

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

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum
Internationales Büro

(43) Internationales Veröffentlichungsdatum
30. Juni 2022 (30.06.2022)



(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2022/136367 A1

(51) Internationale Patentklassifikation:

B23K 26/06 (2014.01) B23K 26/073 (2006.01)

HOCHSCHULE AACHEN [DE/DE]; Templergraben 55,
52056 Aachen (DE).

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2021/086983

(72) Erfinder: **HOFMANN, Oskar**; Ludwigsallee 131, 52062
Aachen (DE). **KÖNIG, Georg**; Hanbrucher Str. 23, 52064
Aachen (DE).

(22) Internationales Anmeldedatum:
21. Dezember 2021 (21.12.2021)

(74) Anwalt: **GAGEL, Roland**; Landsberger Str. 480a, 81241
München (DE).

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

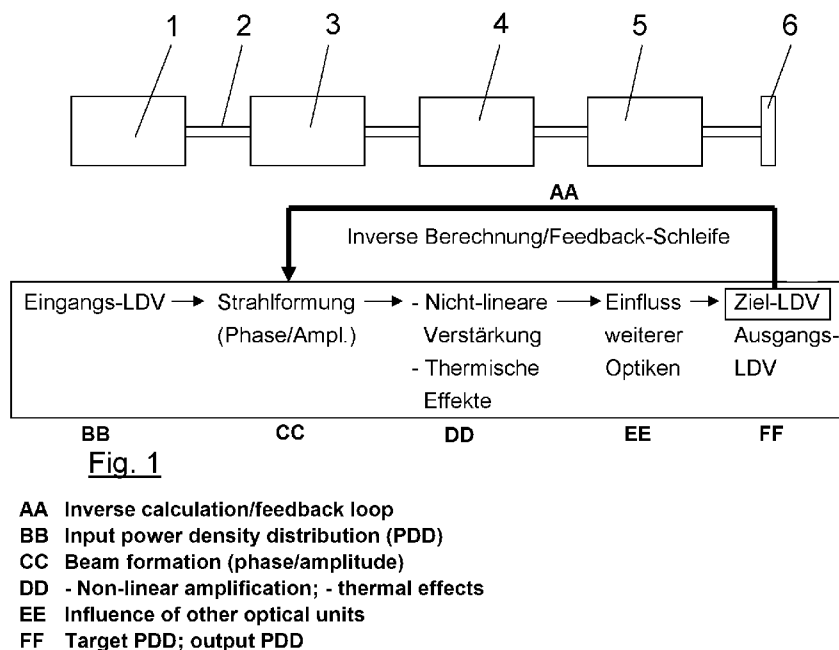
(30) Angaben zur Priorität:
10 2020 134 416.3
21. Dezember 2020 (21.12.2020) DE

(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,

(71) Anmelder: **FRAUNHOFER-GESELLSCHAFT ZUR
FÖRDERUNG DER ANGEWANDTEN FORSCHUNG
E. V.** [DE/DE]; Hansastr. 27c, 80686 München
(DE). **RHEINISCH WESTFÄLISCHE TECHNISCHE**

(54) Title: METHOD FOR SETTING AND/OR DYNAMICALLY ADAPTING THE POWER DENSITY DISTRIBUTION OF
LASER RADIATION

(54) Bezeichnung: VERFAHREN ZUR EINSTELLUNG UND/ODER DYNAMISCHEN ANPASSUNG DER
LEISTUNGSDICHTEVERTEILUNG VON LASERSTRAHLUNG



(57) Abstract: In a method for setting and/or dynamically adapting the power density distribution of laser radiation in a target surface, a laser beam (2) emanating from a laser beam source (1) is first subjected to beam forming in a beam forming device (3) and then amplified in an amplifier assembly (4) and directed onto the target surface. The beam forming device (3) has one or more high-resolution beam forming elements which allow beam forming with more than 500 degrees of freedom. In the proposed method the beam forming device (3) is controlled either on the basis of a simulation previously carried out by means of inverse propagation or on the basis of a comparison of the measured or determined power density distribution in the target surface with the required power density distribution, such that the power density distribution in the target surface is as close as possible to the required power density distribution.



RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, ST, SV, SY, TH, TJ, TM,
TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, WS, ZA, ZM,
ZW.

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

Veröffentlicht:

- mit internationalem Recherchenbericht (Artikel 21 Absatz 3)

(57) Zusammenfassung: Bei einem Verfahren zur Einstellung und/oder dynamischen Anpassung der Leistungsdichteverteilung von Laserstrahlung in einer Zielfläche wird ein von einer Laserstrahlquelle (1) ausgehender Laserstrahl (2) in einer Strahlformungseinrichtung (3) zunächst einer Strahlformung unterworfen und anschließend in einer Verstärkeranordnung (4) verstärkt und auf die Zielfläche gerichtet. Die Strahlformungseinrichtung (3) weist dabei ein oder mehrere hochauflösende Strahlformungselemente auf, die eine Strahlformung von mehr als 500 Freiheitsgraden ermöglichen. Bei dem vorgeschlagenen Verfahren wird die Strahlformungseinrichtung (3) entweder auf Basis einer vorab durchgeführten Simulation mittels inverser Propagation oder auf Basis eines Vergleichs der gemessenen oder bestimmten Leistungsdichteverteilung in der Zielfläche mit der gewünschten Leistungsdichteverteilung so angesteuert, dass die Leistungsdichteverteilung in der Zielfläche der gewünschten Leistungsdichteverteilung möglichst nahekommt.

Verfahren zur Einstellung und/oder dynamischen
Anpassung der Leistungsdichteverteilung von
Laserstrahlung

Technisches Anwendungsgebiet

5 Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren zur Einstellung und/oder dynamischen Anpassung der Leistungsdichteverteilung von Laserstrahlung in einer Zielfläche, bei dem ein von einer Laserstrahlquelle ausgehender Laserstrahl in einer Strahlformungs-
10 einrichtung zunächst einer Strahlformung unterworfen wird und anschließend in einer Verstärkeranordnung verstärkt und auf die Zielfläche gerichtet wird.

