

(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
16. Februar 2023 (16.02.2023)



(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2023/017178 A1

- (51) Internationale Patentklassifikation: *G01N 21/71* (2006.01) *B23K 26/03* (2006.01) (72) Erfinder: **SCHWARZ, Joachim**; Alte Steinerstraße 32, 8451 Kleinandelfingen (CH).
- (21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2022/072721 (74) Anwalt: **TER MEER STEINMEISTER & PARTNER PATENTANWÄLTE MBB**; Nymphenburger Straße 4, 80335 München (DE).
- (22) Internationales Anmeldedatum: 12. August 2022 (12.08.2022) (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, CV, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IQ, IR, IS, IT, JM, 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.
- (25) Einreichungssprache: Deutsch
- (26) Veröffentlichungssprache: Deutsch
- (30) Angaben zur Priorität: 10 2021 121 112.3
13. August 2021 (13.08.2021) DE
- (71) Anmelder: **PRECITEC GMBH & CO. KG** [DE/DE]; Draisstraße 1, 76571 Gaggenau (DE).

(54) Title: METHOD AND SYSTEM FOR ANALYZING A LASER MACHINING PROCESS ON THE BASIS OF A SPECTROGRAM

(54) Bezeichnung: VERFAHREN UND SYSTEM ZUM ANALYSIEREN EINES LASERBEARBEITUNGSPROZESSES BASIEREND AUF EINEM SPEKTROGRAMM

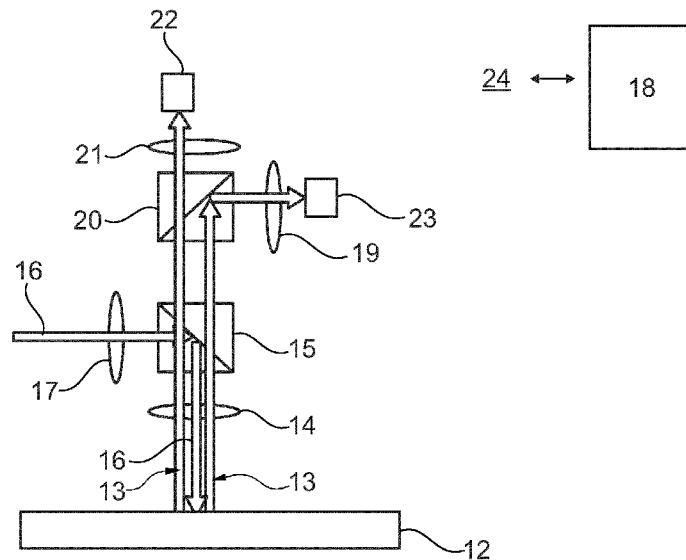


Fig. 4

(57) Abstract: Disclosed is a method for analyzing a laser machining process, said method involving the following steps: acquiring a plurality of spectra of process emissions at consecutive points in time; producing at least one spectrogram on the basis of the acquired spectra; and ascertaining at least one predictive value of a physical quantity and/or ascertaining at least one classification of the laser machining process using a trained neural network, the neural network receiving the spectrogram as an input tensor and outputting the physical quantity and/or the classification of the laser machining process as an output tensor.

(57) Zusammenfassung: Verfahren zum Analysieren eines Laserbearbeitungsprozesses, wobei das Verfahren folgende Schritte umfasst: Erfassen einer Vielzahl von Spektren von Prozessemissionen in aufeinanderfolgenden Zeitpunkten; Erzeugen von zumindest



WO 2023/017178 A1

SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ,
VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW.

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

Veröffentlicht:

- mit internationalem Recherchenbericht (Artikel 21 Absatz 3)

einem Spektrogramm auf Basis der erfassten Spektren; und Ermitteln mindestens eines Vorhersagewertes einer physikalischen Größe und/oder Ermitteln mindestens einer Klassifikation des Laserbearbeitungsprozesses mittels eines angelernten neuronalen Netzes, wobei das neuronale Netz als Eingangstensor das Spektrogramm erhält und als Ausgangstensor die physikalische Größe und/oder die Klassifikation des Laserbearbeitungsprozesses ausgibt.

Verfahren und System zum Analysieren eines Laserbearbeitungsprozesses basierend auf einem Spektrogramm

Die vorliegende Offenbarung betrifft ein Verfahren zum Analysieren eines Laserbearbeitungsprozesses sowie ein System und ein Laserbearbeitungssystem zum Analysieren eines Laserbearbeitungsprozesses, insbesondere basierend auf einem Spektrogramm.

Hintergrund und Stand der Technik

Bei einem Laserbearbeitungsprozess wird ein Werkstück, insbesondere ein metallisches Werkstück mittels eines Bearbeitungslasers bearbeitet. Die Bearbeitung kann beispielsweise ein Laserschneiden, -löten und/oder -schweißen umfassen. Das Laserbearbeitungssystem kann beispielsweise einen Laserbearbeitungskopf umfassen.

Laserbearbeitungsprozesse werden oft einer Qualitätskontrolle unterzogen. Insbesondere wird beim Laserschweißen oder -löten eines Werkstücks, die Qualität der entstandenen Verbindung geprüft. Aktuelle Überwachungssysteme für die Prozessüberwachung und Qualitätsbeurteilung beim Laserschweißen, -löten oder -schneiden basieren in der Regel auf Pre-, In-, und/oder Post-Prozess Überwachungssystemen. Ein Pre-Prozess-Überwachungssystem hat typischerweise die Aufgabe, einen Fügespalt vor dem Laserbearbeitungsprozess zu detektieren bzw. zu vermessen, um den Laserstrahl auf die geeignete Position zu führen und den Versatz der Fügepartner zu ermitteln. In den meisten Fällen werden dafür Triangulationssysteme verwendet.

In- und Post-Prozess-Überwachungssysteme werden regelmäßig verwendet, um Laserbearbeitungsprozesse zu überwachen und die Qualität der entstandenen Verbindung zu kontrollieren und zu sichern. Insbesondere die Post-Prozess-Überwachung wird oft zur Qualitätsüberwachung verwendet, da dabei das aus dem Laserbearbeitungsprozess entstandene Bearbeitungsergebnis, beispielsweise eine fertige und erkaltete Schweißnaht, untersucht und gemäß geltenden Normen (z.B. SEL100) vermessen werden kann. Die Post-Prozess-Überwachung bzw. Post-Inspektion erfordert einen großen anlagentechnischen Aufwand. Oftmals muss für die Post-Prozess-Überwachung eine gesonderte Messzelle aufgebaut werden.

In-Prozess-Überwachungssysteme (auch genannt Inline- oder Online-Prozess-Überwachungssysteme) sind typischerweise dazu ausgelegt, zumindest einen Teil der Strahlung, welche von dem Laserbearbeitungsprozess emittiert wird, zu erfassen. In vielen Fällen können mittels der In-Prozess-Überwachungssysteme nicht alle Signale frequenz- und orts aufgelöst aufgenommen und verarbeitet werden. Eine Qualitätsüberwachung, durch welche eine Klassifikation in Fehlerklassen erfolgen kann, lässt sich deshalb auf Basis dieser Überwachungssysteme nur schwer realisieren. Üblicherweise wird in einem Laserbearbeitungsprozess Strahlung von ei-

5 nem Schmelzbad im sichtbaren Bereich zwischen etwa 400 nm und 850 nm, von einem Plasma im Bereich zwischen etwa 400 nm und 1100 nm, von zurückgestreutem Licht eines Bearbeitungslasers im Bereich von etwa 900 nm bis 1100 nm und Temperaturstrahlung in einem Bereich > 1000 nm emittiert. Mit anderen Worten wird im Laserbearbeitungsprozess Strahlung in einem weiten Bereich zwischen etwa 400 und 1800 nm emittiert. Diese Strahlung wird auch Prozessemission oder Prozessstrahlung genannt.

10 Applikationsabhängig kann eine spektrale Erfassung auf bestimmte Wellenlängenbereiche eingeschränkt werden, wenn Versuche in der Anwendung beispielsweise zeigen, dass ein spektraler Strahlungsbereich z.B. die Temperaturstrahlung, keine Information über Qualitätsmerkmale, die von Interesse sind, enthält. Bei Verbindungen zwischen verschiedenen Metallen ist es insbesondere von Vorteil, frequenzbezogene bzw. frequenzabhängige Intensitäten der Prozessemissionen zu erhalten, da ein Spektrum nachweisen kann, ob beispielsweise bei einer Überlappschweißung Spektrallinien beider Fügepartner im Spektrum vorliegen. Ebenso kann ein Spektrum der Prozessemissionen auf Veränderungen der Legierungen hindeuten. Solche Veränderungen können beispielsweise hervorgerufen werden durch die Verwendung von Materialien unterschiedlicher Hersteller. Veränderungen der Legierungen können Füge-, Schneid- und Laserprint-Prozesse beeinflussen. Bei einer Laserabtragung kann in einem Spektrum sichtbar werden, ob eine Beschichtung tatsächlich abgetragen wird oder ob Material unter der Beschichtung vom Laser erwärmt oder in Plasma übergeführt wird.

25 In vorhandenen In-Prozess-Überwachungssystemen kommen typischerweise Dioden zur Analyse von Prozessstrahlung zum Einsatz, wobei die Strahlung jeweils schmalbandig detektiert wird. In der Regel werden unterschiedlich empfindliche Photodioden eingesetzt. Eine Si-Diode kann z. B. den Bereich zwischen etwa 400 nm und 800 nm erfassen, eine InGaAs-Diode kann den Bereich zwischen etwa 800 nm und 1200 nm erfassen und eine weitere InGaAs- oder Ger-Diode kann den Bereich zwischen etwa 1200 nm und 2000 nm erfassen. Aus diesen Wellenlängenbereichen können prozessabhängig Bereiche mit entsprechenden optischen Filtern herausgeschnitten werden. Beispielsweise kann der Bereich abhängig von dem Bearbeitungslaser für die rückgestreute Laserstrahlung auf etwa 1020 nm bis 1090 nm reduziert werden. Wellenlängen außerhalb dieser Detektionsbereiche der Dioden und der optischen Filter werden nicht detektiert. Intensitätsanteile schmaler Wellenlängenbereiche sind in der integrierten Intensität über große Wellenlängenbereiche nicht mehr sichtbar.

