

(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. September 2021 (30.09.2021)



(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2021/190851 A1

(51) Internationale Patentklassifikation:
B25J 9/16 (2006.01)

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2021/054672

(22) Internationales Anmeldedatum:
25. Februar 2021 (25.02.2021)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:
20165618.8 25. März 2020 (25.03.2020) EP

(71) Anmelder: SIEMENS AKTIENGESellschaft
[DE/DE]; Werner-von-Siemens-Straße 1, 80333 München
(DE).

(72) Erfinder: DENNELER, Stefan; Bruderhofstr. 3, 81371
München (DE). GIGLER, Alexander Michael; Brecht-
straße 26, 86836 Untermeitingen (DE). FELKEL, Dia-
na; Wilhelmsruher Damm 14, 13158 Berlin (DE). FOR-
STER, Frank; Leutholdstr. 12, 81739 München (DE). LIPP,
Christian; Lämmersreut 27, 94065 Waldkirchen (DE).
MAIS, Stephan; Zaunkönigweg 8, 14656 Brieselang (DE).

PAUST, Tobias; Maximilianstraße 30, 89340 Leipheim
(DE).

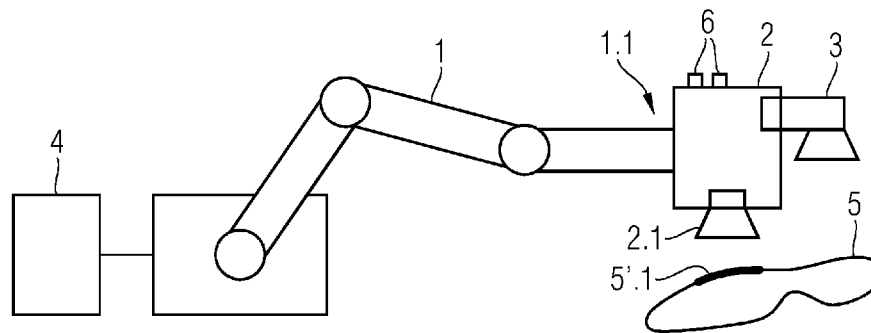
(81) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für
jede verfügbare nationale Schutzrechtsart): AE, AG, AL,
AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY,
BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM,
DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT,
HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, IT, JO, JP, KE, KG, KH,
KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA,
MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI,
NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU,
RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, ST, SV, SY, TH, TJ, TM,
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,

(54) Title: HYPERSPECTRAL SURFACE SCANNING OF A BODY

(54) Bezeichnung: HYPERSPEKTRALE OBERFLÄCHENABTASTUNG EINES KÖRPERS

FIG 1



(57) Abstract: The invention specifies an arrangement for the hyperspectral surface scanning of a body (5), having: - a robot arm (1),
- a hyperspectral detection device (2) arranged at the first end (1.1) of the robot arm (1), - a lighting device (3) arranged at the first
end (1.1) of the robot arm (1), and - a control and computing unit (4) which is configured to move the first end (1.1) of the robot arm
(1) along previously determined trajectories such that a predefined surface region (5.1) of the body (5) is hyperspectrally scanned. The
invention also relates to an associated method for the hyperspectral surface scanning of the body (5).

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung gibt eine Anordnung zur hyperspektralen Oberflächenabtastung eines Körpers (5), aufweisend:
- einen Roboterarm (1), - eine an dem ersten Ende (1.1) des Roboterarms (1) angeordnete hyperspektrale Detektionsvorrichtung (2),
- eine an dem ersten Ende (1.1) des Roboterarms (1) angeordnete Beleuchtungsvorrichtung (3) und - eine Steuer- und Recheneinheit
(4), die eingerichtet ist, das erste Ende (1.1) des Roboterarms (1) derart entlang vorab ermittelter Trajektorien zu bewegen, dass ein
vorbestimmter Oberflächenbereich (5.1) des Körpers (5) hyperspektral abgetastet wird. Ein zugehöriges Verfahren zur hyperspektralen
Oberflächenabtastung des Körpers (5) wird ebenfalls angegeben.

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]



WO 2021/190851 A1

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)

Beschreibung

Hyperspektrale Oberflächenabtastung eines Körpers

5 GEBIET DER ERFINDUNG

Die Erfindung betrifft eine Anordnung und ein Verfahren zur hyperspektralen Oberflächenabtastung eines Körpers. Durch die Erfindung kann jede beliebige Freiform spektral abgetastet
10 werden. Im gesamten Kontext der Erfindung wird unter „hyperspektral“ der Übersichtlichkeit halber auch „multispektral“ verstanden.

HINTERGRUND DER ERFINDUNG

15

Der Schlüssel moderner Spektroskopie liegt in der orts aufgelösten Dechiffrierung der im reflektierten oder absorbierten Licht enthaltenen Informationen. Dies wird durch die Technik des „Hyperspectral Imaging“ (HSI) ermöglicht, eine Art Zeilenkamera, mit der typischerweise im sichtbaren als auch im nahen Infrarotbereich durch Bewegung des Objektes oder der Kamera vollständig spektral aufgelöste Bilder erzeugt werden können. Je nach Arbeitsabstand und verwendetem Objektiv können km² oder aber µm² große Bereiche untersucht werden.