 Die Leistungsdichteverteilung eines Laserstrahls
15 kann als wesentlicher Prozessparameter das Bearbeitungsergebnis laserbasierter Bearbeitungsverfahren, wie beispielsweise Laserstrahlschmelzen oder Laserstrahlschweißen, signifikant beeinflussen. Insbesondere ermöglichen prozessangepasste Leistungs-
20 dichteverteilungen eine signifikante Erhöhung der Durchsatzrate und Verbesserungen der Bearbeitungsergebnisse. Darüber hinaus erfordern bei der Laserbearbeitung Änderungen der Vorschubrichtung, der Vorschubgeschwindigkeit, der lokalen Geometrie eines
25 bearbeiteten Werkstücks oder des Einfallswinkels der Laserstrahlung auf dem Werkstück oft eine dynamische Anpassung der Leistungsdichteverteilung während der Bearbeitung, um konstante Bearbeitungsergebnisse zu erzielen.

- 2 -

Stand der Technik

Für eine Einstellung oder Änderung der Leistungsdichte-
verteilung von Laserstrahlung werden Strahl-
formungselemente eingesetzt, über die beispielsweise
5 die Form des Strahlquerschnitts gezielt eingestellt
oder angepasst werden kann. Bei der Integration von
dynamischen Strahlformungselementen in Lasersystemen
lässt sich im Allgemeinen zwischen der Strahlformung im
Laserresonator und der externen Strahlformung
10 unterscheiden.

Die Strahlformung im Laserresonator basiert auf
der Idee, die optischen Elemente im Resonator so
anzupassen, dass sich die gewünschte Leistungsdichte-
15 verteilung als Eigenmode des Resonators einstellt. Dies
kann durch den Einsatz von entsprechenden Strahl-
formungselementen auch dynamisch erfolgen, wie dies
beispielsweise in der CN 107171170 A ausgeführt ist.
Dabei ist die Laserleistung jedoch durch die Zerstör-
20 schwelle der für die Strahlformung verwendeten
optischen Elemente begrenzt. Die im Resonator
zirkulierende Leistung ist zudem oft deutlich höher als
die eigentliche Ausgangsleistung des Lasers.

25 Bei der externen Strahlformung wird die gewünschte
Leistungsdichteverteilung außerhalb des Resonators
eingestellt. Statische oder dynamische Strahlformungs-
elemente werden hier hinter dem Laserresonator und
gegebenenfalls dem sich anschließenden Verstärker zur
30 Phasen- oder Amplituden-Modulation des Laserstrahls
genutzt, um die gewünschte Leistungsdichteverteilung in
der Zielfläche zu erhalten. Da auch hier wieder die
gesamte in der Zielfläche erforderliche Laserleistung

- 3 -

auf das strahlformende Element trifft, ist über die Zerstörschwelle dieser Elemente die Ausgangsleistung der Laseranordnung begrenzt.

5 Bekannte Strahlformungselemente wie z.B. verformbare Spiegel erlauben dynamische Anpassungen der Strahlform bei mehreren Kilowatt Laserleistung. Verformbare Spiegel besitzen jedoch nur bis zu etwa 100 Freiheitsgrade, so dass die Möglichkeiten der
10 Einstellung bzw. Anpassung der Leistungsdichteverteilung stark begrenzt sind. Die Einstellung von komplexen Leistungsdichteverteilungen erfordert demgegenüber mehrere Tausend oder sogar Millionen unabhängiger Freiheitsgrade, z.B. voneinander
15 unabhängige Pixel oder Aktoren, wie sie derzeit nur hochauflösende optische Strahlformungselemente basierend z.B. auf Arrays von Flüssigkristallen oder Mikrospiegeln aufweisen. Diese hochauflösenden Strahlformungselemente sind jedoch bisher auf mittlere
20 Leistungen von etwa 200 Watt oder weniger begrenzt. Sie lassen sich daher für viele moderne laserbasierte Fertigungsverfahren nicht einsetzen, die insbesondere zur Erzielung einer hohen Produktivität Laserleistungen im Bereich mehrerer 100 Watt bis in den Kilowattbereich
25 erfordern.

Es sind auch Laseranordnungen bekannt, bei denen eine Strahlformungseinrichtung zwischen der Laserstrahlquelle und dem Laserverstärker angeordnet
30 ist. Der Laserstrahl wird dabei mittels eines hochauflösenden Strahlformungselementes bei geringer Leistung geformt und erst anschließend mittels einer optischen Verstärkeranordnung auf die Zielleistung

- 4 -

verstärkt. Eine derartige Anordnung ist beispielsweise in S.-W. Bahk et al., „Precompensation of gain nonuniformity in a Nd:glass amplifier using a programmable beam-shaping system“, Optics Communications 2014, 333, Seiten 45 bis 52 beschrieben. Das Ziel dieser Anordnung besteht in einer Optimierung der Verstärkung des Laserstrahls, nicht jedoch in einer gezielten Einstellung oder Anpassung der Leistungsdichteverteilung in der Zielfläche. Auch in T. Zhao et al., „Beam shaping and compensation for high-gain ND:glass amplification“, Journal of Modern Optics 2013, 60(2), Seiten 109 bis 115 ist eine Laseranordnung beschrieben, bei der eine Strahlformungseinrichtung zwischen der Laserstrahlquelle und der optischen Verstärkeranordnung eingesetzt wird. Ziel dieser Anordnung ist die Erzeugung einer möglichst homogenen Leistungsdichteverteilung über eine einfache geometrische Strahlform, die nahezu unverändert durch die gesamte Laseranordnung propagiert. Eine gezielte Einstellung oder dynamische Anpassung komplexer Leistungsdichteverteilungen, d.h. inhomogener oder auch nicht-symmetrischer Verteilungen, in der Zielfläche, die sich bei der Propagation durch die Verstärkeranordnung und die weiteren optischen Elemente stark verändern, ist mit diesen Anordnungen des Standes der Technik nicht möglich.

Die Aufgabe der vorliegenden Erfindung besteht darin, ein Verfahren zur Einstellung und/oder dynamischen Anpassung der Leistungsdichteverteilung von Laserstrahlung in einer Zielfläche anzugeben, mit der auch eine Einstellung oder Anpassung von komplexer

- 5 -

Leistungsdichteverteilungen für die Lasermaterialbearbeitung bei Laserleistungen von mehr als 200 Watt ermöglicht wird.