35 Die mittels solcher Dioden derart aufgezeichneten Intensitätsverläufe werden typischerweise gefiltert und auf eine Überschreitung von berechneten bzw. vorgegebenen Schwellwerten geprüft. Die Filterparameter und Schwellwerte werden für jedes Signal, d. h. für den jeweiligen Wellenlängenbereich, separat eingestellt. Die Beobachtung und Auswertung einer einzelnen Diode entspricht so einem separaten Sensorsystem.

- Zur Qualitätsüberwachung können auch aus vielen aufgenommenen Signalverläufen Referenzkurven gebildet und um diese Referenzkurven sogenannte Hüllkurven gelegt werden. Die Hüllkurven repräsentieren die Schwellwerte für jeden Zeitpunkt einer Schweißung. Über- oder unterschreitet ein Signal während des Laserbearbeitungsprozesses die Werte einer Hüllkurve, so wird mit zuvor festgelegten Fehlerkriterien eine Fehlermeldung angezeigt bzw. ausgegeben. Kriterien können beispielsweise ein Integral des Signals über der Hüllkurve oder das Überschreiten des Signals über die Hüllkurve sein. Ein Beispiel für ein solches System ist das Produkt LWM der Fa. Precitec.
- Die Auswertung von Spektren und die Klassifikation oder Regression basierend auf den Spektren kann durch einen „feature“-basierten Ansatz nicht zufriedenstellend realisiert werden. Insbesondere lassen sich Rückschlüsse auf bestimmte Fehlerarten nicht zuverlässig durchführen.
- Andere Lösungen können auf bildgebenden Sensoren basieren, wobei dazu eine Bildverarbeitung beispielsweise für Analysen und/oder Vermessungen des Schmelzbades und des Keyholes verwendet wird, um mit den so gewonnenen Messdaten eine Qualitätsaussage zu ermöglichen.
- Mit dem Einsatz von InGaAs Sensoren werden typischerweise nur Wärmeprofile im Bereich oberhalb von etwa 1200 nm ausgewertet, wie beispielsweise in DE 10 2008 058 187 A1 offenbart, wobei ein Verfahren und eine Vorrichtung zur zerstörungsfreien Qualitätsbestimmung einer Schweißnaht und Schweißvorrichtung beschrieben sind.
- Ferner können Helligkeitsprofile mit CMOS Sensoren im Bereich zwischen etwa 450 nm und 800 nm aufgenommen werden, wobei diese Helligkeitsprofile mit angenommenen Modellen verglichen werden und wodurch Qualitätsmerkmale erkannt werden. In DE 10 2011 078 276 B3 wird ein solches Verfahren zum Erkennen von Fehlern während eines Laserbearbeitungsprozesses beschrieben.
- Die Aufnahme der Intensität über der Frequenz und die Auswertung von Spektren wird z.B. in den Patentschriften US 2014 149075 beschrieben. In beiden Fällen bezieht sich die Auswertung auf die Daten eines einzelnen Spektrums, wobei verschiedene Merkmale im Spektrum zur Beurteilung des Laserprozesses herangezogen werden. In DE 10 2008 043 820 wird dabei der für den Laserbearbeitungsprozess signifikante Frequenzanteil vom Anwender ausgewählt. Der große Integrationsaufwand beim Einsatz von Spektrometern durch die bauliche Größe und die erforderliche Genauigkeit verhindern einen Einsatz dieser Technologie in der Serienproduktion.

Zusammenfassung der Erfindung

Es ist daher eine Aufgabe der Erfindung, ein Verfahren sowie ein System zum Analysieren eines Laserbearbeitungsprozesses zur zuverlässigen Beurteilung der Qualität der Laserbearbeitung bereitzustellen. Ferner ist es eine Aufgabe der Erfindung, Bearbeitungsfehler zuverlässig und schnell und ohne aufwendige Parametrisierungsprozesse zu erkennen.

5 Überdies ist es eine Aufgabe der Erfindung, die Beurteilung der Qualität einer Laserbearbeitung und die Erkennung von Bearbeitungsfehlern zu automatisieren und somit eine Prozessüberwachung, insbesondere eine Online- Prozessüberwachung, zu ermöglichen.

10 Es ist weiter eine Aufgabe der Erfindung, Bedingungen bzw. Parameter für einen Laserbearbeitungsprozess auf Basis von Vorhersagewerten und/oder Klassifikationen anzupassen.

Eine oder mehrere dieser Aufgaben wird durch die Merkmale der unabhängigen Ansprüche gelöst.

15 Gemäß einem Aspekt umfasst ein Verfahren zum Analysieren eines Laserbearbeitungsprozesses folgende Schritte: Erfassen einer Vielzahl von Spektren von Prozessemissionen in aufeinanderfolgenden Zeitpunkten bzw. Zeiträumen; Erzeugen von zumindest einem Spektrogramm auf Basis der erfassten Spektren; und Ermitteln mindestens eines Werts bzw.
20 Vorhersagewertes einer physikalischen Größe bzw. einer physikalischen Eigenschaft und/oder Ermitteln mindestens einer Klassifikation des Laserbearbeitungsprozesses mittels eines angelernten neuronalen Netzes, wobei das neuronale Netz als Eingangstensor das Spektrogramm erhält und als Ausgangstensor die physikalische Größe und/oder die Klassifikation des Laserbearbeitungsprozesses ausgibt. Bei dem Laserbearbeitungsprozess kann
25 es sich beispielsweise um einen Laserschneid-, Laserschweiß-, Laserlöt- oder Laserabtragsprozess handeln.

Mit anderen Worten kann das Ermitteln des mindestens einen Werts und/oder mindestens einer Klassifikation des Laserbearbeitungsprozesses basierend auf dem zumindest einen
30 Spektrogramm mittels einer Übertragungsfunktion erfolgen, die durch das angelernte neuronale Netz gebildet ist.

Das neuronale Netz kann durch Fehlerrückführung bzw. Backpropagation angelernt sein. Das neuronale Netz kann ein faltendes neuronales und/oder tiefes neuronales Netz, z.B. ein tiefes
35 faltendes neuronales Netz oder Konvolutionsnetz, sein. Das Konvolutionsnetz kann mindestens eine sogenannte „Fully-Connected“-Schicht aufweisen.

Das erfindungsgemäße Verfahren erlaubt, effizient Rückschlüsse auf bestimmte Fehlerarten bzw. auf bestimmte Klassifikationen vornehmen zu können, ohne die erfassten Daten

bearbeiten und gesondert rechnergestützt mittels einer klassischer Featureanalyse analysieren zu müssen. Der Einsatz von neuronalen Netzen, insbesondere von faltenden neuronalen Netzen, erlaubt, Spektrogramme hinsichtlich bestimmter Fehler zu analysieren und darauf basierend zu klassifizieren und/oder physikalische Größen bzw. physikalische Eigenschaften abzubilden, ohne die Merkmale in den Spektrogrammen zu kennen oder extrahieren zu müssen. Solche Fehler können beispielsweise mangelhafte Einschweißung bei der Schweißung verschiedener Materialien sein, oder Beschichtungseinschlüsse in Schweißzonen. Bearbeitungsfehler können also zuverlässig, schnell und ohne aufwendige Parametrisierungsprozesse identifiziert werden. Mit anderen Worten kann eine besonders effiziente, automatisierte und einfache Qualitätssicherung zu jedem bearbeiteten Werkstück erfolgen. Das neuronale Netz ist überdies besonders sensitiv und es können je nach Training geringfügige Veränderungen oder schwer erkennbare Defekte bzw. Bearbeitungsfehler identifiziert werden.

Das zumindest eine Spektrogramm dient als Eingangsdatensatz bzw. Eingangstensor für das angelernte neuronale Netz. Mehrere erfasste bzw. aufgezeichnete Spektren können hierbei als Spektrogramm zu einem Eingangstensor für das neuronale Netz zusammengefasst werden. Vorzugsweise kann jedes generierte Spektrogramm einen separaten Eingangstensor bilden. Das Spektrogramm kann eine Zusammensetzung der Prozessemissionen aus einzelnen Frequenzen im zeitlichen Verlauf darstellen. Das Spektrogramm kann also eine zeitvariante Darstellung der Frequenzverteilung der Prozessemissionen sein, beispielsweise mit Hilfe der Kurzzeit-Fourier-Transformation.

Das angelernte neuronale Netz gibt den Wert der zumindest einen physikalischen Eigenschaft oder die Klassifikation als Ausgangstensor aus. Das neuronale Netz kann auch Werte mehrerer physikalischer Eigenschaften und/oder Klassifikationen gleichzeitig bestimmen und als Ausgangstensor ausgeben. Durch die gleichzeitige Quantifizierung von mehreren physikalischen Eigenschaften und/oder Klassifikationen des Bearbeitungsergebnisses kann die Überwachung des Laserbearbeitungsprozesses zuverlässiger und genauer erfolgen.

Die Beurteilung der Qualität eines Laserbearbeitungsprozesses kann insbesondere die Beurteilung eines gerade bearbeiteten Werkstücks sein. Daraus kann abgeleitet werden, ob der Bearbeitungsvorgang zu den gewünschten Kriterien des Bearbeitungsprozesses bzw. des Werkstücks führt, oder ob Bearbeitungsfehler auftreten. Das Ermitteln des mindestens einen Wertes bzw. Vorhersagewertes und insbesondere das Erkennen von Bearbeitungsfehlern kann automatisiert erfolgen und somit kann eine Prozessüberwachung, insbesondere eine Online- Prozessüberwachung ermöglicht werden.

Der Laserbearbeitungsprozess kann an zumindest einem Werkstück, insbesondere ein metallisches Werkstück, z.B. aus Reinmetallen und/oder Legierungen, erfolgen. Ein Werkstück kann

insbesondere mehrere zusammengesetzte Ausgangswerkstücke umfassen. Mit anderen Worten können zwei metallische Teile bzw. Ausgangswerkstücke aus demselben Material oder aus unterschiedlichen Materialien mittels des Laserbearbeitungsprozesses verbunden, beispielsweise verschweißt sein oder werden.

5 Die Prozessemissionen werden beispielsweise bei der Laserbearbeitung, d.h. während oder kurz nach der Laserbearbeitung, an dem Werkstück erzeugt und von einem Detektor bzw. einem Sensor, insbesondere von einem Detektor eines Spektrometers, zumindest teilweise erfasst.

