(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
15. April 2021 (15.04.2021)

WIPO | PCT

(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2021/069346 A1

(51) Internationale Patentklassifikation:
B23K 26/03 (2006.01)

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2020/077780

(22) Internationales Anmeldedatum:
05. Oktober 2020 (05.10.2020)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:
10 2019 127 323.4
10. Oktober 2019 (10.10.2019) DE

(71) Anmelder: **PRECITEC GMBH & CO. KG** [DE/DE]; Draisstraße 1, 76571 Gaggenau (DE).

(72) Erfinder: **SCHWARZ, Joachim**; Alte Steinerstraße 32, 8451 Kleinandelfingen (CH).

(74) Anwalt: **TER MEER STEINMEISTER & PARTNER PATENTANWÄLTE MBB**; Nymphenburger Straße 4, 80335 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, 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, IT, JO, JP, KE, KG, KH, KN, 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, ST, SV, SY, TH, TJ, TM,

WO 2021/069346 A1

(54) Title: LASER WORKING SYSTEM FOR PERFORMING A WORKING PROCESS ON A WORKPIECE BY MEANS OF A LASER BEAM AND METHOD FOR MONITORING A WORKING PROCESS ON A WORKPIECE BY MEANS OF A LASER BEAM

(54) Bezeichnung: LASERBEARBEITUNGSSYSTEM ZUM DURCHFÜHREN EINES BEARBEITUNGSPROZESSES AN EINEM WERKSTÜCK MITTELS EINES LASERSTRAHLS UND VERFAHREN ZUR ÜBERWACHUNG EINES BEARBEITUNGSPROZESSES AN EINEM WERKSTÜCK MITTELS EINES LASERSTRAHLS

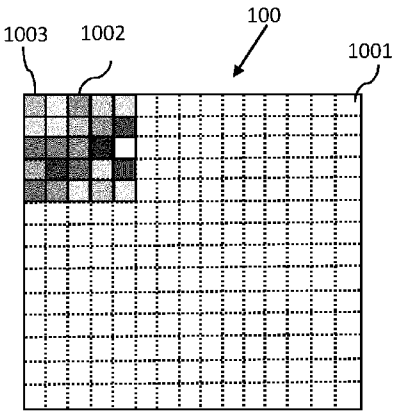


Fig. 1A

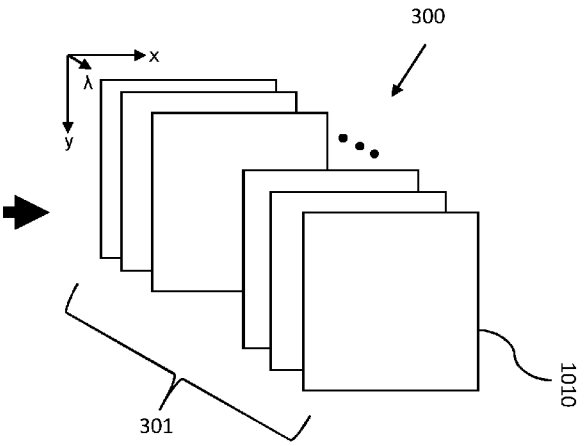


Fig. 1B

(57) Abstract: The invention relates to a laser working system for performing a working process on a workpiece by means of a laser beam. The laser working system comprises: a laser working head for radiating a laser beam into a working region on the workpiece; and a sensor unit for monitoring the working process, the sensor unit having at least one hyperspectral sensor. The sensor unit is designed to capture a hyperspectral image of a region of the workpiece, the hyperspectral image having N times M pixels. The hyperspectral image has two spatial dimensions x and y and a spectral dimension λ. N indicates the number of pixels in the first spatial dimension

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

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)*

— *vor Ablauf der für Änderungen der Ansprüche geltenden Frist; Veröffentlichung wird wiederholt, falls Änderungen eingehen (Regel 48 Absatz 2 Buchstabe h)*

x, M indicates the number of pixels in the second spatial dimension y, and L indicates the number of spectral bands in the spectral dimension λ of the hyperspectral image. M, N and L are natural numbers. The invention further relates to a method for monitoring a working process on a workpiece by means of a laser beam.

(57) Zusammenfassung: Es ist ein Laserbearbeitungssystem zum Durchführen eines Bearbeitungsprozesses an einem Werkstück mittels eines Laserstrahls angegeben, das Laserbearbeitungssystem umfassend: einen Laserbearbeitungskopf zum Einstrahlen eines Laserstrahls in einen Bearbeitungsbereich auf dem Werkstück; und eine Sensoreinheit zur Überwachung des Bearbeitungsprozesses mit zumindest einem Hyperspektralsensor, wobei die Sensoreinheit eingerichtet ist, ein Hyperspektralbild mit N mal M Pixeln von einem Bereich des Werkstücks zu erfassen, wobei das Hyperspektralbild zwei räumliche Dimensionen x und y sowie eine spektrale Dimension λ aufweist und wobei N eine Anzahl von Pixeln in der ersten räumlichen Dimension x, M eine Anzahl von Pixeln in der zweiten räumlichen Dimension y, und L die Anzahl von Spektralbändern in der spektralen Dimension λ des Hyperspektralbildes angeben, wobei M, N und L natürliche Zahlen sind. Ferner ist ein Verfahren zur Überwachung eines Bearbeitungsprozesses an einem Werkstück mittels eines Laserstrahls angegeben.

Laserbearbeitungssystem zum Durchführen eines Bearbeitungsprozesses an einem Werkstück mittels eines Laserstrahls und Verfahren zur Überwachung eines Bearbeitungsprozesses an einem Werkstück mittels eines Laserstrahls

Die vorliegende Offenbarung betrifft ein Laserbearbeitungssystem zum Durchführen eines Bearbeitungsprozesses an einem Werkstück, insbesondere an einem metallischen Werkstück, mittels eines Laserstrahls und ein Verfahren zur Überwachung eines Bearbeitungsprozesses an einem Werkstück, insbesondere an einem metallischen Werkstück, mittels eines Laserstrahls. Die vorliegende Offenbarung betrifft insbesondere ein Laserbearbeitungssystem mit einer Sensoreinheit, die eingerichtet ist, ein Hyperspektralbild von einem Bereich des Werkstücks zu erfassen, und ein Verfahren, bei dem ein Hyperspektralbild von einem Bereich eines Werkstücks erfasst wird.

Hintergrund

In einem Laserbearbeitungssystem zur Bearbeitung eines Werkstücks mittels eines Laserstrahls wird der von einer Laserlichtquelle oder einem Ende einer Laserleitfaser austretende Laserstrahl mit Hilfe einer Strahlführungs- und Fokussieroptik auf das zu bearbeitende Werkstück fokussiert oder gebündelt. Die Bearbeitung kann beispielsweise ein Laserschneiden, -löten oder -schweißen umfassen. Das Laserbearbeitungssystem kann eine Laserbearbeitungsvorrichtung, beispielsweise einen Laserbearbeitungskopf, etwa einen Laserschneidkopf oder einen Laserschweißkopf, umfassen. Insbesondere beim Laserschweißen oder -löten eines Werkstücks ist es wichtig, den Schweiß- bzw. Lötprozess zu überwachen, um die Qualität der Bearbeitung beurteilen und sichern zu können. Dies schließt die Erkennung und Klassifizierung von Bearbeitungsfehlern ein. Aktuelle Lösungen für die Prozessüberwachung und Qualitätsbeurteilung umfassen eine sogenannte „Pre-Prozess“-, „In-Prozess“- und „Post-Prozess“-Inspektion oder -Überwachung.

Die Pre-Prozess Überwachung hat die Aufgabe, einen Fügespalt zwischen zwei Fügepartnern bzw. Werkstücken zu detektieren, um den Laserstrahl auf die geeignete Position zu führen und den Versatz der Fügepartner zu ermitteln. In den meisten Fälle werden Triangulationssysteme dafür eingesetzt.

Die Post-Prozess-Inspektion wird insbesondere zur Prozessüberwachung und Qualitätsbeurteilung, etwa zur Erkennung von Bearbeitungsfehlern, eingesetzt. Das Ziel der Post-Prozess-Inspektion besteht darin, alle Defekte oder Bearbeitungsfehler zuverlässig zu lokalisieren und zu erkennen. Die Post-Prozess-Inspektion von Schweiß- bzw. Lötnähten erfolgt

typischerweise mittels Bildverarbeitung, bei der 2D-Bilder, die die Schweiß- bzw. Lötnähte auf der Oberfläche eines bearbeiteten Werkstücks zeigen, analysiert werden. Beispielsweise kann im Fall des Laserschweißens die entstandene Schweißnaht inspiziert und gemäß geltenden Normen (z.B. SEL100) vermessen bzw. analysiert werden. Auf Basis der erfassten Bilder erfolgt dann eine Extraktion und Klassifizierung von Merkmalen, die die Bearbeitungsqualität, insbesondere die Qualität der Schweiß- und Lötnähte repräsentieren bzw. beschreiben. Anhand der extrahierten und klassifizierten Merkmale werden Bearbeitungsfehler, wie Löcher oder Poren in der Werkstückoberfläche, erkannt und klassifiziert und das bearbeitete Werkstück wird abhängig davon beispielsweise als „gut“ (d.h. geeignet für die Weiterverarbeitung oder den Verkauf) oder als „schlecht (d.h. als Ausschuss) gekennzeichnet bzw. klassifiziert. Welche signifikanten Merkmale überhaupt für die Bewertung der Qualität der Laserbearbeitung herangezogen werden können und welchen Einfluss diese Merkmale dann auf die Bewertung der Qualität haben, kann nur durch Experten auf dem Gebiet entschieden und bewerkstelligt werden, da die Komplexität dieser Systeme aufgrund der Anzahl einzustellenden Parameter sehr hoch ist. In aktuellen Systemen werden dazu bis zu 300 Parameter eingestellt (sogenannte „Parametrisierung“). Die Verwendung von Post-Prozess-Inspektion zur Qualitätsbeurteilung und Klassifikation erhöht die Kosten, den Integrationsaufwand und den Aufwand für den Unterhalt der Laserbearbeitungssysteme.

Die In-Prozess-Inspektion oder -Überwachung dient typischerweise zur kontinuierlichen Überwachung eines Laserbearbeitungsprozesses und erfolgt während der Durchführung des Laserbearbeitungsprozesses. Bei der Überwachung werden Messsignale verschiedener Messgrößen des Laserbearbeitungsprozesses erfasst und beurteilt, insbesondere Strahlung, die während der Durchführung des Bearbeitungsprozesses vom Werkstück emittiert oder reflektiert wird, beispielsweise Plasmastrahlung, zurückgestreute Laserleistung und Temperaturstrahlung. Typischerweise wird bei der Laserbearbeitung Strahlung im sichtbaren Bereich zwischen 400 nm und 850 nm vom Schmelzbad, im Bereich zwischen 400 nm und 1100 nm vom entstehenden Plasma, im Bereich von 900 nm bis 1100 nm zurückgestreutes Licht vom Laser und im Bereich größer als 1000 nm Temperaturstrahlung emittiert bzw. reflektiert. Somit wird Strahlung in einem weiten Bereich zwischen 400 nm und 1800 nm emittiert bzw. reflektiert. Normalerweise werden bei der In-Prozess-Überwachung die Signale nicht ortsaufgelöst und/oder nicht wellenlängenaufgelöst erfasst bzw. verarbeitet. Vorhandene Lösungen für die In-Prozess-Überwachung setzen Dioden ein, die die emittierte bzw. reflektierte Strahlung jeweils in schmalbandigen Wellenlängenbereichen detektieren und als Messsignal ausgeben. Beispielsweise wird eine Si-Diode für die Detektion im Bereich zwischen 400 nm und 800 nm, eine InGaAs-Diode für die Detektion im Bereich zwischen 800 nm und 1200 nm und eine weitere InGaAs- oder Ger-Diode für die Detektion im

Bereich zwischen 1200 nm und 2000 nm eingesetzt. Aus diesen Wellenlängenbereichen können ferner prozessabhängig Bereiche mit entsprechenden optischen Filtern selektiert werden. Beispielsweise wird abhängig von der Art des verwendeten Lasers der Wellenlängenbereich zwischen 1020 nm und 1090 nm gefiltert oder gedämpft. Wellenlängenbereiche außerhalb der Detektionsbereiche der Dioden und der optischen Filter werden nicht detektiert. Eine ortsabhängige Darstellung der Intensitäten ist mit Dioden ebenfalls nicht möglich.

Die mit den Dioden so aufgezeichneten Intensitätsverläufe werden gefiltert und auf eine Überschreitung von Schwellwerten hin geprüft. Die Filterparameter und Schwellwerte werden für jeden Wellenlängenbereich separat eingestellt. Die Erfassung und Auswertung einzelner Wellenlängenbereiche erfolgt somit unabhängig von den anderen Wellenlängenbereichen. Rückschlüsse auf bestimmte Fehlerarten, wie beispielsweise ein Spalt zwischen den zu verbindenden Bauteilen, eine fehlende Durchschweißung, eine mangelhafte Einschweißung, die Entstehung von Poren oder ein Versatz der Schweißung zur Fügekante können mit einer separaten Beurteilung bzw. Klassifikation der Intensitätsverläufe in festgelegten Wellenlängenbereichen nicht zuverlässig gezogen werden.

