



(10) **DE 10 2020 212 701 A1** 2022.04.14

(12) **Offenlegungsschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2020 212 701.8**  
(22) Anmeldetag: **08.10.2020**  
(43) Offenlegungstag: **14.04.2022**

(51) Int Cl.: **B23K 26/32** (2014.01)  
**B23K 26/21** (2014.01)  
**B23K 26/244** (2014.01)  
**H01M 4/04** (2006.01)  
**H01M 50/531** (2021.01)

(71) Anmelder:  
**Robert Bosch Gesellschaft mit beschränkter  
Haftung, 70469 Stuttgart, DE**

(72) Erfinder:  
**Alter, Lukas, 70193 Stuttgart, DE**

(56) Ermittelter Stand der Technik:

DE	195 06 768	A1
DE	10 2020 202 697	A1
US	2018 / 0 361 506	A1
US	4 877 939	A
EP	3 034 224	A1

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

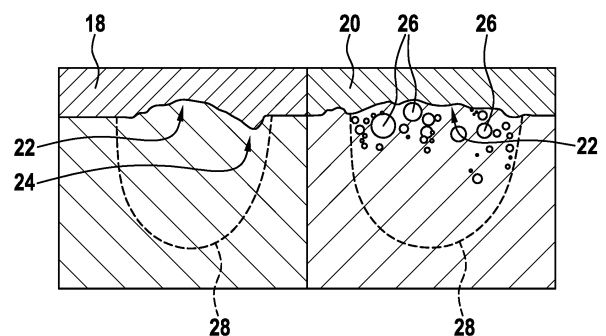
**Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen.**

(54) Bezeichnung: **Verfahren zur Reduzierung von Poren und zur Erhöhung der Einschweißtiefe beim Schweißen von Kupferwerkstoffen**

(57) Zusammenfassung: Die Erfindung bezieht sich auf ein Verfahren zur Reduzierung von Poren (26) und zur Erhöhung der Einschweißtiefe (58, 62) in ein Werkstück (42) beim Schweißen von Kupferwerkstoffen mittels Laserstrahlschweißen. Es werden zumindest die nachfolgenden Verfahrensschritte durchlaufen:

Es erfolgt eine aktive Oxidation (24) einer Oberfläche (44) eines Werkstücks (42) durch einmalige Überfahrt (58) eines Laserstrahls (40) mit reduzierter Laserleistung entlang einer Schweißnahtgeometrie (36), Durchführen mindestens einer zweiten Überfahrt (60) entlang der Schweißnahtgeometrie (36), vorbehandelt gemäß a) mit reduzierter Laserleistung gemäß a) unter Ausnutzung einer erhöhten Absorption des Laserstrahls (40) durch die in a) hervorgerufene Modifikation der Oberfläche (44) oder es erfolgt alternativ eine Zuführung mindestens einer zweiten Überfahrt (60) des Laserstrahls (40) mit Laserleistung > reduzierter Laserleistung gemäß a) entlang der Schweißnahtgeometrie (36) unter Ausnutzung einer erhöhten Absorption des Laserstrahls (40) durch die in a) hervorgerufene Modifikation der Oberfläche (44) zur Erhöhung einer ersten Einschweißtiefe (56) auf zumindest eine zweite Einschweißtiefe (62) im Werkstück (42).

Darüber hinaus bezieht sich die Erfindung auf die Verwendung des Verfahrens zum Schweißen von mit Cu beschichteten Substraten auf Kunststoff oder Keramik bei einer Cu-Metallisierungsdicke von weniger als 100 µm sowie auf das Verschweißen von Folienstapeln aus Kupferfolien in der Batteriefertigung oder der Elektronikfertigung.



**Beschreibung**

Technisches Gebiet

**[0001]** Die Erfindung bezieht sich auf ein Verfahren zur Reduzierung von Poren und zur Erhöhung der Einschweißtiefe in einem Werkstück beim Schweißen von Kupferwerkstoffen mittels Laserstrahlschweißen. Des Weiteren bezieht sich die Erfindung auf die Verwendung des Verfahrens zum Schweißen von mit Cu beschichteten Substraten aus Kunststoff oder Keramik bei sehr dünnenschichtigen Kupfermetallisierungsschichten und auf die Verwendung des Verfahrens zum Einsatz in der Batteriefertigung und der Elektronikfertigung.

