(19) Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 10 2019 214 740 B3** 2021.02.04

(12) # Patentschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2019 214 740.2**
(22) Anmeldetag: **26.09.2019**
(43) Offenlegungstag: **–**
(45) Veröffentlichungstag der Patenterteilung: **04.02.2021**

(51) Int Cl.: ***C22C 21/08*** (2006.01)
C22C 21/02 (2006.01)
C22C 21/06 (2006.01)
B22F 1/00 (2006.01)
B22F 3/105 (2006.01)
B22F 9/06 (2006.01)
B22F 9/08 (2006.01)
C22F 1/043 (2006.01)
C22F 1/047 (2006.01)
C22F 1/05 (2006.01)

Innerhalb von neun Monaten nach Veröffentlichung der Patenterteilung kann nach § 59 Patentgesetz gegen das Patent Einspruch erhoben werden. Der Einspruch ist schriftlich zu erklären und zu begründen. Innerhalb der Einspruchsfrist ist eine Einspruchsgebühr in Höhe von 200 Euro zu entrichten (§ 6 Patentkostengesetz in Verbindung mit der Anlage zu § 2 Abs. 1 Patentkostengesetz).

(73) Patentinhaber:
Daimler AG, Stuttgart, DE; ECKA Granules Germany GmbH, 91235 Velden, DE; EDAG Engineering GmbH, 65205 Wiesbaden, DE; Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V., 80686 München, DE; Leibniz-Institut für Werkstofforientierte Technologien - IWT, 28359 Bremen, DE

(74) Vertreter:
BRP Renaud und Partner mbB Rechtsanwälte Patentanwälte Steuerberater, 70173 Stuttgart, DE

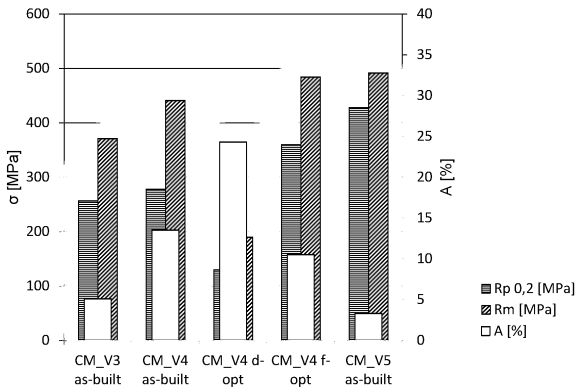
(72) Erfinder:
Lutz, Andreas, 89075 Ulm, DE; Knoop, Daniel, 28357 Bremen, DE; Mais, Bernhard, Dr., 91235 Velden, DE; Caba, Stefan, 36124 Eichenzell, DE; Hillebrecht, Martin, Dr., 36100 Petersberg, DE; Jäger, Sebastian, 21029 Hamburg, DE

(56) Ermittelter Stand der Technik:

DE	**10 2007 018 123**	**A1**
DE	**60 2004 009 545**	**T2**
US	**2010 / 0 074 796**	**A1**
CN	**108 330 344**	**A**

(54) Bezeichnung: **Verfahren zur Herstellung eines Bauteils aus einer Aluminiumlegierung**

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung betrifft eine Aluminiumlegierung für die additive Fertigung eines Bauteils, wenigstens umfassend die Elemente Aluminium, Silizium, Magnesium und Mangan, dadurch gekennzeichnet, dass die Aluminiumlegierung: einen Gewichtsanteil an Scandium von unter 0,01 Gew%; einen Magnesiumgehalt von 1,0 bis 8,0 Gew%, bevorzugt von 2,0 bis 3,0 Gew%, besonders bevorzugt von 2,5 Gew%; einen Siliziumgehalt von 2,5 bis 4,5 Gew %, bevorzugt von 2,5 bis 4,0 Gew%, besonders bevorzugt von 3,5 Gew%; und einen Mangangehalt von 0,15 bis 0,25 Gew%, bevorzugt von 0,2 Gew%; aufweist. Zudem kann sie einen Gehalt an einem dispersionsbildenden Legierungselement, insbesondere einen Zirkoniumgehalt, von 0,10 bis 0, 35 Gew%, besonders bevorzugt von 0,2 Gew% aufweisen. Darüber hinaus betrifft die Erfindung ein Verfahren zur Herstellung eines Bauteils aus einer Aluminiumlegierung wie beschrieben im Rahmen eines additiven Fertigungsverfahrens; bei dem mechanische Eigenschaften der das Bauteil aufbauenden Aluminiumlegierung, wie insbesondere die Festigkeit und/oder Duktilität, ohne zusätzliches Lösungsglühen und Abschrecken, durch Warmauslagerung eingestellt werden.



Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Herstellung eines Bauteils aus einer Aluminiumlegierung im Rahmen eines additiven Fertigungsverfahrens.

[0002] Als additive Fertigungsverfahren (u.a. auch als 3D-Druckverfahren, generative Fertigung oder Rapid Manufacturing bezeichnet) werden Fertigungsverfahren bezeichnet, bei denen ein Material Schicht für Schicht auf einem Substrat (Bauplattform, beliebige Oberfläche, bereits vorhandenes Bauteil, etc.) computergestützt aufgetragen und/oder bearbeitet wird, wodurch auf schnelle und kostengünstige Weise dreidimensionale Werkstücke erzeugt werden können. Die so erzeugten Werkstücke weisen dabei bereits vorteilhaft eine endkontournahe Form auf, sind oftmals bereits voll mechanisch belastbar und bedürfen keiner weiteren Bearbeitung. Additive Fertigungsverfahren zeichnen sich daher durch eine ressourceneffiziente Nutzung von Rohstoffen aus und bieten sich insbesondere zur Herstellung von Bauteilen mit speziellen physikalisch-technischen Eigenschaften in geringer Stückzahl sowie von Ersatzteilen an.