25

Bei sehr kostenintensiven Formen in der initialen Fertigung, z.B. komplexe Gusskörper, bieten sich Wiederaufarbeitungsverfahren zur Verlängerung der Nutzungsdauer der teuren Strukturen an. Vor dem erneuten Aufbau der Oberflächenbeschichtungen erfolgt daher eine vollständige Entschichtung der Struktur.
30

Im Zuge der Verbreitung des 3D Drucks und der adaptiven Fertigung sind jedoch Körper und Bauteile in jeder denkbaren Geometrie möglich, die sogenannte Freiform Geometrie, die viele neue Möglichkeiten bietet.
35

In bekannten Prozessen der Oberflächenbeschichtung oder -entschichtung werden Oberflächen nur dann automatisiert bear-

beitet, wenn die Geometrie der zu bearbeiteten Oberfläche bekannt ist und sie durch das Prozessgerät erreichbar ist. Zur Erkennung und Quantifizierung der Oberflächenmaterialien kann z.B. die Methode des „Hyperspectral Imaging (HSI)“ (= hyperspektrale Bildgebung) genutzt werden. Zumeist handelt es sich bei diesen Abbildungsgeräten um zeilenweise Rasterverfahren, bei denen der Materialkontrast entlang einer Linie bei einem festen Fokus in Form von Reflexionsspektren aufgenommen wird.

10 Auf Grund der Zerstörungsfreiheit der Methode bietet sich die HSI grundsätzlich für den Nachweis von Oberflächenveränderungen oder auch Rückständen nach oder während eines Entschichtungsprozesses an. Ebenso ermöglicht die HSI die Erkennung und Lokalisierung von Kontaminationen vor Beschichtungs-
15 schritten. In der europäischen Offenlegungsschrift EP 1 598 121 A2 wird ein laserbasierter Entschichtungsprozess exemplarisch beschrieben.

Das Untersuchen eines Körpers in Freiform führt hierbei allerdings zu Herausforderungen bezüglich der Robustheit und der Zuverlässigkeit der HSI-Messung, da es eine herkömmliche Regelung auf die Parameter, wie Bewegung entlang der Freiform, Abstand zu dieser und zugelassener Winkelbereich, in automatisierter Form derzeit nicht gibt. Die abbildende Hyperspektralkamera muss stets in einem optimalen Fokus-Abstand und in der optimalen Orientierung zum untersuchten Objekt geführt werden.

Die Bewegung entlang der Freiform lässt sich bis heute nicht automatisiert bewerkstelligen. Um die Visualisierung zuverlässig zu erreichen, muss der Abstand im Bereich der Fokusedynamik bleiben. Die Hyperspektralkamera sollte möglichst senkrecht zu der Oberfläche sein. Eine Ausleuchtung der Oberfläche ist nicht im geeigneten Winkel zur Detektion und nicht adaptiv gegenüber der Freiform möglich.

Das Problem wird bisher dadurch gelöst, dass manuell oder im besten Fall halbautomatisiert an die Oberfläche herangefahren

wird, und unter nicht optimalen Bedingungen – z.B. Kompromiss bei Fokus, Orientierung etc. – die Bestimmung der Oberflächenbeschaffenheit durchgeführt wird.

5 Das Problem wird auch dadurch gelöst, dass die Form des Bauteils auf die herkömmlichen Möglichkeiten der Bearbeitung angepasst wurde, und dadurch die Bearbeitung automatisiert durchgeführt werden kann; jedoch auf Kosten der optimalen Geometrie und daraus folgend durch Erzeugen von zusätzlichen
10 Materialkosten und einem suboptimalen Betrieb der Erzeugnisse. Ferner dauert das Verfahren dann deutlich länger.

Das Problem wurde oft auch nicht betrachtet und dadurch wurden Einbußen in Bearbeitungsgenauigkeit, Bauteilzuverlässigkeit und -haltbarkeit in Kauf genommen.
15

Manuelle Materialbearbeitung nach einer meist thermischen oder chemischen Kontrastierung der Oberflächen, wie es heutzutage beispielsweise beim Prozess des „Turbine-Blade-
20 Refurbishment“ durchgeführt wird, sind bekannt.

In der Offenlegungsschrift DE 10 2018 128 993 A1 wird das spektroskopische Messverfahren, insbesondere auch die Verwendung einer Hyperspektralkamera, beispielhaft beschrieben.
25

ZUSAMMENFASSUNG DER ERFINDUNG

Es ist Aufgabe der Erfindung, eine Lösung anzugeben, durch die die Oberflächenbeschaffenheit eines Körpers nach einer
30 Entschichtung einfach überprüft werden kann.

Die Erfindung ergibt sich aus den Merkmalen der unabhängigen Ansprüche. Vorteilhafte Weiterbildungen und Ausgestaltungen sind Gegenstand der abhängigen Ansprüche. Weitere Merkmale, Anwendungsöglichkeiten und Vorteile der Erfindung ergeben
35 sich aus der nachfolgenden Beschreibung.

Das vorgestellte System löst die oben genannte Aufgabe durch eine geeignete Anordnung von benutzten Komponenten, ein Ausnutzen der für jede Komponente optimalen Bedingungen und eine Nutzung sämtlicher zur Verfügung stehender Informationen.

5

In einem ersten Aspekt dient ein Roboterarm der flexiblen Positionierung einer Detektionsvorrichtung sowie zum Führen dieser entlang einer geeigneten Trajektorie entlang der Freiform des entschichteten Körpers. Die Anordnung mit dem Roboterarm nutzt die bekannte dreidimensionale Geometrie des Körpers aus dem Druck bzw. der Herstellung (digitaler Zwilling) der ursprünglichen Form.