Stand der Technik

**[0002]** Die zunehmende Elektrifizierung des öffentlichen und des privaten Personenverkehrs (Elektromobilität) stellt erhöhte Anforderungen an die Fertigungs- und Fügechnik einzelner Komponenten elektrischer Baugruppen. Der Bedarf an hohen Stromtragfähigkeiten in Kombination mit ausreichender Lebensdauerfestigkeit fordert in vielen Fällen den Einsatz von Kupferwerkstoffen. Diese Werkstoffe müssen unter dem Aspekt möglichst hoher Fügequalitäten und hoher Produktivität elektrisch leitend miteinander verbunden werden können. Oftmals ist dabei auf einen sehr definierten Energieeintrag in Kombination mit engen Qualitätstoleranzen zu achten.

**[0003]** Das Laserstrahlschweißen hat sich bereits als hochflexibles Fügeverfahren in der industriellen Fertigungstechnik etabliert, bringt aber beim Schweißen von Kupferwerkstoffen zahlreiche Herausforderungen mit sich. Die geringe Absorption von Laserstrahlung typischer Schweißlaser mit ungefähr 1 µm Wellenlänge erfordert sehr hohe Intensitäten am Bauteil, um überhaupt einen Schweißprozess realisieren zu können. Zusätzlich erschwert die hohe Wärmeleitfähigkeit des Kupfers den Wärmeeintrag erheblich. Mit Erreichen der Schmelztemperatur steigt die Absorption sprunghaft um den Faktor 2 bis 3 an, wohingegen die Wärmeleitfähigkeit ungefähr um den Faktor 2 abfällt. Dies führt zu einem starken Anstieg des Energieeintrags, verbunden mit der schlagartigen Ausbildung eines Dampfkanals (keyhole) mit großem Aspektverhältnis (Verhältnis keyhole-Tiefe zu keyhole-Durchmesser).

**[0004]** Einerseits sind so geringe Einschweißstiefen (100 µm bis 500 µm) nur durch die Kombination sehr gut fokussierbarer Laserstrahlung (gute Strahlqualität) und einer geeigneten Prozessstrategie (z. B. örtliche Strahloszillation) realisierbar. Weitere Herausforderungen resultieren aus den auftretenden keyhole-Instabilitäten, die bei hohen Aspektverhält-

nissen unvermeidbar sind und zu Spritzern oder Schmelzeauswürfen führen können.

Darstellung der Erfindung

**[0005]** Erfindungsgemäß wird beim Schweißen von Kupferwerkstoffen mittels Laserstrahlschweißen ein Verfahren zur Reduzierung von Poren und zur Erhöhung der Einschweißtiefe in ein Werkstück vorgeschlagen, wobei zumindest die nachfolgenden Verfahrensschritte durchlaufen werden:

- a) Aktive Oxidation einer Oberfläche eines Werkstücks durch einmalige Überfahrt eines Laserstrahls mit reduzierter Laserleistung entlang einer Schweißnahtgeometrie,
- b) Durchführen mindestens einer zweiten Überfahrt entlang der Schweißnahtgeometrie, vorbehandelt gemäß a) mit reduzierter Leistung gemäß a) und Ausnutzung einer erhöhten Absorption des Laserstrahls durch die in a) hervorgerufene Modifikation der Oberfläche, oder
- c) Durchführen mindestens einer zweiten Überfahrt des Laserstrahls mit Laserleistung > reduzierter Laserleistung gemäß a) entlang der Schweißnahtgeometrie unter Ausnutzung einer erhöhten Absorption des Laserstrahls durch die in a) hervorgerufene Modifikation der Oberfläche zur
- d) Erhöhung einer ersten Einschweißtiefe auf mindestens eine zweite Einschweißtiefe im Werkstück.

**[0006]** Durch das erfindungsgemäß vorgeschlagene Verfahren kann eine aktive Oxidation vorgenommen werden, was die Anwesenheit von Wasserstoff, insbesondere aus der Umgebung des Schweißprozesses, signifikant reduziert, was wiederum bei Ausführen der Schweißoperation die mechanische Festigkeit der erhaltenen Schweißnaht erheblich verbessert. Des Weiteren kann durch das erfindungsgemäß vorgeschlagene Verfahren die Ausbildung einer Oxidschicht, die im Rahmen einer ersten Überfahrt über die Schweißnahtgeometrie erzeugt wird, dazu genutzt werden, im Rahmen einer zweiten Überfahrt des Laserstrahls über die entsprechende Nahtoberraupe eine weitere Durchdringung des aufgeschmolzenen Gefüges, d. h. eine erhebliche Erhöhung der Einschweißtiefe zu erreichen.