[0003] In der Automobilindustrie werden additive Fertigungsverfahren beispielsweise bereits bei der Herstellung von Bauteilen für Einzelanwendungen im Rennsport, beim Bau von Demonstrationsmodellen (Prototypen) sowie im Ersatzteilgeschäft angewendet. Und auch in der Luftfahrtindustrie gibt es Bestrebungen, vermehrt additive Fertigungsverfahren in allen Stadien des Flugzeugbaus sowie der Instandhaltung einzusetzen, um die Material-, Zeit- und Kosteneffizienz dieses Industriezweigs zu steigern.

[0004] Die CN 108 330 344 A offenbart beispielsweise eine 3D-Druck-Aluminiumlegierung und ein Herstellungsverfahren, bei dem ein Werkstück aus der Aluminiumlegierung einem 3D-Druck unterzogen wird, und somit eine glatte Oberfläche aufweist und frei von Rissen ist. Die US 2010 074796 A1 offenbart eine Aluminiumlegierung mit guter Dauerwarmfestigkeit zur Herstellung thermisch und mechanisch beanspruchter Bauteile. Die erfindungsgemäße Legierung eignet sich vor allem für den Druckguss, aber auch für den Schwerkraft-Kokillenguss, den Niederdruck-Kokillenguss und den Sandguss.

[0005] Schließlich lehrt die DE 60 2004 009 545 T2 die Herstellung stark deformierter Teile aus Aluminiumlegierung, insbesondere aus Al-Mg-Legierung der Serie 5000 gemäß der EN-Norm 573-3, die insbesondere für den Kraftfahrzeugbau bestimmt sind, durch Warmtiefziehen, d. h. bei einer Temperatur von 150 bis 350°C.

[0006] Als metallische Ausgangswerkstoffe kommen bei den genannten Verfahren neben vereinzelt Reinaluminium bislang vorwiegend Aluminiumlegierungen mit den Hauptlegierungselementen Silizium bzw. Silizium und Magnesium zur Anwendung. Der Gehalt an Silizium und Magnesium von Aluminiumlegierungen des Stands der Technik entspricht zusammengenommen dabei gewöhnlich einem Massenanteil der Gleichgewichtsphase Mg_2Si von kleiner 1,85 Gew%. Aufgrund ihres vergleichsweise hohen Silizium-Gehalts zeichnen sich derartige Aluminiumlegierungen durch eine gute Verarbeitbarkeit in additiven Fertigungsverfahren aus und ermöglichen die Herstellung von Bauteilen mit vergleichsweise niedrigen Porengehalten im Baumaterial von unter 1%.

[0007] Die Festigkeit additiv gefertigter Bauteile aus Aluminiumlegierungen des Legierungssystems Aluminium - Silizium - Magnesium basiert auf einem feinen Gefüge aus primärem α-Aluminium, Primär-Silizium-Ausscheidungen und Magnesium-Silizium-Ausscheidungen (Mg_2Si-Ausscheidungen). Solche Ausscheidungen werden üblicherweise durch eine nachgelagerte Wärmebehandlung (Aushärten) erzeugt, welche ein oft mehrstündiges Lösungsglühen der gefertigten Bauteile, ein Abschrecken und schließlich ein mehrtägiges (bei Raumtemperatur) oder ein mehrstündiges (bei leicht erhöhter Temperatur) Auslagern der Bauteile umfasst. Bei Aluminiumlegierungen mit einem Gehalt an Silizium und Magnesium, der zusammengenommen einem Massenanteil der Gleichgewichtsphase Mg_2Si von kleiner 1,85 Gew% entspricht, führt ein Abschrecken, vorzugsweise in Wasser, zur Erstarrung einer Aluminiumphase mit darin zufällig verteilten Silizium- und Magnesiumatomen. Erst während einer nachfolgenden Warmauslagerung bilden sich dann durch Diffusion Mg_2Si-Ausscheidungen, welche zur Festigkeitssteigerung des Materials beitragen.

[0008] Aluminiumlegierungen des Legierungssystems Aluminium - Silizium - Magnesium, die auf diese Weise behandelt wurden, können Zugfestigkeiten R_m, bis zu 480 MPa und Bruchdehnungswerte A von bis zu 7 % aufweisen. Eine weitere Festigungssteigerung ist aufgrund des geringen Gehalts an potentiell ausscheidbarem Mg_2Si allerdings kaum noch möglich.

[0009] Für die Herstellung von Strukturbauteilen mittels additiver Fertigungsverfahren, die direkt nach der Herstellung mechanisch voll belastbar und somit direkt verwendbar sind, sind allerdings Materialien mit höhe-

rer Festigkeit wünschenswert. Die DE 10 2007 018 123 A1 offenbart dazu ein Verfahren zur Herstellung von konturgetreuen Strukturbauteilen aus einer Aluminiumbasislegierung mittels Rapid-Prototyping, welches sich durch die Verwendung einer Aluminium-Scandium-Legierung, wie beispielsweise Scalmalloy ®, als Ausgangswerkstoff auszeichnet. Nachteilig sind hierbei jedoch die hohen Kosten derartiger Legierungen, insbesondere die Kosten für den Legierungsbestandteil Scandium.