Eine Regelung des Laserbearbeitungsprozesses basierend auf den einzeln erfassten und ausgewerteten Wellenlängenbereichen kann in der Regel ebenfalls nicht realisiert werden, da die Zusammenhänge zwischen den einzelnen Messsignalen und den Stellgrößen bzw. Bearbeitungsparameter des Laserbearbeitungsprozesses nicht ausreichend bekannt sind. Insbesondere sind die Abhängigkeiten der Stellgrößen von den erfassten Signalen nicht eindeutig. Mit anderen Worten ist der Zusammenhang zwischen den Stellgrößen des Laserbearbeitungsprozesses, beispielsweise Fokuslage, der Abstand und die Position des Laserbearbeitungskopfes zur Fügestelle, die Vorschubgeschwindigkeit, die Laserleistung und Menge Gaszufuhr, ggf. auch die Drahtzufuhrgeschwindigkeit und den Messsignalen nicht eindeutig bekannt oder erkennbar. Auch ist die vollständige Information über den Zustand des Laserbearbeitungsprozesses unter Umständen nicht in den Messsignalen enthalten. Eine Regelung des Laserschweißprozesses ist daher nicht möglich.

Andere Lösungen setzen ortsauflösende Sensoren und Bildverarbeitung zur Vermessung der Schmelzbad- und Keyhole-Geometrie ein, um dadurch eine Qualitätsbeurteilung zu ermöglichen. DE10 2011 078 276 B3 beschreibt ein Verfahren, bei dem Helligkeitsprofile von der Werkstückoberfläche mit CMOS-Sensoren im Bereich zwischen 450 nm und 800 nm aufgenommen werden. Diese Profile werden mit Modellen verglichen, um daraus auf die Bearbeitungsqualität zu schließen.

Weitere Systeme liefern mithilfe von Bildsensoren ortsaufgelöste Aufnahmen von einem Fügespalt, dem Bearbeitungsbereich selbst und der Schweißnahtraupe. Allerdings integrieren die verwendeten CMOS-Sensoren die detektierte Beleuchtungsintensität über einen großen Wellenlängenbereich, wodurch die Aussagefähigkeit über den Bearbeitungsprozess eingeschränkt wird und eine Regelung des Bearbeitungsprozesses somit ebenfalls nicht möglich ist. Hinzu kommt die aufwendige Parametrierung dieser Systeme.

Zusammenfassung der Erfindung

Es ist somit eine Aufgabe der Erfindung, eine Überwachung und Regelung eines Laserbearbeitungsprozesses und die Erkennung und Klassifizierung von Bearbeitungsfehlern zu vereinfachen.

Es ist ferner eine Aufgabe der Erfindung, die Erkennung und Klassifizierung von Bearbeitungsfehlern sowie die Überwachung und Regelung eines Laserbearbeitungsprozesses basierend auf erfasster emittierter Prozessstrahlung und/oder reflektierter Laserstrahlung zu ermöglichen.

Es ist ferner eine Aufgabe der Erfindung, die Erfassung emittierter Prozessstrahlung und/oder reflektierter Laserstrahlung des Laserbearbeitungsprozesses ortsaufgelöst und wellenlängenaufgelöst zu ermöglichen.

Es ist ferner eine Aufgabe der Erfindung, Bearbeitungsfehler zuverlässig und schnell und ohne aufwändige Parametrisierungsprozesse zu erkennen und zu klassifizieren. Es ist ferner eine Aufgabe der Erfindung, Bearbeitungsfehler während eines laufenden Laserbearbeitungsprozesses, vorzugsweise in Echtzeit und automatisiert, zu erkennen.

Diese Aufgaben werden durch den Gegenstand der unabhängigen Ansprüche gelöst. Vorteilhafte Ausführungsformen und Weiterentwicklungen sind Gegenstand der entsprechenden abhängigen Ansprüche.

Die Erfindung basiert auf dem Gedanken, die Überwachung eines Laserbearbeitungsprozesses, insbesondere eines Laserschweiß- oder Laserschneidprozesses, unter Verwendung von einem Hyperspektralsensor, insbesondere einer Hyperspektralkamera, durchzuführen. Mit anderen Worten erfasst während eines Laserbearbeitungsprozesses zumindest ein Hyperspektralsensor, vorzugsweise kontinuierlich, Hyperspektralbilder von einem Bereich eines Werkstücks. Die erfassten Hyperspektralbilder umfassen in jedem Pixel ein Spektrum über

einen breiten Wellenlängenbereich von einer während der Durchführung vom Werkstück emittierten oder reflektierten Strahlung, die kurz als „ausgehende Strahlung“ bezeichnet werden kann. Die ausgehende Strahlung kann insbesondere emittierte Prozessstrahlung, beispielweise Temperaturstrahlung und Plasmastrahlung, sowie reflektiertes Licht des Laserstrahls umfassen. Die erfassten Hyperspektralbilder beschreiben oder charakterisieren den Laserbearbeitungsprozess vollständig. Die Hyperspektralbilder können als Eingangsdaten für eine Bildverarbeitung durch ein tiefes neuronales Netz dienen, welches darauf basierend kontinuierlich, vorzugsweise in Echtzeit, einen Ausgangsvektor berechnet, der Informationen über den Bearbeitungsprozess enthält, beispielsweise Informationen über einen Zustand des Laserbearbeitungsprozesses bzw. über ein Bearbeitungsergebnis oder über einen Bearbeitungsfehler bei dem Werkstück. Beispielsweise kann der Ausgangsvektor zur Qualitätsbeurteilung des Bearbeitungsprozesses, insbesondere zur Beurteilung von Laserscheißnähten und Lötnähten, verwendet werden. Der Ausgangsvektor kann ferner zur Regelung des Laserbearbeitungsprozesses verwendet werden.

Die Verwendung eines Hyperspektralsensors, etwa einer Hyperspektralkamera, vereinfacht somit die Erfassung von Bildern eines Bereichs des Werkstücks in verschiedenen Wellenlängenbändern bzw. Spektralbändern. Durch die ortsaufgelöste und spektralaufgelöste bzw. wellenlängenaufgelöste Erfassung von Strahlung eines Bereichs des Werkstücks wird somit eine genaue Datenerfassung für die Überwachung und Regelung des Bearbeitungsprozesses ermöglicht. Die Verwendung einer Vielzahl von Dioden, Strahlteilern und/oder Filtern bzw. aufwendige Filterkaskaden können somit vermieden werden. Hierbei können die Hyperspektralbilder als sogenannte Snapshot-Aufnahmen, wobei alle Daten eines Hyperspektralbildes gleichzeitig aufgenommen werden. Alternativ können die Hyperspektralbilder in einem sogenannten Push-Broom Verfahren erfasst werden, bei dem beispielsweise gleichzeitig alle Pixelzeilen des Hyperspektralsensors in je einem anderen Wellenlängenband aufgenommen werden und anschließend der Hyperspektralsensor und der Werkstückbereich relativ zueinander in y-Richtung bzw. Zeilenrichtung der Sensorpixel verschoben werden, sodass die Pixelzeilen sukzessive in allen Wellenlängenbändern erfasst werden. Hierbei sind die Pixel einer Pixelzeile entlang einer ersten Richtung, auch als x-Richtung oder Spaltenrichtung bezeichnet, angeordnet.

Gemäß einem ersten Aspekt der vorliegenden Offenbarung ist ein Laserbearbeitungssystem zum Durchführen eines Bearbeitungsprozesses an einem Werkstück mittels eines Laserstrahls angegeben, wobei das Laserbearbeitungssystem umfasst: einen Laserbearbeitungskopf zum Einstrahlen des Laserstrahls in einen Bearbeitungsbereich auf dem Werkstück; und eine Sensoreinheit zur Überwachung des Bearbeitungsprozesses mit zumindest einem

Hyperspektralsensor, wobei die Sensoreinheit eingerichtet ist, von einem Bereich des Werkstücks ein Hyperspektralbild mit N mal M Pixeln zu erfassen, die jeweils L verschiedene Werte in einer spektralen Dimension umfassen, wobei das Hyperspektralbild zwei räumliche Dimensionen x und y sowie die spektrale Dimension λ aufweist und wobei N eine Anzahl von Pixeln in der ersten räumlichen Dimension x, M eine Anzahl von Pixeln in der zweiten räumlichen Dimension y, und L die Anzahl von Spektralbändern in der spektralen Dimension λ des Hyperspektralbildes angeben, wobei M, N und L natürliche Zahlen sind.

Gemäß einem zweiten Aspekt der vorliegenden Offenbarung ist ein Verfahren zur Überwachung eines Bearbeitungsprozesses an einem Werkstück mittels eines Laserstrahls angegeben, wobei das Verfahren die folgenden Schritte umfasst: Einstrahlen des Laserstrahls in einen Bearbeitungsbereich auf dem Werkstück, Erfassen eines Hyperspektralbildes mit N mal M Pixeln von einem Bereich des Werkstücks, wobei jedes Pixel L verschiedene Werte in einer spektralen Dimension λ umfasst, wobei das Hyperspektralbild zwei räumliche Dimensionen x und y sowie die spektrale Dimension λ aufweist und wobei N eine Anzahl von Pixeln in der ersten räumlichen Dimension x, M eine Anzahl von Pixeln in der zweiten räumlichen Dimension y, und L die Anzahl von Spektralbändern in der spektralen Dimension λ des Hyperspektralbildes angeben, wobei M, N und L natürliche Zahlen sind.

Der im Hyperspektralbild erfasste Bereich des Werkstücks kann zumindest einen der folgenden Bereiche auf dem Werkstück umfassen: den aktuellen Bearbeitungsbereich des Laserbearbeitungsprozesses, einen Bereich im Vorlauf des Laserstrahls, einen Bereich im Nachlauf des Laserstrahls, einen noch zu bearbeitenden Bereich und einen bearbeiteten Bereich. Der aktuelle Bearbeitungsbereich bezeichnet einen Bereich des Werkstücks, in den der Laserstrahl eingestrahlt wird. Insbesondere beim Laserschweißen kann der erfasste Bereich des Werkstücks zumindest einen der folgenden Bereiche umfassen: eine Dampfkapillare, ein Schmelzbad, eine erstarrte Schmelze, eine Fügekante zwischen zwei miteinander zu verschweißenden Werkstücken, und eine Nahtraupe. Der Hyperspektralsensor kann entsprechend auf den im Hyperspektralbild zu erfassenden Bereich des Werkstücks ausgerichtet sein. Je nachdem, welche Bereiche in dem erfassten Werkstückbereich enthalten sind, kann das Hyperspektralbild zur Pre-Prozess, In-Prozess und/oder Post-Prozess Überwachung dienen.

Das Laserbearbeitungssystem umfasst also eine Sensoreinheit, die eingerichtet ist, um ein Hyperspektralbild von einem Bereich eines Werkstücks zu erfassen und auszugeben. Die Sensoreinheit kann eingerichtet sein, um von dem Bereich des Werkstücks ausgehende Strahlung, beispielsweise emittierte Prozessstrahlung und/oder reflektierte bzw. zurückge-

streute Strahlung, insbesondere reflektierte oder zurückgestreute Laserstrahlung, zu erfassen und als Hyperspektralbild auszugeben. Die Sensoreinheit kann insbesondere eingerichtet sein, um zumindest eine der folgenden Strahlungsarten zu erfassen: Temperaturstrahlung, Strahlung im infraroten Bereich des Lichts, Strahlung im nahen infraroten Bereich des Lichts, Strahlung im sichtbaren Bereich des Lichts, Plasmastrahlung, reflektiertes oder zurückgestreutes Licht des (Bearbeitungs-)Laserstrahls, und von einer Beleuchtungsquelle eingestrahltes und reflektiertes Licht, etwa eingestrahltes und reflektiertes Messlicht eines Kohärenztomographen.

Das Hyperspektralbild umfasst eine Mehrzahl von Pixeln. Insbesondere umfasst das Hyperspektralbild N mal M Pixel, wobei das Hyperspektralbild zwei räumliche Dimensionen x und y sowie eine spektrale Dimension λ aufweist und wobei N eine Anzahl von Pixeln in der ersten räumlichen Dimension x und M eine Anzahl von Pixeln in der zweiten räumlichen Dimension y angibt. Jeder der Pixel umfasst L Werte in der spektralen Dimension λ, wobei L eine Anzahl von Spektralbändern in der spektralen Dimension λ des Hyperspektralbildes angibt. Die erste räumliche Dimension x und die zweite räumliche Dimension y können zwei kartesischen Richtungen des Bereichs des Werkstücks entsprechen. Demnach kann jedes der N mal M Pixel einem Punkt in dem erfassten Bereich des Werkstücks entsprechen. Jeder der L Werte eines Pixels entspricht einer erfassten Strahlungsintensität, kurz „Intensität“, der von dem entsprechenden Punkt des erfassten Bereich des Werkstücks ausgehenden Strahlung im jeweiligen Spektralband. Damit kann das Hyperspektralbild eine spektrale Verteilung innerhalb des durch die Spektralbänder abgedeckten Wellenlängenbereichs der von dem erfassten Bereich des Werkstücks ausgehenden Strahlung angeben. Das erfasste Hyperspektralbild entspricht demnach vorzugsweise einem sowohl ortsaufgelösten als auch wellenlängenaufgelösten Bild des Werkstückbereichs. Damit kann die Sensoreinheit mehrere Einzelsensoren oder eine Anordnung von Einzelsensoren, insbesondere mehrere Dioden, gemäß dem Stand der Technik ersetzen.