10 Das zumindest eine Spektrogramm kann während der Durchführung des Laserbearbeitungsprozesses erfasst werden. Ebenso kann der Wert der physikalischen Eigenschaft während der Durchführung des Laserbearbeitungsprozesses oder auch nach der Beendigung des Laserbearbeitungsprozesses bestimmt werden. Dementsprechend kann das erfindungsgemäße Verfahren insbesondere als In-Prozess-Verfahren ausgebildet sein. Das Bestimmen der zumindest einen physikalischen Eigenschaft und/oder die Klassifikation des Laserbearbeitungsprozesses kann also insbesondere in Echtzeit erfolgen.

20 Das erfindungsgemäße Verfahren kann während der Durchführung des Laserbearbeitungsprozesses kontinuierlich und/oder wiederholt durchgeführt werden. Mit anderen Worten können kontinuierlich und/oder wiederholt Spektren und/oder Spektrogramme erfasst und jeweils der Wert der zumindest einer physikalischen Eigenschaft und/oder Klassifikation bestimmt werden.

25 Das Erzeugen des Spektrogramms kann ein chronologisches Zusammensetzen von zumindest einem Teil bzw. mehreren der Vielzahl von erfassten Spektren aufweisen, wobei jedes Spektrum einem Zeitpunkt bzw. einem Zeitintervall, an bzw. in dem es erfasst wird, zugeordnet ist oder zugeordnet werden kann. Die erfassten Spektren werden an aufeinanderfolgenden Zeitpunkten aufgenommen. Die Aufnahme kann beispielsweise wenige Nano- bis Millisekunden dauern, weshalb der Zeitpunkt, zu dem ein Spektrum aufgenommen wird, in
30 Wirklichkeit einem kurzen Zeitraum entsprechen kann. Dennoch kann näherungsweise von einem Zeitpunkt gesprochen werden. Beispielsweise kann die Zuordnung eines Spektrums zu einem Zeitpunkt, an dem die Erfassung bzw. Aufnahme des Spektrums beginnt, erfolgen.

35 Die Erfindung beruht also auf dem Gedanken, mithilfe eines neuronalen Netzes einen Wert für eine physikalische Eigenschaft und/oder eine Klassifikation des Bearbeitungsergebnisses anzugeben, d.h. die physikalische Eigenschaft zu quantifizieren und/oder den Laserbearbeitungsprozess bzw. das Bearbeitungsergebnis zu klassifizieren, wobei das neuronale Netz zumindest ein für den Laserbearbeitungsprozess erfasstes Spektrogramm als Eingangsdatensatz verwendet.

Mithilfe des erfindungsgemäßen Verfahrens ist es demzufolge möglich, den Wert der physikalischen Eigenschaft und/oder eine Klassifikation des Bearbeitungsergebnisses des Laserbearbeitungsprozesses zerstörungsfrei zu bestimmen. Die physikalische Eigenschaft kann ein Qualitätsmerkmal des Bearbeitungsergebnisses sein, welches beispielsweise durch einen Standard
5 oder eine Norm, z.B. betreffend eine Materialbeschaffenheit, vorgegeben sein kann. Demnach kann eine Qualität des Bearbeitungsergebnisses, etwa von Schweißnähten bzw. Löt Nähten und Schnittkanten anhand des bestimmten Werts der physikalischen Eigenschaft quantifiziert bzw. quantitativ beschrieben und bewertet werden, um so eine feingranulare Bewertungsmetrik zum Analysieren der Schweißnähte bzw. Löt Nähte und Schnittkanten und der entsprechenden Laser-
10 bearbeitungsprozesse anzugeben.

Zusammenfassend erlaubt das Verfahren gemäß der vorliegenden Erfindung eine Überwachung, insbesondere eine Echtzeit-Überwachung, eines Laserbearbeitungsprozesses, insbesondere eines Laserschneid-, Laserschweiß-, Laserlöt-, oder Laserabtragungsprozesses, aus Spektrogrammen
15 mittels Machine-Learning-Methoden.

Das Erfassen jedes der Spektren kann ein Erfassen von Intensitäten der Prozessemissionen in Abhängigkeit von der Wellenlänge zu dem jeweiligen Zeitpunkt umfassen. Anstelle der Intensitäten von Prozessemissionen können auch Absorptionen, beispielsweise Infrarotabsorptionen, erfasst werden. Ein Spektrum umfasst in der Regel die Auftragung oder Zuordnung von Intensitäten zu Wellenlängen, wobei Wellenlängen üblicherweise in der Einheit Nanometer angegeben werden. Alternativ kann die Auftragung bzw. Zuordnung einer Intensität gegen eine Wellenlänge auch durch die Auftragung bzw. Zuordnung einer Intensität gegen eine Frequenz ersetzt werden, wobei eine Frequenz in der Einheit Hz angegeben
25 wird.

Die erfassten Intensitäten können Rohdaten sein. Die Beurteilung der Qualität eines Laserbearbeitungsprozesses und die Erkennung von Bearbeitungsfehlern eines bearbeiteten Werkstücks und insbesondere einer Werkstückoberfläche kann also auf Basis von aufgenommenen
30 Rohdaten erfolgen. Dies wird „end-to-end“-Verarbeitung bzw. -Analyse genannt. Das Analysieren von Rohdaten kann die Anzahl von Schritten zum Analysieren eines Laserbearbeitungsprozesses reduzieren, wodurch ein besonders effizientes Verfahren bereitgestellt werden kann. Aufwändige Vorverarbeitung bzw. Datenvorbereitung kann daher entfallen. Insbesondere ist es nicht erforderlich, dass ein Programm oder ein Anwender mathematische
35 Operationen zur Analyse der erfassten Intensitäten und der erfassten Spektren ausführt. Dadurch ist das Verfahren besonders einfach, zeit- und kosteneffizient. Rohdaten umfassen beispielsweise Intensitäten, welche auf Basis eines elektrischen Signals von einem Sensor bzw. Detektor ermittelt werden. Rohdaten können insbesondere Daten sein, welche nach

Erfassung keine weitere mathematische Behandlung bzw. Operationen erfahren, wie beispielsweise Filtern, Glätten, Normieren etc.

5 Insbesondere in In-Prozess-Überwachungssystemen können Rohdaten zum Analysieren eines Laserbearbeitungsprozesses verwendet werden, um besonders schnell und effizient eine Analyse bzw. Bewertung in Realzeit vornehmen zu können.

10 Die erfassten Intensitäten eines einzigen Spektrums können im Wesentlichen zeitgleich erfasst werden. Das zeitgleiche Erfassen von Intensitäten unterschiedlicher Wellenlängen eines Spektrums erlaubt, dass alle Intensitäten zu einem spezifischen Zustand des Werkstücks zu einem Zeitpunkt erfasst werden, wodurch dieser Zustand vollständig und zuverlässig abgebildet werden kann. Ferner ist das zeitgleiche Erfassen der Intensitäten eines Spektrums besonders effizient.

15 Das Erfassen eines jeden Spektrums kann ein örtliches spektrales Aufspalten an einem Detektor umfassen. Das spektrale Aufspalten an oder vor einem Detektor kann beispielsweise mittels eines Gitters und/oder mittels eines Prismas erfolgen. Vorzugsweise erfolgt das spektrale Aufspalten allerdings durch Reflexion. Ein Gitter kann deswegen bevorzugt sein, da es „in Reflexion“ funktioniert und keine Anteile der spektralen Emissionen durch ein
20 Material absorbiert und somit die Signale bzw. die Spektren verfälscht. Das spektrale Aufspalten erlaubt insbesondere, alle oder zumindest einen Teil der Intensitäten eines Spektrums zeitgleich aufnehmen zu können.

25 Die Prozessemissionen umfassen beispielsweise eine Temperaturstrahlung, eine Plasmastrahlung und/oder eine von einer Oberfläche eines Werkstücks reflektierte Laserstrahlung. Aus den genannten Prozessemissionen können insbesondere in charakteristischen Spektralbereichen bzw. Wellenlängenbereichen Vorhersagewerte für physikalische Größen und/oder Klassifikationen des Laserbearbeitungsprozesses abgeleitet werden. Die besagten Prozessemissionen geben insbesondere einen Hinweis auf Bearbeitungsfehler.

30 Insbesondere kann das Erzeugen des zumindest einen Spektrogramms umfassen: ein Erzeugen eines ersten Spektrogramms für ein erstes Zeitintervall und ein Erzeugen eines zweiten Spektrogramms für ein zweites Zeitintervall, wobei das zweite Zeitintervall mit dem ersten Zeitintervall überlappt und/oder unmittelbar auf dieses folgt.

35 Im Falle eines zeitlichen Überlappens von Spektrogrammen kann beispielsweise ein erstes Spektrogramm aus Spektren von etwa 0 ms bis 500 ms erzeugt werden und ein zweites Spektrogramm kann aus den Spektren von etwa 400 ms bis 900 ms erzeugt werden. Der Überlapp kann von der Fehlergröße und der Bearbeitungsgeschwindigkeit abhängen, also

von der Zeit, in welcher sich ein signifikantes Merkmal über die Spektren ausbildet. Insbesondere sind Zeitintervalle zweier oder mehrerer erzeugter Spektrogramme gleich lang und/oder weisen die gleiche Anzahl von Spektren auf, ungeachtet der Tatsache, ob die Spektrogramme zeitlich überlappen oder nicht. Alternativ können sich die Zeitintervalle auch in ihrer Länge unterscheiden.

Insbesondere kann die physikalische Größe mindestens eine aus den Folgenden umfassen: eine Zugfestigkeit, eine Druckfestigkeit, eine elektrische Leitfähigkeit, eine Keyhole-Tiefe, eine Einschweißtiefe, eine Spaltgröße eines Spalts zwischen zwei durch den Laserbearbeitungsprozess verbundenen Werkstücken, eine Rauigkeit einer Schnittkante eines durch den Laserbearbeitungsprozess geschnittenen Werkstücks, einen Grat einer Schnittkante eines durch den Laserbearbeitungsprozess geschnittenen Werkstücks, eine Grathöhe einer Schnittkante eines durch den Laserbearbeitungsprozess geschnittenen Werkstücks, eine Steilheit der Schneidfront und eine Rechtwinkligkeit einer Schnittkante eines durch den Laserbearbeitungsprozess geschnittenen Werkstücks. Die Klassifikation des Werkstücks kann einer Klassifikation in eine Fehlerklasse umfassen, insbesondere mindestens eine aus den Folgenden: Spalt, Versatz, fehlende Durch- und/oder Einschweißung, fehlerhafte Abtragung, Schnittqualität und Legierungsqualität.