**[0007]** In einer vorteilhaften Weiterbildung des erfindungsgemäß vorgeschlagenen Verfahrens erfolgt eine Erhöhung einer ersten Einschweißtiefe auf zumindest eine zweite Einschweißtiefe im Werkstück durch die Kombination von a) und b) gegenüber einer ausschließlichen Durchführung von b).

**[0008]** Des Weiteren erfolgt in vorteilhafter Weise eine Erhöhung einer ersten Einschweißtiefe auf

zumindest eine zweite Einschweißtiefe im Werkstück durch die Kombination von a) und c) gegenüber einer ausschließlichen Durchführung von c).

**[0009]** In einer vorteilhaften Weiterbildung des der Erfindung zugrundeliegenden Gedankens erfolgt eine Verringerung einer H<sub>2</sub>-Aufnahme durch eine Kombination von a) und b) gegenüber einer ausschließlichen Durchführung von b). Des Weiteren kann beim erfindungsgemäß vorgeschlagenen Verfahren eine Verringerung einer H<sub>2</sub>-Aufnahme durch eine Kombination von a) und c) gegenüber ausschließlich c) erreicht werden.

**[0010]** In einer vorteilhaften Weiterbildung des erfindungsgemäß vorgeschlagenen Verfahrens wird das Laserstrahlschweißen mit einer Laserstrahlung unterhalb einer Wellenlänge von 0,6 µm, bevorzugt mit einer Wellenlänge grünen Laserlichts von 0,515 µm sowie weiter bevorzugt mit einer Wellenlänge blauen Laserlichts im Bereich von 0,44 µm bis 0,46 µm durchgeführt.

**[0011]** Beim erfindungsgemäß vorgeschlagenen Verfahren liegt während der Durchführung des Verfahrensschritts a) die Temperatur  $\tau$  an der Oberfläche des Werkstücks unterhalb der Verdampfungstemperatur des Kupfers.

**[0012]** Weiterhin übersteigt beim erfindungsgemäß vorgeschlagenen Verfahren der Absorptionsgrad von Laserstrahlung in Kupferoxid den Absorptionsgrad von Laserstrahlung in blankem Kupfer um ein Vielfaches.

**[0013]** Beim erfindungsgemäß vorgeschlagenen Verfahren lassen sich bei einer Kombination der Verfahrensschritte a) und b) Einschweißstiefen im Bereich zwischen 20 µm bis 300 µm erzielen.

**[0014]** In einer Ausführungsvariante des erfindungsgemäß vorgeschlagenen Verfahrens kann eine Kombination der Verfahrensschritte a) und c) zu Einschweißstiefen führen, die im Bereich zwischen 100 µm bis 2000 µm liegen.

**[0015]** Beim erfindungsgemäß vorgeschlagenen Verfahren liegt die Anzahl der Überfahrten entlang der Schweißnahtgeometrie bei der Durchführung der Verfahrensschritte a) und b)  $< 10$ , bevorzugt  $< 5$ .

**[0016]** Beim erfindungsgemäß vorgeschlagenen Verfahren kann alternativ die Anzahl der Überfahrten entlang der Schweißnahtgeometrie bei Durchführung der Verfahrensschritte a) und c)  $< 10$  betragen, bevorzugt  $< 5$ .

**[0017]** In vorteilhafter Weise ermöglicht die Durchführung des erfindungsgemäß vorgeschlagenen Verfahrens die Erzeugung der Oxidschicht an der Ober-

fläche des Werkstücks durch den Laserstrahl selbst. Weitere Bearbeitungsschritte zur Erzeugung der Oxidschicht an der Oberfläche des Werkstücks können mithin unterbleiben.

**[0018]** Darüber hinaus bezieht sich die Erfindung auf die Verwendung des Verfahrens zum Schweißen von mit Cu beschichteten Substraten aus Kunststoff oder Keramik, bei welchem eine Cu-Metallisierungsdicke zwischen 20 µm bis 500 µm vorliegt. Darüber hinaus bezieht sich die Erfindung auf die Verwendung des Verfahrens zum Verschweißen von Folienstapeln aus Kupferfolien im Bereich der Batterieherstellung. Weiterhin bezieht sich die Erfindung auf die Verwendung des Verfahrens in der Elektronikfertigung zum Fügen dünn beschichteter Flexfolien mit einer Dicke zwischen 10 µm bis 100 µm auf dünn beschichtete Substrate mit einer Dicke zwischen 10 mm bis 100 mm.

