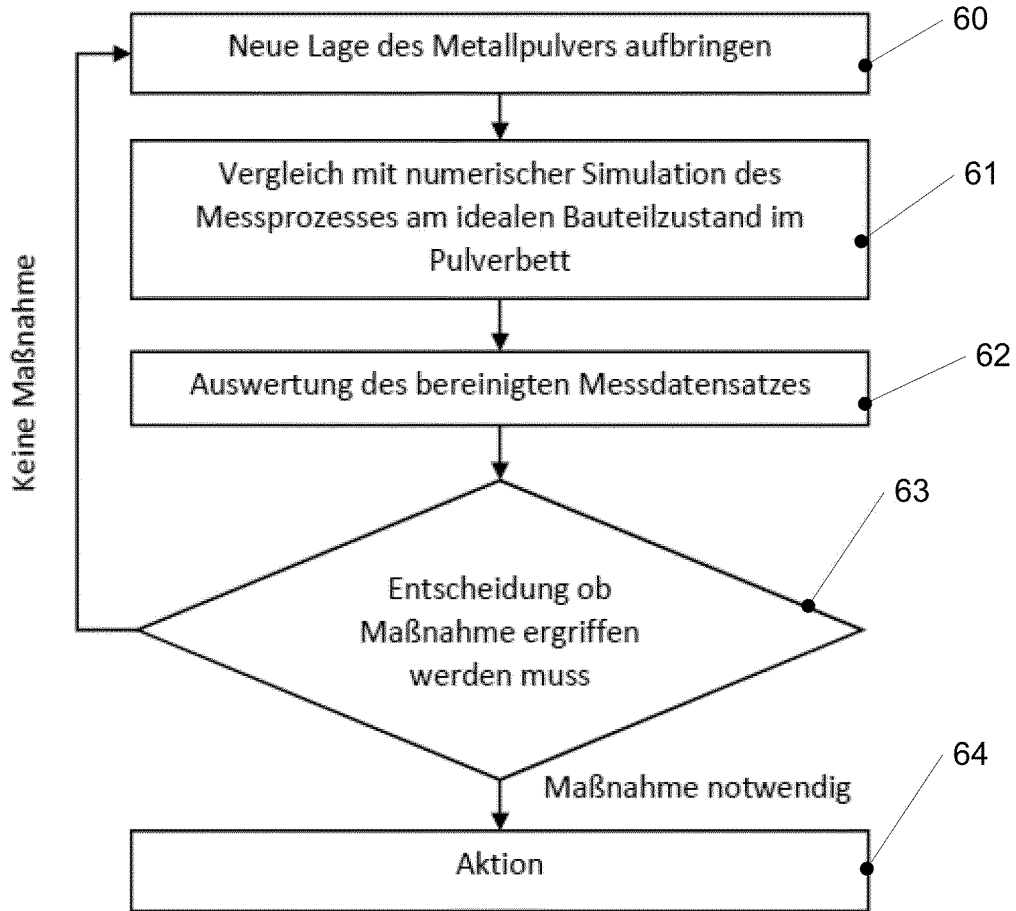


Fig. 6

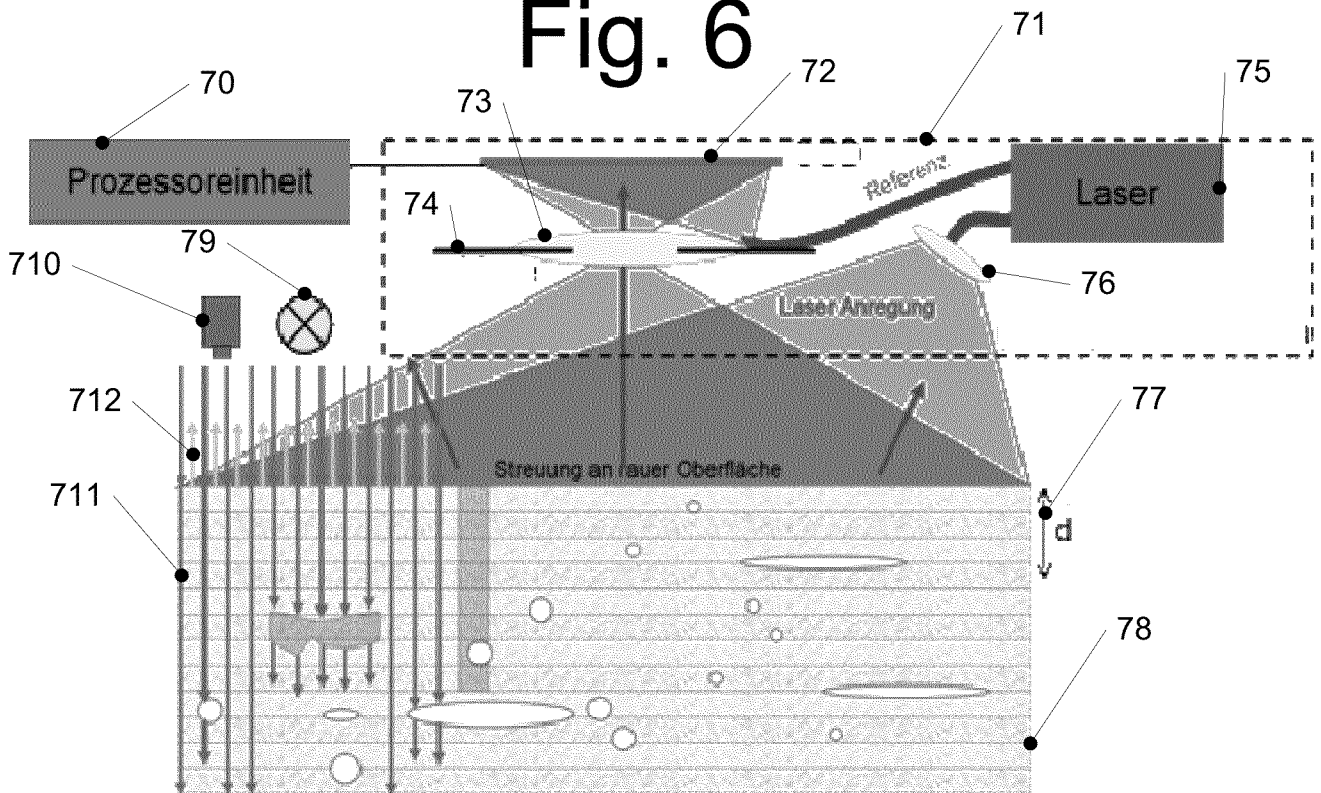


Fig. 7

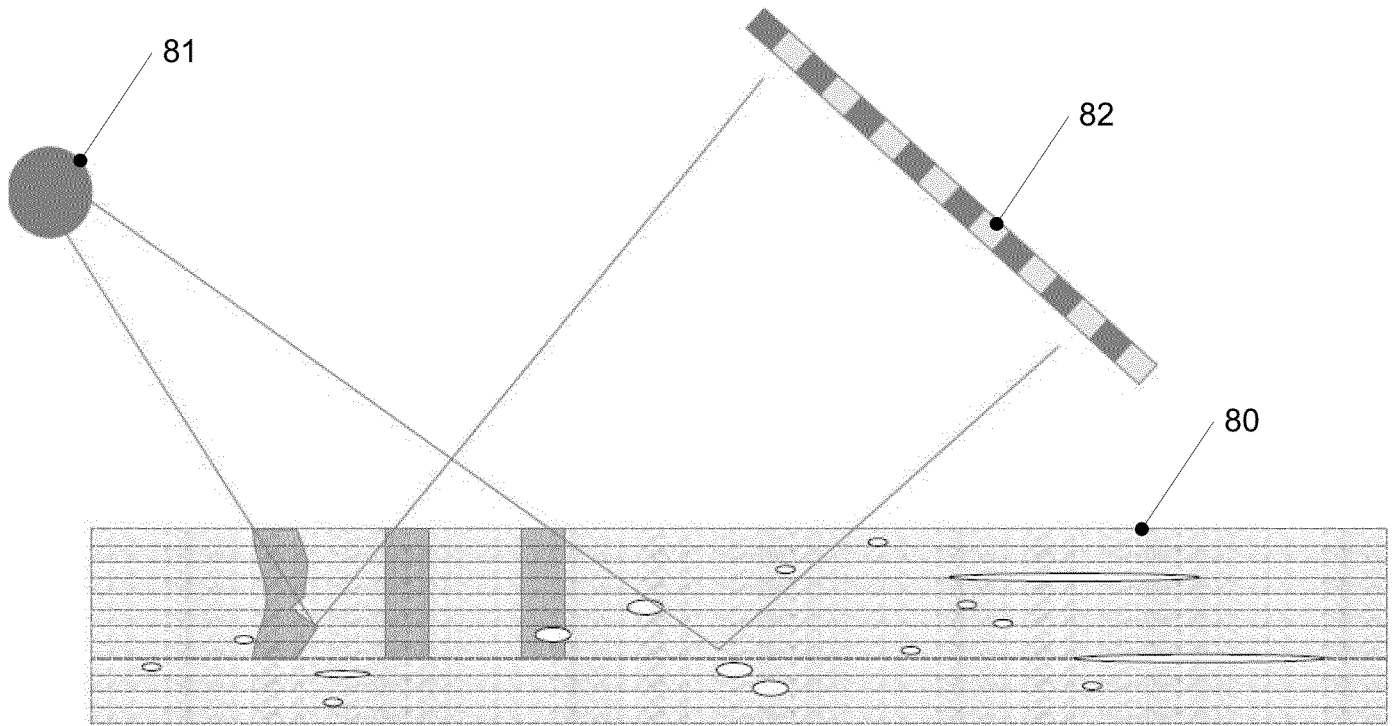


Fig. 8

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/EP2018/066304

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER		
<i>B22F 3/00</i> (2006.01)i; <i>B22F 3/105</i> (2006.01)i; <i>B33Y 30/00</i> (2015.01)i; <i>B33Y 50/00</i> (2015.01)i; <i>B33Y 50/02</i> (2015.01)i; <i>B29C 64/393</i> (2017.01)i; <i>G06F 17/50</i> (2006.01)i; <i>G06N 99/00</i> (2010.01)i; <i>G01N 25/72</i> (2006.01)n; <i>G01N 29/12</i> (2006.01)n; <i>G01N 29/24</i> (2006.01)n; <i>G01B 11/16</i> (2006.01)n; <i>G01B 9/02</i> (2006.01)n		