Das Hyperspektralbild kann auch als Hyperspektralwürfel oder -cube bezeichnet werden. Das Hyperspektralbild kann auch als L Einzelbilder betrachtet werden, wobei jedes der Einzelbilder eine Auflösung von N mal M Pixeln aufweist und einer erfassten Intensität der von dem Bereich des Werkstücks ausgehenden Strahlung in einem der L Spektralbänder entspricht. Dies kann insbesondere für ein sogenannten Mosaik-Sensor der Fall sein. Bei Verwendung des Push-Broom Verfahrens mit einem Hyperspektralsensor, bei dem auf den Pixelzeilen des Hyperspektralsensors L verschiedene Filter für die L verschiedenen Wellenlängenbänder angeordnet sind, kann das Hyperspektralbild hingegen als M Einzelbilder betrachtet werden, wobei jedes der Einzelbilder eine Auflösung von N mal L aufweist und

jede der L Zeilen eines Einzelbildes einer erfassten Intensität der von der entsprechenden Zeile des Bereichs des Werkstücks ausgehenden Strahlung in dem jeweiligen der L Spektralbänder entspricht. Das Hyperspektralbild kann auch als Hyperspektralwürfel bezeichnet werden, wobei der Hyperspektralwürfel N mal M mal L bzw. N mal L mal M Elemente oder Werte aufweist. Die Datenausgabe der Sensoreinheit kann in Form eines 3D-Datenwürfels mit zwei räumlichen Dimensionen und einer spektralen Dimension erfolgen. Der Hyperspektralwürfel kann auch hyperspektraler Datenwürfel, oder analog zu einem 3-kanaligen RGB-Bild als L-kanaliges Hyperspektralbild bezeichnet werden.

Die Anzahl der Spektralbänder L kann gleich oder größer 16, bevorzugt gleich oder größer 20, bevorzugt gleich oder größer 25, besonders bevorzugt gleich oder größer 100 sein.

Die Spektralbänder in der spektralen Dimension λ können gleich groß und/oder über einen Wellenlängenbereich der erfassten Strahlung gleichmäßig verteilt und/oder aneinander angrenzend und/oder aufeinanderfolgend sein. Vorzugsweise überlappen sich die Spektralbänder nicht.

Um eine kontinuierliche Überwachung des Laserbearbeitungsprozesses zu ermöglichen, kann die Sensoreinheit eingerichtet sein, um Hyperspektralbilder kontinuierlich oder um ein Hyperspektralbild pro vorgebebenem Zeitintervall zu erfassen.

Die Sensoreinheit kann ausgebildet sein, um alle L Werte für alle der N mal M Pixel des Hyperspektralbildes im Wesentlichen gleichzeitig zu erfassen. In diesem Fall kann das Hyperspektralbild als Schnappschuss oder Snap-Shot aufgenommen werden, wobei die Intensitäten in allen Spektralbändern für alle Pixel gleichzeitig erfasst werden. Das erfasste Hyperspektralbild entspricht demnach vorzugsweise einem sowohl ortsaufgelösten als auch wellenlängenaufgelösten Bild des Werkstückbereichs zu einem bestimmten Zeitpunkt. Mit anderen Worten kann die Intensität der Strahlung in allen Spektralbändern und für den gesamten erfassten Bereich des Werkstücks gleichzeitig erfasst werden. Dadurch kann der Laserbearbeitungsprozess präzise überwacht werden.

Der Hyperspektralsensor kann einen Mosaikfilter mit L verschiedenen optischen Bandpassfiltern umfassen. Jeder optische Bandpassfilter kann einen Durchlassbereich entsprechend einem der Spektralbänder in der spektralen Dimension λ aufweisen. Auf den Pixeln des Hyperspektralsensors können 4x4 oder 5x5 optische Mosaik-Filter angeordnet sein, wobei jeder einzelne Bandpassfilter des Mosaikfilters auf einem entsprechenden Pixel angeordnet ist. Jeder Pixel des Hyperspektralsensors erfasst demnach eine durch den jeweiligen Band-

passfilter gefilterte Intensität der ausgehenden Strahlung. Somit entstehen im Fall des Hyperspektralsensors mit einem 4x4-Mosaik-Filter 16 Bandpass-gefilterte Bilder, im Fall des Hyperspektralsensors mit einem 5x5-Mosaik-Sensors 25 Bandpass-gefilterte Bilder des Hyperspektralbildes.

Alternativ kann der Hyperspektralsensor einen zeilenbasierten Filter mit L verschiedenen optischen Bandpassfiltern aufweisen. Jeder optische Bandpassfilter kann einen Durchlassbereich entsprechend einem der Spektralbänder in der spektralen Dimension λ aufweisen. Auf den Pixelzeilen des Hyperspektralsensors können die L verschiedenen optischen Bandpassfilter angeordnet sein. Die Pixel einer Pixelzeile sind in einer ersten Richtung, auch als x-Richtung oder Spaltenrichtung bezeichnet, angeordnet. Beispielsweise kann jeder Bandpassfilter über mindestens einer Zeile angeordnet sein und die L verschiedenen optischen Bandpassfilter sind in einer zweiten Richtung, auch als y-Richtung oder Zeilenrichtung bezeichnet, nacheinander angeordnet. Die erste Richtung steht senkrecht auf der zweiten Richtung. Jeder der L optischen Bandpassfilter können einer Zeile oder auch n Zeilen der Pixel ($n>1$) entsprechen. Die L verschiedenen optischen Bandpassfilter sind also vorzugsweise so angeordnet, dass sich die Transmission bzw. der Durchlassbereich nach jeder Zeile oder nach n Zeilen verändert. Jede Zeile oder n Zeilen des Hyperspektralsensors erfasst bzw. erfassen demnach eine durch den jeweiligen Bandpassfilter gefilterte Intensität der ausgehenden Strahlung. Somit kann ein diskretes Spektrum der ausgehenden Strahlung aufgenommen werden. Dieses Verfahren wird auch als „Push Broom“-Verfahren bezeichnet und kann in Laserbearbeitungssystemen mit hochgenauer Materialförderung verwendet werden. Die Synchronisation der Zeilenauslese kann mit der Materialfördergeschwindigkeit abgestimmt sein, so dass jeder Bereich der Oberfläche des Werkstücks mehrfach, d.h. mit jedem der verschiedenen Bandpassfilter zu verschiedenen Zeitpunkten, aufgenommen wird. Dieses Verfahren erlaubt die Anzahl der Bandpassfilter zu erhöhen.

Der zumindest eine Hyperspektralsensor kann eine Hyperspektralkamera umfassen. Insbesondere kann der zumindest eine Hyperspektralsensor eine CMOS-Kamera, einen Infrarot-verstärkten CMOS-Sensor, einen Nahinfrarot (NIR)-verstärkten CMOS-Sensor, einen InGaAs-basierten Sensor, ein Sensorarray und/oder ein Diodenarray umfassen.

Der zumindest eine Hyperspektralsensor kann einen spektralen Empfindlichkeitsbereich von 400 nm bis 1800 nm und/oder von 400 nm bis 950 nm und/oder von 400 nm bis 1000 nm und/oder von 1000 nm bis 1700 nm und/oder von 950 bis 1800 nm und/oder von 1200 nm bis 2000 aufweisen.

Die Sensoreinheit kann insbesondere zumindest zwei Hyperspektralsensoren mit unterschiedlichen Empfindlichkeitsbereichen aufweisen. Die Sensoreinheit kann eingerichtet sein, die von den jeweiligen Hyperspektralsensoren erfassten Daten zu einem Hyperspektralbild mit N mal M Pixeln umzurechnen und auszugeben, wobei jedes der Pixel L Werte in der spektralen Dimension umfasst.

Die Sensoreinheit kann zumindest einen Strahlteiler umfassen, der eingerichtet ist, um die von dem Bereich des Werkstücks ausgehende Strahlung auf die mindestens zwei Hyperspektralsensoren aufzuteilen.

Die Sensoreinheit kann mit dem Laserbearbeitungskopf gekoppelt, insbesondere abnehmbar gekoppelt sein. Die Sensoreinheit kann an einer Außenseite, insbesondere an einer Seitenfläche, des Laserbearbeitungskopfs angeordnet sein. Eine optische Achse der Sensoreinheit kann zumindest streckenweise parallel und/oder koaxial mit der Ausbreitungsrichtung des Laserstrahls verlaufen.

Das Laserbearbeitungssystem kann ferner eine Recheneinheit umfassen, die eingerichtet ist, basierend auf dem Hyperspektralbild einen Eingangstensor zu bestimmen und basierend auf dem Eingangstensor mittels einer Übertragungsfunktion einen Ausgangstensor zu bestimmen, der Informationen über den Bearbeitungsprozess enthält, wobei die Übertragungsfunktion zwischen dem Eingangstensor und dem Ausgangstensor durch ein tiefes neuronales Netz, insbesondere durch ein tiefes faltendes neuronales Netz, gebildet ist. Die Recheneinheit kann eingerichtet sein, um den Ausgangstensor in Echtzeit zu bilden und/oder um basierend auf dem Ausgangstensor Regelungsdaten an eine Steuereinheit des Laserbearbeitungssystems auszugegeben.

Das Verfahren kann ferner die folgenden Schritte umfassen: Bestimmen, basierend auf dem Hyperspektralbild, eines Eingangstensors, und Bestimmen, basierend auf dem Eingangstensor und mittels einer Übertragungsfunktion, eines Ausgangstensors, der Informationen über den Bearbeitungsprozess enthält, wobei die Übertragungsfunktion zwischen dem Eingangstensor und dem Ausgangstensor durch ein angelerntes neuronales Netz, etwa durch ein tiefes neuronales Netz oder durch ein tiefes faltendes neuronales Netz, gebildet ist. Das Bilden des Ausgangstensors kann in Echtzeit erfolgen.

Die Informationen über den Bearbeitungsprozess können Informationen über einen Bearbeitungsfehler und/oder einen Bearbeitungsbereich des Werkstücks umfassen. Der Ausgangstensor kann insbesondere eine der folgenden Informationen enthalten: Informationen über

einen Fügespalt, Informationen über einen Versatz zwischen Fügepartnern, Informationen über ein Schmelzbad, Informationen über eine Dampfkapillare, Informationen über eine Schweißraupe, Informationen über einen Zustand des Bearbeitungsprozesses, Informationen über einen Bearbeitungsfehler, Vorhandensein mindestens eines Bearbeitungsfehlers, Art des Bearbeitungsfehlers, Position des Bearbeitungsfehlers auf dem Werkstück, Wahrscheinlichkeit für einen Bearbeitungsfehler einer bestimmten Art und räumliche und/oder flächige Ausdehnung des Bearbeitungsfehlers.

Demnach können die erfassten Hyperspektralbilder als Grundlage für die Erkennung und Klassifizierung von Bearbeitungsfehlern dienen. Die Bearbeitungsfehler können insbesondere wie folgt klassifiziert werden: Spalt, Versatz, fehlende Durchschweißung, fehlende Einschweißung, Auswürfe, Porenbildung. Die Hyperspektralbilder können auch zur Erkennung einer Abweichung oder einer Anomalie des Laserbearbeitungsprozesses verwendet werden. Dabei ist eine Anomalie beispielsweise eine Abweichung von einer Schweißung, die vorab als „gut“ gekennzeichnet oder klassifiziert wurde.

Zum Anlernen eines überwachten Machine Learning Verfahrens, z.B. eines neuronalen Netzes, wird sowohl eine große Anzahl von fehlerfreien Bearbeitungsprozessen, beispielsweise Schweißungen, als auch eine große Anzahl von fehlerbehafteten Bearbeitungsprozessen durchgeführt und jeweils Hyperspektralbilder aufgenommen. Die Trainingsdaten können für eine Anomalieerkennung verwendet werden, insbesondere wenn wenig fehlerhafte Schweißungen erzeugt werden können. Das Trainieren der neuronalen Netze kann mit Standardverfahren durchgeführt werden.

Die Regelung oder eine Optimierung von Bearbeitungsprozessen kann mittels sogenanntem „Reinforcement Learning“ des neuronalen Netzes ermöglicht werden. Beim Reinforcement Learning Verfahren werden Steueraktionen des Bearbeitungsprozesses, beispielsweise die Änderung der Laserleistung oder die Änderung der Schweißgeschwindigkeit, dahingehend bewertet, ob sie zu einem als optimal betrachteten Prozess oder Prozessverlauf, beispielsweise einen Prozess ohne Bearbeitungsfehler, führen. Die Aktionen, welche zu einem optimalen Prozess führen, werden hoch bewertet. Dabei wird eine große Anzahl von Bearbeitungsprozessen mit einer entsprechenden Erfassung von Hyperspektralbildern durchgeführt, wobei die Hyperspektralbilder den Zustand des Bearbeitungsprozesses darstellen. Darauf basierend kann ein neuronales Netz, insbesondere ein tiefes neuronales Netz oder ein tiefes faltendes neuronales Netz, dahingehend trainiert werden, jede mögliche Steueraktion mit einem Zustand des Bearbeitungsprozesses zu verknüpfen und die Steueraktionen dahingehend zu klassifizieren, inwiefern sie zu einem optimalen Zustand des Bearbeitungsprozesses

führen. Nach Abschluss des Verfahrens ist das neuronale Netz in der Lage, den Bearbeitungsprozess in jedem Zustand durch eine entsprechende Steueraktion zu optimieren und in dem optimierten Zustand zu halten.