[0010] Hiervon ausgehend liegt der vorliegenden Erfindung die Aufgabe zugrunde eine im Vergleich zum Stand der Technik verbesserte, kostengünstige Aluminiumlegierung für die additive Fertigung eines Bauteils bereitzustellen, welche es ermöglicht, im verarbeiteten Zustand eine große Bandbreite an mechanischen Eigenschaften, insbesondere sowohl ein hochfestes als auch ein hochduktiles Eigenschaftsspektrum, zu erzeugen. Darüber hinaus soll ein Verfahren zur Herstellung eines Bauteils aus einer derartigen Aluminiumlegierung im Rahmen eines additiven Fertigungsverfahrens bereitgestellt werden, welches auf einfache, effiziente Weise eine Einstellung der gewünschten Materialeigenschaften bei dem jeweils hergestellten Bauteil ermöglicht.

[0011] Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß durch ein Verfahren mit den Merkmalen des Patenanspruchs 1 gelöst. Vorteilhafte Ausgestaltungen und Weiterbildungen, welche einzeln oder in Kombination miteinander einsetzbar sind, sind Gegenstand der abhängigen Ansprüche.

[0012] Die Aluminiumlegierung zeichnet sich dadurch aus, dass sie einen Gewichtsanteil an Scandium von unter 0,01 Gew% und einen Magnesiumgehalt von 1,0 bis 8,0 Gew%, bevorzugt von 2,0 bis 3,0 Gew%, besonders bevorzugt von 2,5 Gew%; einen Siliziumgehalt von 2,5 bis 4,5 Gew%, bevorzugt von 2,5 bis 4,0 Gew%, besonders bevorzugt von 3,5 Gew%; einen Mangangehalt von 0,15 bis 0,25 Gew%, bevorzugt von 0,2 Gew%; und einen Gehalt an dispersionsbildenden Legierungselementen ausgewählt aus Vanadium, Zirkonium und/oder Titan in einem Anteil von 0,10 bis 0,35 Gew% und als Rest Aluminium aufweist.

[0013] Eine derart zusammengesetzte Aluminiumlegierung weist Legierungsanteile an Silizium und Magnesium auf, die vorteilhaft einem Massenanteil an der Gleichgewichtsphase Mg_2Si von größer 1,85 Gew% entsprechen. Dadurch kann nicht nur die während einer Warmauslagerung gebildete Menge an Mg_2Si-Ausscheidungen im Vergleich zum Stand der Technik erhöht werden, die angesprochenen Mg_2Si-Ausscheidungen entstehen auch bereits direkt beim Abkühlen unter die Solidustemperatur und werden nicht erst, wie bei Silizium- und Magnesium-enthaltenden Aluminiumlegierungen des Stands der Technik, während der üblichen, drei Schritte umfassenden, Wärmebehandlung bestehend aus Lösungsglühen, Abschrecken und Auslagern, gebildet. Im Gegensatz zum Stand der Technik lassen sich die mechanischen Eigenschaften des aus der Aluminiumlegierung gebildeten Bauteils daher vorteilhaft ohne zusätzliches Lösungsglühen und Abschrecken, alleine durch eine Warmauslagerung einstellen.

[0014] Scandium wird der Aluminiumlegierung nicht als Legierungselement zugesetzt und liegt in der Legierung höchstens als unvermeidbare Verunreinigung mit einem Gewichtsanteil von unter 0,01 Gew% vor. Der Verzicht auf die vergleichsweise teure Legierungskomponente Scandium macht die Aluminiumlegierung daher preiswerter als bekannte scandiumhaltige Aluminiumlegierungen wie beispielsweise Scalmalloy ®.

[0015] Erfindungsgemäß umfasst die Aluminiumlegierung dispersionsbildende Legierungselemente wie Vanadium, Zirkonium und/oder Titan. Dabei weist die Aluminiumlegierung einen Gehalt an einem dispersionsbildenden Legierungselement, insbesondere einen Zirkoniumgehalt, von 0,10 bis 0,35 Gew%, bevorzugt von 0,15 bis 0,25 Gew%, besonders bevorzugt von 0,2 Gew% auf. Der Zusatz von dispersionsbildenden Legierungselementen kann vorteilhaft eine Kontrolle des Korngefüges ermöglichen und sich vorteilhaft auf das Korrosionsverhalten sowie auf die Abschreckempfindlichkeit und die Aushärtungskinetik der Aluminiumlegierung auswirken.

[0016] Darüber hinaus ist es von Vorteil, wenn die Aluminiumlegierung in Pulverform vorliegt. Aluminiumlegierungen in Pulverform eignen sich insbesondere als Ausgangsmaterial für das pulverbettbasierte selektive Laserstrahlschmelzen, bei dem die Bauteile auf einer Substratplatte, der sog. Bauplattform, im Pulverbett schichtweise aufgebaut werden.