In einem zweiten Aspekt wird eine Beleuchtungsvorrichtung zur Beleuchtung der Oberfläche zur Erkennung des Oberflächenmaterials am Roboterarm montiert und flexibel in einem bestimmten Winkelbereich veränderbar angeordnet, sodass verhindert werden kann, dass direkte Reflektionen des Lichtes von der Oberfläche detektiert werden. Diese tragen keine spektralen Materialinformationen. Abhängig von der Krümmung der Oberfläche kann die Beleuchtungsvorrichtung angepasst werden.

In einem dritten Aspekt umfasst die Detektionsvorrichtung eine Hyperspektralkamera, die für jede Position über der Oberfläche der Freiform in einem richtigen Abstand (= Fokus) gebracht und senkrecht zur Oberfläche des Körpers ausgerichtet wird. Mit der dazu geeignet platzierten Beleuchtungsvorrichtung stellt die Anordnung eine Art Dunkelfeldbeleuchtung dar. Abhängig von den Aufnahmeparametern der Hyperspektralkamera (Integrationszeit, Anzahl der Mittelungen, etc.), der Krümmung der Oberfläche und ihrer Beschaffenheit (Reflektivität) bewegt sich der Roboterarm mit angepasster Geschwindigkeit über den Körper. Die Relativgeschwindigkeit der Messlinie gegenüber der Oberfläche wird konstant gehalten.

35

In einem vierten Aspekt wird eine prädiktive Analyse zur objektiven Bestimmung der gesuchten Oberflächeneigenschaften des Körpers. Die Spektroskopie erlaubt es, Zustände (Alte-

5 rung, Feuchte, Fremdmaterial, etc.), Beschaffenheiten
 (Schichtdicken, Materialübergangsbereiche, Homogenität, etc.)
 und Materialzusammensetzungen mittels statistischer Modelle
 zu bestimmen. Die prädiktive Analyse ist robust, wenn der In-
10 formationsgehalt der gesuchten Größe sich aus dem Spektrum
 des Rauschens oder anderer Störgrößen abhebt. Bei der adapti-
 ven hyperspektralen Bildgebung in dieser Form werden Störgro-
 ßen dadurch minimiert, weil die Aufnahmeumgebung konstant
 bleibt, obwohl sich die Oberflächengeometrie stark verändert
10 während eines Abfahrens der Freiform des Körpers.

15 In einem fünften Aspekt werden die Fahrwege des Roboterarms
 optimiert. Dadurch, dass die Freiformgeometrie als auch die
 optimalen Parameter jeder Komponente bekannt sind, wird im
15 Vorfeld eine geeignete Scan-3D-Bahn berechnet, sodass ein in
 der Geschwindigkeit optimiertes Scansystem entsteht. Diese
 optimierten Fahrwege müssen zudem flexibel sein, falls sich
 zeitliche Änderungen am Körper selbst, oder auch an der Ober-
 fläche ergeben (Verzug, Fließen, Alterung, etc.). Durch die
20 geeignete Bahnplanung unter Berücksichtigung der konkaven und
 konvexen Biegungen unter Einhaltung von tolerablen Bereichen
 in Abstand und Winkel zur Oberfläche sowie bei der Relativge-
 schwindigkeit.

25 In einem sechsten Aspekt werden die erhaltenen Informationen
 als Feedback für die Bahnparameter gemappt (automatisierter
 Schleifprozess oder andere Oberflächenbearbeitung nach einem
 hyperspektralen Oberflächenscan). Im Beispiel einer Kontami-
30 nation soll bestimmt werden, wo und wie stark die Oberfläche
 beeinträchtigt ist. Für die nächsten Bearbeitungsschritte
 kann dadurch eine optimierte adaptive Bearbeitung erreicht
 werden.

35 Die Erfindung beansprucht eine Anordnung zur hyperspektralen
 Oberflächenabtastung eines Körpers, aufweisend:

- einen Roboterarm,
- eine am ersten Ende des Roboterarms angeordnete hyper-
 spektrale Detektionsvorrichtung,

- eine am ersten Ende des Roboterarms angeordnete Beleuchtungs-
vorrichtung und
- eine Steuer- und Recheneinheit, die eingerichtet ist, das
erste Ende des Roboterarms derart entlang vorab ermittel-
ter Trajektorien zu bewegen, dass ein vorbestimmter Ober-
flächenbereich des Körpers hyperspektral abgetastet wird.

Unter „Roboter“ wird im Lichte der Erfindung jede program-
mierbare, automatisierte technische Apparatur verstanden.

Unter erweiterter Realität (Englisch: augmented reality) kurz
AR wird die computergestützte Erweiterung der Realitätswahr-
nehmung verstanden. Diese Information kann alle menschlichen
Sinnesmodalitäten ansprechen. Häufig wird jedoch unter erwei-
terter Realität nur die visuelle Darstellung von Informatio-
nen verstanden, also die Ergänzung von Bildern oder Videos
mit computergenerierten Zusatzinformationen oder virtuellen
Objekten mittels Einblendung bzw. Überlagerung.

Die Erfindung bietet den Vorteil, dass ein Teil der Oberflä-
che oder die ganze Oberfläche eines Körpers, der nahezu jeg-
liche Form aufweisen kann, hyperspektral gescannt werden
kann. Bevorzugt ist der Körper vor der Abtastung entschichtet
bzw. gereinigt worden. Der Oberflächenbereich kann auch die
gesamte Oberfläche des Körpers umfassen.

In einer Weiterbildung kann die Steuer- und Recheneinheit
eingerichtet sein, auf Basis von gespeicherten CAD Daten des
Körpers oder von Daten eines digitalen Zwillings des Körpers
die Trajektorien zu ermitteln. Dadurch ist eine Bahnplanung
für den Roboterarm einfach möglich.