Das neuronale Netz kann durch sogenanntes Transfer-Learning basierend auf Trainingsdaten an einen geänderten Laserbearbeitungsprozess anpassbar sein. Die Trainingsdaten können umfassen: eine Mehrzahl von Hyperspektralbildern des geänderten Laserbearbeitungsprozesses zum Bestimmen entsprechender Eingangstensoren, und den jeweiligen Hyperspektralbildern zugeordnete, vorgegebene Ausgangstensoren, die entsprechende, vorbestimmte Informationen über den geänderten Laserbearbeitungsprozess enthalten.

Alternativ zur Verwendung eines neuronalen Netzes können signifikante Spektralbänder in Form einzelner Bilder aus dem Hyperspektralbild ausgewählt werden und anschließend kann deren Intensitätsverteilung ausgewertet werden. Dadurch können beispielsweise die geometrischen Abmessungen eines Keyholes und/oder eines Schmelzbades ausgewertet werden. Die ausgewerteten geometrischen Abmessungen können mit jenen von „guten“ bzw. „schlechten“ Bearbeitungsprozessen, insbesondere von guten bzw. schlechten Schweißprozessen verglichen werden. Die Abweichungen der geometrischen Abmessungen können zur Erkennung und Klassifizierung herangezogen werden.

Das Laserbearbeitungssystem kann ferner zumindest eine Abbildungsoptik zum Abbilden einer von dem Bereich des Werkstücks ausgehenden Strahlung auf den zumindest einen Hyperspektralsensor umfassen. Die zumindest eine Abbildungsoptik kann in einem Strahlengang des Laserstrahls und/oder in Ausbreitungsrichtung der vom Bereich des Werkstücks ausgehenden Strahlung vor dem Hyperspektralsensor, beispielsweise zwischen einem Strahlteiler und dem zumindest einen Hyperspektralsensor angeordnet sein.

Das oben beschriebene Verfahren kann während des Laserbearbeitungsprozesses durchgeführt werden. In diesem Fall kann das Bearbeitungsergebnis ein aktuelles Bearbeitungsergebnis sein. Insbesondere kann das Bearbeitungsergebnis in Echtzeit ermittelt werden, oder das Verfahren kann nach Abschluss des Laserbearbeitungsprozesses durchgeführt werden. In diesem Fall kann der Ausgangstensor Informationen über einen Bearbeitungsfehler enthalten. Je nachdem, ob das erfasste Hyperspektralbild einen Werkstückbereich im Vorlauf des Laserstrahls, im aktuellen Bearbeitungsbereich und/oder im Nachlauf des Laserstrahls enthält, kann mit dem beschriebenen Verfahren eine Pre-Prozess, In-Prozess, und/oder Post-Prozess Überwachung durchgeführt werden.

Kurzbeschreibung der Zeichnungen

Die Erfindung wird im Folgenden anhand von Figuren im Detail beschrieben. In den Figuren:

Fig. 1A zeigt eine schematische Darstellung eines Hyperspektralsensors gemäß Ausführungsformen der vorliegenden Offenbarung;
Fig. 1B zeigt eine schematische Darstellung eines Hyperspektralbildes, welches von einem Hyperspektralsensor gemäß Ausführungsformen der vorliegenden Offenbarung erfasst worden ist;
Fig. 1C zeigt eine schematische Darstellung eines Bereichs eines Werkstücks und eines Hyperspektralbildes gemäß Ausführungsformen der vorliegenden Offenbarung;
Fig. 2 zeigt eine schematische Darstellung eines Laserbearbeitungssystems gemäß einer ersten Ausführungsform der vorliegenden Offenbarung;
Fig. 3 zeigt eine schematische Darstellung eines Laserbearbeitungssystems gemäß einer zweiten Ausführungsform der vorliegenden Offenbarung;
Fig. 4 zeigt eine schematische Darstellung eines Laserbearbeitungssystems gemäß einer dritten Ausführungsform der vorliegenden Offenbarung; und
Fig. 5 zeigt eine schematische Darstellung eines Laserbearbeitungssystems gemäß einer vierten Ausführungsform der vorliegenden Offenbarung.
Fig. 6 zeigt ein Verfahren zur Überwachung eines Bearbeitungsprozesses an einem Werkstück mittels eines Laserstrahls gemäß einer Ausführungsform der vorliegenden Offenbarung.

Ausführliche Beschreibung der Zeichnungen

Im Folgenden werden, sofern nicht anders vermerkt, für gleiche bzw. gleichwirkende Elemente dieselben Bezugszeichen verwendet.

Fig. 1A zeigt eine schematische Darstellung eines Hyperspektralsensors gemäß Ausführungsformen der vorliegenden Offenbarung. Fig. 1B zeigt eine schematische Darstellung eines Hyperspektralbildes, welches von einem Hyperspektralsensor gemäß Ausführungsformen der vorliegenden Offenbarung erfasst worden ist. Der in Fig. 1A gezeigte Hyperspektralsensor kann mit anderen Ausführungsformen der vorliegenden Offenbarung kombiniert werden.

Der Hyperspektralsensor 100 weist eine Mehrzahl von Pixeln 1001 auf, die entlang einer ersten Richtung (x-Richtung oder Spaltenrichtung) und einer auf der ersten Richtung senkrecht stehenden zweiten Richtung (y-Richtung oder Zeilenrichtung) angeordnet sind. Die beiden Richtungen entsprechen zwei räumlichen Dimensionen eines vom Hyperspektralsensor 100 erfassten Hyperspektralbildes. Alle Pixel 1001 des Hyperspektralsensors können Strahlung innerhalb eines gewissen Wellenlängenbereichs detektieren bzw. erfassen. Auf den Pixeln 1001 ist ein 5x5 optischer Mosaik-Filter 1002 aufgebracht. Der 5x5 Mosaik-Filter 1002 umfasst 25 verschiedene Einzelfilter 1003, die zu einer Einheitszelle, wie hier beispielsweise zu einem Quadrat angeordnet sind. Die Einheitszellen wiederholen sich in beiden Richtungen, so dass jedem Pixel 1001 des Hyperspektralsensors ein Einzelfilter 1003 des Mosaik-Filters 1002 zugeordnet ist. In Fig. 1A ist der Mosaik-Filter 1002 lediglich auf einer einzelnen Fläche von 5x5 zusammenhängenden Pixeln 1001 gezeigt. Jedoch ist auf jedem Pixel 1001 ein Einzelfilter 1003 des Mosaik-Filters 1002 angeordnet. Jeder Einzelfilter 1003 des Mosaik-Filters 1002 stellt einen optischen Bandpassfilter dar und weist einen Durchlassbereich auf, der einem Spektralband innerhalb des Wellenlängenbereichs entspricht. Die 25 Einzelfilter 1003 des Mosaik-Filters 1002 weisen jeweils unterschiedliche Durchlassbereiche bzw. entsprechende Spektralbänder auf. Die Spektralbänder können zusammenhängend und nicht überlappend sein, sodass sie den Wellenlängenbereich vollständig abdecken.

Mithilfe des Hyperspektralsensors 100 kann Strahlung über einen großen Wellenlängenbereich spektral aufgelöst erfasst bzw. detektiert werden. Durch die Einzelfilter 1003 des Mosaik-Filters 1002 wird die Strahlung vor der Erfassung durch die jeweiligen Pixel 1001 entsprechend der jeweiligen Spektralbänder gefiltert. Jedes Pixel 1001 des Hyperspektralsensors 100 kann demnach den Intensitätswert der Strahlung in dem Spektralband entsprechend dem Durchlassbereich des Einzelfilters 1003 detektieren bzw. erfassen. Jedem Pixel kann so ein bandpassgefilterter Intensitätswert zugeordnet werden. Dadurch entstehen 25 Einzelbilder 301 mit den Intensitätswerten in den durch die Einzelfilter 1003 festgelegten Spektralbändern.

Fig. 1C zeigt eine schematische Darstellung eines Bereichs eines Werkstücks und eines Hyperspektralbildes gemäß Ausführungsformen der vorliegenden Offenbarung. Ein zeilenorientierter Hyperspektralsensor, d.h. ein Hyperspektralsensor mit zeilenbasierten Bandpassfiltern, gemäß Ausführungsformen der vorliegenden Offenbarung weist eine Mehrzahl von Pixeln auf, die entlang einer ersten Richtung (d.h. in x-Richtung oder Spaltenrichtung) und einer zweiten Richtung (d.h. in y-Richtung oder Zeilenrichtung) angeordnet sind. Alle Pixel des Hyperspektralsensors können Strahlung innerhalb eines gewissen Wellenlängenbereichs

detektieren bzw. erfassen. Der Hyperspektralsensor weist einen zeilenbasierten Filter mit L verschiedenen, einzelnen optischen Bandpassfiltern auf. Die L verschiedenen optischen Bandpassfilter sind jeweils auf mindestens einer Zeile von Pixeln des Hyperspektralsensor, d.h. zeilenorientiert, angeordnet. Mit anderen Worten erstrecken sich die L verschiedenen optischen Bandpassfilter in der ersten Richtung über mindestens eine Zeile der Sensorpixel. Die optischen Bandpassfilter können sich in der zweiten Richtung pro Zeile oder alle n Zeilen ändern. Mit anderen Worten überdeckt ein einzelner optischer Bandpassfilter eine oder mehrere Zeilen von Pixeln. Jeder Bandpassfilter weist einen Durchlassbereich auf, der einem Spektralband innerhalb des Wellenlängenbereichs entspricht. Jede Zeile des Hyperspektralsensors erfasst demnach eine durch den jeweiligen Bandpassfilter gefilterte Intensität der ausgehenden Strahlung. Die verschiedenen Bandpassfilter des Filters weisen jeweils unterschiedliche Durchlassbereiche bzw. entsprechende Spektralbänder auf. Die Spektralbänder können zusammenhängend und nicht überlappend sein, sodass sie den Wellenlängenbereich vollständig abdecken.

Mithilfe des Hyperspektralsensors kann Strahlung über einen großen Wellenlängenbereich spektral aufgelöst erfasst bzw. detektiert werden. Durch die Bandpassfilter wird die Strahlung vor der Erfassung durch die jeweiligen Pixel entsprechend der jeweiligen Spektralbänder gefiltert. Jeder Pixel des Hyperspektralsensors kann demnach den Intensitätswert der Strahlung in dem Spektralband entsprechend dem Durchlassbereich des Bandpassfilters detektieren bzw. erfassen. Jedem Pixel kann so ein bandpassgefilterter Intensitätswert zugeordnet werden. Um ein Hyperspektralbild eines Bereichs des Werkstücks 2 zu erhalten, werden die Zeilen 21 des Werkstückbereichs von dem Hyperspektralsensor in der zweiten Richtung, d.h. in y-Richtung oder Zeilenrichtung, gescannt. Somit wird jede Zeile 21 des Bereichs des Werkstücks 2 mehrfach, d.h. mit jedem der Bandpassfilter des Hyperspektralsensors aufgenommen. Es entstehen im Fall des Hyperspektralsensors mit einem zeilenbasierten Filter mit L verschiedenen Bandpassfiltern L Bandpass-gefilterte Einzelbilder 301 mit den Intensitätswerten in den durch die jeweiligen Bandpassfilter festgelegten Spektralbändern, die das Hyperspektralbild bilden. Dieses Verfahren wird auch als „Push Broom"-Verfahren bezeichnet. Das Verfahren kann insbesondere in Laserbearbeitungssystemen mit hochgenauer Materialförderung verwendet werden. Das Scannen bzw. die Synchronisation der Zeilenauslese kann in Richtung der Relativbewegung zwischen Laserbearbeitungskopf und Werkstück bzw. in Richtung der Materialförderung erfolgen und mit der Materialfördergeschwindigkeit abgestimmt sein. Mit anderen Worten wird zu einem Zeitpunkt ein Einzelbild des Hyperspektralbilds aufgenommen, das in jeder Pixelzeile einem anderen Wellenlängenbereich entspricht. Anschließend werden die Zeilen durch die Scanbewegung bzw. die Relativbewegung jede Zeile jeweils in einem anderen Wellenlängenbereich gescannt.

Dieses Verfahren erlaubt die Anzahl der Bandpassfilter zu erhöhen. Die Scanbewegung bzw. die Relativbewegung steht vorzugsweise senkrecht auf den Pixelzeilen des Hyperspektralsensors, d.h. die Scanbewegung bzw. die Relativbewegung kann in y-Richtung bzw. Zeilenrichtung erfolgen. Abhängig von der Auflösung des Hyperspektralsensors lassen sich so mehr Wellenlängenbänder realisieren.

Der Hyperspektralsensor 100 ist also dazu eingerichtet, Strahlung zu erfassen und als 25 bandpassgefilterte Einzelbilder 301 auszugeben. Die Gesamtheit der 25 Bilder werden als Hyperspektralbild 300, Hyperspektralwürfel oder hyperspektraler Datenwürfel bezeichnet.

Der Hyperspektralsensor gemäß Ausführungsformen der vorliegenden Offenbarung weist Pixel mit einer spektralen Empfindlichkeit zwischen 400 und 1800 nm auf. Bei der Verwendung von 5x5 Mosaik-Filtern kann ein Hyperspektralbild bzw. ein Hyperspektralwürfel erfasst werden, welcher 25 Einzelbilder aufweist. Jedes der 25 Einzelbilder deckt demnach ein Spektralband mit 56nm Breite ab. Mit anderen Worten entspricht jedes Einzelbild der Intensitätsverteilung in einem Spektralband von 56 nm. Mit noch anderen Worten haben die Einzelbilder einen Abstand von 56 nm in der spektralen Dimension.

