



(10) **DE 10 2022 130 223 A1** 2024.05.16

(12) **Offenlegungsschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2022 130 223.7**

(22) Anmeldetag: **15.11.2022**

(43) Offenlegungstag: **16.05.2024**

(51) Int Cl.: **B22F 10/38** (2021.01)

B22F 10/85 (2021.01)

B22F 12/90 (2021.01)

B33Y 50/02 (2015.01)

(71) Anmelder:
Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), 12205 Berlin, DE; Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung eingetragener Verein, 80686 München, DE; Technische Universität Berlin, Körperschaft des öffentlichen Rechts, 10623 Berlin, DE

(74) Vertreter:
Heeschen Pültz Patentanwälte PartGmbH, 20354 Hamburg, DE

(72) Erfinder:
Jutkuhn, Dennis, 21029 Hamburg, DE; Thewes, Roland, Prof. Dr., 82178 Puchheim, DE; Pelkner, Matthias, Dr., 10439 Berlin, DE; Ehlers, Henrik, 10247 Berlin, DE; Casperon, Ralf, 12305 Berlin, DE

(56) Ermittelter Stand der Technik:

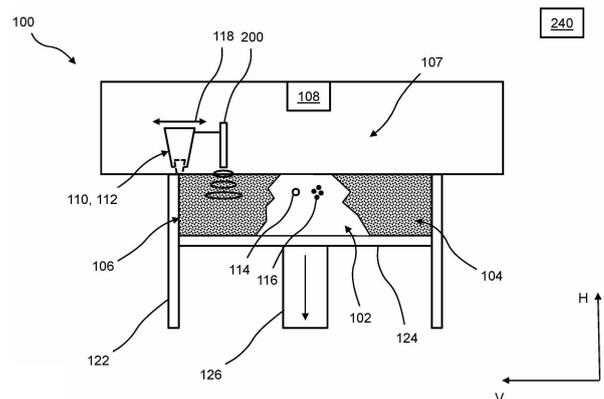
DE	10 2011 111 818	A1
DE	10 2016 201 290	A1
US	2016 / 0 349 215	A1
US	2018 / 0 264 590	A1
EP	3 632 595	A1

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen.

(54) Bezeichnung: **Prüfsystem und Verfahren zur in-situ Erkennung von Eigenschaften innerhalb eines verfestigten Pulvermaterials**

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft ein Prüfsystem (200) zur in-situ Erkennung von Eigenschaften (114, 116) innerhalb eines mittels eines energiereichen Strahls (128) verfestigten Pulvermaterials (104), umfassend eine an einer Bewegungseinheit (110) anordenbare wirbelstrombasierte Prüfeinheit (202), die angeordnet und ausgebildet ist, eine Materialeigenschaft von verfestigtem Pulvermaterial (104) mittels einer Wirbelstromprüfung zu detektieren, sodass Leitfähigkeitsunterschiede innerhalb des verfestigten Pulvermaterials (104) erkennbar sind, um Eigenschaften (114, 116) während der additiven Herstellung zu identifizieren, wobei die Prüfeinheit (202) eine erste Wirbelstromsensoreinheit (210) umfasst, die angeordnet und ausgebildet ist, eine Eigenschaft mit einer ersten Eigenschaftsgröße größer-gleich einem Größengrenzwert zu identifizieren, insbesondere eine Einzelfehlstelle, und wobei die Prüfeinheit (202) eine zweite Wirbelstromsensoreinheit (230) umfasst, die angeordnet und ausgebildet ist, eine Ansammlung von Eigenschaften mit einer zweiten Eigenschaftsgröße kleiner dem Größengrenzwert zu identifizieren, insbesondere einen porösen Fehlstellenbereich.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Prüfsystem und ein Verfahren zur in-situ Erkennung von Eigenschaften innerhalb eines verfestigten Pulvermaterials sowie ein Fertigungssystem.

[0002] Prüfsysteme zur in-situ Erkennung von Eigenschaften innerhalb eines verfestigten Pulvermaterials sind grundsätzlich bekannt. Bei der additiven Herstellung von Bauteilen aus einem Pulvermaterial wird dieses verfestigt, um insbesondere schichtweise das Bauteil zu erzeugen. Das Pulvermaterial kann beispielsweise mit einem energiereichen Strahl, insbesondere einem Laserstrahl, oder einem Bindemittel verfestigt werden.

[0003] Mit Thermografieverfahren können beispielsweise Fehlstellen detektiert werden, jedoch ist die Datenmenge derart umfangreich, dass eine echtzeitfähige Auswertung nicht oder lediglich eingeschränkt möglich ist. Ferner sind keine wiederholenden Prüfungen möglich. Darüber hinaus verfälschen Partikel im Strahlengang die Ergebnisse. Ein weiterer Nachteil der Thermografieverfahren ist, dass der erforderliche Prüfaufbau vergleichsweise teuer ist.

[0004] Ferner besteht die Möglichkeit, verfestigtes Pulvermaterial mit Ultraschall zu prüfen. Ein Nachteil der Ultraschallverfahren besteht darin, dass die erzielbare Prüfauflösung in der Regel nicht ausreichend ist. Darüber hinaus können Ultraschallprüfsonden lediglich unterhalb der Bodenplatte angeordnet werden, sodass eine eingeschränkte Zugänglichkeit zu berücksichtigen ist.

[0005] Mittels Computertomografieverfahren können Fehlstellen in der Regel präzise ermittelt werden, jedoch sind Computertomografieverfahren nicht in-situ einsetzbar und ferner vergleichsweise teuer. Darüber hinaus ist während der Prüfung ein Strahlenschutz erforderlich.

[0006] Mittels einer akustischen Emissionsanalyse können Fehlstellen in der Regel erkannt werden, jedoch ist die Bestimmung der exakten Fehlstellenposition lediglich eingeschränkt möglich. Darüber hinaus besteht in der Regel nicht die Möglichkeit einer Wiederholungsprüfung. Mit optischen Verfahren können ferner keine verdeckten Fehler ermittelt werden.

[0007] Die US 2016/9215 A1 offenbart ein System zur zerstörungsfreien Prüfung von additiv hergestellten Bauteilen, wobei ein elektromagnetisches Feld eingesetzt wird. Hierbei wird eine Wirbelstromprüfung durchgeführt, jedoch wird ein Aufbau vorgeschlagen, der eine derartig eingeschränkte Ortsauflösung bietet, dass eine präzise Feststellung von

unterschiedlich ausgebildeten Fehlstellen in einem verfestigten Pulvermaterial nicht möglich ist.

[0008] Es ist eine Anforderung aus der Industrie, additive Herstellungsprozesse mit einer geringen Ausschussquote und einer hohen Qualität einzusetzen, um unter anderem den nachgelagerten Prüfaufwand zu reduzieren. Insbesondere die derzeit oft eingesetzte Computertomografie, beispielsweise für Bauteile der Medizintechnik oder der Luft- und Raumfahrttechnik, führt zu hohen Kosten und/oder einem hohen Zeiteinsatz. Es ist ferner eine Anforderung, die Prozessstabilität in der additiven Fertigung auf ein vergleichbares Niveau der konventionellen Fertigung zu heben, da die additive Fertigung hinsichtlich des Ressourceneinsatzes besondere Vorteile bietet.

[0009] Es ist daher eine Aufgabe der Erfindung, ein Prüfsystem und ein Verfahren zur in-situ Erkennung von Eigenschaften innerhalb eines verfestigten Pulvermaterials und ein Fertigungssystem bereitzustellen, die einen oder mehrere der genannten Nachteile vermindern oder beseitigen. Insbesondere ist es eine Aufgabe der Erfindung, eine Lösung bereitzustellen, die eine sichere in-situ Erkennung von Eigenschaften in einem verfestigten Pulvermaterial ermöglicht.

[0010] Diese Aufgabe wird gelöst mit einem Prüfsystem und einem Verfahren nach den Merkmalen der unabhängigen Patentansprüche. Weitere vorteilhafte Ausgestaltungen dieser Aspekte sind in den jeweiligen abhängigen Patentansprüchen angegeben. Die in den Patentansprüchen, der Beschreibung und den Zeichnungen offenbarten Merkmale sind einzeln, in beliebiger, technologisch sinnvollerweise miteinander kombinierbar, wobei weitere Ausführungsvarianten der Erfindung aufgezeigt werden.

[0011] Gemäß einem ersten Aspekt wird die eingangs genannte Aufgabe gelöst durch ein Prüfsystem zur in-situ Erkennung von Eigenschaften innerhalb eines verfestigten Pulvermaterials, umfassend eine an einer Bewegungseinheit anordenbare wirbelstrombasierte Prüfeinheit, die angeordnet und ausgebildet ist, eine elektromagnetische Materialeigenschaft von verfestigten Pulvermaterial mittels einer Wirbelstromprüfung zu detektieren, sodass Leitfähigkeitsunterschiede innerhalb des verfestigten Pulvermaterials erkennbar sind, um Eigenschaften zu identifizieren, wobei die Prüfeinheit eine erste Wirbelstromsensoreinheit umfasst, die angeordnet und ausgebildet ist, eine Eigenschaft mit einer ersten Eigenschaftsgröße größer-gleich einem Größengrenzwert zu identifizieren, insbesondere eine Einzelfehlstelle, und wobei die Prüfeinheit eine zweite Wirbelstromsensoreinheit umfasst, die angeordnet und ausgebildet ist, eine Ansammlung von Eigenschaften mit einer zweiten Eigenschaftsgröße kleiner

dem Größengrenzwert zu identifizieren, insbesondere einen porösen Fehlstellenbereich.

[0012] Der Erfindung liegt die Erkenntnis zugrunde, dass Einzelfehlstellen und Ansammlungen von Mikrofehlstellen die häufigsten Ursachen für Ausschuss bei der pulverbasierten additiven Fertigung sind. Ferner lag der Erfindung die Erkenntnis zugrunde, dass unterschiedliche wirbelstrombasierte Mechanismen zur Prüfung der im Vorherigen genannten Eigenschaften erforderlich sind, um eine sichere Identifikation zu gewährleisten. Durch den Einsatz von zwei unterschiedlichen Wirbelstromsensoreinheiten, nämlich der ersten und der zweiten Wirbelstromsensoreinheit, die zur Identifikation von Eigenschaften mit unterschiedlichen Eigenschaftsgrößen ausgebildet sind, kann diese Erkenntnis technisch in vorteilhafterweise genutzt werden.

[0013] Das Prüfsystem ermöglicht dadurch in-situ eine Anpassung, insbesondere eine Korrektur, der identifizierten Eigenschaften, wie im Folgenden noch näher erläutert wird. Ferner kann ein Bauauftrag oder ein Bauteil während der Herstellung und nach Erkennung einer Eigenschaft abgebrochen werden, sodass die kostenintensive additive Herstellung nach Erzeugung einer nicht anpassbaren bzw. korrigierbaren Eigenschaft abgebrochen wird. Darüber hinaus bietet das Prüfsystem den Vorteil, dass keine aufwändigen Prüfschritte nach Fertigstellung des Bauteils erforderlich sind, die üblicherweise mit einer Computertomografie hohe Kosten verursachen.