In einer Weiterbildung kann die Steuer- und Recheneinheit
eingerichtet sein, aufgrund einer automatisierten Geometrie-
messung des Körpers mit einem an dem Roboterarm angeordneten
Sensor die Trajektorien zu ermitteln. Vorab kann so die Geo-
metrie des Körpers und damit der Oberfläche sehr genau ermit-
telt werden.

In einer Weiterbildung kann die Steuer- und Recheneinheit eingerichtet sein, aus der abgetasteten hyperspektralen Messdaten des Oberflächenbereichs durch prädikative Analyse die physikalischen und/oder chemischen Eigenschaften des Oberflächenbereichs durch Ableitung aus bekannten Referenzdaten zu ermitteln.

Bei der prädikativen Analyse (Predictive Analytics) werden u.a. unter Verwendung von Big Data und Machine-Learning-Technologien strukturierte und unstrukturierte Daten analysiert, um zukünftige Ereignisse und Resultate vorhersagen zu können. Ebenso wie im Data-Mining werden für die prädikative Analyse statistische und mathematische Verfahren sowie Algorithmen verwendet, um Muster, Zusammenhänge und Trends aufzuzeigen.

In einer Weiterbildung kann die hyperspektrale Detektionsvorrichtung eine Hyperspektralkamera aufweisen.

In einer weiteren Ausgestaltung kann die Steuer- und Recheneinheit eingerichtet sein, die Hyperspektralkamera über dem Oberflächenbereich in einem Fokusabstand zu halten und die Aufnahmerichtung der Hyperspektralkamera senkrecht zur Oberfläche des Körpers auszurichten.

In einer weiteren Ausgestaltung kann die Steuer- und Recheneinheit eingerichtet sein, die Relativgeschwindigkeit einer Abtastlinie der Hyperspektralkamera zu dem Oberflächenbereich konstant zu halten.

In einer weiteren Ausbildung kann die Beleuchtungsvorrichtung eingerichtet sein, die Winkelstellung der Ausleuchtung des Oberflächenbereichs zu verändern.

In einer weiteren Ausgestaltung kann die Steuer- und Recheneinheit eingerichtet sein, die abgetasteten hyperspektralen Messdaten mit dem Oberflächenbereich des Körpers zu mappen

und daraus Trajektorien für einen weiteren Entschichtungsprozess des Körpers abzuleiten. Dadurch erfolgt eine geänderte Bahnplanung, beispielsweise für einen erneuten Schleifprozess, um mangelhaft entschichtete Bereiche der Oberfläche erfolgreich zu entschichten.

Die Erfindung beansprucht auch ein automatisiertes Verfahren zur hyperspektralen Oberflächenabtastung eines Körpers, wobei eine an einem Roboterarm angeordnete hyperspektrale Detektionsvorrichtung und eine Beleuchtungsvorrichtung derart entlang vorab ermittelter Trajektorien bewegt werden, dass ein vorbestimmter Oberflächenbereich des Körpers hyperspektral abgetastet wird.

In einer Weiterbildung des Verfahrens können auf Basis von gespeicherten CAD Daten des Körpers oder auf Basis von insbesondere geometrischen Daten eines digitalen Zwillings des Körpers die Trajektorien ermittelt werden.

In einer weiteren Ausgestaltung des Verfahrens können aufgrund einer automatisierten Geometriemessung des Körpers mit einem am Roboterarm angeordneten Sensor die Trajektorien ermittelt werden. Der Sensor kann insbesondere ein Laser oder eine Kamera sein.

In einer weiteren Ausprägung des Verfahrens können aus den abgetasteten hyperspektralen Messdaten des Oberflächenbereichs durch eine prädikative Analyse die physikalischen und/oder chemischen Eigenschaften des Oberflächenbereichs ermittelt werden. Beispielsweise können Beschichtungsreste erkannt und die Art der Beschichtung ermittelt werden.

In einer weiteren Ausgestaltung des Verfahrens können die abgetasteten hyperspektralen Messdaten mit dem Oberflächenbereich des Körpers gemappt werden und daraus Trajektorien für einen weiteren Entschichtungsprozess des Körpers abgeleitet werden. Somit können mangelhaft entschichtete Stellen des

Körpers erneut entschichtet werden. Dadurch wird auch eine Optimierung einer vorangehenden ersten Entschichtung möglich.

Weitere Besonderheiten und Vorteile der Erfindung werden aus
5 den nachfolgenden Erläuterungen eines Ausführungsbeispiels anhand von schematischen Zeichnungen ersichtlich.

KURZE BESCHREIBUNG DER ZEICHNUNGEN

10 Es zeigen:

FIG. 1 ein Blockschaltbild einer Anordnung zur hyperspektralen Oberflächenabtastung eines Körpers und

15 FIG. 2 ein Flussdiagramm eines automatisierten Verfahrens zur hyperspektralen Oberflächenabtastung eines Körpers,

DETAILLIERTE BESCHREIBUNG DER ERFINDUNG

20 FIG. 1 zeigt ein Blockschaltbild einer Anordnung zur hyperspektralen Oberflächenabtastung und -analyse eines Körpers 5, beispielsweise einer entschichteten Turbinenschaufel. Ein Roboterarm 1 wird durch eine Steuer- und Recheneinheit 4 auf Trajektorien bewegt. Am ersten Ende 1.1 des Roboterarms 1,
25 das ist das frei bewegliche Ende, befindet sich eine Beleuchtungsvorrichtung 3 und eine hyperspektrale Detektionseinrichtung 2, die eine Hyperspektralkamera 2.1 aufweist. Durch die Bewegung des ersten Endes 1.1 entlang eines ausgewählten Oberflächenbereichs 5.1 des Körpers 5 wird der Oberflächenbereich 5.1 hyperspektral abgetastet, in anderen Worten hyperspektral gescannt. Bevorzugt erfolgt dies durch eine Linienabtastung mit einer linienförmigen Beleuchtung, ähnlich einem Vorlagenscan in einem Scanner bzw. Kopierer.