According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC		
B. FIELDS SEARCHED		
Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols) B22F; B33Y; B29C; G01N; G01B; G06F; G06N		
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		
C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	WO 2016082810 A1 (MTU AERO ENGINES AG [DE]) 02 June 2016 (2016-06-02) page 7, line 15 - page 12, last line; figures	1-18
A	US 2010174392 A1 (FINK JEFFREY E [US] ET AL) 08 July 2010 (2010-07-08) cited in the application paragraphs [0007] - [0009], [0040] - [0048]; claims; figures	1-18
A	Loucas Papadakis ET AL. "Numerical Modeling of Heat Effects during Thermal Manufacturing of Aero Engine Components" <i>Proceedings of the World Congress on Engineering 2012 Vol III</i> , London, UK, 06 July 2012 (2012-07-06), pages 1-6, Retrieved from the Internet: http://www.iaeng.org/publication/WCE2012/WCE2012_p1518-1523.pdf [retrieved on 2016-03-21] . XP055259905 the whole document	1-18
<input checked="" 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 02 October 2018		Date of mailing of the international search report 09 October 2018
Name and mailing address of the ISA/EP European Patent Office p.b. 5818, Patentlaan 2, 2280 HV Rijswijk Netherlands Telephone No. (+31-70)340-2040 Facsimile No. (+31-70)340-3016		Authorized officer Ceulemans, Judy Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/EP2018/066304