[0014] Ein Vorteil des wirbelstrombasierten Verfahrens besteht ferner darin, dass die Datenmenge der erzeugten Daten derart gering ist, sodass die Datenauswertung während der additiven Herstellung erfolgen kann, wodurch eine auf Basis eines Ergebnisses des Prüfsystems erfolgte Prozesssteuerung echtzeitfähig auszubilden ist. Ferner kann eine schichtweise Zuordnung der Eigenschaften erfolgen. Darüber hinaus kann durch die in-situ Erfassung der Eigenschaften eine Korrelation zwischen der Eigenschaft und den eingesetzten Prozessparametern sowie mit Sensoren der Fertigungsanlage festgestellten Prozesszuständen abgeleitet werden, sodass der additive Herstellungsprozess optimierbar ist. Insbesondere kann dies beispielsweise mit einer künstlichen Intelligenz erfolgen. Ferner kann der Prozess in-situ geregelt werden, wie im Weiteren noch näher erläutert wird. Darüber hinaus werden Prozessunterbrechungen und -abbrüche durch die Erhöhung der Prozessstabilität reduziert. Ferner ermöglicht eine derartige Prüfung eine digitale Fertigungsdokumentation.

[0015] Das Prüfsystem ist zur in-situ Erkennung von Eigenschaften innerhalb eines verfestigten Pulvermaterials ausgebildet. Unter einem verfestigten Pul-

vermaterial wird jegliches Pulvermaterial verstanden, dessen Pulverpartikel zumindest abschnittsweise miteinander verbunden sind. Ein verfestigtes Pulvermaterial kann beispielsweise durch gefügte und/oder verklebte Pulverpartikel ausgebildet sein. Das zu verfestigende Pulvermaterial ist insbesondere elektrisch leitfähig und/oder ferromagnetisch ausgebildet. Unter einer in-situ Prüfung und Erkennung von Eigenschaften wird insbesondere eine Prüfung während der Herstellung des Bauteils aus dem Pulvermaterial verstanden, beispielsweise zeitlich schichtweise einfach oder mehrfach zwischen der Erzeugung einer ersten Schicht und der Erzeugung einer letzten Schicht des Bauteils.

[0016] Unter Eigenschaften werden grundsätzlich alle Eigenschaften innerhalb des verfestigten Pulvermaterials verstanden. Eine Eigenschaft kann beispielsweise eine Inhomogenität oder eine Anomalie sein. Beispielsweise kann es sich bei einer Eigenschaft um eine Kavität, beispielsweise durch unvollständige Aufschmelzung, eine Gaspore, eine Mikroporosität, eine Materialeigenschaft, eine Delaminierung, eine geometrische Abweichung, eine verminderte Oberflächengüte, eine Verfärbung und/oder Eigenschaften im Materialgefüge handeln. Ferner kann eine Eigenschaft eine Geometrie, eine Bauteilkante oder eine Kontur des verfestigten Pulvermaterials bzw. des Bauteils sein.

[0017] Das Prüfsystem ist insbesondere für pulverbettbasierte additive Herstellungsverfahren ausgebildet. Das Prüfsystem ist insbesondere für ein additives Schichtbauverfahren geeignet, beispielsweise für ein Selektives Laserstrahlschmelzen (L-PBF), ein Selektives Elektronenstrahlschmelzen (E-PBF) oder ein Metal Binder Jetting (MBJ). Das Pulvermaterial kann beispielsweise mit einem energiereichen Strahl und/oder einem Bindemittel verfestigt werden. Der energiereiche Strahl ist vorzugsweise ein Laser- oder Elektronenstrahl. Unter einem verfestigten Pulvermaterial wird insbesondere ein solches Pulvermaterial verstanden, dessen Pulverpartikel zumindest teilweise miteinander verbunden, insbesondere miteinander verschmolzen, sind.

[0018] Das Prüfsystem umfasst die wirbelstrombasierte Prüfeinheit. Unter einer wirbelstrombasierten Prüfeinheit wird grundsätzlich eine Prüfeinheit verstanden, die angeordnet und ausgebildet ist, auf Grundlage einer Wirbelstromprüfung eine Eigenschaft zu erkennen. Die Prüfeinheit ist vorzugsweise angeordnet und ausgebildet, ein magnetisches Wechselfeld zu erzeugen, das in eine zu prüfende Oberfläche eindringt, innerhalb des Materials einen Wirbelstrom erzeugt und die Rückwirkung dieses Wirbelstroms misst sowie zur Materialprüfung verwendet.

[0019] Der erzeugte Wirbelstrom wirkt durch sein eigenes Magnetfeld entgegen dem Erzeugerstrom, sodass diese Unterschiede mit der Prüfeinheit erfassbar sind. Insbesondere sind mit der wirbelstrombasierten Prüfeinheit Unterschiede der elektromagnetischen Eigenschaften innerhalb des verfestigten Pulvermaterials erkennbar. Beispielsweise weist eine Pore eine von dem die Pore umgebenden verfestigten Pulvermaterial abweichende elektrische Leitfähigkeit auf. Von einem erkannten Unterschied der elektrischen Leitfähigkeit kann somit auf eine Eigenschaft geschlossen werden.

[0020] Bei der bestimmungsgemäßen Anwendung des Prüfsystems kann die Prüfeinheit beispielsweise einen Wirbelstrom in das verfestigte Pulvermaterial induzieren. Die Rückwirkung dieses Wirbelstromes wird anschließend gemessen. Ferner können Veränderungen des Wirbelstroms erkannt werden und auf Basis dessen Leitfähigkeitsunterschiede erkannt werden. Eine entsprechende Auswertung der erkannten Leitfähigkeitsunterschiede lässt wiederum auf Eigenschaften, insbesondere Fehlstellen, schließen. Alternativ zur Prüfeinheit, die den Wirbelstrom induziert, kann auch eine zusätzliche Anregungseinheit vorgesehen sein.

[0021] Die Prüfeinheit ist an einer Bewegungseinheit anordenbar. Dies bedeutet insbesondere, dass die Prüfeinheit ausgebildet ist, an einer über einem Pulverbett zu verfahrenen Bewegungseinheit angeordnet zu werden.

[0022] Die wirbelstrombasierte Prüfeinheit ist angeordnet und ausgebildet, eine elektromagnetische Materialeigenschaft von verfestigtem Pulvermaterial mittels einer Wirbelstromprüfung zu detektieren. Somit können Leitfähigkeitsunterschiede innerhalb des verfestigten Pulvermaterials erkannt werden, um Eigenschaften zu identifizieren. Es ist insbesondere bevorzugt, dass Änderungen der elektromagnetischen Materialeigenschaft detektiert werden.

[0023] Die Prüfeinheit umfasst die erste Wirbelstromsensoreinheit. Die Wirbelstromsensoreinheit ist angeordnet und ausgebildet, insbesondere im bestimmungsgemäßen Betrieb, eine Eigenschaft mit einer ersten Eigenschaftsgröße größer-gleich einem Größengrenzwert zu identifizieren. Die erste Wirbelstromsensoreinheit ist insbesondere angeordnet und ausgebildet, eine Einzelfehlstelle, wie beispielsweise eine Einzelpore, zu erkennen. Die erste Wirbelstromsensoreinheit ist vorzugsweise angeordnet und ausgebildet, ein Magnetfeld an der Wirbelstromsensoreinheit zu messen, das durch den Verlauf der Wirbelströme im verfestigten Pulvermaterial beeinflusst wird. Ein durch eine Eigenschaft gestörter Wirbelstrompfad im verfestigten Pulvermaterial führt zu einem Messeffekt am Ort des Sensors. Insbesondere ist die erste Wirbelstromsensoreinheit

dadurch ausgebildet, um größere Eigenschaften zu identifizieren. Daher ist die erste Wirbelstromsensoreinheit ausgebildet, um solche Eigenschaften zu identifizieren, die größer-gleich dem Größengrenzwert sind. Es ist bevorzugt, dass die erste Wirbelstromsensoreinheit miniaturisierbar ist. Vorzugsweise umfasst die erste Wirbelstromsensoreinheit ein, zwei oder mehrere Wirbelstromsensoren.

[0024] Die Prüfeinheit umfasst ferner die zweite Wirbelstromsensoreinheit. Die zweite Wirbelstromsensoreinheit ist angeordnet und ausgebildet, eine Ansammlung von Eigenschaften zu identifizieren. Eine Ansammlung von Eigenschaften kann beispielsweise eine Porosität sein, die beispielsweise durch Mikroporen ausgebildet wird. Die zweite Wirbelstromsensoreinheit ist vorzugsweise ausgebildet, eine Impedanz einer Wirbelstromspule zu messen, um eine von einem Gegenfeld der Wirbelströme hervorgerufene Veränderung der Impedanz zu detektieren. Die zweite Wirbelstromsensoreinheit weist vorzugsweise ein integrierendes Verhalten auf, sodass in vorteilhafterweise Fehlstellenbereiche identifizierbar sind. Die zweite Wirbelstromsensoreinheit ist vorzugsweise miniaturisierbar. Vorzugsweise umfasst die zweite Wirbelstromsensoreinheit ein, zwei oder mehrere Wirbelstromsensoren.

[0025] Die Prüfeinheit, die erste Wirbelstromsensoreinheit und/oder die zweite Wirbelstromsensoreinheit ist beziehungsweise sind vorzugsweise zur Erzeugung von Eigenschaftssignalen repräsentierend eine Eigenschaft ausgebildet. Unter einem Signal ist jegliche Art eines Informationsträgers zu verstehen. Das Eigenschaftssignal kann beispielsweise als ein Datensatz ausgebildet sein. Das Eigenschaftssignal wird vorzugsweise dauerhaft bereitgestellt, sodass eine Änderung des Eigenschaftssignals auf eine Eigenschaft schließen lässt.

[0026] Insbesondere kann durch eine Signalstärke, vorzugsweise eine konstante Signalstärke, auf Eigenschaften des verfestigten Pulvermaterials geschlossen werden. Ein Offset in der Signalstärke kann eine Verringerung der Materialdichte charakterisieren. Um diesen Wert zu maximieren, können Parametervariationen zur Erlangung eines Optimums durchgeführt werden, insbesondere eine Maximierung der Dichte des Bauteils.

[0027] Ferner ist die Prüfeinheit, die erste Wirbelstromsensoreinheit und/oder die zweite Wirbelstromsensoreinheit vorzugsweise ausgebildet, die Eigenschaftssignale einer Steuerungsvorrichtung bereitzustellen. Die Steuerungsvorrichtung, wie sie im Folgenden noch näher erläutert wird, ist vorzugsweise eingerichtet, Eigenschaften zu identifizieren und zu klassifizieren. Auf Basis dessen können Eigenschaften, falls dies technisch möglich ist, angepasst, insbesondere korrigiert, werden, wie es mit

dem im Folgenden noch näher erläuterten Anpassungssignal möglich ist.

[0028] Die erste Wirbelstromsensoreinheit und die zweite Wirbelstromsensoreinheiten weisen insbesondere Einzelsensoren auf, die angeordnet und ausgebildet sind, Prüfsignale zu erzeugen und bereitzustellen, auf Basis derer Leitfähigkeitsunterschiede erkennbar sind, sodass die elektromagnetischen Materialeigenschaften detektierbar sind.

[0029] Es ist bevorzugt, dass Sensordaten der ersten Wirbelstromsensoreinheit und der zweiten Wirbelstromsensoreinheit kombiniert auswertbar sind, um basierend auf der kombinierten Auswertung eine verbesserte Erkennung von Eigenschaften zu ermöglichen. Diese erfolgt vorzugsweise mittels Überlagerung der Sensordaten und/oder einer Datenfusion, wodurch die Prüffähigkeit des Prüfsystems erweiterbar ist.