#### Vorteile der Erfindung

**[0019]** Gemäß einem Aspekt der vorliegenden Erfindung wird die Reduzierung der durch Anwesenheit von H<sub>2</sub> verursachten Porosität beim Laserstrahlschweißen von Kupferwerkstoffen durch Aufbringen einer Oxidschicht an der Werkstückoberfläche verhindert. Das Kupferoxid an der Oberfläche des mittels Laserschweißen zu verschweißenden Werkstücks führt zu einer Bindung des Umgebungswasserstoffs an der Oberfläche. Dabei wird Wasserdampf gebildet, der oberflächennah aus der Schweißzone entweichen kann, ohne dass es zu einer Porosität im Schweißnahtvolumen kommt.

**[0020]** Eine entsprechende Oxidation der Werkstückoberfläche kann vorab am Werkstück mittels Wärmebehandlung erfolgen, insbesondere durch den Laserstrahl selbst vor der Ausführung des eigentlichen Schweißprozesses. Dazu führt der Laserstrahl eine Überfahrt über die Schweißnahtgeometrie mit einer reduzierten Laserleistung durch, wodurch die Wärmebehandlung gegeben ist.

**[0021]** Hierbei ist darauf zu achten, dass die Temperatur an der Spitze des Laserstrahls, die im Wesentlichen der Temperatur entspricht, die an der Oberfläche des Werkstoffes herrscht, die Verdampfungstemperatur nicht überschreitet. Durch dieses auch als Wärmeleitungsschweißen bezeichnete Vorgehen kann der Wärmeeintrag in das Werkstück minimiert werden und eine ausreichend dicke Oxidschicht erzeugt werden. In einem weiteren Prozessschritt erfolgt der eigentliche Schweißprozess entlang einer zur Wärmebehandlung identischen Schweißbahngeometrie. Durch die erfindungsgemäß vorgeschlagene Lösung kann der Defekt einer unzulässig hohen Bildung von Wasserstoffporen in der Schweißnaht signifikant reduziert und idealerweise vollständig eliminiert werden. Durch die Oxidation

der Oberfläche des Werkstücks kann insbesondere auf den Einsatz teurer Schutzgase, so zum Beispiel Helium, Argon und Stickstoff, und eine Bildung einer Schutzgasatmosphäre verzichtet werden, und die damit einhergehenden Kosten können eingespart werden. Auch der Einsatz von Zusatzmaterial, wie beispielsweise Titan, Silizium oder Aluminium, kann entfallen und dementsprechend können Produktionskosten verringert werden.

**[0022]** Werden die Kupferwerkstoffe mittels grüner Laserstrahlung miteinander stoffschlüssig gefügt, kann ein sehr stabiler Schweißprozess erreicht werden, der insbesondere eine konstante Einschweißtiefe garantiert und andererseits spritzarm beziehungsweise spritzerfrei durchgeführt werden kann. Durch Vermeidung der wasserstoffinduzierten Porosität können die Vorteile dieses Prozesses ohne weitere Betrachtung eines möglichen festigkeitsmindernden Einflusses der Porenbildung übertragen werden. So lassen sich insbesondere auf Substraten aus Kunststoff oder Keramik, die Kupfermetallisierungen von wenigen Hundert Mikrometern aufweisen, Schweißnähte erzeugen, ohne dass die Substrate aus Keramik oder Kunststoff durch den Laserstrahl beschädigt würden.

**[0023]** Gemäß einem weiteren Aspekt des erfindungsgemäß vorgeschlagenen Verfahrens kann durch das Ausnutzen von Wärmeakkumulationseffekten durch Mehrfachüberfahrten des Werkstücks durch den Laserstrahl eine größere Einschweißtiefe erreicht werden. Wird gemäß dem erfindungsgemäß vorgeschlagenen Verfahren eine mehrfache Überfahrt der Schweißnahtgeometrie vorgenommen, kann durch die damit einhergehende Oxidbildung während des Schweißens auf der Oberseite der Schweißnaht eine aktiv erzeugte Oxidschicht hergestellt werden. Dies bringt zweierlei Vorteile mit sich: Bei einer zweiten Überfahrt mit dem Laserstrahl, der mit Laser-Nennleistung betrieben wird, wird an der zu verschweißenden Stelle die Energie des Laserstrahls über das Oxid an der Oberfläche in das Material absorbiert. Der Absorptionsgrad von Kupferoxid liegt um Faktoren höher als der Absorptionsgrad gängiger Laserwellenlängen in blankem Kupfer. Folglich wird mehr Energie im Werkstück deponiert und die Einschweißtiefe erhöht sich. Zum Zweiten erfolgt die Bildung von Kupferoxid unter der Abgabe von Energie im Rahmen einer exothermen Reaktion, was wiederum zur erhöhten Deponierung von Energie im Werkstück und damit zu einer gesteigerten Einschweißtiefe führt.