Gemäß anderen Ausführungsformen der vorliegenden Offenbarung des Hyperspektralsensors (nicht gezeigt) kann der Hyperspektralsensor einen 4x4 Mosaik-Filter mit 16 Einzelfiltern aufweisen. Somit ist der Hyperspektralsensor eingerichtet, 16 Einzelbilder als Hyperspektralbild auszugeben. Beispielsweise kann der Hyperspektralsensor 2048x1088 Pixel aufweisen und als CMOS-Sensor ausgebildet sein. Der Hyperspektralsensor weist einen 4x4 Mosaik-Filter auf. Dadurch wird die örtliche oder räumliche Auflösung um den Faktor 4 reduziert. Mit anderen Worten weist ein von einem solchen Hyperspektralsensor erfasstes Hyperspektralbild 16 Einzelbilder auf, die jeweils 512x272 Pixel aufweisen.

Somit kann der Hyperspektralsensor Bildaufnahmen in verschiedenen Spektralbändern wesentlich vereinfachen und Snapshot-Aufnahmen separiert in aufeinander folgende Spektralbänder ermöglichen.

Der Hyperspektralsensor 100 kann auf Graphen oder InGaAs basieren, und beispielsweise eine Empfindlichkeit zwischen 400nm bis 1800 nm aufweisen. Gemäß anderen Ausführungsformen kann der Hyperspektralsensor 100 auf InGaAs mit einer spektralen Empfindlichkeit zwischen 900 und 1800nm basieren. Gemäß noch anderen Ausführungsformen kann der Hyperspektralsensor ein nahinfrarot-verstärkter CMOS-Sensor sein. Graphen-

basierte Hyperspektralsensoren weisen eine hohe gleichbleibende Empfindlichkeit zwischen 400 und 1800nm auf.

Fig. 2 zeigt eine schematische Darstellung eines Laserbearbeitungssystems zum Durchführen eines Bearbeitungsprozesses, etwa Schweißen oder Schneiden, an einem metallischen Werkstück mittels eines Laserstrahls gemäß einer ersten Ausführungsform der vorliegenden Offenbarung;

Das Laserbearbeitungssystem 1 umfasst einen Laserbearbeitungskopf 20, und eine Sensoreinheit 10 zur Überwachung des Bearbeitungsprozesses. Der Laserbearbeitungskopf 20 kann ein Laserschneid-, Laserlöt- oder Laserschweißkopf sein.

Das Laserbearbeitungssystem 1 umfasst eine Laservorrichtung (nicht gezeigt) zum Erzeugen eines Laserstrahls 201 (auch als „Bearbeitungsstrahl“ oder „Bearbeitungslaserstrahl“ bezeichnet).

Das Laserbearbeitungssystem 1 oder Teile davon, wie beispielsweise der Bearbeitungskopf 20, kann gemäß Ausführungsformen entlang einer Bearbeitungsrichtung bewegbar sein. Die Bearbeitungsrichtung kann eine Schneid-, Löt- oder Schweißrichtung und/oder eine Bewegungsrichtung des Laserbearbeitungssystems 1, wie beispielsweise des Bearbeitungskopfes 20, bezüglich des Werkstücks 2 sein. Insbesondere kann die Bearbeitungsrichtung eine horizontale Richtung sein. Die Bearbeitungsrichtung kann auch als „Vorschubrichtung“ bezeichnet werden.

Das Laserbearbeitungssystem 1 wird von einer Steuereinheit (nicht gezeigt) gesteuert, die dazu eingerichtet ist, den Bearbeitungskopf 20, die Sensoreinheit 10 und/oder die Laservorrichtung zu steuern. Das Laserbearbeitungssystem 1 kann ferner eine Recheneinheit (nicht gezeigt) umfassen, die dazu eingerichtet ist, Informationen über den Bearbeitungsprozesses zu bestimmen. Gemäß einer Ausführungsform ist die Recheneinheit mit der Steuereinheit kombiniert (nicht gezeigt). Mit anderen Worten kann die Funktionalität der Recheneinheit mit derjenigen der Steuereinheit in einer gemeinsamen Verarbeitungseinheit kombiniert sein.

Die Laservorrichtung 1 kann eine Kollimatoroptik 202 zur Kollimation des Laserstrahls 201 und eine Fokussieroptik 203 aufweisen, die eingerichtet ist, um den Laserstrahl 201 auf das Werkstück 2 zu fokussieren. Die Laservorrichtung 1 kann ferner einen Strahlteiler 204 umfassen, der eingerichtet ist, den Laserstrahl 201 auf das Werkstück 2 zu lenken.

Während des Bearbeitungsprozesses bzw. bei der Bearbeitung des Werkstücks 2 mittels des Laserstrahls 201 entsteht Strahlung 205, die vom Werkstück 2 ausgeht. Bei der Strahlung 205 kann von einer Oberfläche des Werkstücks 2 reflektiertes oder zurückgestreutes Licht des Laserstrahls 201, Plasmastrahlung, Temperaturstrahlung, oder sichtbares Licht handeln. Die Strahlung 205 kann auch von einer Beleuchtungsquelle (nicht gezeigt) auf das Werkstück 2 eingestrahltes und zurück reflektiertes Licht umfassen.

Die Sensoreinheit 10 umfasst einen Hyperspektralsensor 100 und eine Abbildungsoptik 101. Die Abbildungsoptik 101 kann gemäß Ausführungsformen auch weggelassen sein. Die Abbildungsoptik 101 ist dazu eingerichtet, die Strahlung 205 auf den Hyperspektralsensor 100 abzubilden bzw. zu fokussieren.

Gemäß der in Fig. 2 gezeigten Ausführungsform umfasst die Sensoreinheit 10 einen Hyperspektralsensor 100 mit einer spektralen Empfindlichkeit von 400 nm bis 1800 nm. Gemäß anderen Ausführungsformen umfasst die Sensoreinheit 10 einen Hyperspektralsensor mit einer spektralen Empfindlichkeit von 400 bis 950 nm oder bis 1000 nm. Gemäß Ausführungsformen kann der Hyperspektralsensor 100 ein Graphen oder InGaAs-basierten Hyperspektralsensor mit Mosaikfilter sein, wie er in Verbindung mit Fig. 1A und 1B beschrieben ist. Gemäß anderen Ausführungsformen kann der Hyperspektralsensor 100 ein nahinfrarotverstärken Hyperspektralsensor mit Mosaikfilter sein, wie er in Verbindung mit Fig. 1A und 1B beschrieben ist.

Die Sensoreinheit 10 bzw. der Hyperspektralsensor 100 ist eingerichtet, die vom Werkstück 2 ausgehende Strahlung 205 zu erfassen und als Hyperspektralbild auszugeben. Die Recheneinheit ist eingerichtet, basierend auf dem Hyperspektralbild Informationen über den Bearbeitungsprozess, insbesondere Informationen über ein Bearbeitungsergebnis, beispielsweise einen Bearbeitungsfehler, zu bestimmen. Die Bestimmung kann mittels tiefer neuronaler Netze, insbesondere tiefer faltender neuronaler Netze, erfolgen.

Die Sensoreinheit 10 ist gemäß der in Fig. 2 gezeigten Ausführungsform am Laserbearbeitungskopf 20 angebracht oder damit gekoppelt.

Gemäß der in Fig. 2 gezeigten Ausführungsform ist die Sensoreinheit 10 so angeordnet, dass die vom Werkstück ausgehende Strahlung 205 koaxial zum Laserstrahl 201 im Laserbearbeitungskopf 20 zur Sensoreinheit 10 geführt wird. Somit tritt die vom Werkstück ausgehende Strahlung 205 in den Laserbearbeitungskopf 20 entgegen der Ausbreitungsrichtung

des Laserstrahls 201 ein und trifft auf die Sensoreinheit 10. Hierbei durchläuft die Strahlung 205 die Fokussieroptik 203 und den Strahlteiler 204, bevor sie auf die Sensoreinheit 10 trifft. Mit anderen Worten überlappen sich Strahlung 205 und der Laserstrahl 201 im Laserbearbeitungskopf 20.

Das Laserbearbeitungssystem kann ferner eine Recheneinheit umfassen, die basierend auf dem von der Sensoreinheit erfassten Hyperspektralbild einen vielkanaligen Eingangstensor und basierend auf dem Eingangstensor mittels einer Übertragungsfunktion einen Ausgangstensor bestimmt, der Informationen über den Bearbeitungsprozess enthält. Die Übertragungsfunktion kann durch ein neuronales Netz, bevorzugt durch ein tiefes neuronales Netz oder ein tiefes faltendes neuronales Netz gebildet sein. Die Recheneinheit gibt basierend auf dem Ausgangstensor Regelungsdaten oder Steuerdaten an die Steuereinheit des Laserbearbeitungssystems aus. Basierend auf den Hyperspektralbildern bzw. -würfeln kann eine Anomalieerkennung durchgeführt werden, indem die Hyperspektralbilder von fehlerfreien Prozessen als Datenbasis dienen. Die Anomalierkennung kann mit Standardverfahren, dem Bilden eines Modells aus den Trainingsdaten und dem Berechnen der Abweichung der Merkmale vom Modell in der Inferenz durchgeführt werden.

Die Klassifikation in typische Fehlerklassen, wie Spalt, Versatz, fehlende Durch- und Einschweißung, Auswürfe und die Porenbildung, erfordert die Erzeugung einer großen Anzahl von Trainingsdaten welche diese typischen Fehler enthalten. Das bedeutet es müssen Schweißungen für jeden Fehlertyp erzeugt werden. Die so erzeugten Trainingsdaten bestehen aus den Hyperspektralbildern und den hinzugefügten Fehlerbeschreibungen. Diese Trainingsdatensätze können verwendet werden, um ein überwachtes Machine Learning Verfahren zur Klassifikation zu verwenden. Beispielsweise können die erzeugten Hyperspektralbilder als mehrkanalige Eingangstensoren für ein tiefes neuronales Netz, typischerweise eines faltenden neuronalen Netzes, verwendet werden. Die nach dem Trainingsvorgang entstandene generalisierte Übertragungsfunktion bildet in der Inferenz die Hyperspektralbilder auf den Ausgangsvektor ab, welcher die Vorhersage über die Fehlerklassifikation liefert. Die gelernte generalisierte Übertragungsfunktion, gebildet aus dem Modell des tiefen faltenden neuronalen Netzes, beinhaltet in den letzten voll verbundenen Schichten Merkmalsvektoren, welche den Prozess beschreiben.

Die Betrachtung des Hyperspektralwürfels als vielkanaligen Eingangstensor eines tiefen neuronalen Netzes, insbesondere eines tiefen faltenden neuronalen Netzes, erlaubt das Trainieren solcher Netze und das damit verbundene Bilden einer generalisierten Abbildungsfunktion, welche den Eingangstensor auf ein Klassifikationsergebnis abbildet. Die Verwen-

dung des Hyperspektralbilds zur Abbildung des Prozesses kann in einem „Reinforcement Deep Q Learning“ Verfahren angewendet werden: Das Hyperspektralbild, betrachtet als Status des Prozesses, erlaubt ein Lernen des Nutzens einer Aktion auf den Prozess mittels eines tiefen faltenden neuronalen Netzes. Nach Abschluss des Lernens ist das Programm in der Lage, für jeden Zustand die optimale Änderung des Prozesses durchzuführen.

Die Optimierung des Laserschweißprozesses mittels eines Reinforcement Learning Verfahrens wird dadurch ermöglicht, dass die Aktionen auf den Prozess, z.B. eine Änderung der Laserleistung oder die Änderung der Schweißgeschwindigkeit bewertet werden. Die Aktionen, welche zu einem optimalen Prozess führen, werden hoch bewertet. Da Expertenwissen über den Laserprozess vorhanden ist, können die Anzahl der Aktionen am Prozess eingeschränkt werden. Über eine große Anzahl von Schweißversuchen kann so ein tiefes neuronales Netz, typischerweise ein faltendes neuronales Netz, verwendet werden, um die Zuordnung des Status, welcher durch den Hyperspektralwürfel dargestellt wird, auf die Bewertung für jede mögliche bzw. erlaubte Aktion zu trainieren. Das trainierte Netz erlaubt dann aus jedem Zustand heraus die optimale Aktion auf den Prozess auszuführen, um den Prozess zu optimieren und in einem optimalen Zustand zu halten.

Fig. 3 zeigt eine schematische Darstellung eines Laserbearbeitungssystems gemäß einer zweiten Ausführungsform der vorliegenden Offenbarung. Das in Fig. 3 gezeigte Laserbearbeitungssystem entspricht dem in Fig. 2 gezeigten Laserbearbeitungssystem bis auf die nachfolgend beschriebenen Unterschiede.

Gemäß der in Fig. 3 gezeigten Ausführungsform verläuft der Strahlengang der zur Sensoreinheit 10 geführten, vom Werkstückbereich ausgehenden Strahlung 205 außerhalb des Laserbearbeitungskopfs 20. Somit tritt die Strahlung 205 nicht in den Laserbearbeitungskopf 20 ein, bevor sie auf die Sensoreinheit 10 trifft. Mit anderen Worten überlappen sich Strahlung 205 und der Laserstrahl 201 nicht im Laserbearbeitungskopf 20. Etwaige Filtereffekte der Fokussieroptik des Laserbearbeitungskopfes 20 fallen weg.

Gemäß der in Fig. 3 gezeigten Ausführungsform kann die Sensoreinheit 10 an einer seitlichen Oberfläche des Laserbearbeitungskopfes angebracht sein. Diese Anordnung der Sensoreinheit wird auch als „off-axiale Anordnung“ bezeichnet.