[0030] Es ist bevorzugt, dass die erste Wirbelstromsensoreinheit eine erste Steuereinheit und/oder die zweite Wirbelstromsensoreinheit eine zweite Steuereinheit und/oder das Prüfsystem eine Steuerungsvorrichtung aufweist, die eingerichtet ist bzw. sind, basierend auf Prüfsignalen der ersten Wirbelstromsensoreinheit und/oder der zweiten Wirbelstromsensoreinheit Leitfähigkeitsunterschiede innerhalb des verfestigten Pulvermaterials zu erkennen und Eigenschaften zu identifizieren. Es ist bevorzugt, dass die erste Steuereinheit und/oder die zweite Steuereinheit und/oder die Steuerungsvorrichtung eingerichtet sind, ein Eigenschaftssignal repräsentierend die identifizierte Eigenschaft zu erzeugen und/oder bereitzustellen.

[0031] Eine bevorzugte Fortbildung des Prüfsystems zeichnet sich dadurch aus, dass die erste Wirbelstromsensoreinheit und/oder die zweite Wirbelstromsensoreinheit angeordnet und ausgebildet sind, eine Sensorbewegung in einer Nebenrichtung zu bewirken, wobei die Nebenrichtung nichtparallel zu einer Hauptrichtung, insbesondere einer Vorschubrichtung, der Bewegungseinheit ausgerichtet ist. Es ist bevorzugt, dass die erste Wirbelstromsensoreinheit und/oder die zweite Wirbelstromsensoreinheit in der Nebenrichtung bewegbar angeordnet ist. Alternativ oder ergänzend können Einzelsensoren der ersten Wirbelstromsensoreinheit und/oder der zweiten Wirbelstromsensoreinheit in der Nebenrichtung bewegbar angeordnet sein. Beispielsweise kann ein Magnetfeldsensor der ersten Wirbelstromsensoreinheit bei der Prüfung durch einen Antrieb, insbesondere einen Linearmotor seitlich hin- und herbewegt werden, sodass eine Zick-Zack Bewegung bei der Prüfung erzeugt wird. Dies würde zum Beispiel eine geometrische Prüfung verbessern. Der technische Effekt der Nebenbewegung besteht unter anderem darin, dass die Richtungsabhängigkeit der

Auflösung reduziert und die Auflösung verbessert wird.

[0032] Es ist bevorzugt, dass die erste Wirbelstromsensoreinheit mehrreihig angeordnete Anregungselemente, beispielsweise Anregungsdrähte, aufweist, die derart angeordnet sind, dass mit diesen gewinkelt zueinander ausgerichtete Anregungsströme bewirkbar sind, um die Identifikation von Eigenschaften zu verbessern.

[0033] In einer bevorzugten Ausführungsvariante des Prüfsystems ist vorgesehen, dass die erste Wirbelstromsensoreinheit eine erste Prüfauflösung und die zweite Wirbelstromsensoreinheit eine zweite Prüfauflösung aufweist, wobei die erste Prüfauflösung höher, insbesondere um ein Vielfaches höher, ist als die zweite Prüfauflösung.

[0034] Unter der ersten und zweiten Prüfauflösung ist insbesondere ein Maß für die Detailgenauigkeit der mit der ersten Wirbelstromsensoreinheit und der zweiten Wirbelstromsensoreinheit erfolgten Prüfung zu verstehen. Je höher die Prüfauflösung der Wirbelstromsensoreinheiten ausgebildet ist, je genauer kann die Prüfung durchgeführt werden und je kleiner können die identifizierbaren Eigenschaften sein. Ferner kann unter einer Prüfauflösung ein maximaler Messpunktabstand verstanden werden.

[0035] Es ist bevorzugt, dass die erste Prüfauflösung kleiner 100 Mikrometer beträgt. Ferner kann es bevorzugt sein, dass die zweite Prüfauflösung kleiner 1 Millimeter beträgt.

[0036] Eine weitere bevorzugte Fortbildung des Prüfsystems zeichnet sich dadurch aus, dass der Größengrenzwert zwischen 15 Mikrometern und 100 Mikrometern, insbesondere zwischen 20 Mikrometern und 50 Mikrometern, beträgt. Es hat sich herausgestellt, dass eine Auswahl einer ersten Wirbelstromsensoreinheit und einer zweiten Wirbelstromsensoreinheiten, die durch diesen Größengrenzwert und/oder ihre örtliche Prüfauflösung unterschieden werden, in besonders vorteilhafter Weise zur Erkennung der unterschiedlichen Eigenschaften in verfestigtem Pulvermaterial geeignet sind.

[0037] In einer weiteren bevorzugten Ausführungsvariante des Prüfsystems ist vorgesehen, dass die erste Wirbelstromsensoreinheit ein Magnetfeldsensor ist oder diesen umfasst. Vorzugsweise umfasst die erste Wirbelstromsensoreinheit eine Vielzahl an Magnetfeldsensoren. Die Magnetfeldsensoren können als Array angeordnet werden. Der Magnetfeldsensor kann beispielsweise ein magnetoresistiver Sensor, ein GMR- (Riesenmagnetwiderstand-) Sensor, ein TMR- (magnetischer Tunnelwiderstands-) Sensor und/oder ein Hall-Sensor sein. Es ist

bevorzugt, dass der Magnetfeldsensor miniaturisierbar ist.

[0038] Ferner kann es bevorzugt sein, dass die zweite Wirbelstromsensoreinheit eine Wirbelstromspule ist oder diese umfasst. Die Wirbelstromspule kann beispielsweise eine gedruckte Spule sein. Es ist ferner bevorzugt, dass die zweite Wirbelstromsensoreinheit zwei oder mehr Wirbelstromspulen aufweist. Es ist bevorzugt, dass bei der zweiten Wirbelstromsensoreinheit die Wirbelstromspulen auch als Anregungseinheit verwendet werden.

[0039] Insbesondere die Kombination aus Magnetfeldsensoren und Wirbelstromspulen ermöglicht in vorteilhafterweise die Identifikation von großen Eigenschaften und von kleineren Eigenschaften in Form einer Ansammlung von Mikrofehlstellen.

[0040] Es ist bevorzugt, dass die Magnetfeldsensoren beabstandet von den Wirbelstromspulen angeordnet sind, sodass die Wirbelstromspulen die Magnetfeldsensoren physikalisch nicht oder lediglich geringfügig beeinflussen. Darüber hinaus kann der Einfluss der Wirbelstromspulen auf die Magnetfeldsensoren durch zusätzliche Elemente beeinflusst werden.

[0041] In einer weiteren bevorzugten Ausführungsvariante ist vorgesehen, dass die Prüfeinheit angeordnet und ausgebildet ist, während der Verfestigung, insbesondere einer Belichtung und/oder eines Stillstands und/oder eines Bewegens der Bewegungseinheit, die elektromagnetische Materialeigenschaft mittels der Wirbelstromprüfung zu detektieren. Die Prüfeinheit kann beispielsweise in Vorschubrichtung vor oder hinter der Bewegungseinheit angeordnet werden. Die Bewegungseinheit kann beispielsweise eine Beschichtereinheit sein.

[0042] Eine weitere bevorzugte Fortbildung des Prüfsystems zeichnet sich dadurch aus, dass dieses eine oder die mit der Prüfeinheit signaltechnisch gekoppelte Steuerungsvorrichtung umfasst, die eingerichtet ist, basierend auf einer identifizierten Eigenschaft, insbesondere einer Einzelfehlstelle und/oder einem porösen Fehlstellenbereich, ein Anpassungssignal, insbesondere ein Korrektursignal, zu erzeugen, das eine Anpassungsstrategie, insbesondere eine Korrekturstrategie, des Fertigungssystems zur Anpassung, insbesondere zur Behebung, der Eigenschaft repräsentiert.

[0043] Unter dem Anpassungssignal ist jegliche Art eines Informationsträgers zu verstehen, das geeignet ist, die Anpassungsstrategie des Fertigungssystems zu bewirken. Das Anpassungssignal kann beispielsweise als ein Datensatz ausgebildet sein und/oder einen Befehl repräsentieren. Das Anpassungssignal kann darüber hinaus auf einer Identifikation und/oder Klassifikation der Eigenschaft, insbesondere der Einzelfehlstelle und/oder des Fehlstellenbereichs basieren.

ungssignal kann darüber hinaus auf einer Identifikation und/oder Klassifikation der Eigenschaft, insbesondere der Einzelfehlstelle und/oder des Fehlstellenbereichs basieren.

[0044] Ferner ist es bevorzugt, dass die Steuerungsvorrichtung eingerichtet ist, Parameter des Fertigungssystems basierend auf den identifizierten Eigenschaften und/oder basierend auf dem Anpassungssignal zu optimieren, sodass die Erzeugung von Eigenschaften vermindert oder vermieden wird.

[0045] Die Steuerungsvorrichtung ist vorzugsweise derart eingerichtet, dass das Anpassungssignal eine Anpassung von Fertigungs- und/oder Maschinenparametern und/oder Prozessbedingungen bewirkt. Beispielsweise kann das Anpassungssignal bewirken, dass Prozessparameter, wie beispielsweise Scanner-, Belichtungs-, Bebinderungs- und Beschichtungsparameter, Gasfluss, Vorwärmung und/oder Baukammerdruck, angepasst werden.

[0046] Ferner kann das Anpassungssignal eine erneute Belichtung und/oder Bebinderung, insbesondere eine angepasste Belichtung und/oder Bebinderung, von Eigenschaften bewirken. Das Anpassungssignal kann ferner eine Änderung der Scanstrategie und/oder eines Scanmusters, einer Änderung einer Belichtungsreihenfolge, eine Änderung einer zeitlichen Abfolge der Belichtung, ein erneuter Pulverauftrag, eine Anpassung des Bauplattformhubs beziehungsweise der Schichtdicke bewirken. Ferner kann das Anpassungssignal den Abbruch von einzelnen Bauteilen oder eines gesamten Bauauftrages repräsentieren oder bewirken.

[0047] Das Prüfsystem ermöglicht somit die Anpassung, insbesondere die Korrektur, einer Eigenschaft der aktuell erzeugten Schicht, wohingegen bestehende Ansätze in der Regel erst eine Beeinflussung der Eigenschaft durch weitere, bereits erzeugte Schichten hindurch ermöglichen. Somit wird eine direktere und gezieltere Beeinflussung der Eigenschaften ermöglicht. Das Prüfsystem ermöglicht ferner nicht nur die Identifikation von Fehlstellen bzw. die Prüfung der Integrität des Bauteils und eine Zustandserfassung der Materialeigenschaften innerhalb der Prüftiefe, sondern ermöglicht auch die gezielte Ableitung von Maßnahmen zur aktiven Behebung der Fehlstellen sowie die Nachkontrolle, ob die Behebung erfolgreich war. Hier kommt die Wiederholbarkeit der Prüfung zum Tragen. Kein anderes in-situ Prüfsystem ermöglicht eine direkte Prüfung, Ableitung von Maßnahmen sowie eine gezielte Ausheilung und Überprüfung dieser Ausheilung.

[0048] In einer bevorzugten Fortbildung des Prüfsystems ist vorgesehen, dass die Steuerungsvorrichtung eingerichtet ist, die Prüfeinheit derart anzu-

steuern, dass eine vordefinierte Anzahl an Schichten, insbesondere an vordefinierten Schichtpositionen, geprüft werden. Durch ein derartig ausgebildetes Prüfsystem besteht beispielsweise die Möglichkeit, dass die Schichten 50 bis 500 eines Baujobs geprüft werden, währenddessen die übrigen Schichten aufgrund ihrer Irrelevanz für die Bauteilqualität nicht geprüft werden. Dies kann beispielsweise der Fall sein, wenn die ersten Schichten zur Anbindung des Bauteils an eine Bauplattform vorgesehen sind und somit deren Eigenschaften nicht relevant sind. Dadurch wird die erzeugte Datenmenge weiter reduziert.