Eine Klassifikation kann auch auf Basis der besagten physikalischen Größe ermittelt werden. Die Klassifikation kann insbesondere darstellen, ob ein Werkstück einer Gutschweißung oder einer Schlechtschweißung entspricht, wobei eine Gutschweißung ein Schweißergebnis ist, welches vorbestimmte Kriterien erfüllt und eine Schlechtschweißung ein Schweißergebnis ist, welches vorbestimmte Kriterien nicht erfüllt.

Das Erfassen der Spektren kann beispielsweise mit einer Abtastrate zwischen etwa 100 Hz und 100 kHz, bevorzugt zwischen etwa 800 Hz und 10 kHz und insbesondere zwischen etwa 900 Hz und 2 kHz, erfolgen. Eine hohe Abtastrate führt zu einer hohen zeitlichen Auflösung der Spektrogramme.

Insbesondere kann das Erfassen der Spektren in einem Wellenlängenbereich zwischen etwa 100 nm bis etwa 1500 nm, bevorzugt zwischen etwa 130 nm bis 1300 nm, besonders bevorzugt zwischen etwa 150 nm und 1050 nm und insbesondere zwischen etwa 340 nm und 850 nm, erfolgen. Aus den Spektren der besagten Wellenlängenbereiche können die meisten physikalischen Werte oder Klassifikationen des Laserbearbeitungsprozesses abgeleitet werden.

Das Erfassen der Spektren kann mit einer spektralen Auflösung zwischen etwa 0,1 nm und 1 nm, bevorzugt zwischen etwa 0,2 nm bis 0,8 nm und besonders bevorzugt zwischen etwa

0,4 nm bis 0,6 nm, erfolgen. Die spektrale Auflösung ergibt sich insbesondere durch das spektrale Aufspalten an bzw. vor dem Detektor. Je stärker die Aufspaltung an einem Gitter oder einem anderen dispersiven optischen Element ist, desto höher kann die spektrale Auflösung sein, sofern der Detektor dies erlaubt.

5

Der Wert bzw. Vorhersagewert der physikalischen Größe und/oder die Klassifikation kann in Echtzeit ermittelt werden. Basierend darauf können Regelungsdaten und/oder Steuerungsdaten an ein den Laserbearbeitungsprozess durchführendes Laserbearbeitungssystem ausgegeben werden. Der Wert der physikalischen Eigenschaft und/oder der Klassifizierung kann also zur Regelung des Laserbearbeitungsprozesses verwendet werden, insbesondere, wenn der jeweilige Wert während der Durchführung des Laserbearbeitungsprozesses bestimmt wird. Beispielsweise kann der Laserbearbeitungsprozess so geregelt werden, dass eine Differenz zwischen dem bestimmten Wert bzw. einem Ist-Wert und einem Soll-Wert der physikalischen Eigenschaft des aktuellen Bearbeitungsergebnisses oder eines darauffolgenden Bearbeitungsergebnisses verringert wird. Wenn beispielsweise die physikalische Eigenschaft die Einschweißtiefe in ein Werkstück ist und der bestimmte Wert der Einschweißtiefe von einem Soll-Wert der Einschweißtiefe abweicht, kann der Laserbearbeitungsprozess so angepasst werden, dass für einen nachfolgenden Laserbearbeitungsprozess eine Differenz zwischen dem bestimmten Wert der Einschweißtiefe und einem aktuellen Soll-Wert abnimmt. Eine Regelung des Laserbearbeitungsprozesses kann eine Anpassung einer Fokusslage, eines Fokussdurchmessers des Laserstrahls, einer Laserleistung und/oder eines Abstands eines Laserbearbeitungskopfes umfassen.

Insbesondere kann der Laserbearbeitungsprozess auf Basis von Vorhersagewerten und/oder Klassifikationen automatisiert gesteuert und/oder geregelt werden. Beispielsweise kann ein Vorhersagewert für eine physikalische Größe die Basis für das Steuern oder Regeln der Laserleistung eines Bearbeitungslasers darstellen. Insbesondere kann dadurch verhindert werden, dass Bearbeitungsfehler entstehen. Außerdem können ggf. auch Bearbeitungsfehler an einem Werkstück durch das Regeln und/oder Steuern des Laserbearbeitungsprozesses korrigiert werden. Überdies kann ein solches Verfahren dazu führen, dass ein Werkstück mit den gewünschten physikalischen Eigenschaften mittels des Laserbearbeitungsprozesses erzeugt wird und dadurch sehr hohe Qualitätskriterien erfüllt. Derart können insbesondere die Bedingungen für einen Laserbearbeitungsprozess auf Basis von Vorhersagewerten und/oder Klassifikationen angepasst werden.

Demzufolge kann ein Ausschuss an Werkstücken aufgrund von Bearbeitungsfehlern vermindert oder vermieden werden, was insbesondere bei sehr hochwertigen Werkstücken unter ökonomischen und ökologischen Gesichtspunkten von Bedeutung ist. Überdies kann ein Werkstück durch einen optimierten Laserbearbeitungsprozess ggü. anderen Werkstücken, welche durch bekannte Laserbearbeitungsprozesse hergestellt werden, verbessert

werden, d.h. die physikalischen Eigenschaften eines bearbeiteten Werkstücks entsprechend der Erfindung können besonders hohe Qualitätsanforderungen erfüllen. Beispielsweise kann ein elektrischer Kontakt durch einen optimierten Laserbearbeitungsprozess im Wesentlichen keine Defekte, eine besonders hohe Lebensdauer und eine besonders gute Leitfähigkeit aufweisen.

Die Daten, welche zu einem Werkstück erfasst werden, also insbesondere die Spektrogramme und die daraus ermittelten Vorhersagewerte und/oder Klassifikationen können ferner aufgezeichnet und gespeichert werden und beispielsweise für Garantiezwecke dem Produkt auf einem Produktdatenblatt beigelegt werden. Dies ist insbesondere von Interesse bei sehr hochwertigen Werkstücken, oder Werkstücken, welche hohe Sicherheitsstandards erfüllen müssen.

Das angelernte neuronale Netz kann mittels Trainingsdaten durch Transfer-Learning anpassbar sein. Insbesondere kann das neuronale Netz an veränderte Prozessbedingungen, etwa aufgrund einer neuen Charge Werkstücke mit leicht veränderter Materialzusammensetzung, anpassbar sein. Ein anpassbares neuronales Netz, das mittels Trainingsdaten durch Transfer-Learning (nach)trainiert werden kann, ist besonders flexibel, vielseitig einsetzbar und anwenderfreundlich.

Die Anforderungen an Laserbearbeitungsprozesse und an die dadurch entstehenden Werkstücke können vielfältig und unterschiedlich sein. Ein Nutzer kann beispielsweise an sehr spezifischen physikalischen Größen seiner Werkstücke interessiert sein, da er damit ganz bestimmte Eigenschaften der Werkstücke, an denen er interessiert ist, abbilden kann.

Mittels Transfer-Learning kann ein neuronales Netz nachtrainiert werden, beispielsweise wenn das neuronale Netz unzutreffende Vorhersagewerte bzw. Klassifikationen ausgibt. Für das Transfer-Learning können Trainingsdaten an einem Werkstück, das speziell für das Training bearbeitet wird, erstellt werden. Zu einem für Trainingszwecke bearbeiteten Werkstück werden Spektren erfasst und Spektrogramme erzeugt, welche zusammen mit jeweiligen Messwerten der physikalischen Größe und/oder durch Experten vorgenommene Klassifikationen (sogenannte „Ground Truth“ Werte) als Trainingsdaten für das neuronale Netz verwendet werden. Das Messen einer physikalischen Größe bzw. das Klassifizieren durch Experten erfolgt anhand des bearbeiteten Werkstücks und gegebenenfalls mit zerstörenden Techniken.

Durch Transfer-Learning kann das neuronale Netz an eine geänderte Situation oder einen geänderten Laserbearbeitungsprozess angepasst werden. Die geänderte Situation kann beispielsweise darin bestehen, dass die zu bearbeitenden Werkstücke unterschiedliche Materialien, Verschmutzungsgrade und/oder Dicken aufweisen, oder dass die Parameter der Laserbearbeitung geändert

werden. Beim Transfer-Learning können die für das Trainieren oder Anlernen des neuronalen Netzes verwendeten Trainingsdatensätze um neue Beispiele ergänzt werden. Die Verwendung eines trainierten neuronalen Netzes, das zum Transfer-Learning eingerichtet ist, hat also den Vorteil, dass das System schnell an geänderte Situationen, insbesondere an einen geänderten Laserbearbeitungsprozess, angepasst werden kann.

Das neuronale Netz kann ein CNN sein, welches voll verbundene Schichten beinhalten kann, es kann LSTM-Schichten („long short term memory“) und/oder zumindest eine GRU-Schicht („gated recurrent units“) umfassen. Dadurch kann eine Leistungsfähigkeit des neuronalen Netzes verbessert werden.

Gemäß einem weiteren Aspekt ist ein System zum Analysieren eines Laserbearbeitungsprozesses angegeben. Das System kann dazu ausgelegt sein, das Verfahren und insbesondere eine Ausführungsform des Verfahrens auszuführen. Das System umfasst: mindestens ein Sensor bzw. eine Sensoreinheit, bevorzugt mit einem Sensorfeld, der bzw. die dazu ausgelegt ist, eine Vielzahl von Spektren von Prozessemissionen an aufeinanderfolgenden Zeitpunkten zu erfassen; und mindestens eine Recheneinheit (auch Controller genannt), die dazu eingerichtet ist, mindestens ein Spektrogramm auf Basis der erfassten Spektren als Eingangstensor zu erzeugen; und ein neuronales Netz, das dazu eingerichtet ist, basierend auf dem Eingangstensor mindestens einen Wert bzw. Vorhersagewert einer physikalischen Größe bzw. Eigenschaft und/oder einer Klassifikation des Laserbearbeitungsprozesses als Ausgangstensor auszugeben. Das neuronale Netz kann in der Recheneinheit enthalten bzw. implementiert sein. Alternativ kann das neuronale Netz in einem Server oder einer Cloud bereitgestellt sein. Das neuronale Netz kann in diesem Fall drahtlos mit der Recheneinheit zum Datenaustausch verbunden sein.

Das System zum Analysieren eines Laserbearbeitungsprozesses verwirklicht alle Vorteile, die auch für das Verfahren und insbesondere eines oder mehrere der Ausführungsformen des Verfahrens zutreffen.