35 Die so gewonnenen hyperspektralen Daten werden in der Steuer- und Recheneinheit 4 gemäß Verfahren nach dem Stand der Technik ausgewertet. Bevorzugt werden durch eine prädikative Analyse die physikalischen und/oder chemischen Eigenschaften des

Oberflächenbereichs 5.1 ermittelt. So kann beispielsweise festgestellt werden, ob eine Beschichtung des Körpers 5 in diesem Bereich vollständig entfernt worden ist. Die so gewonnenen Eigenschaften des Oberflächenbereichs 5.1 können für die Bahnplanung der Anordnung für einen weiteren Entscheidungsprozess verwendet werden. Stellen, die nicht vollständig entschichtet wurden, können so einfach ermittelt werden und einer Nacharbeitung zugeführt werden.

Die Steuer- und Recheneinheit 4 ist bevorzugt ausgebildet und programmiert, die Hyperspektralkamera 2.1 über dem Oberflächenbereich 5.1 in einem Fokusabstand zu halten, d.h. die Aufnahme immer zu fokussieren. Außerdem wird bevorzugt die Aufnahmerichtung der Hyperspektralkamera 2.1 senkrecht zu der Oberfläche des Körpers 5 ausgerichtet.

Des Weiteren ist die Steuer- und Recheneinheit 4 ausgebildet und programmiert, d.h. eingerichtet, die Relativgeschwindigkeit einer Abtastlinie der Hyperspektralkamera 2.1 zu dem Oberflächenbereich 5.1 konstant zu halten.

Die Beleuchtungsvorrichtung 3 ist außerdem bevorzugt eingerichtet, die Winkelstellung der Ausleuchtung des Oberflächenbereichs 5.1 zu verändern. Somit können ungewünschte Reflexionen in die Hyperspektralkamera 2.1 vermieden werden.

Die Trajektorien der hyperspektralen Oberflächenabtastung können aus den CAD-Daten des Körpers oder eines digitalen Zwillings des Körpers 5 gewonnen werden. Alternativ ist es auch möglich, vorab mithilfe von an dem Roboterarm 1 angebrachten Sensoren 6 oder auch lediglich einem einzigen Sensor 6 den Körper 5 zu vermessen und daraus die Trajektorien für den abzutastenden Oberflächenbereich 5.1 zu gewinnen. Der Sensor 6 kann beispielsweise ein Laser oder eine Kamera sein.

Durch die erfindungsgemäße Anordnung kann jede beliebige Freiform abgetastet werden.

FIG. 2 zeigt ein Ablaufdiagramm eines Verfahrens zur hyperspektralen Oberflächenabtastung und -analyse eines Körpers 5, beispielsweise einer entschichteten Turbinenschaufel. In einem ersten Schritt 101 erfolgt die Bahnplanung für einen Roboterarm 1, an dessen ersten Ende 1.1 eine Beleuchtungsvorrichtung und eine hyperspektrale Detektionsvorrichtung angeordnet sind. Dazu muss die Geometrie des Körpers 5 bekannt sein. Dafür können entweder die CAD Daten oder die Daten eines digitalen Zwillings des Körpers 5 verwendet werden, oder es erfolgt ein Geometriescan des Körpers 5 mithilfe eines an dem Roboterarm angebrachten Sensors.

In einem zweiten Schritt 102 erfolgt entlang der in dem Schritt 101 geplanten Trajektorien eine hyperspektrale Oberflächenabtastung des gewünschten Zielbereichs, d.h. eines zu untersuchenden Oberflächenbereichs des Körpers 5.

In einem folgenden dritten Schritt 103 werden die erforderlichen physikalischen und chemischen Eigenschaften des abgetasteten Oberflächenbereichs mithilfe einer prädikativen Analyse ermittelt. Dadurch können beispielsweise Aussagen gemacht werden, ob bzw. wie gut der Oberflächenbereich in einem vorangehenden Prozess entschichtet wurde und ob etwa nachgearbeitet werden muss.

In einem vierten Schritt 104 erfolgt durch Mappen der Oberflächeneigenschaften mit den Geometriedaten eine erneute Bahnplanung für eine ergänzende Entschichtung. In einem abschließenden fünften Schritt 1005 erfolgt dann anhand der neu geplanten Trajektorien eine weitere Entschichtung des Oberflächenbereichs an den entsprechenden Stellen. Die Schritte 102 bis 105 können bei Bedarf wiederholt werden.

Das Neuartige der Anordnung und des Verfahrens liegt darin, dass unter Ausnutzung einer bekannten dreidimensionalen Geometrie eines Körpers es möglich ist, die komplette Freiform des Körpers unter für die Messung gleichbleibenden Bedingungen abzufahren bzw. abzutasten. Dadurch entsteht eine bisher

unerreichte Flexibilität (kein Umbau/Abänderung, wenn sich die betrachtete Geometrie ändert z.B. auf Grund eines anderen Bauteil-Designs), eine hohe Robustheit der Analyse aufgrund immer gleichbleibende Messbedingung, ein zeitoptimiertes Scannen und ein auf Dauer Kosten sparendes Messsystem wegen optimierten Abläufen, eingesparter manueller Eingriffe und optimierter Folgeprozesse.