Fig. 4 zeigt eine schematische Darstellung eines Laserbearbeitungssystems gemäß einer dritten Ausführungsform der vorliegenden Offenbarung. Das in Fig. 4 gezeigte Laserbear-

beitungssystem entspricht dem in Fig. 2 gezeigten Laserbearbeitungssystem bis auf die nachfolgend beschriebenen Unterschiede.

Die Sensorvorrichtung 10 umfasst einen ersten Hyperspektralsensor 100a, einen zweiten Hyperspektralsensor 100b und einen Strahlteiler 102. Anstelle eines Sensors mit einer breitbandigen Empfindlichkeit, wie in den Ausführungsbeispielen von Figuren 2 und 3, wird in diesem Ausführungsbeispiel ein entsprechender Wellenlängenbereich mit Hilfe von zwei Hyperspektralsensoren 100a und 100b und einem Strahlteiler 102 abgedeckt. Die Hyperspektralwürfel der einzelnen Hyperspektralsensoren, beispielsweise eines InGaAs Bildsensors und eines NIR verstärkten CMOS Bildsensors, können zu einem Hyperspektralwürfel zusammengesetzt werden.

Der Strahlteiler 102 ist eingerichtet, die vom Werkstück ausgehende Strahlung 205 aufzuteilen und auf den ersten Hyperspektralsensor 100a und den zweiten Hyperspektralsensor 100b zu lenken. Die Sensorvorrichtung 10 kann ferner eine erste Abbildungsoptik 101a und eine zweite Abbildungsoptik 101b umfassen, die jeweils vor dem ersten und zweiten Hyperspektralsensor 100a und 100b angeordnet sind, um den Teil der Strahlung 205 darauf abzubilden.

Gemäß der in Fig. 4 gezeigten Ausführungsform weist der erste Hyperspektralsensor 100a eine spektrale Empfindlichkeit von 400 nm bis 950 nm oder von 400 nm bis 1000 nm auf und der zweite Hyperspektralsensor 100b weist eine spektrale Empfindlichkeit von 1000 nm bis 1700 nm oder von 900 bis 1800 nm auf. Gemäß Ausführungsformen kann der erste Hyperspektralsensor 100a ein nahinfrarot-verstärkter CMOS-Sensor mit Mosaikfilter sein, wie er in Verbindung mit Fig. 1A und 1B beschrieben ist. Ebenso kann der zweite Hyperspektralsensor 100b ein InGaAs-basierter Hyperspektralsensor mit Mosaikfilter sein, wie er in Verbindung mit Fig. 1A und 1B beschrieben ist.

Die Sensoreinheit 10 gemäß Fig. 4 ist eingerichtet, die vom ersten Hyperspektralsensor 100a und vom zweiten Hyperspektralsensor 100b erfassten Hyperspektralbilder zu einem einzelnen Hyperspektralbild zu kombinieren und auszugeben. Das kombinierte Hyperspektralbild kann in diesem Fall 50 Einzelbilder umfassen. Der erste Hyperspektralsensor 100a und der zweite Hyperspektralsensor 100b können unterschiedliche Auflösungen, d.h. eine unterschiedliche Anzahl von Pixeln, aufweisen. Die Sensoreinheit 10 kann deshalb eingerichtet sein, die Auflösungen der von den beiden Hyperspektralsensoren erhaltenen jeweiligen Hyperspektralbilder aneinander anzupassen, sodass die Einzelbilder im Hyperspektralwürfel dieselbe räumliche Dimension besitzen.

Fig. 5 zeigt eine schematische Darstellung eines Laserbearbeitungssystems gemäß einer vierten Ausführungsform der vorliegenden Offenbarung. Das in Fig. 5 gezeigte Laserbearbeitungssystem entspricht dem in Fig. 4 gezeigten Laserbearbeitungssystem bis auf die nachfolgend beschriebenen Unterschiede.

Gemäß der in Fig. 5 gezeigten Ausführungsform verläuft der Strahlengang der zur Sensoreinheit 10 geführten, vom Werkstückbereich ausgehenden Strahlung 205 außerhalb des Laserbearbeitungskopfs 20. Somit tritt die Strahlung 205 nicht in den Laserbearbeitungskopf 20 ein, bevor sie auf die Sensoreinheit 10 trifft. Mit anderen Worten überlappen sich Strahlung 205 und der Laserstrahl 201 nicht im Laserbearbeitungskopf 20.

Gemäß der in Fig. 5 gezeigten Ausführungsform kann die Sensoreinheit 10 an einer seitlichen Oberfläche des Laserbearbeitungskopfes angebracht sein. Diese Anordnung der Sensoreinheit wird auch als „off-axiale Anordnung“ bezeichnet.

Fig. 6 zeigt ein Verfahren zur Überwachung eines Bearbeitungsprozesses an einem Werkstück mittels eines Laserstrahls.

Das Verfahren kann von einem Laserbearbeitungssystem gemäß Ausführungsformen der vorliegenden Offenbarung ausgeführt werden.

Der erste Schritt 601 umfasst das Einstrahlen eines Laserstrahls in einen Bearbeitungsbereich auf einem Werkstück. In einem zweiten Schritt 602 wird ein Hyperspektralbild mit N mal M Pixeln von einem Bereich des Werkstücks erfasst. Jedes Pixel umfasst L Werte, wobei das Hyperspektralbild zwei räumliche Dimensionen x und y sowie eine spektrale Dimension λ aufweist und wobei N eine Anzahl von Pixeln in der ersten räumlichen Dimension x, M eine Anzahl von Pixeln in der zweiten räumlichen Dimension y, und L die Anzahl von Spektralbändern in der spektralen Dimension λ des Hyperspektralbildes angeben, wobei M, N und L natürliche Zahlen sind.

Das Verfahren kann ferner einen dritten Schritt 603 umfassen, bei dem basierend auf dem Hyperspektralbild ein Eingangstensor bestimmt wird, und das Verfahren kann einen vierten Schritt 604 umfassen, bei dem basierend auf dem Eingangstensor und mittels einer Übertragungsfunktion ein Ausgangstensor bestimmt wird, der Informationen über ein Bearbeitungsergebnis eines Laserbearbeitungsprozesses enthält. Die Übertragungsfunktion zwi-

schen dem Eingangstensor und dem Ausgangstensor kann durch ein angelerntes neuronales Netz gebildet sein.

Gemäß einer Ausführungsform erfolgen die Schritte 602 bis 604 parallel bzw. zeitgleich zum Schritt 601. Gemäß einer anderen Ausführungsform erfolgen die Schritte 602 bis 604 nach Beendigung des Schritt 601.

Gemäß Ausführungsformen der Offenbarung wird bei einem Laserbearbeitungsprozess, bei dem ein Laserstrahl auf einen Bearbeitungsbereich des Werkstücks eingestrahlt wird, zur Überwachung des Laserbearbeitungsprozesses ein Hyperspektralbild von einem Bereich des Werkstücks erfasst. Der erfasste Bereich kann den Bearbeitungsbereich und/oder Bereiche im Vor- bzw. im Nachlauf des Laserstrahls umfassen. Das Hyperspektralbild weist N mal M Pixel in zwei räumlichen Dimensionen auf. Jeder Pixel weist L Werte in einer spektralen Dimension auf. Mit anderen Worten weist das Hyperspektralbild L Einzelbilder mit N mal M Pixeln auf. L gibt die Anzahl von Spektralbändern in einem erfassten Wellenlängenbereich auf. Die L Spektralbänder können aneinander angrenzen. Ein Hyperspektralbild bzw. -würfel über den gesamten Wellenlängenbereich der Strahlung, die vom Bearbeitungsprozess emittiert wird, bildet den Prozess vollständig ab, da alle Wellenlängen ortsaufgelöst zur Verfügung stehen. Das Hyperspektralbild enthält umfassende Informationen über einen Zustand des Laserbearbeitungsprozesses und kann deshalb als Grundlage für die Überwachung und Regelung des Laserbearbeitungsprozesses verwendet werden. Zudem können mithilfe des Hyperspektralbildes Informationen über ein Bearbeitungsergebnis des Laserbearbeitungsprozesses erhalten werden, was Informationen über einen Bearbeitungsfehler einschließt. Der Zustand des Laserbearbeitungsprozesses bzw. die Informationen über ein Bearbeitungsergebnis können mithilfe eines (tiefen) neuronalen Netzes bestimmt werden, wobei das erfasste Hyperspektralbild als Grundlage für den Eingangstensor des tiefen neuronalen Netzes verwendet wird.

Patentansprüche

1. Laserbearbeitungssystem (1) zum Durchführen eines Bearbeitungsprozesses an einem Werkstück (2) mittels eines Laserstrahls (201), das Laserbearbeitungssystem (1) umfassend:

einen Laserbearbeitungskopf (20) zum Einstrahlen eines Laserstrahls (201) in einen Bearbeitungsbereich auf dem Werkstück (2); und

eine Sensoreinheit (10) zum Überwachen des Bearbeitungsprozesses mit zumindest einem Hyperspektralsensor (100, 100a, 100b), wobei die Sensoreinheit (10) eingerichtet ist, ein Hyperspektralbild (300) mit N mal M Pixeln von einem Bereich des Werkstücks (2) zu erfassen, wobei jedes Pixel L Werte umfasst,

wobei das Hyperspektralbild (300) zwei räumliche Dimensionen x und y sowie eine spektrale Dimension λ aufweist und wobei N eine Anzahl von Pixeln in der ersten räumlichen Dimension x, M eine Anzahl von Pixeln in der zweiten räumlichen Dimension y, und L die Anzahl von Spektralbändern in der spektralen Dimension λ des Hyperspektralbildes angeben, wobei M, N und L natürliche Zahlen größer Null sind.

2. Laserbearbeitungssystem (1) gemäß Anspruch 1, wobei die Sensoreinheit (10) eingerichtet ist, um von dem erfassten Bereich des Werkstücks (20) emittierte Strahlung (205) und/oder reflektierte Laserstrahlung zu erfassen und als Hyperspektralbild (300) auszugeben.

3. Laserbearbeitungssystem (1) gemäß einem der vorstehenden Ansprüche, wobei die Sensoreinheit (10) eingerichtet ist, um zumindest eine der folgenden Strahlungsarten zu erfassen: Temperaturstrahlung, Strahlung im infraroten Bereich des Lichts, Strahlung im nahen infraroten Bereich des Lichts, Strahlung im sichtbaren Bereich des Lichts, Plasmastrahlung, reflektiertes Licht des Laserstrahls, zurückgestreutes Licht des Laserstrahls, und von einer Beleuchtungsquelle eingestrahltes und reflektiertes Licht.

4. Laserbearbeitungssystem (1) gemäß einem der vorstehenden Ansprüche, wobei der im Hyperspektralbild (300) erfasste Bereich des Werkstücks (2) zumindest einen der folgenden Bereiche auf dem Werkstück umfasst: den Bearbeitungsbereich, einen Bereich im Vorlauf des Laserstrahls (201), einen Bereich im Nachlauf des Laserstrahls (201), einen noch zu bearbeitenden Bereich und einen bearbeiteten Bereich.

5. Laserbearbeitungssystem (1) gemäß einem der vorstehenden Ansprüche, wobei L gleich oder größer 16, bevorzugt gleich oder größer 20, bevorzugt gleich oder größer 25, oder bevorzugt gleich oder größer 100 ist.

6. Laserbearbeitungssystem (1) gemäß einem der vorstehenden Ansprüche, wobei die Spektralbänder gleich groß und/oder aneinander angrenzend und/oder aufeinanderfolgend sind.

7. Laserbearbeitungssystem (1) gemäß einem der vorstehenden Ansprüche, wobei die Sensoreinheit (10) ausgebildet ist, um Hyperspektralbilder (300) kontinuierlich und/oder um ein Hyperspektralbild (300) pro vorgebebenem Zeitintervall zu erfassen.

8. Laserbearbeitungssystem (1) gemäß einem der vorstehenden Ansprüche, wobei die Sensoreinheit (10) ausgebildet ist, um alle L Werte für alle der N mal M Pixel des Hyperspektralbildes (300) gleichzeitig zu erfassen, oder wobei die Sensoreinheit (10) ausgebildet ist, um alle Pixelzeilen des Hyperspektralbildes (300) gleichzeitig, aber in verschiedenen Spektralbändern und die L Werte der verschiedenen Spektralbänder für jede Pixelzeile oder für alle n Pixelzeilen sequentiell zu erfassen.

9. Laserbearbeitungssystem (1) gemäß einem der vorstehenden Ansprüche, wobei der Hyperspektralsensor (100, 100a, 100b) einen Mosaikfilter (1002) umfasst, der N mal M Einzelfilter (1003) mit L verschiedenen Durchlassbereichen aufweist, oder
wobei der Hyperspektralsensor (100, 100a, 100b) eine Vielzahl von Pixelzeilen aufweist und die Pixel in einer Pixelzeile in einer ersten Richtung (x) angeordnet sind, und der Hyperspektralsensor (100, 100a, 100b) einen Zeilenfilter umfasst, bei dem sich je ein Einzelfilter von einer Vielzahl von Einzelfiltern (1003) über mindestens eine Pixelzeile des Hyperspektralsensors (100, 100a, 100b) erstreckt und die Vielzahl der Einzelfilter (1003) mit L verschiedenen Durchlassbereichen in einer zweiten Richtung (y) senkrecht zu der ersten Richtung (x) angeordnet ist.