[0017] Die Pulverherstellung kann dabei vorteilhaft über eine Schmelzzerstäubung der zuvor aufgeschmolzenen Aluminiumlegierung bzw. der zuvor aufgeschmolzenen Legierungsbestandteile erfolgen. Zum Aufschmelzen kann insbesondere ein Induktionsofen Verwendung finden. Die geschmolzene Legierung kann sodann durch Zuführung von Inertgas, vorzugsweise Stickstoff, Helium oder Argon, zerstäubt, anschließend fraktioniert und so als Pulver erhalten werden. Bedingt durch die extrem hohe Abkühlgeschwindigkeit beim Zerstäuben kann die Verteilung der Legierungselemente in der Schmelze dabei zum Teil eingefroren werden, wodurch die

sich bildenden festigkeitssteigernden Ausscheidungen vorteilhaft in einer fein-dispersen Verteilung vorliegen können.

[0018] Das erfindungsgemäße Verfahren zur Herstellung eines Bauteils aus einer Aluminiumlegierung wie oben beschrieben, im Rahmen eines additiven Fertigungsverfahrens zeichnet sich dadurch aus, dass die mechanischen Eigenschaften der das Bauteil aufbauenden Aluminiumlegierung, wie insbesondere die Festigkeit und/oder Duktilität, ohne zusätzliches Lösungsglühen und Abschrecken, durch Warmauslagerung eingestellt werden.

[0019] Besonders bevorzugt kann die erfindungsgemäße Aluminiumlegierung dabei in einem ersten Verfahrensschritt über Schmelz- und/oder Zerstäubungsverfahren in eine Pulverform überführt werden. Die Pulverherstellung kann bevorzugt, wie oben beschrieben, über Schmelzzerstäubung erfolgen, wobei insbesondere eine „closed-coupled"-Düsenkonfiguration der Zerstäubungsdüsen Verwendung finden kann. Das so erhaltene Pulver zeichnet sich vorteilhaft durch eine, durch die hohe Abkühlrate verursachte, Übersättigung an Legierungselementen und durch eine für den weiteren Verarbeitungsprozess geeignete Kornform und Korngrößenverteilung aus.

[0020] In einer bevorzugten Ausgestaltung des Verfahrens können dann vor oder während der Einstellung der mechanischen Eigenschaften der das Bauteil aufbauenden Aluminiumlegierung, Teilvolumina der als Ausgangswerkstoff fungierenden Aluminiumlegierung sukzessive von einer Wärmequelle aufgeschmolzen werden und im Anschluss daran wieder erstarren und so das Bauteil endkontournah durch Addition erstarrter Teilvolumina aufgebaut werden. Dabei hat es sich bewährt, wenn das Aufschmelzen der Teilvolumina mit Hilfe von Laserstrahlen und/oder Elektronenstrahlen als Wärmequelle durch Laserstrahlschmelzen, Laserauftragsschweißen und/oder Elektronenstrahlschmelzen erfolgt.

[0021] Beim selektiven Laserstrahlschmelzen wird der zu verarbeitende Werkstoff in Pulverform in einer dünnen Schicht auf einer Substratplatte aufgebracht. Der pulverförmige Werkstoff wird mittels Laserstrahlung lokal vollständig aufgeschmolzen und bildet nach der Erstarrung eine feste Materialschicht. Anschließend wird die Substratplatte um den Betrag einer Schichtstärke abgesenkt und erneut Pulver aufgetragen. Dieser Zyklus wird solange wiederholt, bis alle Schichten aufgeschmolzen und wieder erstarrt sind. Das fertige Bauteil wird vom überschüssigen Pulver gereinigt, nach Bedarf bearbeitet oder sofort verwendet.

[0022] Um die oben genannten mechanischen Eigenschaften der so erhaltenen Bauteile gezielt einstellen zu können, sollten diese eine ausreichend hohe Dichte von mindestens 96 %, vorzugsweise größer 99 %, also Porengehalte von weniger als 4 %, vorzugsweise weniger als 1 %, aufweisen.

[0023] Die Dichte der Bauteile kann vorzugsweise durch die Prozessparameter des selektiven Laserstrahlprozesses eingestellt werden. Als relevanter Einflussfaktor wird die Streckenenergie, die durch den Laser in das Pulvermaterial eingebracht wird, kontrolliert. Zum Erzielen der angestrebten Bauteileigenschaften sollte vorzugsweise eine Streckenenergie von 0,20 J/mm bis 0,40 J/mm, bevorzugt 0,30 J/mm, genutzt werden. Diese Parameterempfehlung bezieht sich auf die Fertigung mit einem Pulver bestehend aus 20 µm bis 63 µm großen, runden Partikeln und einer Schichtstärke von 50 µm (Fertigung im Pulverbett: 30-120 µm Schichtstärke).

[0024] Für die Arbeit mit dem beschriebenen Pulver, insbesondere der Zusammensetzung CM_V4 (siehe Tabelle 3), wird empfohlen die folgenden Prozessparameter (Tabelle 1) für die Verarbeitung durch das selektive Laserstrahlschmelzen zu nutzen:

Tabelle 1:

Parameter [Einheit]	Wert
Laserleistung [W]	300 - 1000, bevorzugt 370
Hatch [mm]	0,09 - 0,13, bevorzugt 0,11
Scangeschwindigkeit [mm/s]	1000 - 1400, bevorzugt 1200
Fokusdurchmesser [µm]	70 - 90, bevorzugt 80
Schichtstärke [µm]	30 - 120, bevorzugt 50

[0025] Auf ein Vorheizen der Substratplatte über Raumtemperatur kann für die Verarbeitung der erfindungsgemäßen Aluminiumlegierung verzichtet werden, ist aber grundsätzlich möglich. Dadurch kann eine unkon-

trollierte Warmauslagerung während des Fertigungsprozesses verhindert werden, sodass die Materialeigenschaften in einer anschließenden Wärmebehandlung vorteilhaft kontrolliert eingestellt werden können.