Zusätzlich wird der Zustand der kompletten Freiform, und nicht nur einzelne Flächen dieser, charakterisiert und digitalisiert. Dies hat einen großen Nutzen in einer automatisierten und durchgehend digitalisierten Prozesskette, bei der mehrere Abhängigkeiten zwischen den Prozessschritten bestehen. Durch die digitalisierten Informationen über die zu vermessenden Körper wird eine Information über ganze Serien von Körpern zugänglich, die wiederum in den Produktlebenszyklus (auch: digitaler Zwilling) einfließt.

Obwohl die Erfindung im Detail durch die Ausführungsbeispiele näher illustriert und beschrieben wurde, ist die Erfindung durch die offenbarten Beispiele nicht eingeschränkt und andere Variationen können vom Fachmann daraus abgeleitet werden, ohne den Schutzzumfang der Erfindung zu verlassen.

Bezugszeichenliste

1	Roboterarm
1.1	erstes Ende des Roboterarms 1
2	hyperspektrale Detektionsvorrichtung
2.1	Hyperspektralkamera
3	Beleuchtungsvorrichtung
4	Steuer- und Recheneinheit
5	Körper
5.1	Oberflächenbereich des Körpers 5
6	Sensor
100	Ermittlung der Geometrie des Körpers 5
101	hyperspektrale Abtastung
102	Ermittlung der Oberflächeneigenschaften
103	Bahnplanung
104	weitere Entschichtung

Patentansprüche

1. Anordnung zur hyperspektralen Oberflächenabtastung eines Körpers (5), aufweisend:

- 5 - einen Roboterarm (1),
- eine an dem ersten Ende (1.1) des Roboterarms (1) angeordnete hyperspektrale Detektionsvorrichtung (2),
- eine an dem ersten Ende (1.1) des Roboterarms (1) angeordnete Beleuchtungsvorrichtung (3) und
- 10 - eine Steuer- und Recheneinheit (4), die eingerichtet ist, das erste Ende (1.1) des Roboterarms (1) derart entlang vorab ermittelter Trajektorien zu bewegen, dass ein vorbestimmter Oberflächenbereich (5.1) des Körpers (5) hyperspektral abgetastet wird.

15

2. Anordnung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet,

- dass die Steuer- und Recheneinheit (4) eingerichtet ist, auf Basis von gespeicherten CAD Daten des Körpers (5) oder Daten
20 eines digitalen Zwillings des Körpers (5) die Trajektorien zu ermitteln.

3. Anordnung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet,

- 25 dass die Steuer- und Recheneinheit (4) eingerichtet ist, aufgrund einer automatisierten Geometriemessung des Körpers (5) mit mindestens einem an dem Roboterarm (1) angeordneten Sensor (6) die Trajektorien zu ermitteln.

30 4. Anordnung nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet,

- dass die Steuer- und Recheneinheit (4) eingerichtet ist, aus den abgetasteten hyperspektralen Messdaten des Oberflächenbereichs (5.1) durch prädikative Analyse die physikalischen
35 und/oder chemischen Eigenschaften des Oberflächenbereichs (5.1) zu ermitteln.

5. Anordnung nach einem der vorhergehenden Ansprüche,

dadurch gekennzeichnet,
dass die hyperspektrale Detektionsvorrichtung (2) eine Hyper-
spektralkamera (2.1) aufweist.

5 6. Anordnung nach Anspruch 5,
dadurch gekennzeichnet,
dass Steuer- und Recheneinheit (4) eingerichtet ist, die Hy-
perspektralkamera (2.1) über dem Oberflächenbereich (5.1) in
einem Fokusabstand zu halten und die Aufnahmerichtung der Hy-
10 perspektralkamera (2.1) senkrecht zu der Oberfläche des Kör-
pers (5) auszurichten.

7. Anordnung nach Anspruch 5 oder 6,
dadurch gekennzeichnet,
15 dass die Steuer- und Recheneinheit (4) eingerichtet ist, die
Relativgeschwindigkeit einer Abtastlinie der Hyperspektralka-
mera (2.1) zu dem Oberflächenbereich (5.1) konstant zu hal-
ten.

20 8. Anordnung nach einem der vorhergehenden Ansprüche,
dadurch gekennzeichnet,
dass die Beleuchtungsvorrichtung (3) eingerichtet ist, die
Winkelstellung der Ausleuchtung des Oberflächenbereichs (5.1)
zu verändern.

25 9. Anordnung nach einem der vorhergehenden Ansprüche,
dadurch gekennzeichnet,
dass die Steuer- und Recheneinheit (4) eingerichtet ist, die
abgetasteten hyperspektralen Messdaten mit dem Oberflächenbe-
30 reich (5.1) des Körpers (5) zu mappen und daraus Trajektorien
für einen weiteren Entschichtungsprozess des Körpers (5) ab-
zuleiten.

10. Automatisiertes Verfahren zur hyperspektralen Oberflä-
35 chenabtastung eines Körpers (5),
wobei eine an einem Roboterarm (1) angeordnete hyperspektrale
Detektionsvorrichtung (2) und eine Beleuchtungsvorrichtung
(3) derart entlang vorab ermittelter Trajektorien bewegt wer-

den, dass ein vorbestimmter Oberflächenbereich (5.1) des Körpers (5) hyperspektral abgetastet wird (101).