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	DE 102006025262 A1 (ADVANCE TECHNOLOGY VENTURE LTD [IE]) 06 December 2007 (2007-12-06) the whole document	1-18
A	US 2016318255 A1 (OU JIFEI [US] ET AL) 03 November 2016 (2016-11-03) paragraphs [0005], [0006], [0042], [0057] - [0058]; claims; figures	1-18

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/EP2018/066304

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
WO	2016082810	A1	02 June 2016	DE	112015005369	A5	10 August 2017
				US	2018071868	A1	15 March 2018
				WO	2016082810	A1	02 June 2016
US	2010174392	A1	08 July 2010	EP	2277687	A1	26 January 2011
				EP	2899012	A1	29 July 2015
				US	2010174392	A1	08 July 2010
DE	102006025262	A1	06 December 2007	NONE			
US	2016318255	A1	03 November 2016	NONE			

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Internationales Aktenzeichen
PCT/EP2018/066304

A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES					
INV.	B22F3/00	B22F3/105	B33Y30/00	B33Y50/00	B33Y50/02
	B29C64/393	G06F17/50	G06N99/00		
ADD.	G01N25/72	G01N29/12	G01N29/24	G01B11/16	G01B9/02

Nach der Internationalen Patentklassifikation (IPC) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPC

B. RECHERCHIERTER GEBIETE
Recherchierter Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole) B22F B33Y B29C G01N G01B G06F G06N

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.
A	WO 2016/082810 A1 (MTU AERO ENGINES AG [DE]) 2. Juni 2016 (2016-06-02) Seite 7, Zeile 15 - Seite 12, letzter Zeile; Abbildungen	1-18
A	US 2010/174392 A1 (FINK JEFFREY E [US] ET AL) 8. Juli 2010 (2010-07-08) in der Anmeldung erwähnt Absätze [0007] - [0009], [0040] - [0048]; Ansprüche; Abbildungen	1-18
	----- -/--	

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

* Besondere Kategorien von angegebenen Veröffentlichungen :	"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
"A" Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert, aber nicht als besonders bedeutsam anzusehen ist	"X" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann allein aufgrund dieser Veröffentlichung nicht als neu oder auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden
"E" frühere Anmeldung oder Patent, die bzw. das jedoch erst am oder nach dem internationalen Anmeldedatum veröffentlicht worden ist	"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
"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)	"&" Veröffentlichung, die Mitglied derselben Patentfamilie ist
"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	

Datum des Abschlusses der internationalen Recherche	Absenddatum des internationalen Recherchenberichts
2. Oktober 2018	09/10/2018

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 Ceulemans, Judy
--	--

C. (Fortsetzung) ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN		
Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
A	<p>Loucas Papadakis ET AL: "Numerical Modeling of Heat Effects during Thermal Manufacturing of Aero Engine Components", Proceedings of the World Congress on Engineering 2012 Vol III, 6. Juli 2012 (2012-07-06), Seiten 1-6, XP055259905, London, UK ISBN: 978-988-1925-22-0 Gefunden im Internet: URL:http://www.iaeng.org/publication/WCE2012/WCE2012_pp1518-1523.pdf [gefunden am 2016-03-21] das ganze Dokument</p>	1-18
A	<p>DE 10 2006 025262 A1 (ADVANCE TECHNOLOGY VENTURE LTD [IE]) 6. Dezember 2007 (2007-12-06) das ganze Dokument</p>	1-18
A	<p>US 2016/318255 A1 (OU JIFEI [US] ET AL) 3. November 2016 (2016-11-03) Absätze [0005], [0006], [0042], [0057] - [0058]; Ansprüche; Abbildungen</p>	1-18

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

Internationales Aktenzeichen

PCT/EP2018/066304

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
WO 2016082810 A1	02-06-2016	DE 112015005369 A5	10-08-2017
		US 2018071868 A1	15-03-2018
		WO 2016082810 A1	02-06-2016

US 2010174392 A1	08-07-2010	EP 2277687 A1	26-01-2011
		EP 2899012 A1	29-07-2015
		US 2010174392 A1	08-07-2010

DE 102006025262 A1	06-12-2007	KEINE	

US 2016318255 A1	03-11-2016	KEINE	