[0026] Neben der Verarbeitung der pulverförmigen Aluminiumlegierung durch selektives Laserstrahlschmelzen ist die Verarbeitung durch Laserauftragsschweißen (auch Laser-Pulver-Auftragsschweißen) möglich. Bei diesem Verfahren wird das pulverförmige Ausgangsmaterial über eine Fördereinrichtung und einen Schweißkopf lokal aufgetragen sowie durch einen Laser aufgeschmolzen. Die Positionierung erfolgt beispielsweise durch einen Industrie-Roboter. Über das schichtweise Auftragen des Materials können dreidimensionale Strukturen erzeugt werden. Vorteilhaft ist dabei, dass das pulverförmige Ausgangsmaterial auch auf bestehende dreidimensionale Bauteile gezielt aufgetragen werden kann. Dadurch können Bauteile aus dem Automobilbau beispielsweise lokal verstärkt oder Reparaturarbeiten durchgeführt werden.

[0027] Für die Verarbeitung einer erfindungsgemäßen Aluminiumlegierung der Zusammensetzung CM_V4 (siehe Tabelle 3) haben sich beispielweise folgende Prozessparameterbereiche für die Verarbeitung durch das Laser-Pulver-Auftragsschweißen bewährt. Dabei steht grundlegend das Erreichen einer hohen Auftragsrate bei einer gleichzeitig hohen Bauteildichte im Vordergrund. Mit einem Fokusdurchmesser von 5 mm lassen sich diese Anforderungen insbesondere in Kombination mit den in der Tabelle 2 genannten Parameterbereichen umsetzen.

Tabelle 2:

Parameter [Einheit]	Wert
Laserleistung [W]	2000 - 4000, bevorzugt 3000 - 3400
Pulverförderrate [g/min]	10 - 20, bevorzugt 12-15
Vorschubgeschwindigkeit [m/min]	0,5 - 1,5, bevorzugt 0,8 - 1,2
Fokusdurchmesser [mm]	3-7, bevorzugt 5

[0028] Diese Parameterbereiche können vorteilhaft den Kompromiss aus einer gering angestrebten Wärmeeinwirkung und der gleichzeitig vollständigen Pulveraufschmelzung abdecken. Die Reduzierung der Laserleistung kann vorteilhaft zusätzlich dazu genutzt werden, um bei 3D-Bauteilen in wachsender Bauhöhe den Wärmeeintrag konstant zu halten. Der optimale Leistungsverlauf ist dabei von der Bauteilgeometrie abhängig.

[0029] In einer alternativen Ausgestaltung des Verfahrens kann vor oder während der Einstellung der mechanischen Eigenschaften der das Bauteil aufbauenden Aluminiumlegierung, die als Ausgangsstoff fungierende Aluminiumlegierung auch mittels einer Wärmequelle aufgeschmolzen werden. Teilvolumina der schmelzflüssigen Aluminiumlegierung können dann auf eine Substratplatte, insbesondere eine Bauplattform, auf ein anderes, zu veränderndes Bauteil und/oder auf ein bereits erstarrtes Teilvolumen des additiv aufzubauenden Bauteils aufgetragen werden, wobei das aufgetragene Teilvolumen der Aluminiumlegierung an der Auftragsstelle erstarrt.

[0030] Die Einstellung der mechanischen Eigenschaften der das Bauteil aufbauenden Aluminiumlegierung, wie insbesondere die Festigkeit und/oder Duktilität, erfolgt schließlich erfindungsgemäß ohne zusätzliches Lösungsglühen und Abschrecken, durch Warmauslagerung.

[0031] In einer bevorzugten Ausgestaltung des Verfahrens kann in einem Verfahrensschritt das Bauteil auch im Rahmen der Warmauslagerung für 30 bis 450 min, bevorzugt für 60 min, einer Temperatur von 150 bis 200 °C, bevorzugt von 170 °C, ausgesetzt und anschließend an der Luft abgekühlt oder durch in Kontakt bringen mit einem Kühlmittel, insbesondere Wasser oder Öl, abgeschreckt werden. Eine Warmauslagerung in diesem Parameterbereich führt vorteilhaft zu einer vergleichsweise höheren Festigkeit der Aluminiumlegierung und ermöglicht so vorteilhaft die Herstellung eines festigkeitsoptimierten Bauteils.

[0032] Alternativ dazu kann in einem Verfahrensschritt das Bauteil im Rahmen der Warmauslagerung für 10 bis 120 min, bevorzugt für 60 min, einer Temperatur von 250 bis 450 °C, bevorzugt von 380 °C, ausgesetzt und anschließend an der Luft abgekühlt oder durch in Kontakt bringen mit einem Kühlmittel, insbesondere Wasser oder Öl, abgeschreckt werden. Eine Warmauslagerung in diesem Parameterbereich führt vorteilhaft zu einer vergleichsweise höheren Duktilität der Aluminiumlegierung und ermöglicht so vorteilhaft die Herstellung eines duktilitätsoptimierten Bauteils.