[0049] Eine bevorzugte Ausführungsvariante des Prüfsystems zeichnet sich dadurch aus, dass die Prüfeinheit angeordnet und ausgebildet ist, eine auf Grundlage des Anpassungssignals angepasste Eigenschaft zu identifizieren. Ferner kann es bevorzugt sein, dass die Steuerungsvorrichtung eingerichtet ist, basierend auf der identifizierten angepassten Eigenschaft ein zweites Anpassungssignal zu erzeugen, das eine zweite Anpassungsstrategie des Fertigungssystems zur weiteren Anpassung der angepassten Eigenschaft repräsentiert.

[0050] In einer weiteren bevorzugten Ausführungsvariante des Prüfsystems ist vorgesehen, dass dieses eine Anregungseinheit zur Bewirkung des Wirbelstroms in dem verfestigten Pulvermaterial umfasst, wobei im bestimmungsgemäßen Betrieb eine Anregungseinheit neben oder zwei Anregungseinheiten beidseitig von der ersten Wirbelstromsensoreinheit in gleichem Abstand zur Prüfoberfläche angeordnet ist bzw. sind.

[0051] Diese Anordnung ermöglicht eine besonders geringe Beabstandung der Wirbelstromsensoreinheiten zu der Prüfoberfläche, insbesondere einer Pulverbettoberfläche, sodass die Wirbelstromprüfung in vorteilhafterweise ermöglicht wird. Die Anregungseinheit ist vorzugsweise angeordnet und ausgebildet, den Wirbelstrom derart zu bewirken, dass dieser eine Eindringtiefe von größer 100 Mikrometer, vorzugsweise mehr als 200 Mikrometer aufweist.

[0052] Im bestimmungsgemäßen Betrieb befinden sich die Wirbelstromsensoreinheiten zwischen dem Pulverbett und der Anregungseinheit und/oder in der gleichen Ebene wie die Anregungseinheit parallel zur Oberfläche des Pulverbetts.

[0053] In einer weiteren bevorzugten Ausführungsvariante des Prüfsystems ist vorgesehen, dass dieses ein Topografiemesssystem zur Ermittlung einer Topografie des verfestigten Pulvermaterials, insbesondere einer Oberfläche des verfestigten Pulvermaterials, das eingerichtet ist, ein Topografiesignal charakterisierend ein Topografieabbild zu erzeugen, das einen Abstand des verfestigten Pulvermaterials zu

der Prüfeinheit repräsentiert, wobei die Eigenschaft weiter basierend auf dem Topografieabbild identifiziert wird.

[0054] Das Topografiemesssystem kann beispielsweise eine Einheit zur Streifenlichtprojektion, ein Linienscanner und/oder eine Lichtfeldkamera sein. Der Abstand des verfestigten Pulvermaterials zu der Prüfeinheit wird insbesondere zwischen der Oberfläche des verfestigten Pulvermaterials und der ersten und/oder zweiten Wirbelstromsensoreinheit, insbesondere deren Einzelsensoren, ermittelt.

[0055] Eine weitere bevorzugte Ausführungsvariante des Prüfsystems zeichnet sich dadurch aus, dass die erste Wirbelstromsensoreinheit und die zweite Wirbelstromsensoreinheit versetzt zueinander angeordnet sind. Beispielsweise können diese einen Pitch bzw. Abstand aufweisen. Ferner können diese mehrreihig angeordnet sein. Es ist insbesondere bevorzugt, dass die erste Wirbelstromsensoreinheit und die zweite Wirbelstromsensoreinheit im bestimmungsgemäßen Betrieb horizontal zueinander versetzt angeordnet sind. Insbesondere sind bei der zweiten Wirbelstromsensoreinheit deren Einzelsensoren versetzt zueinander angeordnet. Im bestimmungsgemäßen Betrieb können die Einzelsensoren orthogonal zu einer Hauptbewegungsrichtung, insbesondere in Vorschubrichtung, der Bewegungseinheit zueinander versetzt angeordnet sein.

[0056] In einer weiteren bevorzugten Ausführungsvariante des Prüfsystems ist vorgesehen, dass die erste Wirbelstromsensoreinheit und/oder die zweite Wirbelstromsensoreinheit derart angeordnete und ausgebildete Einzelsensoren, insbesondere die Magnetfeldsensoren und/oder Wirbelstromspulen, aufweisen, dass diese um mindestens einen weiteren Einzelsensor ergänzbar sind. Mit einer derartigen Anordnung und Ausbildung der Wirbelstromsensoreinheiten sind diese individuell erweiterbar, sodass verschiedene Anforderungen der additiven Fertigung adressiert werden können.

[0057] In einer weiteren bevorzugten Ausführungsvariante ist vorgesehen, dass das Prüfsystem eine mit der Prüfeinheit signaltechnisch gekoppelte anwendungsspezifische integrierte Schaltung aufweist, die eingerichtet ist, von der ersten Wirbelstrommesseinheit und/oder der zweiten Wirbelstrommesseinheit aufgenommenen Signale zu verstärken, zu digitalisieren, zu filtern und/oder zur weiteren Verarbeitung bereitzustellen.

[0058] Ein Vorteil der anwendungsspezifischen integrierten Schaltung ist deren hohe Integrationsdichte, sodass diese lediglich einen geringen Raum beansprucht, sodass die Prüfeinheit miniaturisierbar ist.

[0059] In einer weiteren bevorzugten Ausführungsvariante des Prüfsystems ist vorgesehen, dass die Steuerungsvorrichtung eingerichtet ist, eine Bauteilkante und/oder eine Kontur des Bauteils, insbesondere des verfestigten Pulvermaterials, basierend auf Ausgangssignalen der ersten und/oder zweiten Wirbelstromsensoreinheit zu identifizieren. Die Erfassung von Bauteilkanten und Konturen ist mit dem Prüfsystem in vorteilhafterweise möglich, da loses Pulvermaterial bei den Messungen der ersten und/oder der zweiten Wirbelstromsensoreinheit wie ein Isolator wirkt. Eine intelligente Überlagerung und Verarbeitung beider Signale sind daher möglich.

[0060] Gemäß einem weiteren Aspekt wird die eingangs genannte Aufgabe gelöst durch ein Fertigungssystem zur additiven Herstellung eines Bauteils mittels Verfestigung eines Pulvermaterials, umfassend eine Baukammer, in der das Pulvermaterial anordenbar ist, eine Verfestigungseinheit, die angeordnet und ausgebildet ist, das Pulvermaterial zu verfestigen, insbesondere mit einem energiereichen Strahl oder einem Bindemittel, eine über dem zu verfestigenden Pulvermaterial verfahrbar angeordnete Bewegungseinheit, und ein Prüfsystem nach einer der im Vorherigen beschriebenen Ausführungsvarianten, wobei die Prüfeinheit an der Bewegungseinheit angeordnet ist.

[0061] Das Fertigungssystem kann vorzugsweise mit der im Vorherigen beschriebenen Steuerungsvorrichtung des Prüfsystems gesteuert werden. Alternativ kann das Fertigungssystem eine Steuerungseinheit aufweisen, die das im Vorherigen genannte Anpassungssignal empfängt und/oder erzeugt und mittels des Anpassungssignal das Fertigungssystem steuerbar ist. Das Fertigungssystem kann mit dem im Vorherigen beschriebene Prüfsystem prozessparallel gesteuert oder geregelt werden, sodass die erkannten Eigenschaften der aktuell erzeugten Schicht und/oder einer der zuvor erzeugten Schichten angepasst, insbesondere korrigiert, werden oder ein Bauteil oder ein Bauauftrag abgebrochen wird.

[0062] Die Verfestigungseinheit ist vorzugsweise als eine Belichtungseinheit zur Belichtung des Pulvermaterials ausgebildet. Alternativ oder ergänzend ist die Verfestigungseinheit zur Applikation eines Bindemittels ausgebildet.

[0063] In einer bevorzugten Ausführungsvariante des Fertigungssystems ist vorgesehen, dass die Bewegungseinheit eine Beschichtereinheit zur Ausbildung einer Pulverbettoberfläche ist. Die Beschichtereinheit hat beispielsweise eine glättende Funktion, um eine ebene Pulverbettoberfläche auszubilden. Diese Funktion kann beispielsweise mit einer Beschichterlippe ausgebildet werden. Darüber hinaus kann die Beschichtereinheit einen Pulvermaterialvorrat aufweisen oder mit einem Pulvermaterial-

speicher derart gekoppelt sein, dass das Pulvermaterial der Beschichtereinheit zuführbar ist. Die Anordnung der Prüfeinheit an dem Beschichter hat den Vorteil, dass der Beschichter das Pulverbett regelmäßig abfährt und somit eine vollständige prozessparallele Prüfung des verfestigten Pulvermaterials möglich ist. Insbesondere bei einem unidirektionalen Schichtauftrag ist es bevorzugt, dass die Prüfeinheit eine erste Prüfung bei einem Hinweg und eine zweite Prüfung auf einem Rückweg zu einer Ausgangslage durchführt.

[0064] In einer weiteren bevorzugten Ausführungsvariante ist die Bewegungseinheit als mindestens ein Handhabungssystem, insbesondere ein Roboter, beispielsweise mit mindestens einem Roboterarm, ausgebildet. Das Handhabungssystem ist vorzugsweise angeordnet und ausgebildet, solche Abschnitte bereits zu prüfen, die während der noch laufenden Verfestigung des Pulvermaterials zugänglich sind. Der Prüfprozess würde mit dem Verfestigungsprozess teilweise oder gänzlich parallelisierbar. Ferner ist es bevorzugt, dass die Bewegungseinheit die Verfestigungseinheit ist oder umfasst.

[0065] Gemäß einem weiteren Aspekt wird die eingangs genannte Aufgabe gelöst durch ein Verfahren zur in-situ Erkennung von Eigenschaften innerhalb eines verfestigten Pulvermaterials, insbesondere mit einem Prüfsystem nach einer der im Vorherigen beschriebenen Ausführungsvarianten, umfassend die Schritte: Detektieren einer elektromagnetischen Materialeigenschaft von verfestigten Pulvermaterial mittels einer Wirbelstromprüfung, sodass Leitfähigkeitsunterschiede innerhalb des verfestigten Pulvermaterials erkannt werden, um Eigenschaften zu identifizieren, wobei mit einer ersten Wirbelstromsensoreinheit eine Eigenschaft mit einer ersten Eigenschaftsgröße größer-gleich einem Größengrenzwert identifiziert wird, insbesondere eine Einzelfehlstelle, und wobei mit einer zweiten Wirbelstromsensoreinheit einer Ansammlung von Eigenschaften mit einer zweiten Eigenschaftsgröße kleiner dem Größengrenzwert identifiziert werden, insbesondere ein poröser Fehlstellenbereich.