5

Darstellung der Erfindung

Die Aufgabe wird mit dem Verfahren gemäß Patentanspruch 1 gelöst. Vorteilhafte Ausgestaltungen des Verfahrens sind Gegenstand der abhängigen Patentansprüche oder lassen sich der nachfolgenden Beschreibung sowie den Ausführungsbeispielen entnehmen.

Bei dem vorgeschlagenen Verfahren zur Einstellung und/oder dynamischen Anpassung der Leistungsdichteverteilung von Laserstrahlung in einer Zielfläche wird ein von der Laserstrahlquelle ausgehender Laserstrahl zunächst in einer Strahlformungseinrichtung einer Strahlformung unterworfen. Der Laserstrahl weist dabei in der Ebene der Strahlformungseinrichtung eine erste Leistungsdichteverteilung auf. Anschließend wird der auf diese Weise geformte Laserstrahl in einer Verstärkeranordnung auf eine gewünschte Laserleistung verstärkt und in die Zielfläche gerichtet. Dabei können zusätzlich ein oder mehrere optische Elemente im Strahlengang des Laserstrahls angeordnet sein, beispielsweise zur Fokussierung in die Zielfläche. Die Strahlformungseinrichtung weist dabei eines oder mehrere hochauflösende Strahlformungselemente auf, die eine Strahlformung mit mehr als 500 unabhängigen Freiheitsgraden ermöglichen. Beispiele für derartige hochauflösende Strahlformungselemente sind steuerbare Mikrospiegel-Arrays oder Arrays aus steuerbaren

- 6 -

Flüssigkristallelementen. Zwischen der Laserstrahl-
quelle und der Strahlformungseinrichtung können auch
zusätzliche optische Elemente, beispielsweise zur
Strahlkollimierung, vorhanden sein. Durch die
5 Verstärkung und Propagation durch die Verstärker-
anordnung und ggf. die weiteren optischen Elemente bis
zur Zielfläche verändert sich die erste Leistungs-
dichteverteilung, so dass in der Zielfläche eine zweite
Leistungsdichteverteilung erhalten wird, die sich von
10 der ersten Leistungsdichteverteilung und auch von einer
Leistungsdichteverteilung unterscheidet, die der
Laserstrahl ohne die Verstärkeranordnung und ggf. die
weiteren optischen Elemente in der Zielfläche hätte.
Unterschiede bestehen dabei insbesondere in einer
15 veränderten Strahlform (andere äußere Form des
Strahlquerschnitts) und/oder in einer veränderten
relativen Verteilung der Leistungsdichte über den
Strahlquerschnitt.

20 Diese zweite Leistungsdichteverteilung, die der
Laserstrahl in der Zielfläche aufweist, wird in einer
ersten Alternative des vorgeschlagenen Verfahrens
gemessen oder bestimmt und mit einer jeweils
vorgegebenen bzw. gewünschten Leistungsdichteverteilung
25 verglichen, im Folgenden auch als Ziel-Leistungsdichte-
verteilung bezeichnet. Die Messung der (zweiten)
Leistungsdichteverteilung in der Zielfläche kann dabei
über geeignete bekannte Techniken erfolgen, beispiels-
weise über eine Kamera oder auch durch Auskoppeln eines
30 kleinen Strahlanteils vor der Zielfläche, der dann in
gleichem Abstand von der Auskoppelstelle wie die
Zielfläche mit einem entsprechend auflösenden optischen

- 7 -

Detektor, insbesondere aus einem Array aus Detektorelementen, erfasst wird. Eine Bestimmung der (zweiten) Leistungsdichteverteilung in der Zielfläche kann dadurch erfolgen, dass die Leistungsdichteverteilung in
5 einer oder mehreren anderen Flächen oder Ebenen, also nicht der Zielfläche oder einer dazu analogen Fläche, vermessen wird und aus dieser Messung dann Rückschlüsse auf die Verteilung in der Zielfläche gezogen werden. Die Strahlformungseinrichtung wird dann in dieser
10 ersten Alternative in Abhängigkeit vom Unterschied zwischen der gemessenen Leistungsdichteverteilung und der Ziel-Leistungsdichteverteilung über eine Rückkopplungsschleife derart angesteuert, dass die zweite Leistungsdichteverteilung der Ziel- Leistungsdichte-
15 verteilung möglichst nahe kommt. Die Ansteuerung der Strahlungsformungseinrichtung erfolgt dabei auf Basis von Daten, die durch maschinelles Lernen erhalten werden oder wurden.

20 In einer zweiten Alternative des vorgeschlagenen Verfahrens wird die Strahlformungseinrichtung auf der Basis von vorab theoretisch ermittelten Daten derart angesteuert, dass die zweite Leistungsdichteverteilung der Ziel- Leistungsdichteverteilung möglichst nahe
25 kommt. Die entsprechenden Daten werden bzw. wurden hierbei durch eine Simulation der Strahlpropagation und Verstärkung unter Einsatz inverser Propagation für diese Laseranordnung ermittelt.

30 Bei beiden Alternativen fließen die Eigenschaften der Verstärkeranordnung und ggf. optischen Elemente sowie die Verstärkungsbedingungen, insbesondere Verstärkungsfaktor und Temperaturverhalten, in die

- 8 -

Daten für die Ansteuerung des Strahlformungseinrichtung ein.

Durch die Strahlformung vor der Verstärkung ist
5 die Laserleistung in der Strahlformungseinrichtung bzw.
auf dem Strahlformungselement ausreichend gering, um
ein hochauflösendes Strahlformungselement mit einer
ausreichend großen Anzahl an Freiheitsgraden einsetzen
zu können. Die in der Zielfläche gewünschte Laser-
10 leistung wird erst anschließend über die Verstärker-
anordnung erzielt. Durch explizite Berücksichtigung der
Veränderung der Leistungsdichteverteilung bei der
Verstärkung und durch die zwischen der Strahlformungs-
einrichtung und der Zielfläche ggf. liegenden optischen
15 Elemente kann die Strahlformung in der Strahlformungs-
einrichtung so erfolgen, dass in der Zielfläche die
gewünschte Leistungsdichteverteilung erhalten wird. Der
komplexe Zusammenhang zwischen der (ersten) Leistungs-
dichteverteilung an der Strahlformungseinrichtung und
20 der (zweiten) Leistungsdichteverteilung in der
Zielfläche wird entweder durch Einsatz der Technik des
maschinellen Lernens oder durch eine Simulation der
Verhältnisse mittels inverser Propagation aufgelöst.
Damit lassen sich mit dem vorgeschlagenen Verfahren
25 komplexe Leistungsdichteverteilungen in der Zielfläche
auch bei hohen Laserleistungen gezielt einstellen und
auch dynamisch anpassen.