[0033] Die Aluminiumlegierung und das erfindungsgemäße Verfahren eignen sich vorteilhaft, aber nicht ausschließlich, für Anwendungen im Fahrzeugbereich. Besonders in Anwendungsbereichen, in denen zielgerichtet wahlweise die hohe Duktilität oder die hohe Festigkeit eines erzeugten Bauteils genutzt werden soll (im Sinne des sog. „Uni-Alloy-Konzepts"), bieten die beschriebene Aluminiumlegierung sowie das beschriebene Verfahren Vorteile.

[0034] Die Aluminiumlegierung eignet sich vorteilhaft zur Verwendung im Rahmen eines additiven Fertigungsverfahrens, insbesondere zur Herstellung von endkonturnahen Bauteilen der Automobil- und/oder Maschinenbauindustrie im Rahmen eines additiven Fertigungsverfahrens. Die Möglichkeit, die Materialeigenschaften der erfindungsgemäßen Aluminiumlegierung mittels des erfindungsgemäßen Verfahrens im Sinne des sog. „Uni-Alloy-Konzepts" gezielt einzustellen und somit sowohl hochfeste als auch duktile Bauteile herstellen zu können, erlaubt vorteilhaft eine Reduzierung der Materialvariantenvielfalt im jeweiligen Produkt, z.B. im Automobil, und vermeidet im Rahmen additiver Fertigungsverfahren vorteilhaft aufwendige Materialwechsel.

[0035] Exemplarisch seien folgende mögliche Anwendungsfälle im Automobilbereich genannt:

- A/B/C/D-Säulen-Versteifung
- A/B/C/D-Säulen-Knoten
- Verbindungsknoten im Batteriekasten
- Knoten zur Verbindung von Profilen, bevorzugt aus Aluminium
- Türscharnier
- Crashbox vorne, Crashbox hinten
- Fahrwerkskomponenten wie Querlenker, Stabilisator, etc.
- Anbindung Sonder-Beleuchtung (z.B. Blaulicht)
- Pleuel
- Motorhalter
- Turbolader-Verdichtergehäuse / Shroud
- Jegliche Halterstrukturen für Nebenaggregate wie Onboard-Charger, Wechselrichter, Lichtmaschine, etc.
- Wärmetauscher
- Gurthalter
- Anhängerkupplung.

[0036] Daneben sind Anwendungen im Bereich Maschinenbau, Bergbautechnik, der Öl- und Gasindustrie, der Luft- und Raumfahrt ebenso wie im Bereich der Nutzfahrzeuge möglich.

[0037] Aufgrund der nachgewiesenen Anwendbarkeit in Hybridverfahren wie dem Laser-Pulver-Auftragsschweißen eignet sich die Aluminiumlegierung auch vorteilhaft für die Herstellung von Versteifungsrippen, Anbindungspunkten wie Schraubdomen, Niet- und Schweißverbindungspunkten, Anschlägen zur Ausrichtung, Montagehilfen, etc.

[0038] Weitere Anwendungen sind Hybridbauteile, die aus einer additiv gefertigten Komponente aus der Aluminiumlegierung sowie weiteren Komponenten bestehen, die aus der gleichen Legierung oder anderen Werkstoffen wie anderen Aluminiumlegierungen, Stahl, Titan oder Kunststoffen bestehen können. Die Hybridisierung kann beispielsweise durch Umgießen, Schweißen, Löten, Nieten, Sintern oder Kleben erfolgen. Ebenso ist es möglich, die zweite Komponente in den additiven Prozess einzulegen und auf der ersten Komponente aufzubauen. Insbesondere kann eine zweite Komponente in den Bauraum eingebracht und der additive, schichtweise Fertigungsprozess auf einer der zweiten Komponente zugehörigen Ebene, die in ihrer Ausrichtung den Schichten des additiven Fertigungsprozesses entspricht, begonnen bzw. fortgesetzt werden. Gleiches gilt für einen möglichen Laser-Pulver-Auftragsschweißprozess. Ein weiterer Hybridisierungsprozess ist die Herstellung eines Hybridbauteils aus einem pulverbettbasiert additiv gefertigten Bauteil in einem Laser-Pulver-Auftragsschweißprozess. Auch hier ist sowohl die Nutzung der erfindungsgemäßen Aluminiumlegierung als auch eines anderen Werkstoffs möglich.

[0039] Zusätzliche Einzelheiten und weitere Vorteile der Erfindung werden nachfolgend an Hand bevorzugter Ausführungsbeispiele, auf welche die vorliegende Erfindung jedoch nicht beschränkt ist, und in Verbindung mit der beigefügten Zeichnung beschrieben.

[0040] Dabei zeigt:

Fig. 1 in Diagrammform die Ergebnisse von Zugversuchen nach DIN EN ISO 6892 (Probenform nach DIN EN 50125) an Proben verschiedener Ausführungsformen der erfindungsgemäßen Aluminiumlegierung (mit $R_{p\ 0,2}$ = Dehngrenze in MPa; R_m = Zugfestigkeit in MPa und A = Bruchdehnung in Prozent; d-opt = duktilitätsoptimiert; f-opt = festigkeitsoptimiert).