[0066] Es ist bevorzugt, dass Prüfsignale erzeugt werden, auf Basis derer Leitfähigkeitsunterschiede erkannt werden, sodass die elektromagnetische Materialeigenschaft detektiert wird. Die Detektion der Materialeigenschaft wird vorzugsweise mit einer ersten Steuereinheit der ersten Wirbelstromsensoreinheit und/oder einer zweiten Steuereinheit der zweiten Wirbelstromsensoreinheit und/oder einer Steuerungsvorrichtung durchgeführt. Ferner erfolgt die Identifikation der Eigenschaft vorzugsweise mit der ersten Steuereinheit und/oder der zweiten Steuereinheit und/oder der Steuerungsvorrichtung.

[0067] Gemäß einer bevorzugten Ausführungsvariante des Verfahrens umfasst dieses die Schritte: Erzeugen eines Anpassungssignals, insbesondere eines Korrektursignals, basierend auf einer identifizierten Eigenschaft, insbesondere einer Einzelfehlstelle und/oder einem porösen Fehlstellenbereich, wobei das Anpassungssignal, insbesondere das Korrektursignal, eine Anpassungsstrategie, insbesondere eine Korrekturstrategie, eines Fertigungssystems zur Anpassung der Eigenschaft repräsentiert und Ansteuern des Fertigungssystems mit dem Anpassungssignal, insbesondere dem Korrektursignal, um die Eigenschaft anzupassen.

[0068] Für weitere Vorteile, Ausführungsvarianten und Ausführungsdetails der einzelnen Aspekte und ihrer möglichen Fortbildungen wird auch auf die erfolgte Beschreibung zu den weiteren Aspekten, den entsprechenden Merkmalen und Fortbildungen verwiesen.

[0069] Bevorzugte Ausführungsbeispiele werden exemplarisch anhand der beiliegenden Figuren erläutert. Es zeigen:

Fig. 1: eine schematische, zweidimensionale Ansicht einer beispielhaften Ausführungsform eines Fertigungssystems;

Fig. 2: eine schematische, zweidimensionale Draufsicht des in **Fig. 1** gezeigten Fertigungssystems;

Fig. 3: eine weitere schematische, zweidimensionale Ansicht einer beispielhaften Ausführungsform eines Fertigungssystems;

Fig. 4: eine weitere schematische, zweidimensionale Ansicht einer beispielhaften Ausführungsform eines Fertigungssystems;

Fig. 5: eine schematische, zweidimensionale Ansicht einer beispielhaften Ausführungsform einer ersten Wirbelstromsensoreinheit;

Fig. 6: eine schematische, zweidimensionale Ansicht einer beispielhaften Ausführungsform einer Verbindung zwischen einem Magnetfeldsensor und einer anwendungsspezifischen integrierten Schaltung;

Fig. 7: eine schematische, zweidimensionale Ansicht einer beispielhaften Ausführungsform einer zweiten Wirbelstromsensoreinheit;

Fig. 8: eine schematische Ansicht eines beispielhaften Verfahrens; und

Fig. 9: eine schematische Ansicht eines weiteren beispielhaften Verfahrens.

[0070] In den Figuren sind gleiche oder im Wesentlichen funktionsgleiche beziehungsweise -ähnliche Elemente mit dem gleichen Bezugszeichen bezeichnet.

[0071] In den **Fig. 1** bis **3** ist ein Fertigungssystem 100 zur additiven Herstellung eines Bauteils 102 mittels Belichtung eines Pulvermaterials 104 gezeigt. Das Bauteil 102 wird durch verfestigtes Pulvermaterial 104 ausgebildet. Das Pulvermaterial 104 wird mit einem energiereichen Strahl 128 verfestigt. Der energiereiche Strahl 128 kann beispielsweise ein Laserstrahl sein. Das Bauteil 102 wird in dem Pulverbett 106 erzeugt. Hierfür wird mit der als Beschichter 112 ausgebildeten Bewegungseinheit 110 schichtweise Pulvermaterial 104 aufgetragen, wobei die Stärke der Schicht des Pulvermaterials 104 im Mikrometer- oder Millimeterbereich liegen kann. Die Bewegungseinheit 110 wird in Vorschubrichtung 118 bewegt.

[0072] Nachdem eine Schicht des Pulvermaterials 104 aufgetragen wurde, wird dieses selektiv mit der Belichtungseinheit 108 belichtet und dadurch in der Regel aufgeschmolzen. Anschließend verfährt der Tisch 124 mit der Verstelleinheit 126 um eine Schichtdicke vertikal nach unten und eine neue Schicht des Pulvermaterials 104 kann mit dem Beschichter 112 erzeugt werden. Die Anlage ist an einem Gestell 122 angeordnet.

[0073] Durch das Belichten des Pulvermaterials 104 mit dem energiereichen Strahl 128 entstehen regelmäßig auch Eigenschaften 114, 116. Die Eigenschaft 114 ist als eine Einzelfehlstelle und die Eigenschaft 116 ist als ein poröser Fehlstellenbereich mit einer Vielzahl an Mikrofehlstellen dargestellt. Dieser Prozess erfolgt in der Baukammer 107.

[0074] In **Fig. 3** ist gezeigt, dass im Strahlengang des energiereichen Strahls 128 ein Spiegelement 120 angeordnet ist, der beispielsweise Teil eines Scanners sein kann. Mit dem Spiegel 120 kann der energiereiche Strahl 128 auf eine beliebige Position der als Pulverbettoberfläche 130 ausgebildeten Prüfoberfläche gerichtet werden.

[0075] Das Fertigungssystem 100 umfasst darüber hinaus das Prüfsystem 200. Das Prüfsystem 200 ist zur in-situ Erkennung der Eigenschaften 114, 116 innerhalb des verfestigten Pulvermaterials 102 ausgebildet. Das Prüfsystem 200 umfasst eine an der Bewegungseinheit 110 angeordnete wirbelstrombasierte Prüfeinheit 202. Die Prüfeinheit 202 ist angeordnet und ausgebildet, eine elektromagnetische Materialeigenschaft des verfestigten Pulvermaterials 102 mittels einer Wirbelstromprüfung zu detektieren, sodass Leitfähigkeitsunterschiede innerhalb des verfestigten Pulvermaterials 102 erkennbar sind, um die Eigenschaften 114, 116 während der additiven Herstellung zu identifizieren. Der Wirbelstrom 204 wird von dem Prüfsystem 200 mit einer Anregungseinheit 242 oder einer von dem Prüfsystem 200 nicht umfassten Anregungseinheit bewirkt.

[0076] Die Prüfeinheit 202 umfasst eine erste Wirbelstromsensoreinheit 210, die angeordnet und ausgebildet ist, eine Eigenschaft 114 mit einer ersten Eigenschaftsgröße größer-gleich einem Größengrenzwert zu identifizieren, insbesondere eine Einzelfehlstelle. Darüber hinaus umfasst die Prüfeinheit 202 eine zweite Wirbelstromsensoreinheit 230, die angeordnet und ausgebildet ist, eine Ansammlung von Eigenschaften 116 mit einer zweiten Eigenschaftsgröße kleiner dem Größengrenzwert zu identifizieren, insbesondere einen porösen Fehlstellenbereich.

[0077] Das Prüfsystem 200 umfasst ferner eine mit der Prüfeinheit 202 signaltechnisch gekoppelte Steuerungsvorrichtung 240, die eingerichtet ist, basierend auf einer identifizierten Eigenschaft 114, 116, ein Korrektursignal zu erzeugen, das eine Korrekturstrategie des Fertigungssystems 100 zur Behebung der Eigenschaft 114, 116 repräsentiert.

[0078] Das Prüfsystem 200 umfasst ferner ein Topografiemesssystem 244 zur Ermittlung einer Topografie des verfestigten Pulvermaterials 104. Das Topografiemesssystem 244 ist eingerichtet, ein Topografieabbild zu erzeugen, das einen Abstand der Pulverbettoberfläche 130 zu der Prüfeinheit 202 repräsentiert, wobei die Eigenschaft 114, 116 weiter basierend auf dem Topografieabbild identifiziert wird. Die Anordnung des Topografiemesssystems 244 an dem Beschichter 112 ist optional, da dieses auch dergestalt anordenbar ist, dass dieses die Topografie in der gesamten Bauebene erfassen kann, beispielsweise von schräg oberhalb der Bauebene.

[0079] In Fig. 4 ist ein im Wesentlichen analog zur Fig. 3 aufgebautes Fertigungssystem 100 gezeigt, wobei die Verfestigungseinheit als eine Bindemittel-einheit 246 zur Applikation eines Bindemittels 248 ausgebildet ist. Somit lässt sich ein mit einem Metal Binder Jetting Verfahren verfestigtes Pulvermaterial 104 mit dem im Vorherigen beschriebenen Prüfsystem 200 prüfen.

[0080] In Fig. 5 ist gezeigt, dass die erste Wirbelstromsensoreinheit 210 eine Vielzahl an Magnetfeldsensoren 212 umfasst. Die Magnetfeldsensoren 212 sind paarweise mit anwendungsspezifischen integrierten Schaltungen 214 verbunden. Diese Verbindung ist insbesondere in Fig. 6 gezeigt, wobei diese Verbindungen mittels Verbindungsflächen 222 und Verbindungsdrähten 224 ausgebildet sind.

[0081] Die anwendungsspezifischen integrierten Schaltungen 214 sind ferner mit einer FPGA 216, einem Steuerelement 218 und einem Speicherelement 220 verbunden. Die FPGA 216 kann beispielsweise zur Voranalyse und Zwischenspeicherung der von den Magnetfeldsensoren 212 erzeugten Daten und zur Vorgabe einer Prüffrequenz verwendet wer-

den. Die FPGA wirkt als Schnittstellenkonverter zwischen den ASICs und weiteren Einheiten des Systems.

[0082] Das Steuerelement 218 ist ferner mittels einer Datenverbindung 207 mit einer Recheneinheit 206 gekoppelt.

[0083] In Fig. 7 ist die zweite Wirbelstromsensoreinheit 230 im Detail gezeigt. Die zweite Wirbelstromsensoreinheit 230 ist analog zur ersten Wirbelstromsensoreinheit 210 aufgebaut. Die zweite Wirbelstromsensoreinheit 230 umfasst eine lediglich schematisch dargestellte Wirbelstromspule 232, die wiederum mit einer FPGA 234, einem Steuerelement 236 und einem Speicherelement 238 gekoppelt ist. Die zweite Wirbelstromsensoreinheit 230 weist vorzugsweise mehrere, vorzugsweise eine Vielzahl an, Wirbelstromspulen 232 auf.

[0084] In Fig. 8 ist ein Verfahren zur in-situ Erkennung von Eigenschaften 114, 116 innerhalb eines mittels eines energiereichen Strahls 128 verfestigten Pulvermaterials 102 gezeigt. Das Verfahren umfasst den Schritt 300: Detektieren einer elektromagnetischen Materialeigenschaft von verfestigten Pulvermaterial 102 mittels einer Wirbelstromprüfung, sodass Leitfähigkeitsunterschiede innerhalb des verfestigten Pulvermaterials 102 erkannt werden, um Eigenschaften 114, 116 während der additiven Herstellung zu identifizieren. Mit einer ersten Wirbelstromsensoreinheit 210 wird eine Eigenschaft mit einer ersten Eigenschaftsgröße und mit einer zweiten Wirbelstromsensoreinheit 230 eine Ansammlung von Eigenschaften identifiziert. In Schritt 302 wird die Eigenschaft 114 und/oder die Ansammlung an Eigenschaften 116 auf Basis der detektierten elektromagnetischen Materialeigenschaft erkannt.