11. Automatisiertes Verfahren nach Anspruch 10,

5 wobei auf Basis von gespeicherten CAD Daten des Körpers (5) oder Daten eines digitalen Zwillings des Körpers (5) die Trajektorien ermittelt werden (100).

12. Automatisiertes Verfahren nach Anspruch 10,

10 Wobei aufgrund einer automatisierten Geometriemessung des Körpers (5) mit mindestens einem an dem Roboterarm (1) angeordneten Sensor (6) die Trajektorien ermittelt werden (100).

13. Automatisiertes Verfahren nach einem der Ansprüche 10 bis 12,

15 wobei aus den abgetasteten hyperspektralen Messdaten des Oberflächenbereichs (5.1) durch prädikative Analyse die physikalischen und/oder chemischen Eigenschaften des Oberflächenbereichs (5.1) ermittelt werden (102).

20

14. Automatisiertes Verfahren nach einem der Ansprüche 10 bis 13,

wobei die abgetasteten hyperspektralen Messdaten mit dem Oberflächenbereich (5.1) des Körpers (5) gemappt werden und daraus Trajektorien für einen weiteren Entschichtungsprozess des Körpers (5) abgeleitet werden (103).

25

FIG 1

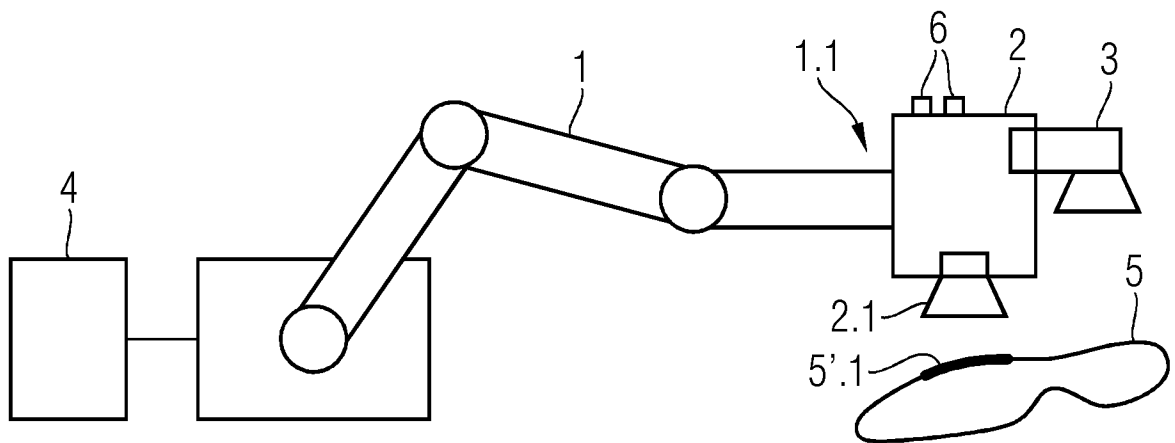
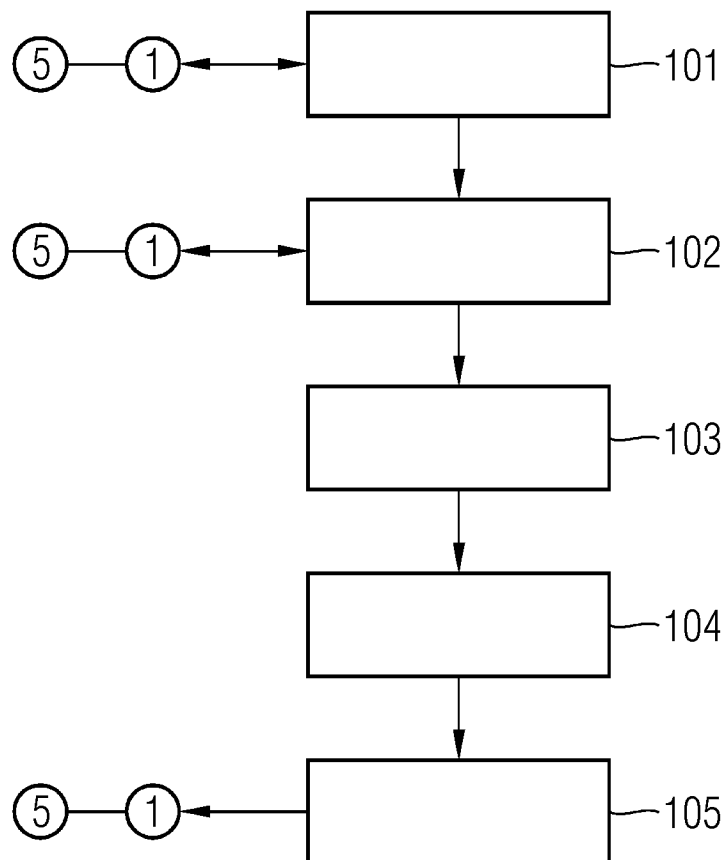


FIG 2



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/EP2021/054672

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER**B25J 9/16**(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)

B25J; G05B; G01B

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

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	WO 2014145471 A1 (UNIV CARNEGIE MELLON [US]) 18 September 2014 (2014-09-18) abstract paragraph [0007] paragraph [0038] - paragraph [0058] paragraph [0068] - paragraph [0073] paragraph [0100] - paragraph [0120] claims	1-14
X	DE 202020100470 U1 (SCHAEFTER KIRCHHOFF GMBH [DE]) 11 February 2020 (2020-02-11) abstract paragraph [0005] - paragraph [0019] claims	1-14
X	DE 102017007737 A1 (LEMNATEC GMBH [DE]) 21 February 2019 (2019-02-21) the whole document	1-7,10-13
A	WO 2018059660 A1 (SIEMENS AG [DE]) 05 April 2018 (2018-04-05) abstract page 2, line 8 - page 6, line 33	1,4,5,10,13