[0041] Fig. 1 fasst in Diagrammform die Ergebnisse von Zugversuchen an Proben verschiedener Ausführungsformen der erfindungsgemäßen Aluminiumlegierung zusammen. In der nachfolgenden Tabelle 3 sind die entsprechenden chemischen Zusammensetzungen der einzelnen Proben aufgelistet:

Tabelle 3:

Probe	Mg (Gew%)	Si (Gew%)	Mn (Gew%)	Zr (Gew%)	Al (Gew%)
CM V3	1	3,5	0,2	0,2	Rest
CM V4	2,5	3,5	0,2	0,2	Rest
CM_V5	3,5	3,5	0,2	0,2	Rest

[0042] Wie dem Diagramm zu entnehmen ist, können unter Verwendung von Aluminiumlegierungen und unter Anwendung des erfindungsgemäßen Verfahrens Bauteile mit 0,2-Dehngrenzen $R_{p0.2}$ im Bereich von ungefähr 130 bis 428 MPa; Zugfestigkeiten R_m von ungefähr 190 bis 492 MPa und Bruchdehnungswerten A von ungefähr 3 bis 24 % hergestellt werden.

[0043] Die mechanischen Eigenschaften der so erhaltenen Bauteile lassen sich vorteilhaft einerseits über die Prozesstemperaturen während des Aufbauprozesses und andererseits über die beschriebene Warmauslagerung variieren.
Ein Vergleich der Kennwerte (Tabelle 4) der mechanischen Eigenschaften der Proben mit der Zusammensetzung CM_V4 zeigt zudem, dass es die Anwendung des erfindungsgemäßen Verfahrens vorteilhaft ermöglicht, aus einer einzigen Legierung (CM_V4) Bauteile mit einer großen Bandbreite an mechanischen Eigenschaften zu erzeugen. Beispielsweise lässt sich aus einer Aluminiumlegierung der Zusammensetzung CM_V4 sowohl ein vergleichsweise duktiles Material mit einer 0,2-Dehngrenze von ungefähr 130 MPa, einer Zugfestigkeit von ungefähr 190 MPa und einer Bruchdehnung von ungefähr 24 % (CM_V4 d-opt), als auch ein vergleichsweise sprödes Material mit einer 0,2-Dehngrenze von ungefähr 360 MPa, einer Zugfestigkeit von ungefähr 484 MPa und einer Bruchdehnung von ungefähr 10 % (CM_V4 f-opt) erzeugen.

Tabelle 4: Beispielhafte Kennwertangaben (WBH = Wärmebehandlung; FZ = Fertigungszustand)

Legierung	CM_V3	CM_V4			CM_V5
WBH (nachträglich)	FZ (as-built), d.h. nach Druck	FZ (as-built)	380°C /60 min	170°C / 60 min	FZ (as-built)
			Duktilitätsoptimiert	Festigkeitsoptimiert	
$R_{p0,2}$ [MPa]	257	278	130	360	428
R_m [MPa]	371	441	190	484	492
A [%]	5,1	13,5	24,3	10,5	3,3
Biegewinkel [°] (acc. VDA 238-100)	27	31	97	21	18

Patentansprüche

1. Verfahren zur Herstellung eines Bauteils aus einer Aluminiumlegierung, welche
- einen Gewichtsanteil an Scandium von unter 0,01 Gew%,
- einen Magnesiumgehalt von 1,0 bis 8,0 Gew%,
- einen Siliziumgehalt von 2,5 bis 4,5 Gew%,
- einen Mangangehalt von 0,15 bis 0,25 Gew%,
- einen Gehalt an dispersionsbildenden Legierungselementen ausgewählt aus Vanadium, Zirkonium und/oder Titan in einem Anteil von 0,10 bis 0,35 Gew% und als Rest Aluminium aufweist, im Rahmen eines additiven Fertigungsverfahrens; bei dem mechanische Eigenschaften der das Bauteil aufbauenden Aluminiumlegierung, wie die Festigkeit und/oder Duktilität, ohne zusätzliches Lösungsglühen und Abschrecken, durch Warmauslagerung eingestellt werden.

2. Verfahren nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Aluminiumlegierung in Pulverform vorliegt.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, bei dem in einem Verfahrensschritt das Bauteil im Rahmen der Warmauslagerung für 30 bis 450 min, bevorzugt für 60 min, einer Temperatur von 150 bis 200 °C, bevorzugt von 170 °C, ausgesetzt und anschließend an der Luft abgekühlt oder durch in Kontakt bringen mit einem Kühlmittel, insbesondere Wasser oder Öl, abgeschreckt wird.

4. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, bei dem in einem Verfahrensschritt das Bauteil im Rahmen der Warmauslagerung für 10 bis 120 min, bevorzugt für 60 min, einer Temperatur von 250 bis 450 °C, bevorzugt von 380 °C, ausgesetzt und anschließend an der Luft abgekühlt oder durch in Kontakt bringen mit einem Kühlmittel, insbesondere Wasser oder Öl, abgeschreckt wird.

5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, bei dem vor oder während der Einstellung der mechanischen Eigenschaften der das Bauteil aufbauenden Aluminiumlegierung; Teilvolumina der als Ausgangswerkstoff fungierenden Aluminiumlegierung sukzessive von einer Wärmequelle aufgeschmolzen werden und im Anschluss daran wieder erstarren; und das Bauteil endkontournah durch Addition erstarrter Teilvolumina aufgebaut wird.

6. Verfahren nach Anspruch 5, bei dem das Aufschmelzen der Teilvolumina mit Hilfe von Laserstrahlen und/oder Elektronenstahlen als Wärmequelle durch Laserstrahlschmelzen, Laserauftragsschweißen und/oder Elektronenstrahlschmelzen erfolgt.

7. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, bei dem vor oder während der Einstellung der mechanischen Eigenschaften der das Bauteil aufbauenden Aluminiumlegierung; die als Ausgangsstoff fungierende Aluminiumlegierung mittels einer Wärmequelle aufgeschmolzen wird; Teilvolumina der schmelzflüssigen Aluminiumlegierung auf eine Substratplatte, insbesondere eine Bauplattform, auf ein anderes, zu veränderndes Bauteil und/oder auf ein bereits erstarrtes Teilvolumen des additiv aufzubauenden Bauteils aufgetragen werden, wobei das aufgetragene Teilvolumen der Aluminiumlegierung an der Auftragsstelle erstarrt.

8. Verfahren nach einem oder mehreren der vorherigen Ansprüche, bei dem die Aluminiumlegierung in einem ersten Verfahrensschritt über Schmelz- und/oder Zerstäubungsverfahren in eine Pulverform überführt wird.

9. Verwendung einer Aluminiumlegierung, welche
- einen Gewichtsanteil an Scandium von unter 0,01 Gew%,
- einen Magnesiumgehalt von 1,0 bis 8,0 Gew%,
- einen Siliziumgehalt von 2,5 bis 4,5 Gew%,
- einen Mangangehalt von 0,15 bis 0,25 Gew%,
- einen Gehalt an dispersionsbildenden Legierungselementen ausgewählt aus Vanadium, Zirkonium und/oder Titan in einem Anteil von 0,10 bis 0,35 Gew% und als Rest Aluminium aufweist, im Rahmen eines additiven Fertigungsverfahrens.

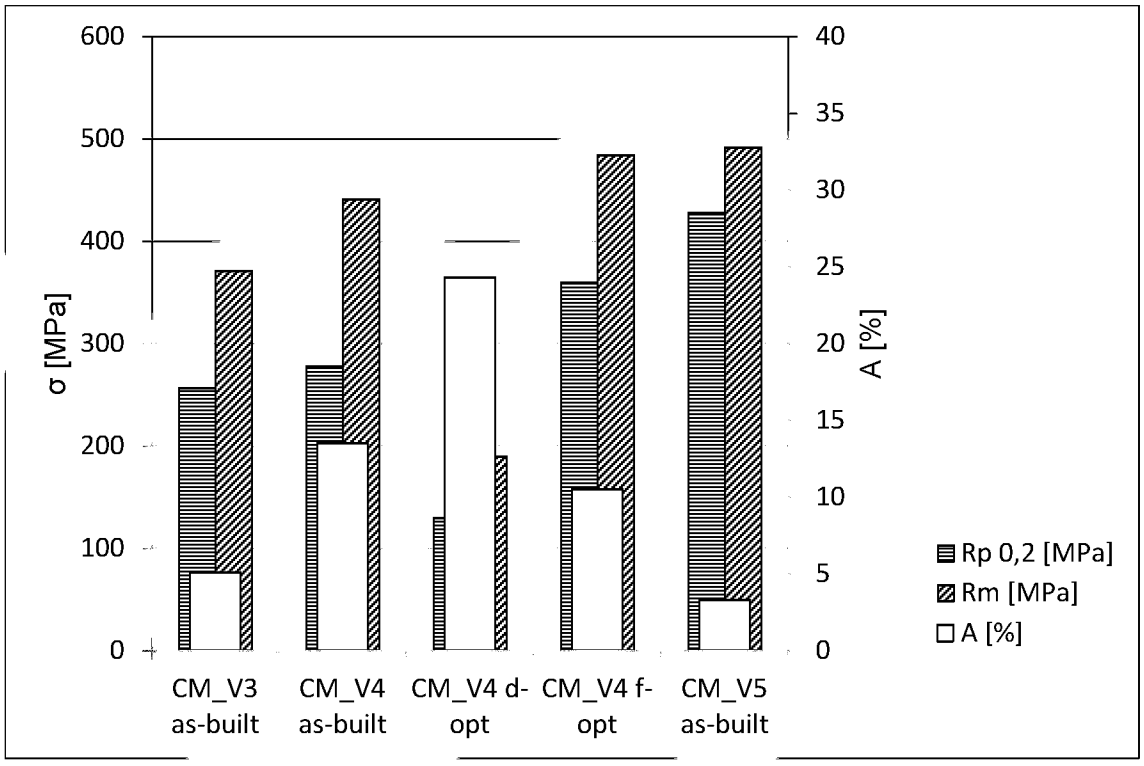
10. Verwendung einer Aluminiumlegierung, welche
- einen Gewichtsanteil an Scandium von unter 0,01 Gew%,
- einen Magnesiumgehalt von 1,0 bis 8,0 Gew%,
- einen Siliziumgehalt von 2,5 bis 4,5 Gew%,
- einen Mangangehalt von 0,15 bis 0,25 Gew%,

- einen Gehalt an dispersionsbildenden Legierungselementen ausgewählt aus Vanadium, Zirkonium und/oder Titan in einem Anteil von 0,10 bis 0,35 Gew% und als Rest Aluminium aufweist, zur Herstellung von endkonturnahen Bauteilen der Automobil- und/oder Maschinenbauindustrie im Rahmen eines additiven Fertigungsverfahrens.

Es folgt eine Seite Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

Fig. 1



 Das Dokument wurde durch die Firma Jouve erstellt.