10. Laserbearbeitungssystem (1) gemäß einem der vorstehenden Ansprüche, wobei der zumindest eine Hyperspektralsensor (100, 100a, 100b) einen spektralen Empfindlichkeitsbereich von 400 nm bis 1800 nm, und/oder von 400 nm bis 950 nm, und/oder von 400 nm bis 1000 nm, und/oder von 1000 nm bis 1700 nm, und/oder von 950 bis 1800 nm, und/oder von 1200 nm bis 2000 aufweist.

11. Laserbearbeitungssystem (1) gemäß einem der vorstehenden Ansprüche, wobei der zumindest eine Hyperspektralsensor (100, 100a, 100b) eine CMOS-Kamera, einen Infrarot-verstärkten CMOS-Sensor, einen Nahinfrarot (NIR)-verstärkten CMOS- Sensor, einen InGaAs-basierten Sensor, einen Graphen basierten Sensor, ein Sensorarray und/oder ein Diodenarray umfasst.

12. Laserbearbeitungssystem (1) gemäß einem der vorstehenden Ansprüche, ferner umfassend

- eine Recheneinheit, die eingerichtet ist, basierend auf dem Hyperspektralbild (300) einen Eingangstensor zu bestimmen und basierend auf dem Eingangstensor mittels einer Übertragungsfunktion einen Ausgangstensor zu bestimmen, der Informationen über den Bearbeitungsprozess enthält,

wobei die Übertragungsfunktion zwischen dem Eingangstensor und dem Ausgangstensor durch ein tiefes neuronales Netz, insbesondere durch ein tiefes faltendes neuronales Netz, gebildet ist.

13. Laserbearbeitungssystem (1) gemäß einem der vorstehenden Ansprüche, wobei die Recheneinheit eingerichtet ist, den Ausgangstensor in Echtzeit zu bilden und darauf basierend Steuerdaten an eine Steuereinheit des Laserbearbeitungssystems (1) auszugeben.

14. Laserbearbeitungssystem (1) gemäß einem der vorstehenden Ansprüche, wobei der Ausgangstensor eine der folgenden Informationen enthält: Informationen über einen Zustand des Bearbeitungsprozesses, Informationen über einen Bearbeitungsfehler, Vorhandensein mindestens eines Bearbeitungsfehlers, Art des Bearbeitungsfehlers, Position des Bearbeitungsfehlers auf dem Werkstück, Wahrscheinlichkeit für einen Bearbeitungsfehler einer bestimmten Art und räumliche und/oder flächige Ausdehnung des Bearbeitungsfehlers.

15. Verfahren zur Überwachung eines Bearbeitungsprozesses an einem Werkstück (2) mittels eines Laserstrahls (201), das Verfahren umfassend die Schritte:

- Einstrahlen eines Laserstrahls (201) in einen Bearbeitungsbereich auf einem Werkstück (2); und
- Erfassen eines Hyperspektralbildes (300) mit N mal M Pixeln von einem Bereich des Werkstücks (2), wobei jedes Pixel L Werte umfasst,

wobei das Hyperspektralbild (300) zwei räumliche Dimensionen x und y sowie eine spektrale Dimension λ aufweist und wobei N eine Anzahl von Pixeln in der ersten räumlichen Dimension x, M eine Anzahl von Pixeln in der zweiten räumlichen Dimension y, und

L die Anzahl von Spektralbändern in der spektralen Dimension λ des Hyperspektralbildes (300) angeben, wobei M, N und L natürliche Zahlen sind.

16. Verfahren nach Anspruch 15, ferner umfassend die Schritte:

- Bestimmen, basierend auf dem Hyperspektralbild (300), eines Eingangstensors, und
- Bestimmen, basierend auf dem Eingangstensor und mittels einer Übertragungsfunktion, eines Ausgangstensors, der Informationen über den Bearbeitungsprozess enthält,

wobei die Übertragungsfunktion zwischen dem Eingangstensor und dem Ausgangstensor durch ein tiefes neuronales Netz, insbesondere durch ein tiefes faltendes neuronales Netz, gebildet ist.