Das vorgeschlagene Verfahren ist unabhängig von
30 der verwendeten Laserstrahlquelle, der eingesetzten
Verstärkeranordnung und den weiteren optischen
Elementen im Strahlengang. Der Einfluss dieser
Komponenten sowie der Betriebsparameter auf die

- 9 -

Leistungsdichteverteilung des propagierenden Laserstrahls wird bei der Nutzung eines maschinellen Lernprozesses automatisch berücksichtigt. Bei der Nutzung einer Simulation werden die Eigenschaften
5 dieser Komponenten und der damit verbundene Einfluss auf die Leistungsdichteverteilung bei den gewählten Betriebsparametern explizit bei der Simulation berücksichtigt. Hierzu stehen geeignete Simulations-
tools zur Verfügung, mit denen die Propagation eines
10 Laserstrahls beliebiger Leistungsdichteverteilung durch optische Elemente und auch durch einen optischen Verstärker simuliert werden kann. Bei der Simulation muss die Eingangs-Leistungsdichteverteilung, die der Laserstrahl an der Strahlformungseinrichtung aufweist,
15 bekannt sein. Diese kann entweder gemessen werden oder ist für die verwendete Laserstrahlquelle bereits bekannt.

Bei Nutzung eines maschinellen Lernprozesses wird
20 vorzugsweise ein neuronales Netzwerk oder ein evolutionärer bzw. genetischer Algorithmus eingesetzt. Das Training wird dabei vorzugsweise mit der Laseranordnung durchgeführt, die auch für die jeweilige Laserbearbeitung eingesetzt wird und mit der das
25 vorgeschlagene Verfahren zum Einsatz kommen soll. Der maschinelle Lernprozess wird beim vorgeschlagenen Verfahren vor dem Einsatz der Laseranordnung für die Laserbearbeitung durchgeführt. Die dabei gewonnenen Daten oder der entsprechend trainierte Algorithmus
30 werden bzw. wird dann bei der Durchführung des vorgeschlagenen Verfahrens für die Steuerung der Strahlformungseinrichtung eingesetzt.

- 10 -

Bei Nutzung der Simulation erfolgt diese Simulation ebenfalls vorab, d.h. vor dem Einsatz der jeweiligen Laseranordnung für die Laserbearbeitung. Die bei dieser Simulation erhaltenen Daten werden dann
5 wiederum während des Verfahrens zur Steuerung der Strahlformungseinrichtung eingesetzt.

Das vorgeschlagene Verfahren lässt sich sehr vorteilhaft für alle Laser-basierten Material-
10 bearbeitungsverfahren anwenden, die Laserleistungen benötigen, die über der Zerstörschwelle von hochauflösenden Strahlformungselementen liegen. Auch für andere Anwendungen, bei denen eine bestimmte Leistungsdichteverteilung in einer Zielfläche bei hoher
15 Laserleistung erreicht werden soll, kann das vorgeschlagene Verfahren eingesetzt werden.

Kurze Beschreibung der Zeichnungen

20 Das vorgeschlagene Verfahren wird nachfolgend anhand von Ausführungsbeispielen in Verbindung mit den Zeichnungen nochmals näher erläutert. Hierbei zeigen:

Fig. 1 eine schematische Darstellung der
25 Durchführung des vorgeschlagenen Verfahrens;

Fig. 2 ein erstes Beispiel einer mit dem Verfahren erzeugbaren Leistungsdichteverteilung; und

30 Fig. 3 ein zweites Beispiel einer mit dem Verfahren erzeugbaren Leistungsdichteverteilung.

- 11 -

Wege zur Ausführung der Erfindung

Das vorgeschlagene Verfahren ermöglicht eine hochdynamische Laserstrahlformung bei hohen Laserleistungen (>100 W). Figur 1 zeigt eine schematische Darstellung einer Laseranordnung zur Lasermaterialbearbeitung sowie der Vorgehensweise bei der Durchführung des vorgeschlagenen Verfahrens. Die Laseranordnung umfasst dabei eine Laserstrahlquelle 1, die einen Laserstrahl 2 mit einer bekannten Leistungsdichte-
5 Verteilung (LDV) emittiert. Der Laserstrahl 2 wird in einer Strahlformungseinrichtung 3 einer Strahlformung durch ortsabhängige Veränderung von Phase und/oder Amplitude über den Strahlquerschnitt unterworfen. Der Laserstrahl 2 weist hierbei in der
10 Ebene der Strahlformungseinrichtung 3 die Eingangs-Leistungsdichte-Verteilung auf, in der vorliegenden Patentanmeldung auch als erste Leistungsdichte-Verteilung bezeichnet. Der aus der Strahlformungseinrichtung 3 austretende Laserstrahl wird anschließend
15 in der optischen Verstärkeranordnung 4, die einen oder mehrere optische Verstärker für den Laserstrahl aufweist, auf eine gewünschte Ziel-Laserleistung verstärkt, die für die Materialbearbeitung an einem Werkstück 6 erforderlich ist. Zwischen der Verstärker-
20 anordnung 4 und dem Werkstück 6 sind eine oder mehrere weitere optische Elemente 5 angeordnet, mit denen der Laserstrahl beispielsweise in die Zielfläche auf dem Werkstück 6 fokussiert werden kann.