[0085] Fig. 9 zeigt eine bevorzugte Ausführungsvariante des im Vorherigen beschriebenen Verfahrens. In Schritt 304 wird ein Korrektursignal basierend auf der identifizierten Eigenschaft 114, 116 erzeugt, insbesondere einer Einzelfehlstelle und/oder einem porösen Fehlstellenbereich, wobei das Korrektursignal eine Korrekturstrategie eines Fertigungssystems 100 zur Behebung der Eigenschaft 114, 116 repräsentiert. In Schritt 306 wird das Fertigungssystem 100 mit dem Korrektursignal angesteuert, um die Eigenschaft 114, 116 zu beheben.

[0086] Das im Vorherigen beschriebene Prüfsystem 200 und das korrespondierende Verfahren ermöglichen eine besonders vorteilhafte Erkennung von Eigenschaften 114, 116 in einem aus Pulvermaterial 104 erzeugten Bauteil. Insbesondere können unterschiedliche Eigenschaftsgrößen sicher identifiziert werden. Ferner ermöglichen das Prüfsystem und das Verfahren eine prozessparallele Steuerung oder Regelung eines additiven Herstellungsprozesses.

ses, da die erzeugte und erforderliche Datenmenge	240	Steuerungsvorrichtung
derart gering ist, dass eine Echtzeitsteuerung möglich ist.	242	Anregungseinheit
	244	Topografiemesssystem
BEZUGSZEICHEN	246	Bindemittleinheit
100 Fertigungssystem	248	Bindemittel
102 Bauteil		
104 Pulvermaterial		
106 Pulverbett		
107 Baukammer		
108 Belichtungseinheit		
110 Bewegungseinheit		
112 Beschichter		
114 Eigenschaften		
116 Eigenschaften		
118 Beschichtervorschub		
120 Spiegelement		
122 Gestell		
124 Tisch		
126 Verstelleinheit		
128 energiereicher Strahl		
130 Pulverbettoberfläche		
200 Prüfsystem		
202 wirbelstrombasierte Prüfeinheit		
204 Wirbelstrom		
206 Recheneinheit		
207 Datenverbindung		
210 erste Wirbelstromsensoreinheit		
212 Magnetfeldsensor		
214 ASIC (anwendungsspezifische integrierte Schaltung)		
216 FPGA (feldprogrammierbare Logikgatter-Anordnung)		
218 Steuerelement		
220 Speicherelement		
222 Verbindungsflächen		
224 Verbindungsdrähte		
230 zweite Wirbelstromsensoreinheit		
232 Wirbelstromspule		
234 FPGA		
236 Steuerelement		
238 Speicherelement		

ZITATE ENTHALTEN IN DER BESCHREIBUNG

Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde automatisiert erzeugt und ist ausschließlich zur besseren Information des Lesers aufgenommen. Die Liste ist nicht Bestandteil der deutschen Patent- bzw. Gebrauchsmusteranmeldung. Das DPMA übernimmt keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.

Zitierte Patentliteratur

- US 20169215 A1 [0007]

Patentansprüche

1. Prüfsystem (200) zur in-situ Erkennung von Eigenschaften (114, 116) innerhalb eines verfestigten Pulvermaterials (104), umfassend

- eine an einer Bewegungseinheit (110) anordenbare wirbelstrombasierte Prüfeinheit (202), die angeordnet und ausgebildet ist, eine elektromagnetische Materialeigenschaft von verfestigtem Pulvermaterial (104) mittels einer Wirbelstromprüfung zu detektieren, sodass Leitfähigkeitsunterschiede innerhalb des verfestigten Pulvermaterials (104) erkennbar sind, um Eigenschaften (114, 116) zu identifizieren,

- wobei die Prüfeinheit (202) eine erste Wirbelstromsensoreinheit (210) umfasst, die angeordnet und ausgebildet ist, eine Eigenschaft mit einer ersten Eigenschaftsgröße größer-gleich einem Größengrenzwert zu identifizieren, und

- wobei die Prüfeinheit (202) eine zweite Wirbelstromsensoreinheit (230) umfasst, die angeordnet und ausgebildet ist, eine Ansammlung von Eigenschaften mit einer zweiten Eigenschaftsgröße kleiner dem Größengrenzwert zu identifizieren.

2. Prüfsystem (200) nach Anspruch 1, wobei

- die erste Wirbelstromsensoreinheit (210) eine erste Prüfauflösung und die zweite Wirbelstromsensoreinheit (230) eine zweite Prüfauflösung aufweist, wobei die erste Prüfauflösung höher, insbesondere um ein Vielfaches höher, ist als die zweite Prüfauflösung.

3. Prüfsystem (200) nach einem der vorherigen Ansprüche, wobei

- der Größengrenzwert zwischen 15 µm und 100 µm, insbesondere zwischen 20 µm und 50 µm, beträgt.

4. Prüfsystem (200) nach einem der vorherigen Ansprüche, wobei

- die erste Wirbelstromsensoreinheit (210) ein Magnetfeldsensor (212) ist oder diesen umfasst, und/oder

- die zweite Wirbelstromsensoreinheit (230) eine Wirbelstromspule (232) ist oder diese umfasst.

5. Prüfsystem (200) nach einem der vorherigen Ansprüche, wobei die Prüfeinheit (202) angeordnet und ausgebildet ist, während der Verfestigung, insbesondere einer Belichtung und/oder eines Stillstands und/oder eines Bewegens der Bewegungseinheit (110), die elektromagnetische Materialeigenschaft mittels der Wirbelstromprüfung zu detektieren.

6. Prüfsystem (200) nach einem der vorherigen Ansprüche, umfassend

- eine mit der Prüfeinheit (202) signaltechnisch gekoppelte Steuerungsvorrichtung (240), die einge-

richtet ist, basierend auf einer identifizierten Eigenschaft, insbesondere einer Einzelfehlstelle und/oder einem porösen Fehlstellenbereich, ein Anpassungssignal zu erzeugen, das eine Anpassungsstrategie des Fertigungssystems zur Anpassung der Eigenschaft repräsentiert.

7. Prüfsystem (200) nach einem der vorherigen Ansprüche, wobei

- die Prüfeinheit angeordnet und ausgebildet ist, eine auf Grundlage des Anpassungssignals angepasste Eigenschaft zu identifizieren, und/oder

- die Steuerungsvorrichtung (240) eingerichtet ist, basierend auf der identifizierten angepassten Eigenschaft ein zweites Anpassungssignal zu erzeugen, das eine zweite Anpassungsstrategie des Fertigungssystems zur weiteren Anpassung der angepassten Eigenschaft repräsentiert.

8. Prüfsystem (200) nach einem der vorherigen Ansprüche, umfassend

- eine Anregungseinheit (242) zur Bewirkung des Wirbelstroms in dem verfestigten Pulvermaterial (104), wobei im bestimmungsgemäßen Betrieb die erste Wirbelstromsensoreinheit (210) und/oder die zweite Wirbelstromsensoreinheit (230) zwischen der Anregungseinheit (242) und einer Prüfoberfläche (130) angeordnet ist bzw. sind.

9. Prüfsystem (200) nach einem der vorherigen Ansprüche, umfassend ein Topografiemesssystem zur Ermittlung einer Topografie des verfestigten Pulvermaterials (104), das eingerichtet ist, ein Topographiesignal charakterisierend ein Topografieabbild zu erzeugen, das einen Abstand des verfestigten Pulvermaterials (104) zu der Prüfeinheit (202) repräsentiert, wobei die Eigenschaft weiter basierend auf dem Topografieabbild identifiziert wird.

10. Prüfsystem (200) nach einem der vorherigen Ansprüche, wobei die erste Wirbelstromsensoreinheit (210) und die zweite Wirbelstromsensoreinheit (230) versetzt zueinander angeordnet sind.

11. Prüfsystem (200) nach einem der vorherigen Ansprüche, wobei die erste Wirbelstromsensoreinheit (210) und/oder die zweite Wirbelstromsensoreinheit (230) derart angeordnete und ausgebildete Einzelsensoren aufweisen, dass diese um mindestens einen weiteren Einzelsensor ergänzbar sind.

12. Prüfsystem (200) nach einem der vorherigen Ansprüche, umfassend eine mit der Prüfeinheit (202) signaltechnisch gekoppelte anwendungsspezifische integrierte Schaltung (214), die eingerichtet ist, von der ersten Wirbelstromprüfeinheit und/oder der zweiten Wirbelstromprüfeinheit aufgenommene Signale zu verstärken, zu digitalisieren, zu filtern und/oder zur weiteren Verarbeitung bereitzustellen.

13. Prüfsystem (200) nach einem der vorherigen Ansprüche, wobei die Steuerungsvorrichtung (240) eingerichtet ist, eine Bauteilkante des Bauteils basierend auf Ausgangssignalen der ersten und/oder zweiten Wirbelstromsensoreinheit (210) zu identifizieren.

- Ansteuern des Fertigungssystems mit dem Anpassungssignal, um die Eigenschaft anzupassen.

Es folgen 9 Seiten Zeichnungen

14. Fertigungssystem (100) zur additiven Herstellung eines Bauteils mittels Verfestigung eines Pulvermaterials (104), umfassend

- eine Baukammer (107), in der das Pulvermaterial (104) anordenbar ist,
- eine Verfestigungseinheit (108, 146), die angeordnet und ausgebildet ist, das Pulvermaterial (104) zu verfestigen,
- eine über dem zu verfestigenden Pulvermaterial verfahrbar angeordnete Bewegungseinheit (110), und
- ein Prüfsystem (200) nach einem der vorherigen Ansprüche 1-13, wobei die Prüfeinheit (202) an der Bewegungseinheit (110) angeordnet ist.

15. Fertigungssystem (100) nach dem vorherigen Anspruch 14, wobei die Bewegungseinheit (110) eine Beschichtereinheit (112) zur Ausbildung einer Pulverbettoberfläche ist.

16. Verfahren zur in-situ Erkennung von Eigenschaften (114, 116) innerhalb eines verfestigten Pulvermaterials (104), insbesondere mit einem Prüfsystem nach einem der vorherigen Ansprüche 1-13, umfassend die Schritte:

- Detektieren einer elektromagnetischen Materialeigenschaft von verfestigtem Pulvermaterial (104) mittels einer Wirbelstromprüfung, sodass Leitfähigkeitsunterschiede innerhalb des verfestigten Pulvermaterials (104) erkannt werden, um Eigenschaften (114, 116) zu identifizieren,
- wobei mit einer ersten Wirbelstromsensoreinheit (210) eine Eigenschaft (114, 116) mit einer ersten Eigenschaftsgröße größer-gleich einem Größengrenzwert identifiziert wird, insbesondere eine Einzelfehlstelle, und
- wobei mit einer zweiten Wirbelstromsensoreinheit (230) eine Ansammlung von Eigenschaften mit einer zweiten Eigenschaftsgröße kleiner dem Größengrenzwert identifiziert werden, insbesondere einen porösen Fehlstellenbereich.