Die Erfassung der Spektren von Prozessemissionen kann zumindest teilweise koaxial zum Strahlengang eines Bearbeitungslasers zum Durchführen des Laserbearbeitungsprozesses erfolgen. Dadurch kann das System besonders platzsparend und effizient gestaltet werden. Optische Elemente können daher effizient genutzt werden und es kann auf zusätzliche optische Elemente, die ein nicht koaxialer Strahlengang erforderlich machen würde, verzichtet werden.

Die Recheneinheit kann dazu ausgelegt sein, den Wert in Echtzeit zu bestimmen und/oder Regelungsdaten an ein den Laserbearbeitungsprozess durchführendes Laserbearbeitungssystem auszugeben.

- 5 Der Sensor bzw. die Sensoreinheit kann mindestens ein Spektrometer, insbesondere ein MEMS-Spektrometer, aufweisen. MEMS (Mikro-Elektronisch-Mechanischen-Systeme) sind besonders kosteneffizient und platzsparend, und daher einfach in oder an Laserbearbeitungsköpfe zu integrieren. MEMS Bausteine können in „on-chip“-Spektrometer verwendet werden. Dies ermöglicht die Integration dieser miniaturisierten Spektrometer in Lasermaterialbearbeitungsköpfen. Insbesondere kann der Sensor bzw. die Sensoreinheit zwei, drei, vier, fünf, 10 sechs, sieben, acht, neun, zehn oder sogar mehr MEMS-Spektrometer aufweisen.

Die Recheneinheit kann dazu ausgelegt sein, den Laserbearbeitungsprozess auf Basis von Regelungsdaten und/oder Steuerungsdaten zu regeln und/oder zu steuern.

- 15 Ein solches System kann autonom, also ohne Einwirkung eines Anwenders, Werkstücke hoher Qualität erzeugen. Ein Laserbearbeitungsprozess, welcher zu Bearbeitungsfehlern führt, kann dadurch korrigiert oder ggf. sogar beendet werden, um zu gewährleisten, dass die Werkstücke den individuellen Qualitätsansprüchen eines Anwenders entsprechen. Insbesondere können verschiedene Parameter des Laserbearbeitungsprozesses gesteuert und/oder geregelt werden, um sicher zu stellen, dass ein Werkstück im Wesentlichen keine Bearbeitungsfehler aufweist.

- 25 Gemäß einem weiteren Aspekt umfasst ein Laserbearbeitungssystem zur Bearbeitung eines Werkstücks mittels eines Bearbeitungslaserstrahls: einen Laserbearbeitungskopf zum Einstrahlen des Bearbeitungslaserstrahls auf das Werkstück; und das System zum Analysieren eines Laserbearbeitungsprozesses gemäß der vorliegenden Offenbarung und insbesondere eine Ausführungsform dessen.

- 30 Das Laserbearbeitungssystem zur Bearbeitung eines Werkstücks verwirklicht ebenfalls alle Vorteile, die auch für das Verfahren und insbesondere eines der Ausführungsformen des Verfahrens zutreffen.

Kurzbeschreibung der Zeichnungen

- 35 Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung werden im Folgenden anhand von Figuren im Detail beschrieben. Die Figuren bilden verschiedene Merkmale von Ausführungsformen ab, wobei die Merkmale nicht auf die Ausführungsformen allein beschränkt sind. Vielmehr lassen sich alle Merkmale, die sich nicht gegenseitig ausschließen auch miteinander kombinieren oder es

lassen sich Merkmale aus Ausführungsformen entfernen, sofern sie nicht wesentlich für die Ausführung der Erfindung sind.

- Fig. 1** ist ein beispielhaftes Spektrum bei einem Laserbearbeitungsprozess zu einem Zeitpunkt t ;
5 **Fig. 2** ist ein beispielhaftes Spektrogramm eines Laserbearbeitungsprozesses;
Fig. 3 ist eine schematische Darstellung eines Funktionsprinzips eines Spektrometers gemäß einer Ausführungsform;
Fig. 4 ist eine schematische Darstellung eines Laserbearbeitungskopfes mit einem Spektrometer gemäß einer Ausführungsform; und
10 **Fig. 5** ist eine schematische Darstellung eines Verfahrens zum Analysieren eines Laserbearbeitungsprozesses gemäß einer Ausführungsform.

Detaillierte Beschreibung der Ausführungsformen

- 15 **Fig. 1** ist ein beispielhaftes Spektrum 3 eines Laserschweißprozesses von Aluminium auf Stahl zu einem Zeitpunkt t . Es werden Intensitäten I auf der vertikalen Achse gegen Wellenlängen λ auf der horizontalen Achse aufgetragen. Das Resultat daraus ist das gezeigte Spektrum 3.

Das Spektrum 3 ist mittels eines Spektrometers erfasst worden. Spektrometer erlauben, die Intensität von Licht, insbesondere von Prozessemissionen, in Abhängigkeit der Wellenlänge oder
20 der Frequenz zu bestimmen. Charakteristische Linien von metallischen Werkstücken sowie deren Beschichtungen und für den Laserbearbeitungsprozesses signifikante Prozessemissionen werden nicht durch Emissionen überdeckt, welche keinen Einfluss auf die Qualitäts- oder Re-
gressions- Zuordnung haben, wie dies bei einer selektiven Betrachtung nur eines Ausschnitts des
25 Spektrums der Prozessemissionen geschehen kann. Dies ermöglicht ein vollständiges Bild und somit eine zuverlässigere Qualitätsanalyse.

Der Hauptanteil des Spektrums 3 in **Fig. 1**, also die höchsten Intensitäten des Spektrums liegen im sichtbaren spektralen Wellenlängenbereich 2 von Licht, also zwischen etwa 400 nm und etwa
30 730 nm.

Fig. 2 ist ein beispielhaftes Spektrogramm 5 eines Laserbearbeitungsprozesses über einen Zeitraum von ca. 0.2 Sekunden. Das Spektrogramm 5 setzt sich aus einer Vielzahl von einzelnen Spektren 3 zusammen, welche gegen die Zeit entlang der Zeitachse aufgetragen
35 sind. Mit anderen Worten werden die einzelnen Spektren 3 in einem Spektrogramm 5 angeordnet und können so über der Zeit sichtbar gemacht werden. Die Zusammenfassung von Spektren zu einem Bild entsteht, indem jede Zeile des Bildes aus den Intensitäten eines Spektrums besteht.

Spektren können beispielsweise mit einer Rate von etwa 1 KHz über die Länge einer Zeitdauer von etwa einer Sekunde aufgenommen und zeitlich so angeordnet werden, dass ein Spektrogramm bzw. ein Bild mit 1000 Zeilen erzeugt wird. Die Zeilenlänge ergibt sich aus der Auflösung des Spektrometers. In einem Wellenlängenbereich von etwa 150 nm bis 1050 nm und etwa 0.5 nm Auflösung, ergibt sich beispielsweise eine Zeilenlänge von 1800 Intensitätswerten. Die Auflösung der einzelnen Datenpunkte beträgt beispielsweise 16 bit.

Fig. 3 ist eine schematische Darstellung eines Funktionsprinzips eines Spektrometers. Ein Teil der Prozessemissionen fällt als einfallendes Licht 11 durch einen Spalt 9 bzw. Schlitz auf ein reflektives konkaves Gitter 8 eines Gitter-Chips 7. Das Licht wird spektral am Gitter 8 aufgespalten und auf einen Sensor 10, insbesondere auf ein Sensorfeld, gelenkt.

Bei dem in **Fig. 3** gezeigten Spektrometer 6 kann es sich insbesondere um ein MEMS-Spektrometer handeln, welches besonders kostengünstig und einfach in einen Laserbearbeitungskopf zu integrieren ist. Die Entwicklung von Spektrometern „on chip“, basierend auf MEMS-Spektrometern, ermöglicht die Integration dieser Technologie in Lasermaterialbearbeitungsköpfen. Insbesondere kann als Detektor bzw. Sensor 10 ein Zeilensensor verwendet werden, auf den das spektral aufgespaltene Licht fällt bzw. abgebildet wird. Die Daten können am Sensor 10 beispielsweise in einer Auflösung von 16 bit ausgelesen werden. Dabei können Datenraten im kHz Bereich pro Spektrum realisiert werden.

Als Beispiel für ein Spektrometer 6 wird ein MEMS-Spektrometer von der Firma Hamamatsu (C12666MA) angeführt, mit einer spektralen Auflösung von etwa 15 nm in einem Bereich von etwa 340 nm bis 850 nm. Der Einsatz mehrerer MEMS-Spektrometer für verschiedene Wellenlängenbereiche ist problemlos möglich, indem die einzelnen erfassten Spektren zusammengeführt werden und zu einem Spektrogramm angeordnet werden. Die Wellenlängenbereiche grenzen vorzugsweise unmittelbar aneinander an oder überlappen sich in einem kleinen Bereich.

Nachfolgend werden die Daten bzw. Spektren, insbesondere die wellenlängenabhängigen Intensitäten, ausgelesen und zu einem Spektrogramm 5, wie in **Fig. 2** beispielhaft dargestellt, zusammengesetzt. Beispielsweise kann ein erstes Spektrogramm 5 aus Spektren 3 von etwa 0 ms bis 500 ms erzeugt werden, und ein zweites Spektrogramm 5 aus den Spektren 3 von etwa 400 ms bis 900 ms erzeugt werden, usw. In diesem Fall liegt eine Überlappung vor, welche von der Fehlergröße und Schweißgeschwindigkeit abhängt, also von der Zeit, in welcher sich ein signifikantes Merkmal über die Spektren ausbildet.

Die Anzahl der Spektren 3 im Spektrogramm 5 kann applikationsabhängig gewählt werden, abhängig von der Länge bzw. Dauer des Bearbeitungsprozesses, z.B. einer Schweißung, und der ausreichenden Belichtung des Zeilensensors im MEMS Baustein.

Der Einsatz von neuronalen Netzen erlaubt, die Spektrogramme 5 nach Fehlern zu klassifizieren und/oder auf physikalische Größen abzubilden, ohne die Merkmale in den Spektrogrammen 5 zu kennen oder extrahieren zu müssen. Dazu werden in den Daten der Einzelspektren 3 oder Spektrogrammen 5 keine Fehler festgelegt, welche die sogenannte Ground Truth darstellen, sondern es werden geschweißte Werkstücke zur Festlegung der Ground Truth herangezogen.