30 Bei dem vorgeschlagenen Verfahren findet die Strahlformung in der Strahlformungseinrichtung 3 vor einer Verstärkung des Laserstrahls 2 statt. In der Strahlformungseinrichtung 3 wird ein (oder auch

- 12 -

mehrere) hochauflösendes Strahlformungselement ($>> 100$ Freiheitsgrade) verwendet, das bei der Ziel-Laserleistung am Werkstück 6, insbesondere aufgrund zu geringer Zerstörschwellen, nicht verwendet werden
5 könnte. Durch dieses Strahlformungselement wird die bekannte Eingangs-Leistungsdichteverteilung des Laserstrahls 2 in Phase und/oder Amplitude geändert bzw. angepasst. Die Leistungsdichteverteilung am Strahlformungselement ist dabei im Allgemeinen noch
10 deutlich verschieden von der Leistungsdichteverteilung, in der vorliegenden Patentanmeldung auch als zweite Leistungsdichteverteilung bezeichnet, die in der Zielfläche am Werkstück 6 auftritt. In der Laseranordnung wird der Strahl nach der Strahlformungs-
15 einrichtung 3 in einer optischen Verstärkeranordnung 4 auf die Zielleistung verstärkt. Die Propagation durch die Verstärkeranordnung 4, nicht-lineare Verstärkung und thermische Effekte im Verstärker haben dabei einen erheblichen Einfluss auf die Leistungsdichteverteilung
20 des durch die Verstärkeranordnung propagierenden Laserstrahls. Hinter dem Verstärker bzw. der Verstärkeranordnung 4 unterscheidet sich die Leistungsdichteverteilung des verstärkten Laserstrahls somit nicht-trivial von der Leistungsdichteverteilung vor dem
25 Verstärker, im Allgemeinen aber auch noch von der zweiten Leistungsdichteverteilung in der Zielfläche. Weitere optische Komponenten, insbesondere Standard-Komponenten zur Anpassung der Größe der Leistungsdichteverteilung, der Positionierung in der Zielfläche
30 oder der Fokussierung des Laserstrahls, und die Propagation in die Zielfläche beeinflussen die Leistungsdichteverteilung zusätzlich. Zur Realisierung einer gewünschten Ziel-Leistungsdichteverteilung in der

- 13 -

Zielfläche müssen diese Einflüsse bei der ursprünglichen Strahlformung in der Strahlformungseinrichtung 3 berücksichtigt werden.

5 Dies erfolgt beim vorgeschlagenen Verfahren messbasiert unter Einsatz von maschinellem Lernen oder simulationsbasiert. Bei der messbasierten Technik wird die Leistungsdichteverteilung in der Zielfläche – oder einer dazu äquivalenten Fläche – vermessen. Dies kann
10 bspw. mit einem örtlich hochauflösenden Detektor mit einem Array von Detektorelementen erfolgen. Basierend auf dem Unterschied zwischen gemessener (zweiter) Leistungsdichteverteilung und gewünschter Ziel-Leistungsdichteverteilung wird dann die Strahlformung
15 in der Strahlformungseinrichtung 3 so angepasst, dass die zweite Leistungsdichteverteilung der Ziel-Leistungsdichteverteilung möglichst nahe kommt. Dies erfolgt bei der messbasierten Technik in einer geeigneten Rückkopplungs-Schleife, wie dies im unteren
20 Teil der Figur 1 schematisch angedeutet ist.

 Die für die Ansteuerung der Strahlformungseinrichtung 3 erforderlichen Daten werden bei der simulationsbasierten Technik mit Hilfe einer vorab
25 durchgeführten Simulation erhalten. Hierbei wird in einer Simulationsumgebung der Einfluss aller optischen Komponenten einschließlich des laseraktiven Mediums des Verstärkers der Verstärkeranordnung bei den jeweils gewählten Betriebsparametern und der Propagation
30 zwischen den Komponenten hinterlegt. Die zur Annäherung der zweiten Leistungsdichteverteilung an die Ziel-Leistungsdichteverteilung jeweils erforderliche Strahlformung in der Strahlformungseinrichtung 3 wird

- 14 -

dabei durch Simulation der inversen Propagation des Laserstrahls von der Zielfläche durch das optische System zur Strahlformungseinrichtung 3 erhalten. Da eine Leistungsdichteverteilung einen Laserstrahl nicht
5 eindeutig bestimmt (die Phasen-Information ist nicht enthalten) ist in der Regel ein iterativer Ansatz nötig, um eine geeignete Lösung zu finden. So gibt eine Leistungsdichteverteilung z.B. nicht vor, ob der Laserstrahl gerade konvergiert oder divergiert. Bei
10 einem gegebenen optischen System und einer gegebenen Zielfläche ist jedoch im Allgemeinen nur eines von beiden möglich. Bei der vorgeschlagenen Simulation erfolgt daher die Bestimmung einer geeigneten Lösung bzw. der für die Ansteuerung der Strahlformungseinrichtung 3 erforderlichen Daten durch iterative
15 Vorwärts- und Rückwärtspropagationen, die auf ein Ergebnis konvergieren.

In einem konkreten Beispiel der Bestimmung der benötigten Strahlformung an der Strahlformungseinrichtung, beispielsweise in Form einer Phasenmaske für ein LCoS-Strahlformungselement (LCoS: Liquid Crystal on Silicon), werden beispielsweise folgende Schritte zur Simulation durchgeführt:

25

- 1) Bestimmung/Auswahl einer Startphase (zufällige Phase, einfache Rückpropagation der Zielverteilung oder Phase aus geometrischer/analytischer Berechnung).
- 30 2) Numerische wellenoptische Simulation der Vorwärtspropagation des Eingangsstrahls mit der Startphase durch das gesamte optische System. Dies beinhaltet die Simulation der Propagation zwischen

- 15 -

- allen optischen Elementen und die Propagation durch die optischen Elemente inklusive z.B. nicht-linearer Verstärkungen in optischen Verstärkern und thermischen Linsen und die Abschattung an Blenden.
- 5 3) Vergleich der simulierten Leistungsdichteverteilung in der Zielfläche mit der Ziel-Leistungsdichteverteilung. Bei ausreichender Übereinstimmung wurde die Phasenmaske erfolgreich bestimmt.
- 10 4) Ersetzen der Intensität bzw. Amplitude des simulierten Strahls in der Zielfläche mit der Ziel-Leistungsdichteverteilung unter Beibehaltung der simulierten Phasen.
- 5) Rückpropagation des in 4) bestimmten Strahls durch das optische System (vgl. 2)).
- 15 6) Ersetzen der Intensität bzw. Amplitude des simulierten Strahls in der Startebene mit der Leistungsdichteverteilung des Eingangsstrahls unter Beibehaltung der simulierten Phasen.
- 20 7) Nächster Iterationsschritt (ab 2)) bis eine festgelegte Anzahl an Iterationsschritten durchgeführt wurde oder eine Abbruchbedingung erreicht wurde (vgl. 3)).