17. Verfahren nach dem vorherigen Anspruch 16, umfassend die Schritte:

- Erzeugen eines Anpassungssignals basierend auf einer identifizierten Eigenschaft, insbesondere einer Einzelfehlstelle und/oder einem porösen Fehlstellenbereich, wobei das Anpassungssignal eine Anpassungsstrategie eines Fertigungssystems zur Anpassung der Eigenschaft repräsentiert, und

Anhängende Zeichnungen

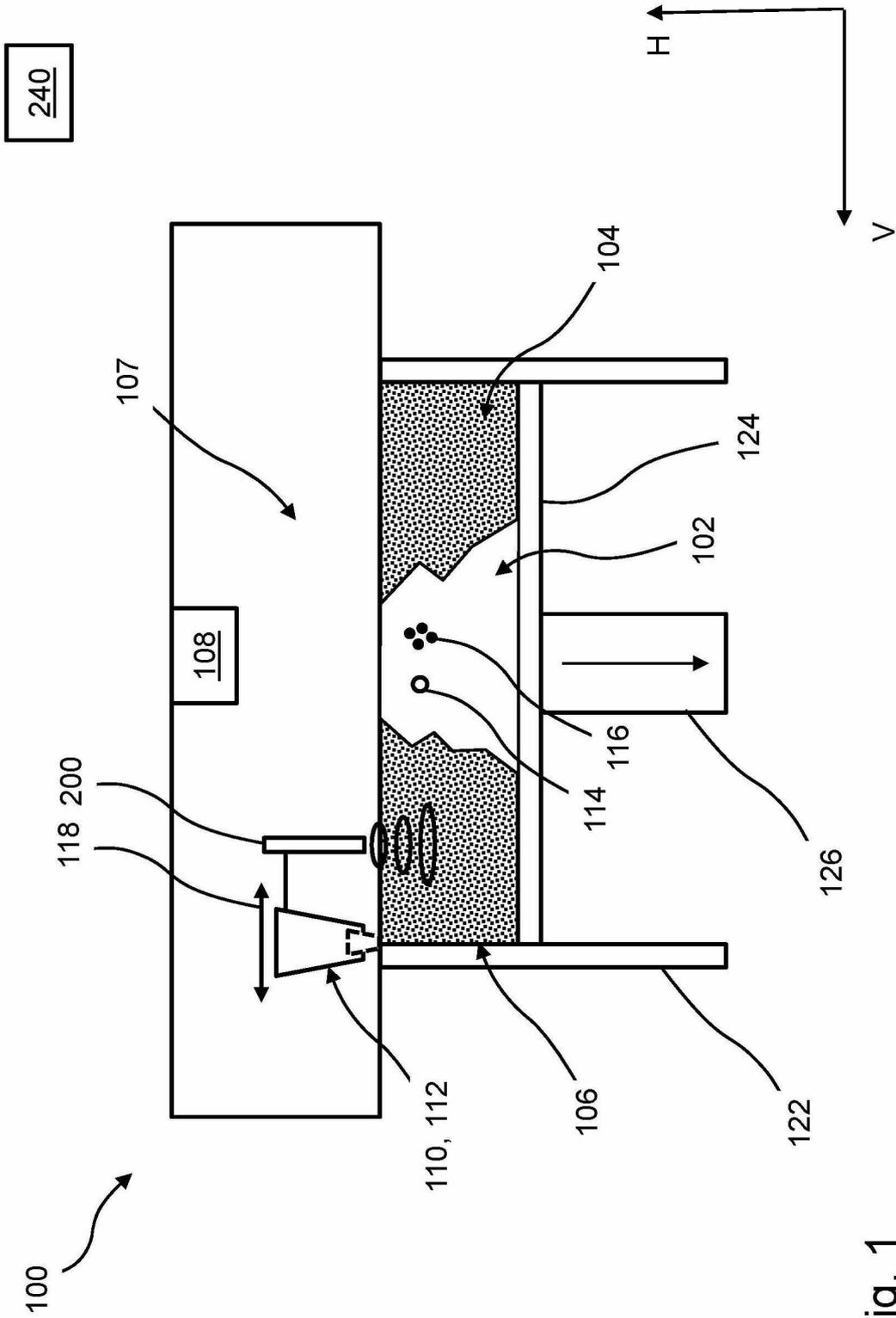


Fig. 1

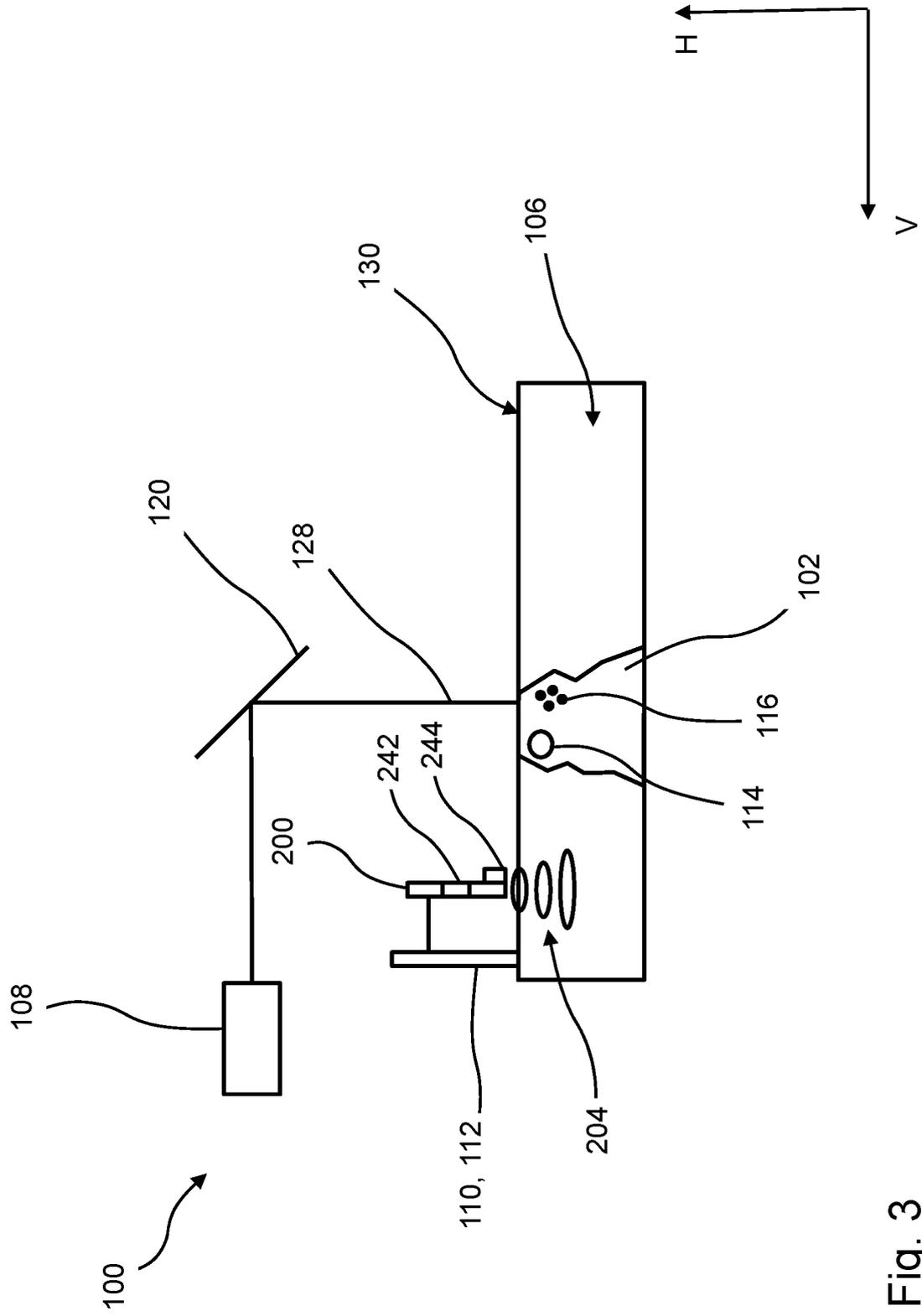


Fig. 3

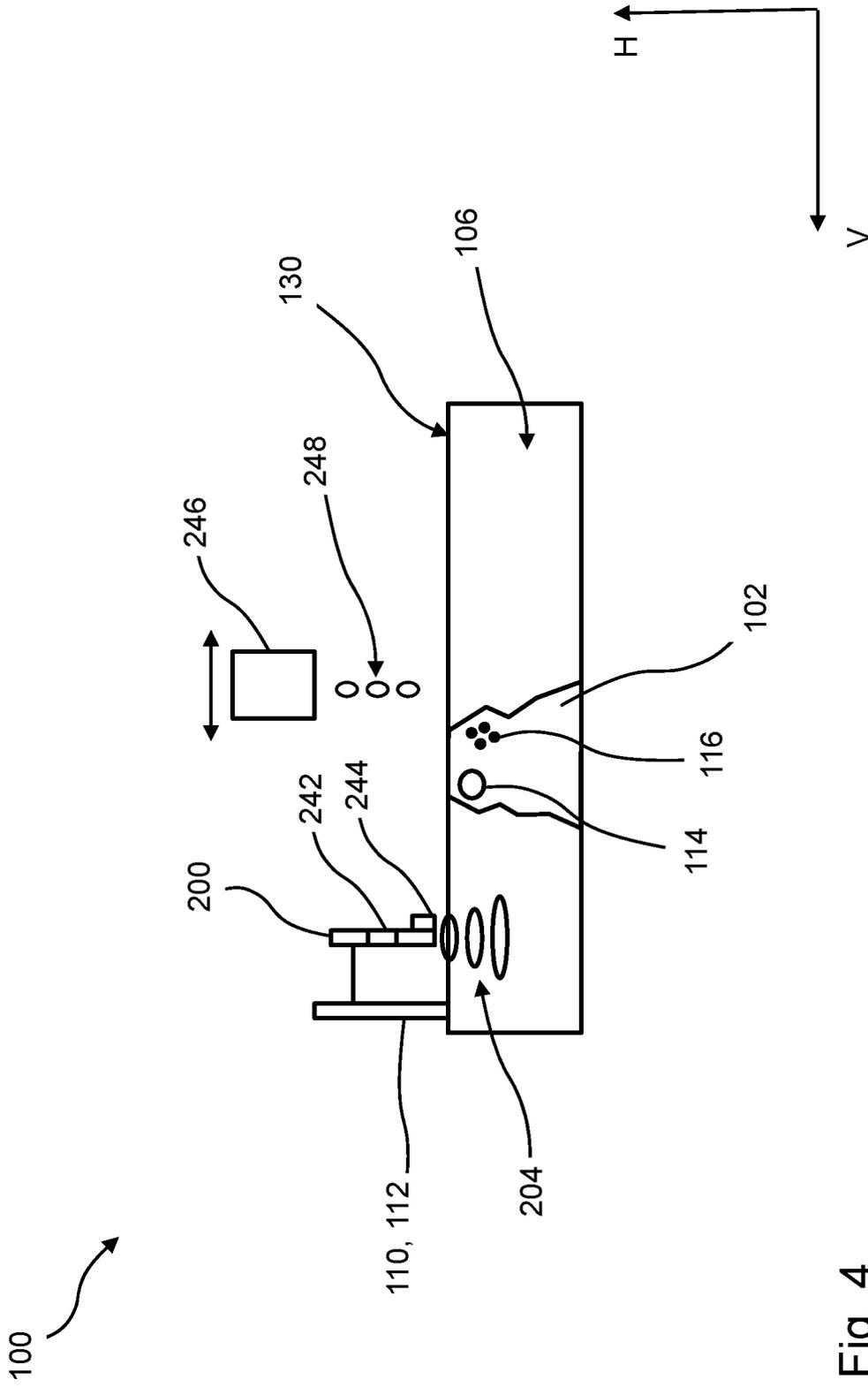


Fig. 4

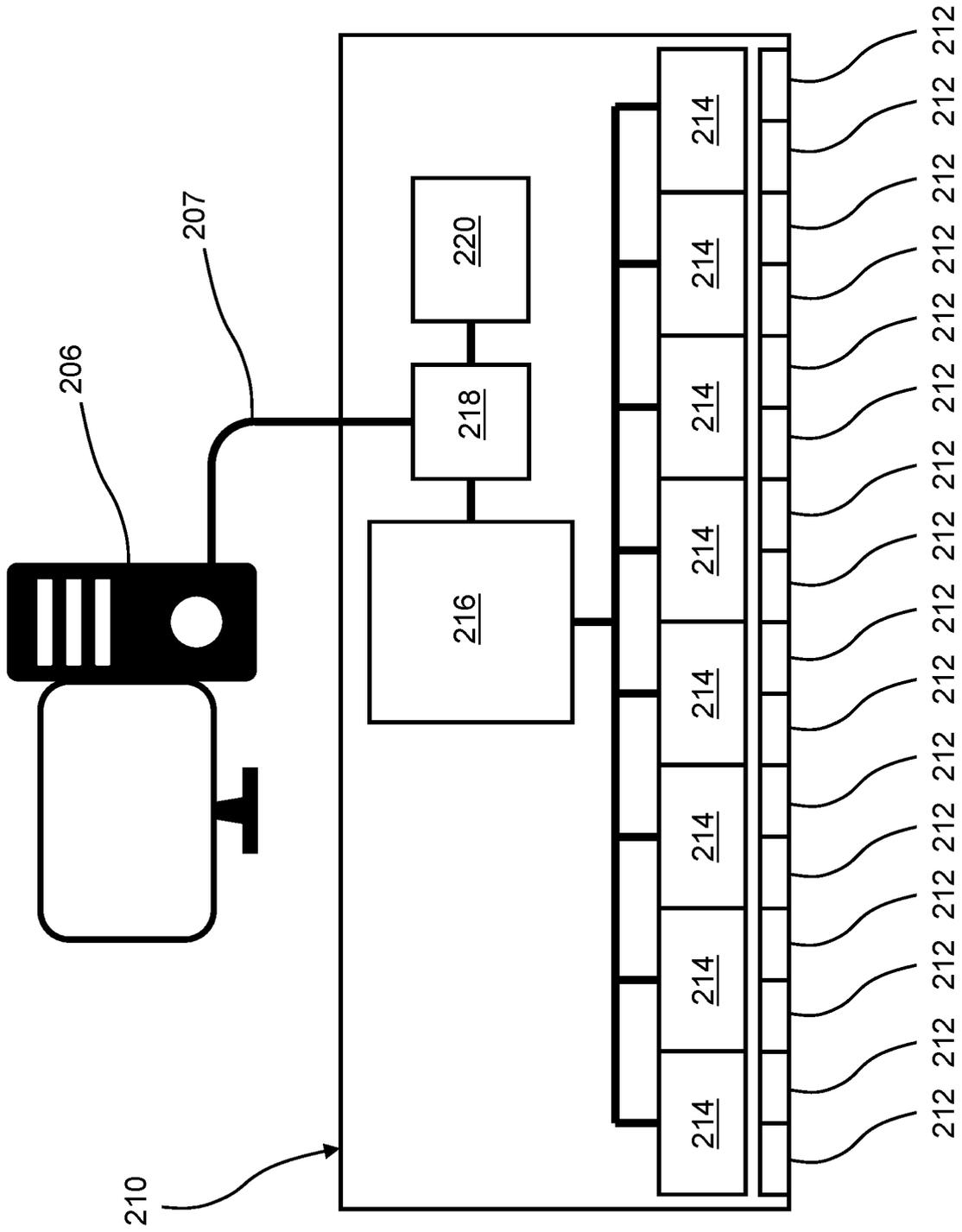


Fig. 5

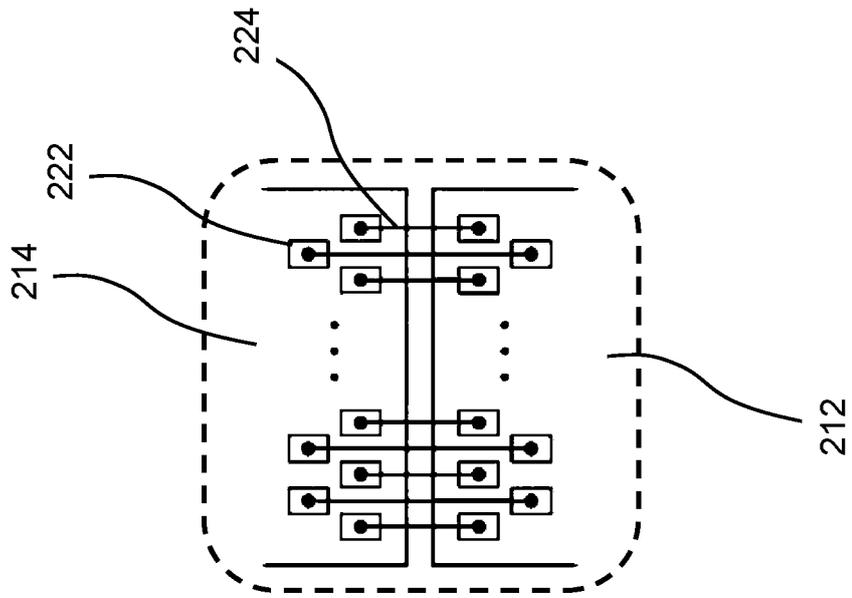


Fig. 6

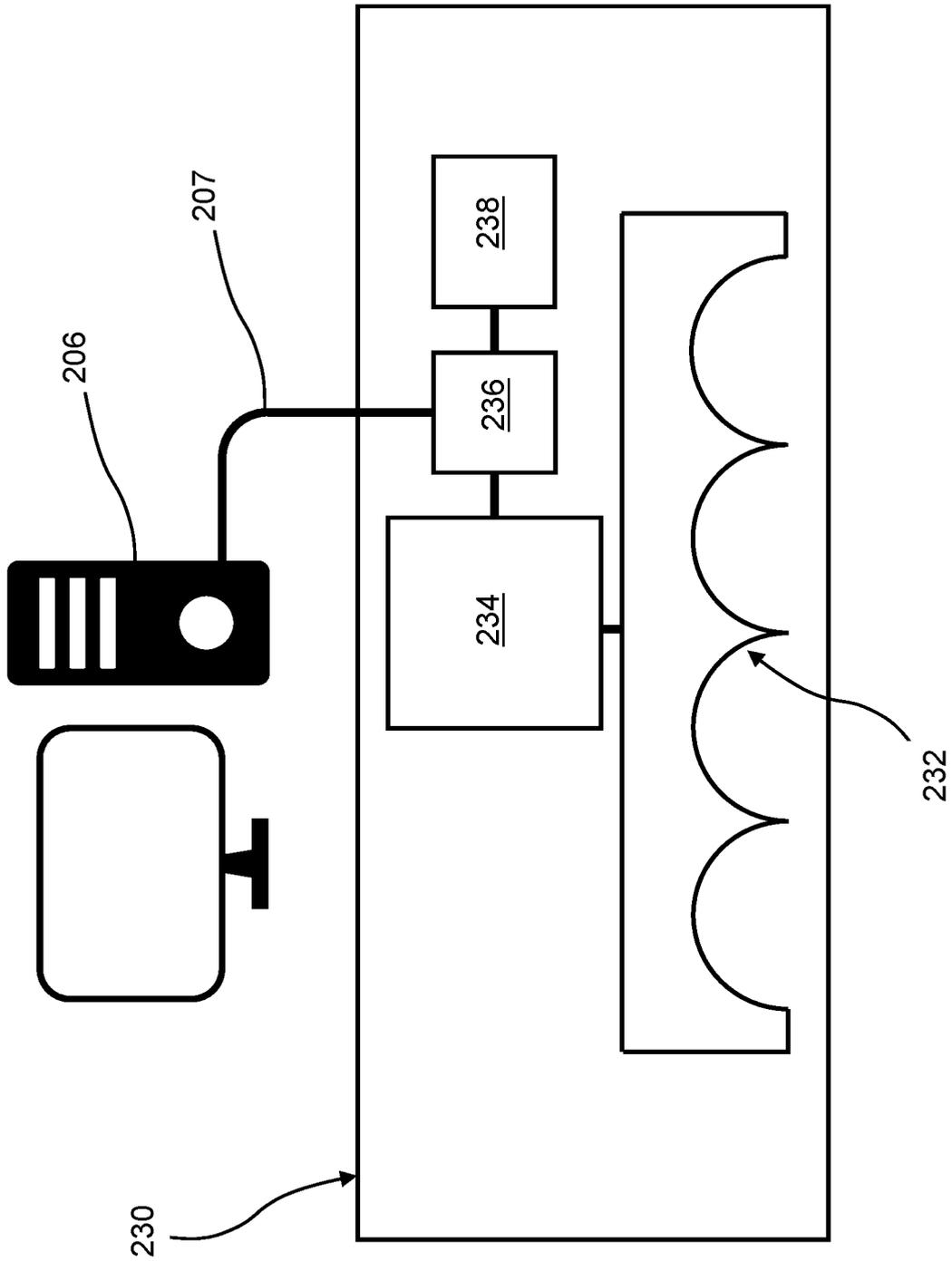


Fig. 7

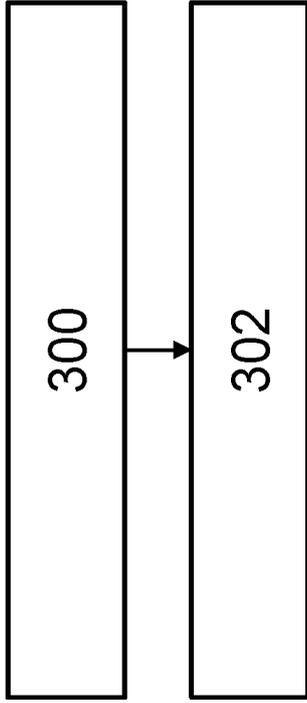


Fig. 8

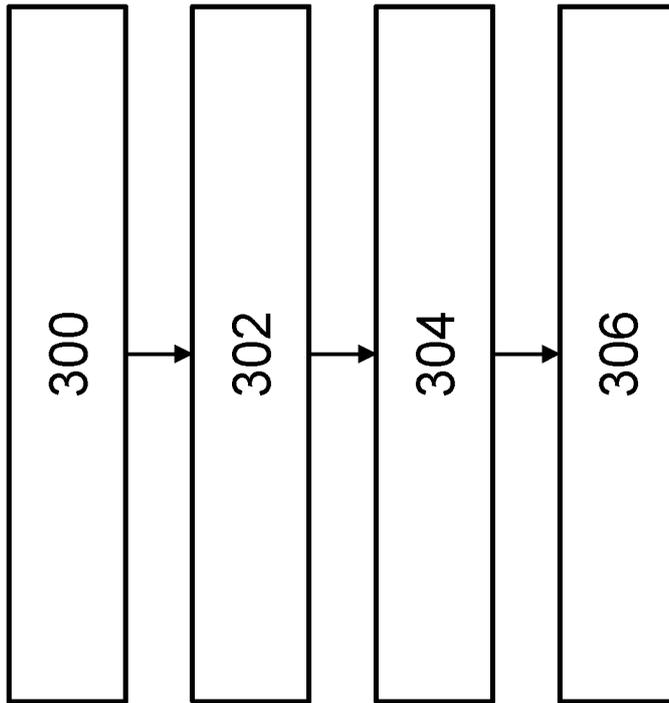


Fig. 9