Zur Klassifikation oder Regression der Eingangsdaten in eine Qualitätsklasse oder Abbildung auf einen Wert einer physikalischen Größe, z.B. für eine Festigkeit oder Leitfähigkeit, wird das Bearbeitungsergebnis, z.B. eine geschweißte Verbindung, einer Messung, z.B. einer Kraftmessung oder einer Leitfähigkeitsmessung, unterzogen. Damit kann physikalisch die Kraft ermittelt werden, bei welcher eine Schweißnaht reißt oder welche Leitfähigkeit zwischen den verbundenen Werkstoffen entstanden ist.

Diese Werte können als Ground Truth verwendet werden, um ein neuronales Netz, insbesondere ein faltendes neuronales Netz zu trainieren oder anzupassen. Die Intensitätsverteilung in den einzelnen Spektren 3 und dessen zeitlicher Verlauf muss dem Anwender also nicht bekannt sein.

Das Spektrogramm 5 bildet einen Eingangstensor für das neuronale Netz, insbesondere ein tiefes, typischerweise faltendes, neuronales Netz, welches das Spektrogramm 5 beispielsweise auf einen Fehlertyp hin klassifiziert. Das neuronale Netz kann beispielsweise ein Netz der Architektur Xception aufweisen.

Die Klassifikation in typische Fehlerklassen, wie Spalt, Versatz, fehlende Durch- und Einschweißung, und fehlerhafte Abtragung erfordert die Erzeugung einer großen Anzahl von Trainingsdaten, welche diese typischen Fehler aufweisen. Es müssen daher Schweißungen für jeden Fehlertyp erzeugt werden. Für jede Schweißung muss die Festigkeit, Leitfähigkeit oder andere physikalische Größen ermittelt werden, abhängig in welche Klassen klassifiziert werden soll oder auf welche physikalischen Werte abgebildet werden soll. Dadurch besteht eine klare Zuordnung der Daten zur Ground Truth. Daher kann auf das umständliche Ermitteln von signifikanten Merkmalen aus den Spektrogrammen 5 verzichtet werden.

Beim Schweißen unterschiedlicher Materialien wird sich das Spektrogramm 5 abhängig von den Anteilen der Fügepartner im Fügeprozess verändern. Die Regression auf einen Wert für eine Einschweißtiefe bei Überlappverbindungen unterschiedlicher Werkstoffe wird mit den Spektrogrammen 5 als Eingangstensor ermöglicht.

Unterschiedliche Schnittqualitäten, hervorgerufen unter anderem durch Legierungsänderungen der Werkstoffe, können basierend auf den Spektrogrammen 5 erkannt werden. Die Klassifikation

in Schnittqualitäten wird durch die Verwendung der Spektrogramme 5 als Eingangstensor ermöglicht.

Fig. 4 ist eine schematische Darstellung eines Laserschweißkopfes 24 mit Spektrometern 22, 23 als Beispiel für einen Laserbearbeitungskopf gemäß einer Ausführungsform. Der Strahlengang des Bearbeitungslaserstrahls 16 verläuft über eine Kollimationsoptik 17, einen Strahlteiler 15 und eine Fokussieroptik 14 auf ein Werkstück 12, welches bearbeitet wird. Bei der Bearbeitung entstehen Prozessemissionen 13, beispielsweise Temperaturstrahlung, Plasmastrahlung und/oder eine von einer Oberfläche eines Werkstücks reflektierte Laserstrahlung. Ein Teil der Prozessemissionen 13 wird zumindest teilweise koaxial bzw. kollinear zu dem Strahlengang des Bearbeitungsstrahls 16 von der Oberfläche des Werkstücks zu einem der beiden Spektrometer 22, 23 geführt. Am Strahlteiler 20 werden die Prozessemissionen 13 aufgeteilt. Ein Teil der Prozessemissionen 13 gelangt durch Reflektion an dem Strahlteiler 20 über die abbildende Optik 19 zu dem Spektrometer 23, welches beispielsweise Wellenlängen zwischen etwa 300 nm und 1050 nm erfassen kann. Ein anderer Teil der Prozessemissionen 13 gelangt durch Transmission durch den Strahlteiler 20 über die abbildende Optik 21 zu dem Spektrometer 22, welches beispielsweise Wellenlängen zwischen etwa 1000 nm und 1400 nm erfassen kann.

Der Laserschweißkopf 24 ist mit einer Recheneinheit 18 verbunden, welche Rechenoperationen ausführt, insbesondere Spektren 3 zu Spektrogrammen 5 zusammensetzt und ein neuronales Netz zur Ermittlung von physikalischen Größen und/oder Klassifikationen umfasst oder verwendet und insbesondere Bearbeitungsfehler identifiziert.

In **Fig. 5** ist eine schematische Darstellung eines Verfahrens zum Analysieren eines Laserbearbeitungsprozesses gemäß einer Ausführungsform gezeigt. Im Schritt 110 wird eine Vielzahl von Spektren von Prozessemissionen in aufeinanderfolgenden Zeitpunkten bzw. Zeiträumen von einem Spektrometer erfasst. Mit anderen Worten detektiert das Spektrometer Intensitäten bei unterschiedlichen Wellenlängen zu einem bestimmten Zeitpunkt bzw. in einem bestimmten Zeitraum, wobei ein Datensatz aus den Intensitäten und den zugehörigen Wellenlängen ein Spektrum darstellt. Im Schritt 120 werden Spektrogramme auf Basis der erfassten Spektren erzeugt. Die Spektrogramme werden dadurch erzeugt, dass mehrere Spektren entlang einer Zeitachse gegen die Zeit t , zu der sie erfasst wurden, aufgetragen werden. Im Schritt 130 werden mittels eines neuronalen Netzes ein Wert einer physikalischen Größe und/oder eine Klassifikation des Laserbearbeitungsprozesses ermittelt. Das neuronale Netz empfängt das Spektrogramm als Eingangstensor und generiert als Ausgangstensor den Wert der physikalischen Größe und/oder die Klassifikation des Laserbearbeitungsprozesses.

Das neuronale Netz ist insbesondere ein faltendes neuronales Netz und kann beispielsweise aus einem Xception Netz bestehen. Der Eingangslayer kann auf die Dimension des Spektrogramms angepasst sein (z.B. 2315x500x1). Die Dimension des letzten ergibt sich z.B. aus den zu vorher-sagenden Wahrscheinlichkeiten für die Klassen, in welche klassifiziert werden soll, beispiels-
5 weise Spalt, fehlende Durch- oder Einschweißung und Versatz.

Der hierin beschriebene Laserbearbeitungsprozess kann ein Fügen bzw. Verbinden von Werk-
stücken oder ein Trennen oder Abtragen von Werkstoff umfassen. Der Laserbearbeitungsprozess
kann ein Laserschneidprozess, ein Laserabtragungsprozess, ein Laserschweißprozess oder ein
10 Laserlötprozess sein oder einen solchen umfassen. Das Bearbeitungsergebnis des Laserbearbei-
tungsprozesses kann die geschnittenen, gefügten bzw. verbundenen, d.h. die verschweißten oder
verlöteten oder geschnittenen Werkstücke umfassen. Insbesondere kann das Bearbeitungsergeb-
nis in diesem Fall eine Schweißverbindung bzw. Lötverbindung zwischen den gefügten Werk-
stücken bezeichnen. Die Schweißverbindung bzw. Lötverbindung kann durch eine Schweißnaht
15 gebildet werden. Mit anderen Worten kann das Bearbeitungsergebnis in diesem Fall die
Schweißnaht bzw. Lötnaht bezeichnen. Das Bearbeitungsergebnis kann auch einen Teil oder
Bereich der Schweißverbindung bzw. der Schweißnaht bezeichnen. Zwischen den durch den
Laserbearbeitungsprozess zu verbindenden Werkstücken kann ein Spalt vorhanden sein, welcher
auf das Ergebnis der Schweißung Einfluss hat. Der Spalt kann, im Fall einer Stumpfstoßschwei-
20 ßung, als Raum zwischen zwei sich gegenüberliegenden Oberflächen der zu verbindenden
Werkstücke oder, im Fall einer Überlappschweißung, als Raum zwischen den zu verbindenden
Werkstücken bezeichnet werden. Ein Abstand zwischen den sich gegenüberliegenden Oberflä-
chen der verbundenen Werkstücke kann als Spaltgröße bezeichnet werden. Ein zu großer Spalt
kann einen Bearbeitungsfehler des Laserbearbeitungsprozesses darstellen. Im Fall einer Stumpf-
25 stoßschweißung wird der Spalt im Pre-Prozess, d.h. vor der Schweißung ermittelt, im Fall einer
Überlappschweißung wird der Spalt über die Spanntechnik festgelegt.

Das Bearbeitungsergebnis des Laserbearbeitungsprozesses kann auch ein Zwischenergebnis des
Laserbearbeitungsprozesses umfassen, d.h. ein Merkmal, das (auch oder nur) während der
30 Durchführung des Laserbearbeitungsprozesses vorliegt. Insbesondere kann das Bearbeitungser-
gebnis eine Dampfkapillare, auch „Keyhole“ genannt, und/oder ein Schmelzbad umfassen. Eine
Keyhole-Tiefe kann hierbei als ein Abstand eines Bodens der Dampfkapillare zur Oberfläche des
Werkstücks definiert sein, auf die der Laserstrahl eingestrahlt wird. Aus der Keyhole-Tiefe kann
auf die Einschweißtiefe geschlossen werden.

35 Der Wert der physikalischen Eigenschaft des Bearbeitungsergebnisses kann einem für eine Mes-
sung der physikalischen Eigenschaft am Bearbeitungsergebnis vorhergesagten Wert entsprechen.
Mit anderen Worten kann die Bestimmung des Werts der physikalischen Eigenschaft als Vorher-
sage eines Messwerts der physikalischen Eigenschaft betrachtet werden.