Diese Simulation kann mit bekannten öffentlich
25 verfügbaren Simulationstools durchgeführt werden, wie bspw. VirtualLab Fusion der Firma LightTrans.

Optional können auch noch Schritte durchgeführt werden, um die Übereinstimmung von Simulation und
30 Experiment zu verbessern und/oder die Konvergenz der Simulation zu beschleunigen. Zu diesen Schritten gehört eine Überkompensation der Zielintensität, die für die Rückpropagation verwendet wird. In Bereichen mit zu

- 16 -

wenig Licht wird dabei mehr Licht erzwungen als eigentlich benötigt wird und umgekehrt. Weiterhin kann eine Berücksichtigung des Übersprechens des LCoS (gegenseitige Beeinflussung von benachbarten Pixeln) 5 sowie eine Berücksichtigung der Phasen-abhängigen Absorption eines LCoS erfolgen.

Bei einer Lösung auf Basis des maschinellen Lernens kann beispielsweise ein künstliches neuronales 10 Netzwerk eingesetzt werden. Die Bestimmung des jeweils nächsten Schrittes in der Rückkopplungs-Schleife für ein entsprechendes optisches System ist aufgrund der hohen Anzahl an Freiheitsgraden und der hohen Nicht-Linearität des Zusammenhangs zwischen Input und Output 15 nicht trivial. Ein neuronales Netzwerk kann direkt an der eingesetzten Laseranordnung beispielsweise mit einer Auswahl an Testbildern der jeweils erzeugen Leistungsdichteverteilung trainiert werden. Damit berücksichtigt das neuronale Netzwerk auch direkt alle 20 bekannten und unbekannten Imperfektionen des optischen Systems der Laseranordnung, wie z.B. Fehlstellen und optische bzw. mechanische Toleranzen.

Mit dem vorgeschlagenen Verfahren lassen sich 25 komplexe Leistungsdichteverteilungen erzeugen, wie sie beispielsweise in den Figuren 2 und 3 dargestellt sind. Figur 2 zeigt hierzu eine Leistungsdichteverteilung in der Zielfläche, die einem rechteckigen Top-Hat mit dreieckigem Ausschnitt entspricht. Eine derartige 30 Leistungsdichteverteilung lässt sich mit dem vorgeschlagenen Verfahren beispielsweise aus einem

- 17 -

Gauß-förmigen rotationssymmetrischen Eingangsstrahlprofil erzeugen und ist insbesondere für effektives Laserpolieren von Vorteil.

5 Figur 3 zeigt ein weiteres Beispiel einer komplexen Leistungsdichteverteilung in der Zielfläche, wie sie mit dem vorgeschlagenen Verfahren erzeugt werden kann. Diese Leistungsdichteverteilung wird auch als Lasersessel bezeichnet, da die Intensitäts-
10 verteilung in dem dargestellten Diagramm an die Form eines Sessels erinnert. Mit einer derartigen Leistungsdichteverteilung lässt sich beispielsweise beim Laserhärten eine homogene Temperaturverteilung auf dem Werkstück erzeugen.

15 Das vorgeschlagene Verfahren ermöglicht eine flexible und dynamische Erzeugung von Applikationsangepassten Leistungsdichteverteilungen bei Laserleistungen, die die Zerstörschwelle der zur Formung der
20 Laserstrahlung verwendeten Strahlformungselemente übersteigen. Dadurch kann der Zielkonflikt bei der dynamischen Laserstrahlformung zwischen nutzbarer Laserleistung und der Anzahl der Freiheitsgrade aufgelöst werden. Die Berücksichtigung von beliebigen
25 optischen Elementen und Propagationsdistanzen, sowohl in einem simulationsbasierten Verfahren als auch in einem messbasierten Verfahren auf Basis des maschinellen Lernens, ermöglicht die Nutzung von nahezu beliebigen Leistungsdichteverteilungen in flexibel
30 gestaltbaren optischen Systemen.

Bezugszeichenliste

	1	Laserstrahlquelle
5	2	Laserstrahl
	3	Strahlformungseinrichtung
	4	Verstärkeranordnung
	5	weitere optische Elemente
	6	Werkstück
10		

Patentansprüche

1. Verfahren zur Einstellung und/oder dynamischen Anpassung der Leistungsdichteverteilung von Laserstrahlung in einer Zielfläche, bei dem ein
- 5 von einer Laserstrahlquelle (1) ausgehender Laserstrahl (2) in einer Strahlformungseinrichtung (3) zunächst einer Strahlformung unterworfen wird und anschließend in einer Verstärkeranordnung (4) verstärkt und auf die Zielfläche gerichtet wird,
- 10 wobei
- die Strahlformungseinrichtung (3) mit einem oder mehreren hochauflösenden Strahlformungselementen eingesetzt wird, die eine Strahlformung mit mehr als 500 Freiheitsgraden ermöglichen, und
 - 15 - die Strahlformungseinrichtung (3) derart angesteuert wird, dass eine zweite Leistungsdichteverteilung, die der Laserstrahl (2) in der Zielfläche aufweist, einer vorgegebenen Leistungsdichteverteilung möglichst nahe kommt,
 - 20 und wobei
 - entweder die Ansteuerung der Strahlformungseinrichtung auf Basis von Daten erfolgt, die durch eine Simulation unter Einsatz inverser Propagation erhalten werden oder wurden,
 - 25 - oder die zweite Leistungsdichteverteilung gemessen oder bestimmt und mit der jeweils vorgegebenen Leistungsdichteverteilung verglichen wird, und die Ansteuerung der Strahlformungseinrichtung (3) über eine Rückkopplungsschleife auf
 - 30 Basis eines Unterschieds der jeweils vorgegebenen

- 20 -

Leistungsdichteverteilung und der gemessenen oder bestimmten zweiten Leistungsdichteverteilung und von Daten erfolgt, die durch maschinelles Lernen erhalten werden oder wurden.

5

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass für das maschinelle Lernen ein neuronales Netzwerk eingesetzt wird.

10

3. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass für das maschinelle Lernen ein evolutionärer oder genetischer Algorithmus verwendet wird.