**[0024]** Durch das erfindungsgemäß vorgeschlagene Verfahren wird die Einschweißtiefe bei spritzerfrei durchzuführendem Laserstrahlschweißen deutlich erhöht. Dies bringt für viele potenzielle Schweißprozesse, insbesondere in der Elektronik- und der Batteriefertigung entscheidende Vorteile mit sich.

Werden beispielsweise in der Batteriefertigung Folienstapel aus Kupferfolie geschweißt, kann durch Anwendung des erfindungsgemäß vorgeschlagenen Verfahrens ein dickerer Folienstapel sicher und qualitativ hochwertig verschweißt werden. Dies ist der im Wesentlichen porenfrei ausgebildeten Schweißnaht einerseits und andererseits der Erhöhung der Einschweißtiefe, die beim erfindungsgemäß vorgeschlagenen Verfahren erzielt werden kann, geschuldet. In der Elektronikfertigung werden oftmals dünne Folien (Flexfolien) auf dünn beschichtete Substrate gefügt. Beim konventionellen Wärmeleitschweißprozess ist die Dicke der sicher zu verschweißenden Flexfolien auf wenige zehn Mikrometer begrenzt. Durch die Anwendung des erfindungsgemäß vorgeschlagenen Verfahrens können diese Grenzen nach oben hin verschoben werden.

**[0025]** Ein weiterer schlagender Vorteil des erfindungsgemäß vorgeschlagenen Verfahrens ist darin zu sehen, dass das Oxid an der Werkstückoberfläche (Nahtberraupe) durch das Werkzeug selbst, d. h. durch den Laserstrahl erzeugt wird. Für die sichere Einkopplung der Energie des Laserstrahls ist es gemäß dem Stand der Technik nicht unüblich, das Werkstück an seiner Oberfläche beispielsweise mit Zinn oder Nickel zu beschichten. Diese Vorbehandlung kann durch das erfindungsgemäß vorgeschlagene Verfahren mit induzierten Oxidschichten an der Oberfläche vermieden werden, wodurch sich vorbehandelnde Arbeitsschritte bei Durchführung von automatisierten Schweißprozessen einsparen ließen.

#### Figurenliste

**[0026]** Ausführungsformen der Erfindung werden anhand der Zeichnungen und der nachfolgenden Beschreibung näher erläutert.

**[0027]** Es zeigen:

**Fig. 1** den schematischen Zusammenhang zwischen Wasserstofflöslichkeit und Temperatur für Cu,

**Fig. 2** gegenübergestellte Querschnitte lasergestrahelter Proben aus Reinkupfer mit aktiv oxidierte Oberfläche beziehungsweise im unbehandelten Zustand,

**Fig. 3** lichtmikroskopische Aufnahmen laserstrahlgeschweißter Kupferproben in Dunkelfeld- und Hellfelddarstellung,

**Fig. 4.1, Fig. 4.2** schematische Darstellung der ersten Überfahrt sowie der zweiten Überfahrt, wobei der Laserstrahl mit Laser-Nennleistung betrieben wird,

**Fig. 5** den Verlauf der erreichbaren Einschweißtiefe laserstrahlgeschweißter Kupferproben aufgetragen über die Anzahl der Überfahrten.

## Ausführungsformen der Erfindung

**[0028]** In der nachfolgenden Beschreibung der Ausführungsformen der Erfindung werden gleiche oder ähnliche Elemente mit gleichem Bezugszeichen bezeichnet, wobei auf eine wiederholte Beschreibung dieser Elemente in Einzelfällen verzichtet wird. Die Figuren stellen den Gegenstand der Erfindung nur schematisch dar.