Die zumindest eine physikalische Eigenschaft des Bearbeitungsergebnisses kann zumindest eine der folgenden umfassen: eine Festigkeit, insbesondere eine Zug-, Druck- und/oder Scherfestigkeit, einer durch den Laserbearbeitungsprozess hergestellten Schweiß- oder Lötverbindung, eine elektrische Leitfähigkeit einer durch den Laserbearbeitungsprozess hergestellten Schweiß- oder Lötverbindung, eine Keyhole-Tiefe, eine Einschweißtiefe in ein Werkstück, eine Spaltgröße zwischen zwei durch den Laserbearbeitungsprozess verbundenen Werkstücken, eine Rauigkeit einer Schnittkante eines durch den Laserbearbeitungsprozess geschnittenen Werkstücks, ein Grat bzw. eine Grathöhe einer Schnittkante eines durch den Laserbearbeitungsprozess geschnittenen Werkstücks, eine Steilheit der Schneidfront und eine Rechtwinkligkeit einer Schnittkante eines durch den Laserbearbeitungsprozess geschnittenen Werkstücks. Wenn mittels des erfindungsgemäßen Verfahrens die Keyhole-Tiefe oder die Steilheit der Schneidfront bestimmt bzw. vorhergesagt wird, kann auf separate Messeinrichtungen, beispielsweise optische Kohärenztomographen, bei einem Laserbearbeitungssystem zum Durchführen des Laserbearbeitungsprozesses verzichtet werden. Die Bestimmung eines Werts der Zugfestigkeit hingegen ist insbesondere bei auf Stumpfstoß verbundenen Werkstücken relevant. Das Bearbeitungsergebnis beim Laserschneiden kann durch die physikalischen Eigenschaften, wie beispielsweise der Rauigkeit der Schnittkanten oder dem Grat bzw. der Grathöhe der Schnittkanten oder Rechtwinkligkeit der Schnittkanten beschrieben werden.

Der Wert der physikalischen Eigenschaft kann in einer physikalischen Einheit, z.B. in einer „SI-Einheit“ (Internationales Einheitensystem), bestimmt werden. Beispielsweise kann Festigkeit in Newton (N) oder Newton pro Fläche (N/m^2), die Einschweißtiefe in μm , die Spaltgröße in μm und die elektrische Leitfähigkeit in Siemens (S) bestimmt werden. Die Rauigkeit einer Schnittkante kann z.B. mit der Einheit μm bestimmt werden.

Alle diskreten Werte, die hierin angegeben wurden, können bis zu etwa 10% und insbesondere bis zu etwa 5-7% von den Angaben abweichen. Daher sind die Angaben lediglich als etwaige Angaben zu verstehen.

Bezugszeichenliste

- 3 Spektrum
- 5 Spektrogramm
- 6 Sensor- bzw. Spektrometervorrichtung
- 7 Gitter-Chip
- 8 Reflektives konkaves Gitter
- 9 Spalt
- 10 Sensorfeld
- 11 Einfallendes Licht
- 12 Werkstück
- 13 Prozessemissionen
- 14 Fokussieroptik
- 15 Strahlteiler
- 16 Bearbeitungsstrahl
- 17 Kollimationsoptik
- 18 Recheneinheit
- 19 Abbildende Optik
- 20 Strahlteiler
- 21 Abbildende Optik
- 22 Spektrometer
- 23 Spektrometer
- 24 Laserschweißkopf
- 110 Erfassen einer Vielzahl von Spektren an einem Spektrometer
- 120 Erzeugen von zumindest einem Spektrogramm auf Basis der erfassten Spektren
- 130 Ermitteln mindestens eines Vorhersagewertes einer physikalischen Größe und/oder Ermitteln mindestens einer Klassifikation des Laserbearbeitungsprozesses mittels eines angelegten neuronalen Netzes

Patentansprüche

1. Verfahren zum Analysieren eines Laserbearbeitungsprozesses, wobei das Verfahren folgende Schritte umfasst:
- 5 - Erfassen (110) einer Vielzahl von Spektren (3) von Prozessemissionen in aufeinanderfolgenden Zeitpunkten;
- Erzeugen (120) von zumindest einem Spektrogramm (5) auf Basis der erfassten Spektren; und
- Ermitteln (130) zumindest eines Wertes einer physikalischen Größe und/oder
- 10 Ermitteln zumindest einer Klassifikation des Laserbearbeitungsprozesses mittels eines neuronalen Netzes,
- wobei das neuronale Netz als Eingangstensor das Spektrogramm (5) erhält und als Ausgangstensor die physikalische Größe und/oder die Klassifikation des Laserbearbeitungsprozesses ausgibt.
- 15
2. Verfahren nach Anspruch 1,
- wobei das Erfassen jedes der Spektren (3) ein Erfassen von Intensitäten der Prozessemissionen (13) in Abhängigkeit von der Wellenlänge zu dem jeweiligen Zeitpunkt umfasst.
- 20
3. Verfahren nach Anspruch 2, wobei die erfassten Intensitäten Rohdaten sind.
4. Verfahren nach Anspruch 2 oder 3, wobei die erfassten Intensitäten eines Spektrums (3) zeitgleich erfasst werden und/oder wobei das Erfassen eines jeden Spektrums (3) ein örtliches spektrales Aufspalten an einem Detektor umfasst.
- 25
5. Verfahren nach einem der voranstehenden Ansprüche,
- wobei die Prozessemissionen (13) eine Temperaturstrahlung, eine Plasmastrahlung und/oder eine von einer Oberfläche eines Werkstücks (12) reflektierte Laserstrahlung umfassen.
- 30
6. Verfahren nach einem der voranstehenden Ansprüche, wobei das Erzeugen des zumindest einen Spektrogramms (5) umfasst:
- ein Erzeugen eines ersten Spektrogramms (5) für ein erstes Zeitintervall und ein Erzeugen eines zweiten Spektrogramms (5) für ein zweites Zeitintervall, wobei das zweite Zeitintervall mit dem ersten Zeitintervall überlappt und/oder unmittelbar auf dieses folgt; und/oder
- 35 ein chronologisches Zusammensetzen der Vielzahl von Spektren.

7. Verfahren nach einem der voranstehenden Ansprüche,
wobei die physikalische Größe mindestens eine von den Folgenden umfasst: eine Zugfestigkeit, eine Druckfestigkeit, eine elektrische Leitfähigkeit, eine Keyhole-Tiefe, eine Einschweißtiefe, eine Spaltgröße eines Spalts zwischen zwei durch den Laserbearbeitungsprozess verbundenen Werkstücken, eine Rauigkeit einer Schnittkante eines durch den Laserbearbeitungsprozess geschnittenen Werkstücks, einen Grat einer Schnittkante eines durch den Laserbearbeitungsprozess geschnittenen Werkstücks, eine Grathöhe einer Schnittkante eines durch den Laserbearbeitungsprozess geschnittenen Werkstücks, eine Steilheit der Schneidfront und eine Rechtwinkligkeit einer Schnittkante eines durch den Laserbearbeitungsprozess geschnittenen Werkstücks; und/oder
wobei die Klassifikation des Werkstücks (12) einer Klassifikation in eine Fehlerklasse entspricht und mindestens eine aus den Folgenden umfasst: Spalt, Versatz, fehlende Durch- und/oder Einschweißung, fehlerhafte Abtragung, Schnittqualität und Legierungsqualität.
8. Verfahren nach einem der voranstehenden Ansprüche, wobei das Erfassen der Spektren (3) mit einer Abtastrate erfolgt zwischen etwa 100 Hz und 100 kHz oder zwischen etwa 800 Hz und 10 kHz oder zwischen etwa 900 Hz und 2 kHz.
9. Verfahren nach einem der voranstehenden Ansprüche,
wobei das Erfassen der Spektren (3) in einem Wellenlängenbereich erfolgt zwischen etwa 100 nm bis etwa 1500 nm oder zwischen etwa 130 nm bis 1300 nm oder zwischen etwa 150 nm und 1050 nm oder zwischen etwa 340 nm und 850 nm; und/oder
wobei das Erfassen der Spektren (3) mit einer spektralen Auflösung erfolgt zwischen etwa 0,1 nm und 1 nm oder zwischen etwa 0,2 nm bis 0,8 nm oder zwischen etwa 0,4 nm bis 0,6 nm.
10. Verfahren nach einem der voranstehenden Ansprüche, wobei der Vorhersagewert der physikalischen Größe und/oder die Klassifikation in Echtzeit ermittelt wird und basierend darauf Regelungsdaten an ein den Laserbearbeitungsprozess durchführendes Laserbearbeitungssystem ausgegeben werden.
11. Verfahren nach einem der voranstehenden Ansprüche, wobei das neuronale Netz ein angeleitetes neuronales Netz ist, das mittels Trainingsdaten durch Transfer-Learning anpassbar ist.
12. System zum Analysieren eines Laserbearbeitungsprozesses, wobei das System umfasst:
- mindestens eine Sensoreinheit, die dazu eingerichtet ist, eine Vielzahl von Spektren (3) von Prozessemissionen (13) an aufeinanderfolgenden Zeitpunkten zu erfassen;

- mindestens eine Recheneinheit (18), die dazu eingerichtet ist, mindestens ein Spektrogramm (5) auf Basis der erfassten Spektren als Eingangstensor zu erzeugen; und
 - ein neuronales Netz, das eingerichtet ist, basierend auf dem Eingangstensor mindestens einen Wert einer physikalischen Größe und/oder eine Klassifikation des Laserbearbeitungsprozesses als Ausgangstensor auszugeben.
- 5
13. System nach Anspruch 12, wobei die Sensoreinheit mindestens ein Spektrometer oder ein MEMS-Spektrometer, aufweist.
- 10 14. System nach Anspruch 12 oder 13, wobei die mindestens eine Recheneinheit (18) dazu ausgelegt ist, den Laserbearbeitungsprozess auf Basis von Regelungsdaten zu regeln.
15. Laserbearbeitungssystem zur Bearbeitung eines Werkstücks mittels eines Bearbeitungslaserstrahls, wobei das Laserbearbeitungssystem umfasst:
- 15 - einen Laserbearbeitungskopf (24) zum Einstrahlen des Bearbeitungslaserstrahls (16) auf das Werkstück (12); und
 - ein System gemäß einem der Ansprüche 12, 13 oder 14.