15

4. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Simulation mittels iterativer Vorwärts- und Rückwärtspropagation erfolgt.

20

5. Verfahren nach Anspruch 1 oder 4, dadurch gekennzeichnet, dass bei der Simulation die Propagation und Verstärkung des Laserstrahls (2) durch die Verstärkeranordnung (4) berücksichtigt wird.

25

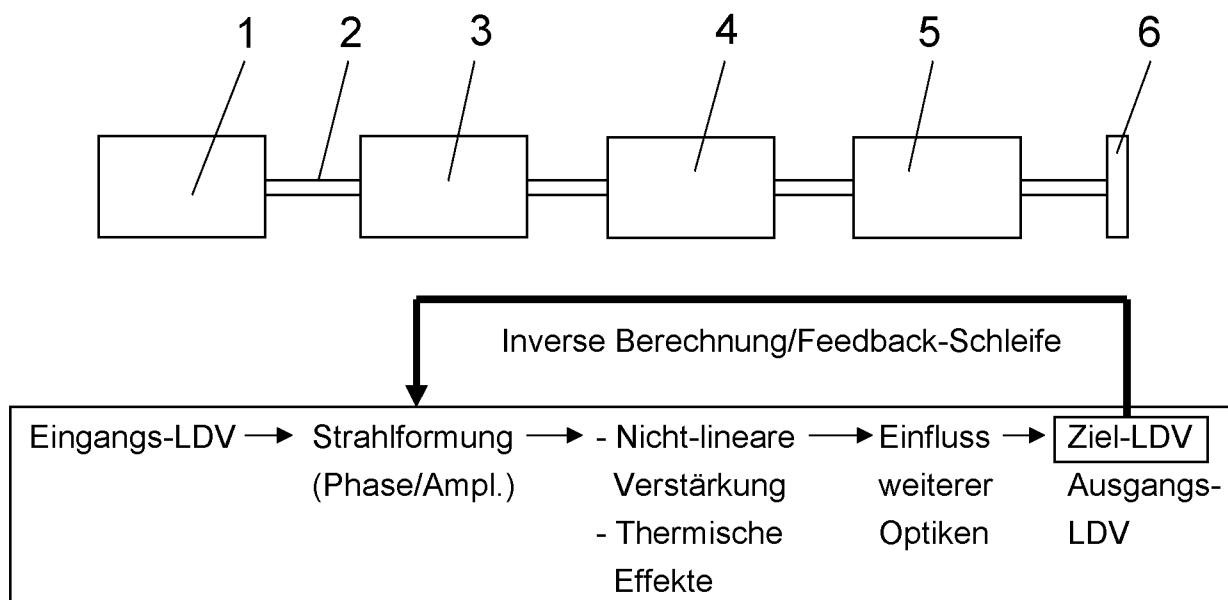
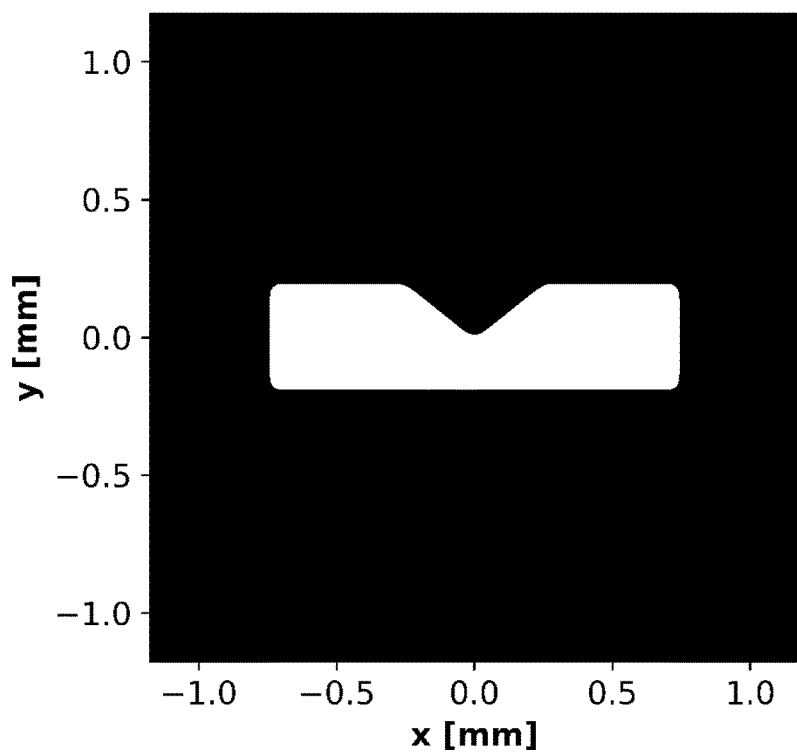
6. Verfahren nach Anspruch 1 oder 4, dadurch gekennzeichnet, dass zusätzlich ein oder mehrere optische Elemente (5) zwischen der Laserstrahlquelle (1) und der Zielfläche angeordnet sind und bei der Simulation die Propagation und Verstärkung des Laserstrahls (2) durch die Verstärkeranordnung (4) und die

30

- 21 -

Propagation durch das eine oder die mehreren optischen Elemente (5) berücksichtigt werden.

7. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3,
5 dadurch gekennzeichnet,
dass das maschinelle Lernen mit der gleichen Anlage bestehend aus der Laserstrahlquelle (1), der Strahlformungseinrichtung (3), der Verstärkeranordnung (4) und gegebenenfalls einem
10 oder mehreren optischen Elementen (5) erfolgt, die auch für die Einstellung und/oder dynamische Anpassung der Leistungsdichteverteilung eingesetzt wird.
- 15 8. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 7, dadurch gekennzeichnet,
dass als hochauflösende Strahlformungselemente Arrays aus Flüssigkristallen oder Mikrospiegeln
20 verwendet werden.