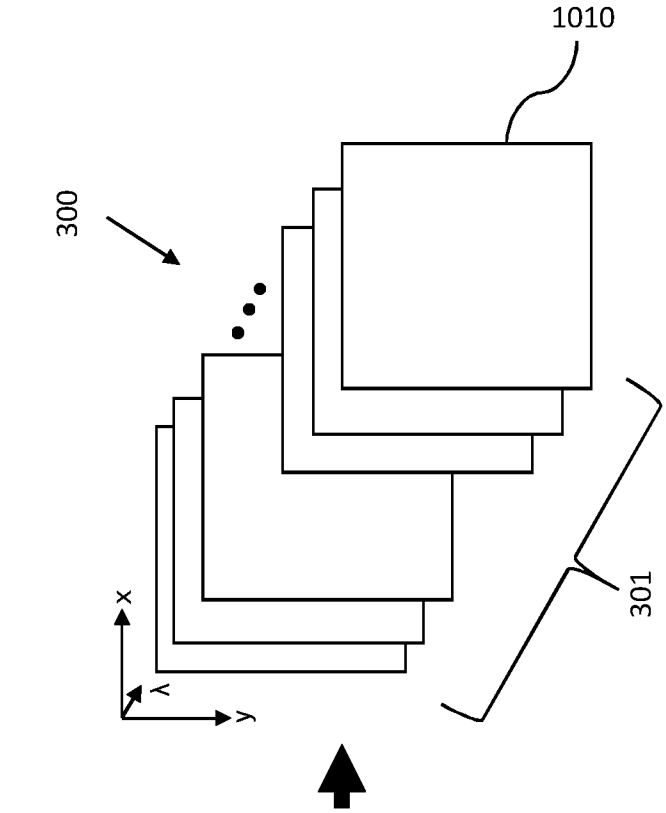


Fig. 1B

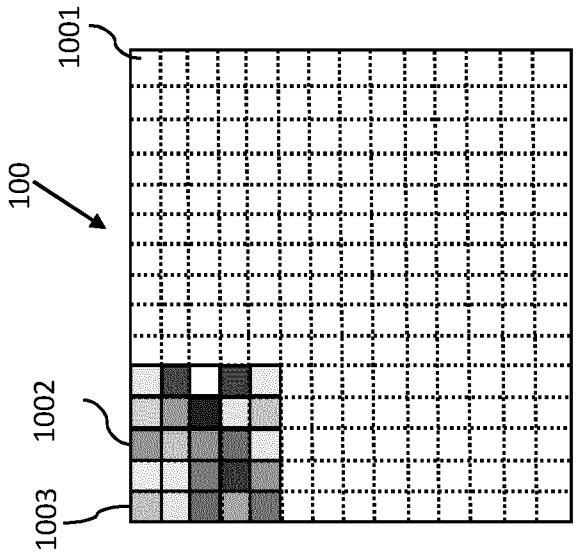


Fig. 1A

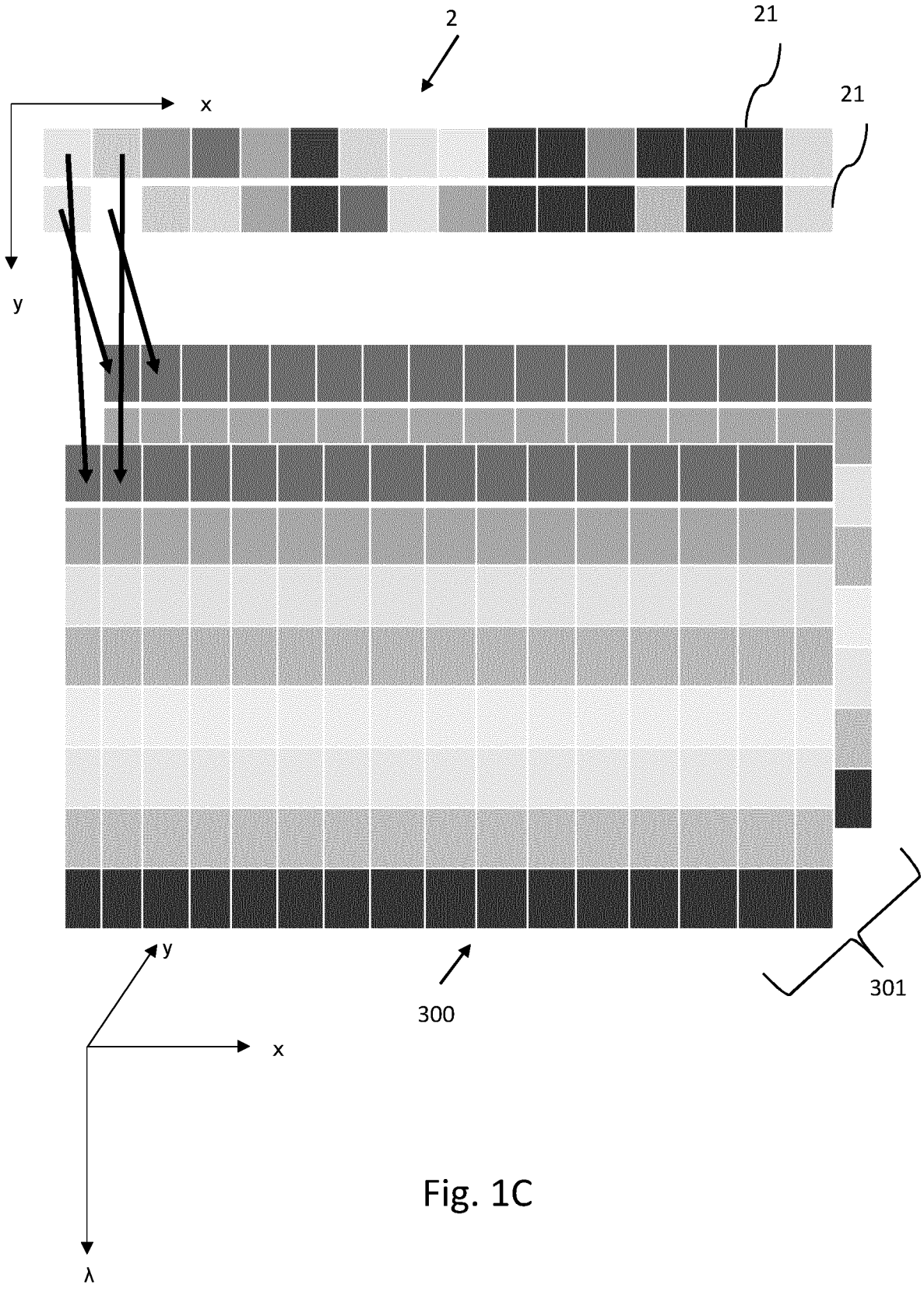


Fig. 1C

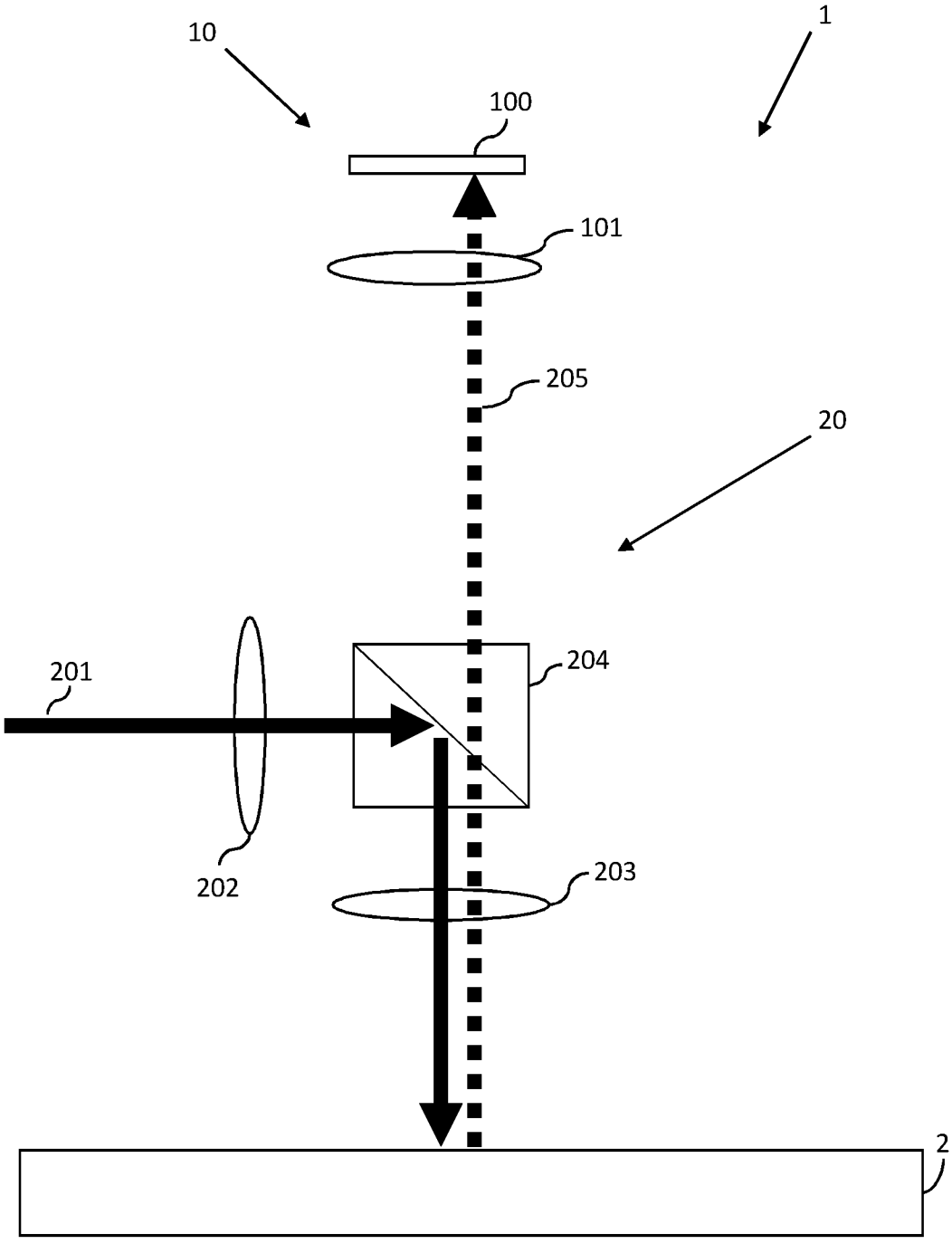


Fig. 2

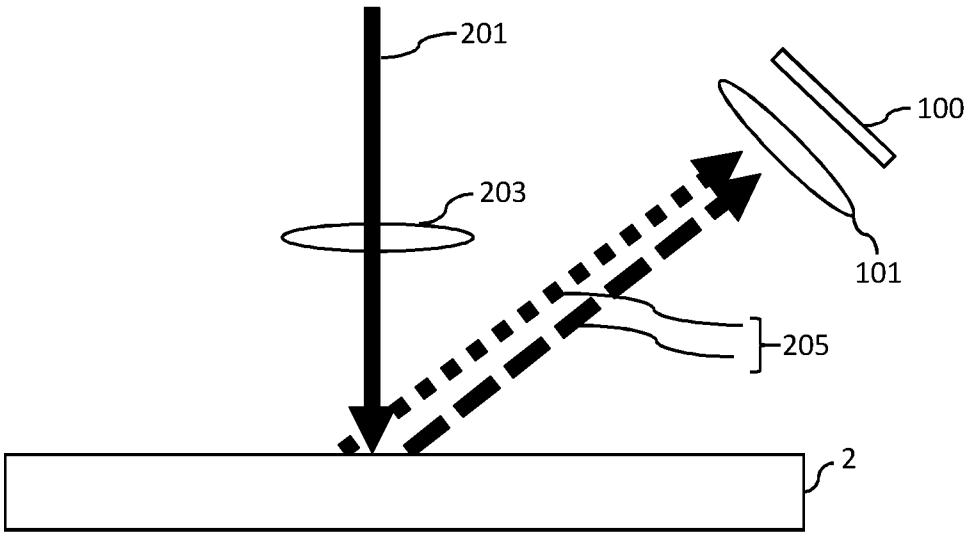


Fig. 3

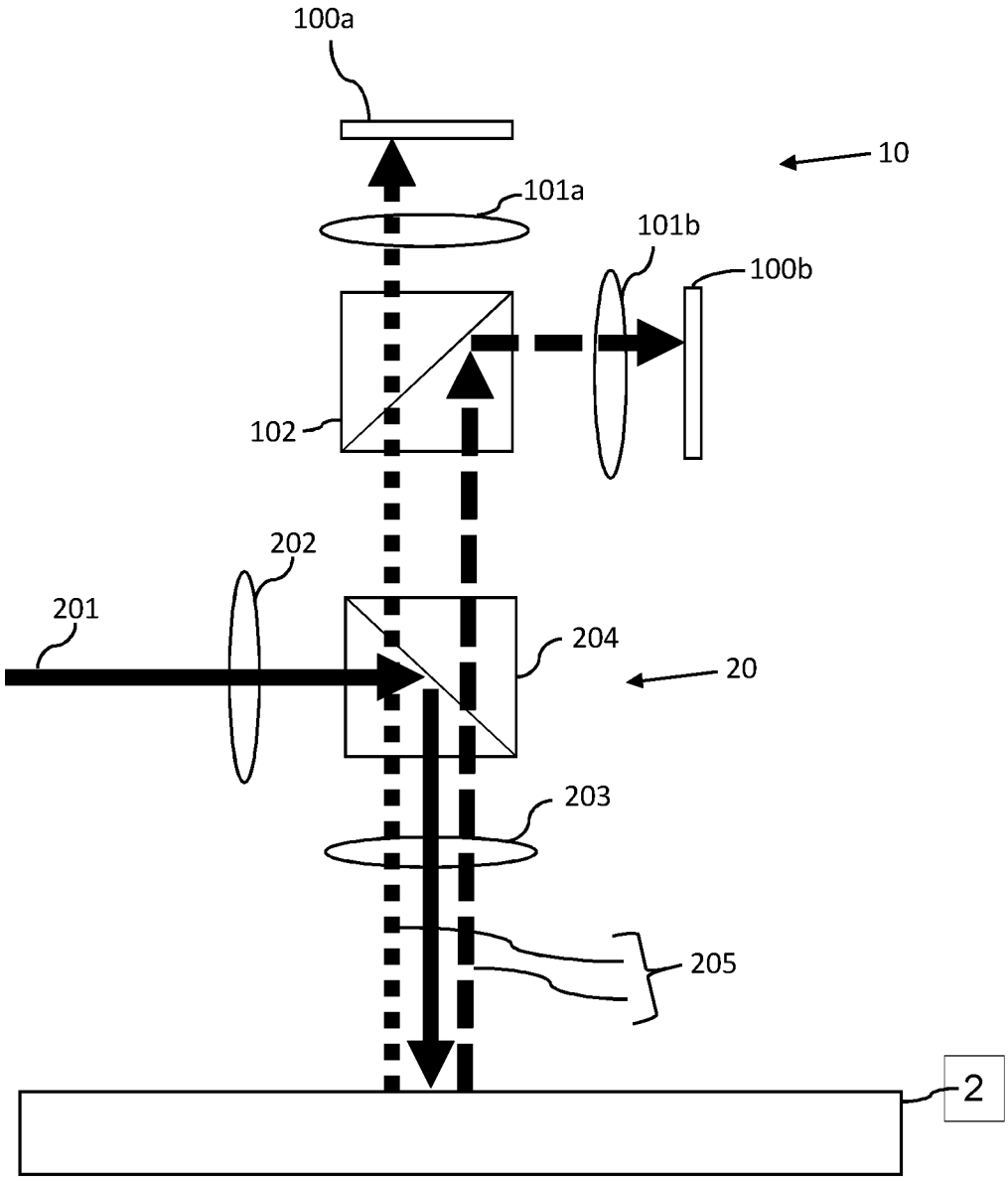


Fig. 4

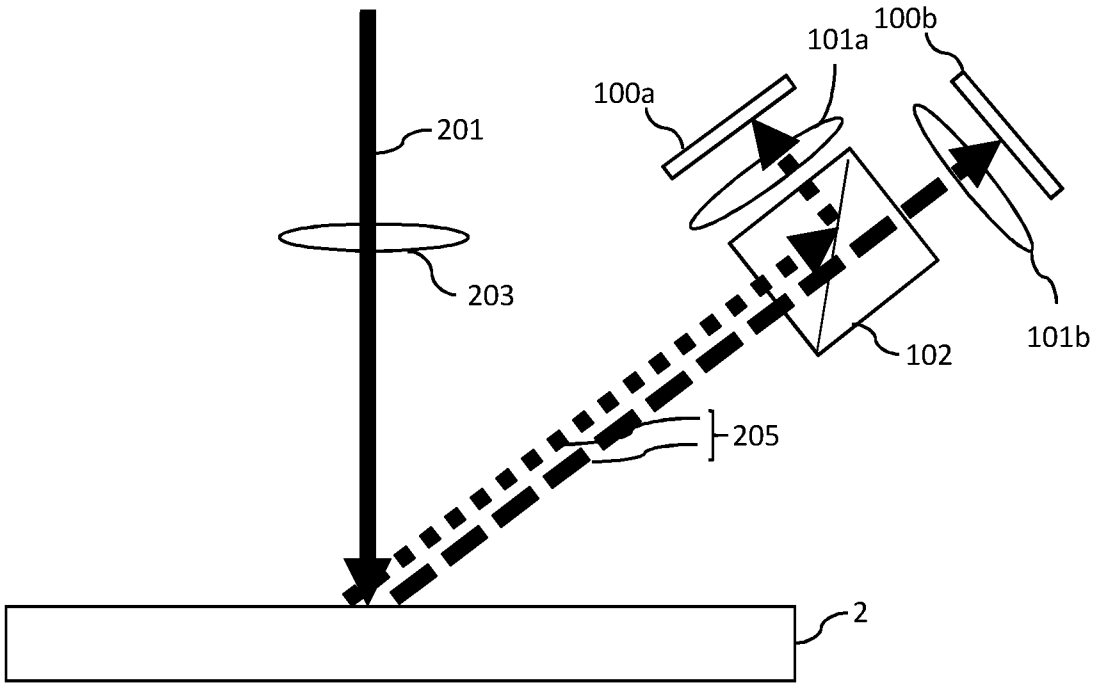


Fig. 5

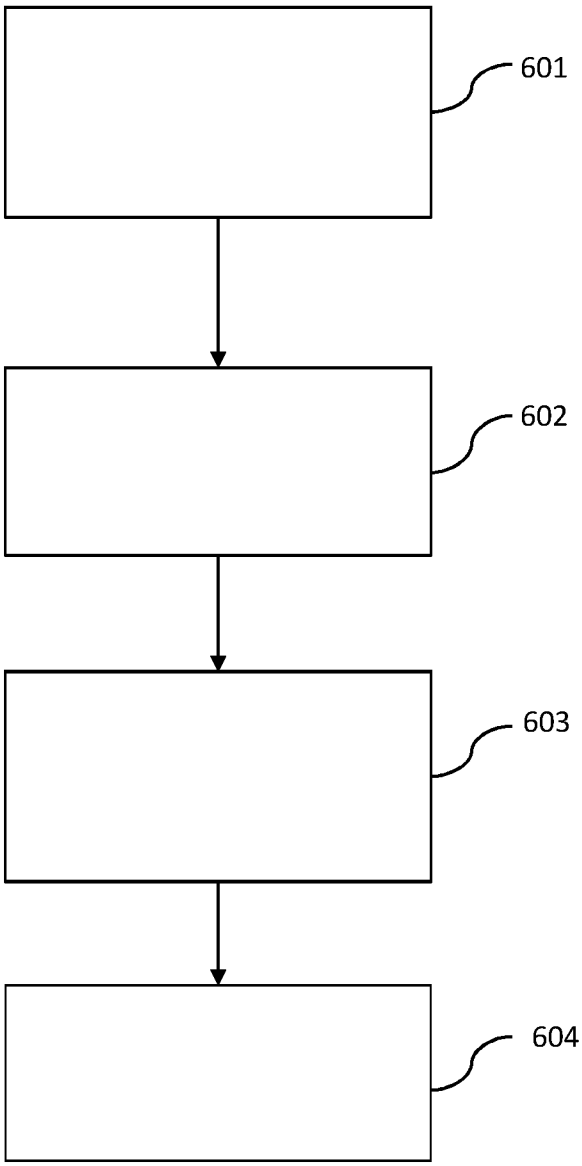


Fig. 6

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/EP2020/077780

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

B23K 26/03(2006.01)i

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)

B23K

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.
X	US 2019118300 A1 (PENNY RYAN WADE [US] ET AL) 25 April 2019 (2019-04-25) paragraph [0006] - paragraph [0008] paragraph [0062] - paragraph [0066]; figure 1	1-16
X	DE 102011085677 A1 (SIEMENS AG [DE]) 08 May 2013 (2013-05-08) paragraph [0001] - paragraph [0006] paragraph [0049]; figure 1	1-16

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C. ☑ 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	Date of mailing of the international search report
10 February 2021	**18 February 2021**

Name and mailing address of the ISA/EP	Authorized officer
European Patent Office **p.b. 5818, Patentlaan 2, 2280 HV Rijswijk** **Netherlands** Telephone No. **(+31-70)340-2040** Facsimile No. **(+31-70)340-3016**	**Frisch, Ulrich** Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.
PCT/EP2020/077780

Patent document cited in search report	Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)	Publication date (day/month/year)
US 2019118300 A1	25 April 2019	US 2019118300 A1	25 April 2019
		WO 2019040948 A1	28 February 2019
DE 102011085677 A1	08 May 2013	NONE	

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Internationales Aktenzeichen
PCT/EP2020/077780

A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES
INV. B23K26/03
ADD.

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

B. RECHERCHIERTE GEBIETE

Recherchierter Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole)
B23K

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 2019/118300 A1 (PENNY RYAN WADE [US] ET AL) 25. April 2019 (2019-04-25) Absatz [0006] - Absatz [0008] Absatz [0062] - Absatz [0066]; Abbildung 1 -----	1-16
X	DE 10 2011 085677 A1 (SIEMENS AG [DE]) 8. Mai 2013 (2013-05-08) Absatz [0001] - Absatz [0006] Absatz [0049]; Abbildung 1 -----	1-16

☐ 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	Absendedatum des internationalen Recherchenberichts
10. Februar 2021	18/02/2021

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

Formblatt PCT/ISA/210 (Blatt 2) (April 2005)

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

Internationales Aktenzeichen
PCT/EP2020/077780

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
US 2019118300 A1	25-04-2019	US 2019118300 A1	25-04-2019
		WO 2019040948 A1	28-02-2019
DE 102011085677 A1	08-05-2013	KEINE	