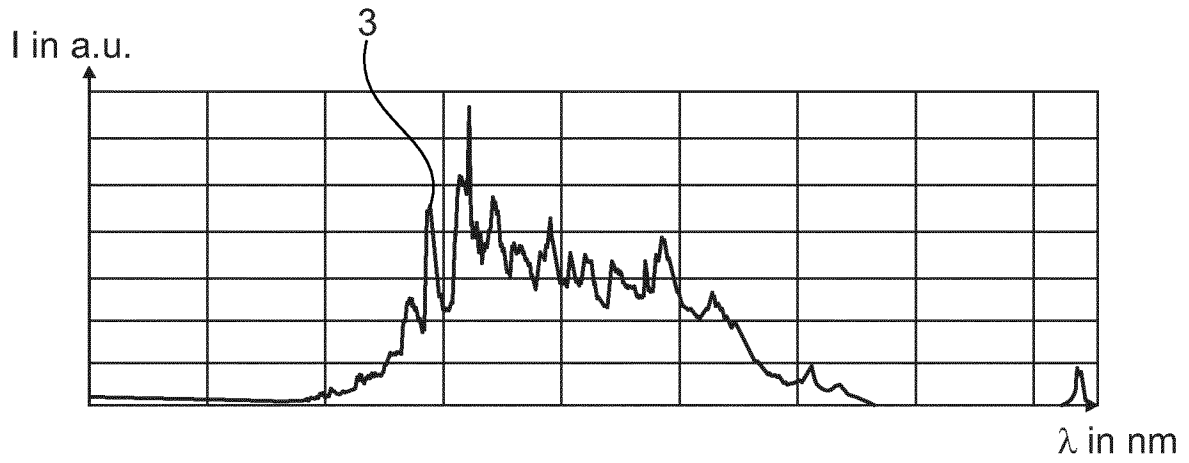


Fig. 1

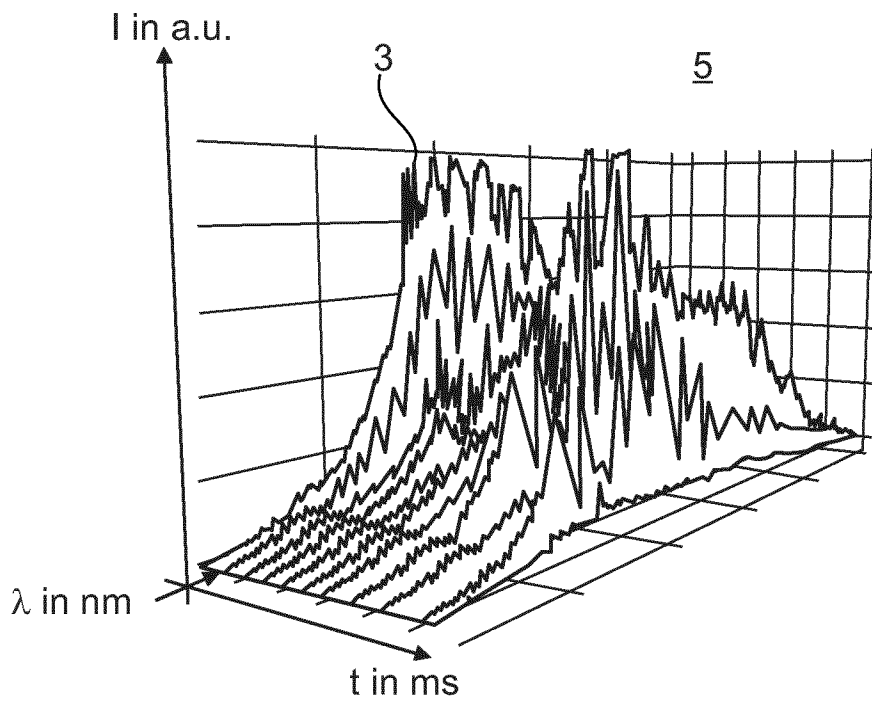


Fig. 2

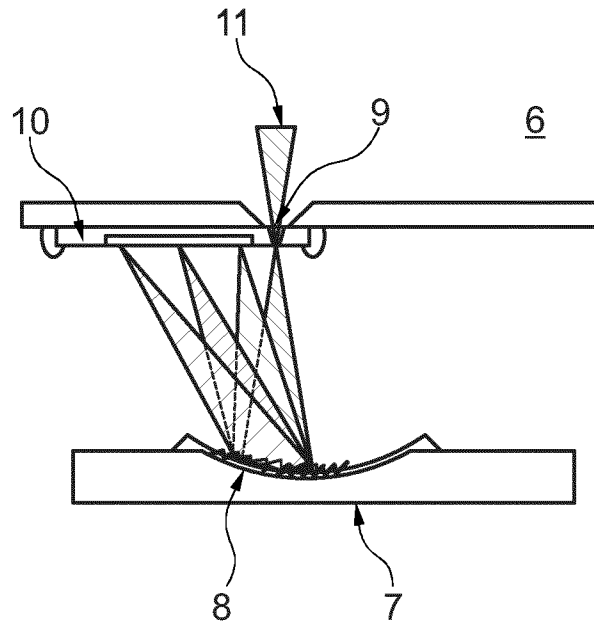


Fig. 3



Fig. 5

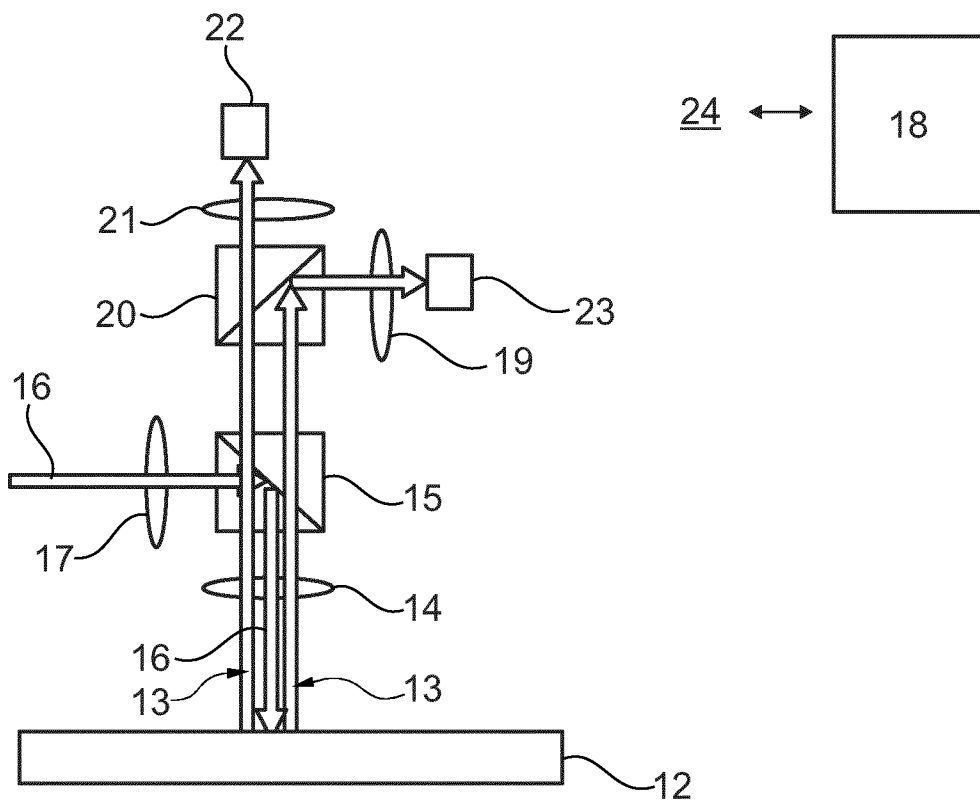


Fig. 4

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/EP2022/072721

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER G01N 21/71 (2006.01)i; 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) G01N; 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, COMPENDEX, INSPEC, 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	CN 111426639 A (UNIV HUAZHONG SCIENCE TECH) 17 July 2020 (2020-07-17) the whole document	1-15
X	CN 103878479 B (UNIV SHANGHAI JIAOTONG) 10 February 2016 (2016-02-10) the whole document	1,3-5,7,12-15
X	DE 102018129441 A1 (PRECITEC GMBH & CO KG [DE]) 28 May 2020 (2020-05-28) the whole document	1,3-5,7,10,12,15
<input type="checkbox"/> Further documents are listed in the continuation of Box C. <input checked="" type="checkbox"/> See patent family annex.		
<p>* Special categories of cited documents:</p> <p>“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance</p> <p>“E” earlier application or patent but published on or after the international filing date</p> <p>“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)</p> <p>“O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means</p> <p>“P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed</p> <p>“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</p> <p>“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</p> <p>“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</p> <p>“&” document member of the same patent family</p>		
Date of the actual completion of the international search 03 November 2022		Date of mailing of the international search report 11 November 2022
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 Politsch, Erich Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/EP2022/072721

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)	Publication date (day/month/year)
CN	111426639	A	17 July 2020	NONE	
CN	103878479	B	10 February 2016	NONE	
DE	102018129441	A1	28 May 2020	CN 113329836 A	31 August 2021
				DE 102018129441 A1	28 May 2020
				EP 3883715 A1	29 September 2021
				JP 2022509143 A	20 January 2022
				KR 20210091789 A	22 July 2021
				US 2022011726 A1	13 January 2022
				WO 2020104103 A1	28 May 2020

A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES		
INV. G01N21/71 B23K26/03		
ADD.		
Nach der Internationalen Patentklassifikation (IPC) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPC		
B. RECHERCHIERTE GEBIETE		
Recherchierter Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole) G01N 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, COMPENDEX, INSPEC, WPI Data		
C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN		
Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
X	CN 111 426 639 A (UNIV HUAZHONG SCIENCE TECH) 17. Juli 2020 (2020-07-17) das ganze Dokument -----	1-15
X	CN 103 878 479 B (UNIV SHANGHAI JIAOTONG) 10. Februar 2016 (2016-02-10) das ganze Dokument -----	1, 3-5, 7, 12-15
X	DE 10 2018 129441 A1 (PRECITEC GMBH & CO KG [DE]) 28. Mai 2020 (2020-05-28) das ganze Dokument -----	1, 3-5, 7, 10, 12, 15
<input type="checkbox"/> Weitere Veröffentlichungen sind der Fortsetzung von Feld C zu entnehmen <input checked="" type="checkbox"/> 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
3. November 2022		11/11/2022
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 Politsch, Erich

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

Internationales Aktenzeichen

PCT/EP2022/072721

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
CN 111426639 A	17-07-2020	KEINE	

CN 103878479 B	10-02-2016	KEINE	

DE 102018129441 A1	28-05-2020	CN 113329836 A	31-08-2021
		DE 102018129441 A1	28-05-2020
		EP 3883715 A1	29-09-2021
		JP 2022509143 A	20-01-2022
		KR 20210091789 A	22-07-2021
		US 2022011726 A1	13-01-2022
		WO 2020104103 A1	28-05-2020