Fig. 1Fig. 2

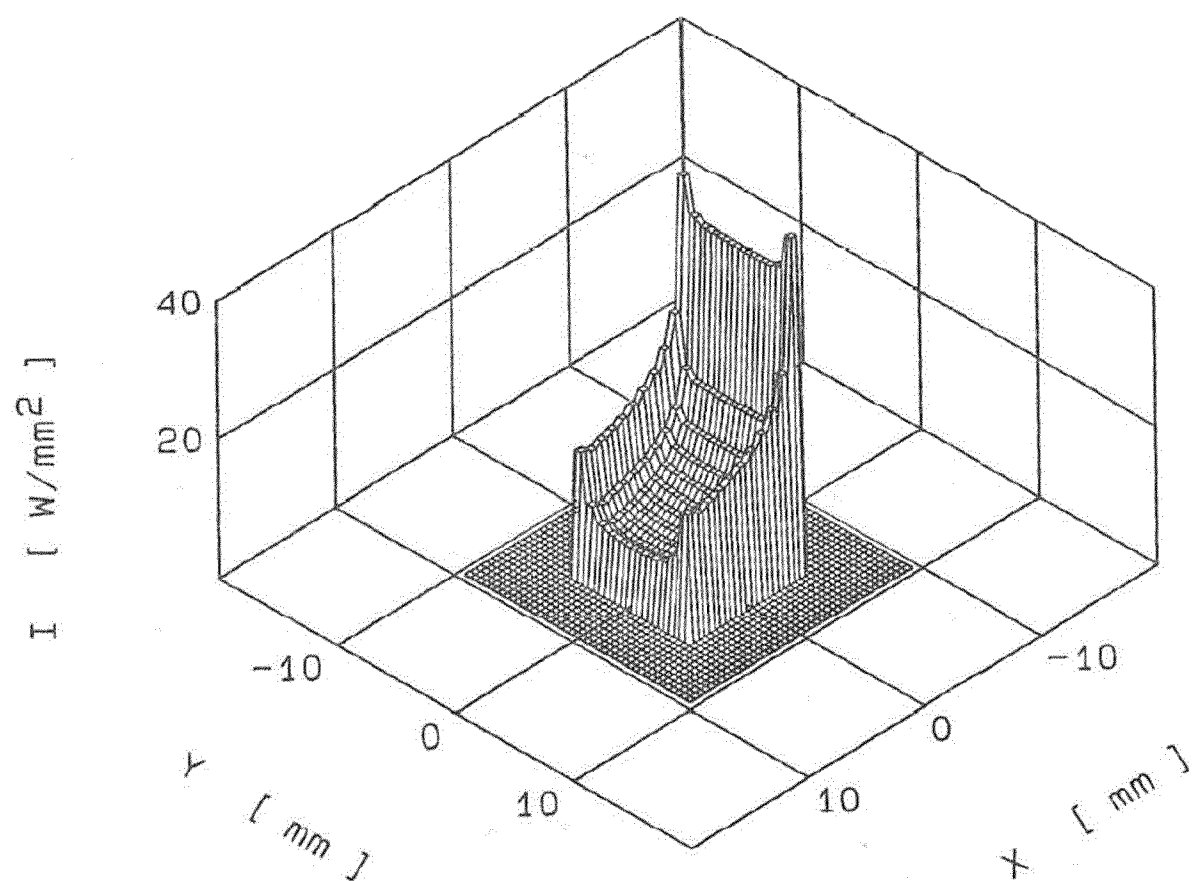


Fig. 3

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/EP2021/086983**A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER****B23K 26/06**(2014.01)i; **B23K 26/073**(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.
Y	US 2011292157 A1 (GHAURI FARZAN [US]) 01 December 2011 (2011-12-01) figures	1-8
Y	US 2015219937 A1 (MATSUMOTO NAOYA [JP] ET AL) 06 August 2015 (2015-08-06) paragraph [0055]	1
Y	US 2017270434 A1 (TAKIGAWA HIROSHI [JP] ET AL) 21 September 2017 (2017-09-21) paragraph [0136] - paragraph [0141]; figures	2-8



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

04 April 2022

Date of mailing of the international search report

13 April 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

Caubet, J

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/EP2021/086983

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
US	2011292157	A1	01 December 2011	JP	6005644	B2	12 October 2016
				JP	2013535339	A	12 September 2013
				MY	166120	A	24 May 2018
				US	2011292157	A1	01 December 2011
				US	2015210084	A1	30 July 2015
				US	2015210085	A1	30 July 2015
				WO	2012044400	A1	05 April 2012
US	2015219937	A1	06 August 2015	CN	104620163	A	13 May 2015
				DE	112012006900	T5	28 May 2015
				KR	20150056546	A	26 May 2015
				US	2015219937	A1	06 August 2015
				WO	2014041660	A1	20 March 2014
US	2017270434	A1	21 September 2017	CN	107199397	A	26 September 2017
				DE	102017105224	A1	21 September 2017
				JP	6625914	B2	25 December 2019
				JP	2017164801	A	21 September 2017
				US	2017270434	A1	21 September 2017

A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES

INV. B23K26/06 B23K26/073

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.
Y	US 2011/292157 A1 (GHAURI FARZAN [US]) 1. Dezember 2011 (2011-12-01) Abbildungen -----	1-8
Y	US 2015/219937 A1 (MATSUMOTO NAOYA [JP] ET AL) 6. August 2015 (2015-08-06) Absatz [0055] -----	1
Y	US 2017/270434 A1 (TAKIGAWA HIROSHI [JP] ET AL) 21. September 2017 (2017-09-21) Absatz [0136] - Absatz [0141]; Abbildungen -----	2-8



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

4. April 2022

Absendedatum des internationalen Recherchenberichts

13/04/2022

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

Caubet, J

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

Internationales Aktenzeichen

PCT/EP2021/086983

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
US 2011292157 A1	01-12-2011	JP 6005644 B2	12-10-2016
		JP 2013535339 A	12-09-2013
		MY 166120 A	24-05-2018
		US 2011292157 A1	01-12-2011
		US 2015210084 A1	30-07-2015
		US 2015210085 A1	30-07-2015
		WO 2012044400 A1	05-04-2012

US 2015219937 A1	06-08-2015	CN 104620163 A	13-05-2015
		DE 112012006900 T5	28-05-2015
		KR 20150056546 A	26-05-2015
		US 2015219937 A1	06-08-2015
		WO 2014041660 A1	20-03-2014

US 2017270434 A1	21-09-2017	CN 107199397 A	26-09-2017
		DE 102017105224 A1	21-09-2017
		JP 6625914 B2	25-12-2019
		JP 2017164801 A	21-09-2017
		US 2017270434 A1	21-09-2017