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

01 June 2021

Date of mailing of the international search report

09 June 2021

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

Abbing, Ralf

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/EP2021/054672**C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT**

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	US 2013271752 A1 (BELLIAN JEROME ANTHONY [US] ET AL) 17 October 2013 (2013-10-17) the whole document	1,4,5,10,13
A	EP 3552775 A1 (BOEING CO [US]) 16 October 2019 (2019-10-16) abstract paragraph [0006] - paragraph [0012]	1-3,10-12

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/EP2021/054672

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
WO	2014145471	A1	18 September 2014	CA	2904542	A1	18 September 2014
				DK	2973074	T3	03 June 2019
				EP	2973074	A1	20 January 2016
				ES	2728861	T3	29 October 2019
				HU	E043828	T2	30 September 2019
				JP	6426143	B2	21 November 2018
				JP	2016522089	A	28 July 2016
				KR	20160014585	A	11 February 2016
				SG	11201507679R	A	29 October 2015
				SI	2973074	T1	30 August 2019
				US	2016016312	A1	21 January 2016
				US	2017297198	A1	19 October 2017
				WO	2014145471	A1	18 September 2014
DE	202020100470	U1	11 February 2020	NONE			
DE	102017007737	A1	21 February 2019	NONE			
WO	2018059660	A1	05 April 2018	NONE			
US	2013271752	A1	17 October 2013	AU	2013246358	A1	04 September 2014
				CA	2866640	A1	17 October 2013
				CN	104204740	A	10 December 2014
				EP	2836805	A1	18 February 2015
				RU	2014145227	A	10 June 2016
				US	2013271752	A1	17 October 2013
				WO	2013154769	A1	17 October 2013
EP	3552775	A1	16 October 2019	AU	2019200970	A1	10 October 2019
				CA	3033972	A1	21 September 2019
				CN	110293558	A	01 October 2019
				EP	3552775	A1	16 October 2019
				JP	2019166631	A	03 October 2019
				US	2019291275	A1	26 September 2019

A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES

INV. B25J9/16

ADD.

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

B. RECHERCHIERTE GEBIETE

Recherchierter Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole)

B25J G05B G01B

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

C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
X	WO 2014/145471 A1 (UNIV CARNEGIE MELLON [US]) 18. September 2014 (2014-09-18) Zusammenfassung Absatz [0007] Absatz [0038] - Absatz [0058] Absatz [0068] - Absatz [0073] Absatz [0100] - Absatz [0120] Ansprüche -----	1-14
X	DE 20 2020 100470 U1 (SCHAEFTER KIRCHHOFF GMBH [DE]) 11. Februar 2020 (2020-02-11) Zusammenfassung Absatz [0005] - Absatz [0019] Ansprüche -----	1-14
X	DE 10 2017 007737 A1 (LEMNATEC GMBH [DE]) 21. Februar 2019 (2019-02-21) das ganze Dokument ----- -/-	1-7, 10-13



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

1. Juni 2021

Absendedatum des internationalen Recherchenberichts

09/06/2021

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

Abbing, Ralf

C. (Fortsetzung) ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN		
Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
A	WO 2018/059660 A1 (SIEMENS AG [DE]) 5. April 2018 (2018-04-05) Zusammenfassung Seite 2, Zeile 8 - Seite 6, Zeile 33 -----	1,4,5, 10,13
A	US 2013/271752 A1 (BELLIAN JEROME ANTHONY [US] ET AL) 17. Oktober 2013 (2013-10-17) das ganze Dokument -----	1,4,5, 10,13
A	EP 3 552 775 A1 (BOEING CO [US]) 16. Oktober 2019 (2019-10-16) Zusammenfassung Absatz [0006] - Absatz [0012] -----	1-3, 10-12

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

Internationales Aktenzeichen

PCT/EP2021/054672

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
WO 2014145471 A1	18-09-2014	CA 2904542 A1	18-09-2014
		DK 2973074 T3	03-06-2019
		EP 2973074 A1	20-01-2016
		ES 2728861 T3	29-10-2019
		HU E043828 T2	30-09-2019
		JP 6426143 B2	21-11-2018
		JP 2016522089 A	28-07-2016
		KR 20160014585 A	11-02-2016
		SG 11201507679R A	29-10-2015
		SI 2973074 T1	30-08-2019
		US 2016016312 A1	21-01-2016
		US 2017297198 A1	19-10-2017
		WO 2014145471 A1	18-09-2014
DE 202020100470 U1	11-02-2020	KEINE	
DE 102017007737 A1	21-02-2019	KEINE	
WO 2018059660 A1	05-04-2018	KEINE	
US 2013271752 A1	17-10-2013	AU 2013246358 A1	04-09-2014
		CA 2866640 A1	17-10-2013
		CN 104204740 A	10-12-2014
		EP 2836805 A1	18-02-2015
		RU 2014145227 A	10-06-2016
		US 2013271752 A1	17-10-2013
		WO 2013154769 A1	17-10-2013
EP 3552775 A1	16-10-2019	AU 2019200970 A1	10-10-2019
		CA 3033972 A1	21-09-2019
		CN 110293558 A	01-10-2019
		EP 3552775 A1	16-10-2019
		JP 2019166631 A	03-10-2019
		US 2019291275 A1	26-09-2019