**[0029]** Der Darstellung gemäß **Fig. 1** ist der Zusammenhang zwischen der Wasserstofflöslichkeit und der Temperatur für das Material Kupfer zu entnehmen. Gemäß **Fig. 1** ist die Porenbildung im Kupfermaterial dadurch begründet, dass Kupfer im flüssigen Zustand eine hohe Wasserstofflöslichkeit aufweist. In **Fig. 1** ist der Verlauf einer Wasserstofflöslichkeit 10 über den Temperaturverlauf 12 aufgetragen. Mit Position 14 ist eine Schmelztemperatur des Kupfermaterials bezeichnet. Die Wasserstoffaufnahme des Kupfers wird durch hohe Diffusionsgeschwindigkeiten des Wasserstoffs in flüssigem Kupfer begünstigt. Wird bei der Abkühlung die Schmelztemperatur 14 erreicht, fällt die Wasserstofflöslichkeit schlagartig mit ca. Faktor 3 ab und die wasserstoffreiche Schmelze gibt den Wasserstoff als Gas an die Umgebung ab. Dies führt zur obenstehend mehrfach erwähnten Porosität, wie in **Fig. 2** durch Position 26 angedeutet.

**[0030]** **Fig. 2** zeigt eine Gegenüberstellung von Querschnitten laserstrahlgeschweißter Proben von Reinkupfer mit konstanten Schweißparametern. Während im linken Teil von **Fig. 2** eine oxidierte Oberfläche 18 durch Durchführen einer aktiven Oxidation 24 vorliegt, ist die im rechten Teil von **Fig. 2** dargestellte Oberfläche eine blanke, unbehandelte Oberfläche 20 von Kupfer. An beiden Proben wird eine Laserstrahlschweißung vorgenommen (vgl. Position 22). Da bei der mit einer aktiven Oxidation 24 vorbehandelten Laserstrahlschweißung 22 kein Wasserstoff vorliegt, weder aus der Umgebung noch aus Verschmutzungen an der Oberfläche, stellt sich die relativ gleichmäßige Laserstrahlschweißung 22 ein. Mit Position 28 ist ein Bereich bezeichnet, in dem eine Gefügeänderung des Werkstoffs Kupfer im Werkstück vorliegt.

**[0031]** Liegt hingegen eine blanke, unbehandelte Oberfläche 20 im Bereich der Laserstrahlschweißung 22 vor, kommt es zur Bildung von Poren 26, die im Material der Schweißnaht nach der Laserstrahlschweißung 22 ausgebildet werden. Die Poren 26, die im Bereich 28 mit Gefügeänderungen vorliegen, schwächen die erzielbare mechanische Festigkeit der Laserstrahlschweißung 22 nicht unerheblich.

**[0032]** Der Darstellung gemäß **Fig. 3** sind Schlißproben zu entnehmen, die lichtmikroskopische Aufnah-

men laserstrahlgeschweißter Kupferproben wiedergeben. Eine aktive Oxidation 24 der Oberfläche 44 eines Werkstücks 42 kann im Schlißbild detektiert werden, da die im Schweißgut gelösten Kupferoxide 32 unter polarisiertem Licht und im Dunkelfeld 30 rot erscheinen. Den **Fig. 4.1** und **Fig. 4.2** sind schematische Darstellungen von Überfahrten über eine Schweißnahtgeometrie 36 zu entnehmen.

**[0033]** Nach der Durchführung der Vorbehandlung der Oberfläche 44, d. h. deren aktiver Oxidation 24, beispielsweise durch eine einmalige Wärmebehandlung einer Oberfläche 44 eines Werkstücks 42 durch einen Laserstrahl 40 mit reduzierter Laserleistung, erfolgt gemäß **Fig. 4.1** in Vorschubrichtung 48 der Vorschub des Laserstrahls 40, der mit Nennleistung betrieben wird. Eine Strahlspitze 46 des Laserstrahls 40 fährt entsprechend der Vorschubgeschwindigkeit des Laserstrahls 40 in Vorschubrichtung 48 entlang der Schweißnahtgeometrie 36. Im Rahmen einer ersten Überfahrt 58 in Vorschubrichtung 48 wird auf der Oberfläche 44 des Werkstücks 42 eine Oxidschicht 50 erzeugt. Diese überdeckt eine Nahtoberfläche 54 einer Schweißnaht 52. Bei der ersten Überfahrt 58 des Laserstrahls 40 entlang der Schweißnahtgeometrie 36 wird eine erste Einschweißtiefe 56 erreicht. Die Ausbildung der Oxidschicht 50 während des Schweißens und deren Vorhandensein auf der Oberseite der Schweißnaht 52, d. h. auf der Nahtoberfläche 54 hat folgende Vorteile:

**[0034]** Bei einer in **Fig. 4.2** dargestellten zweiten Überfahrt 60 des Laserstrahls 40 in Vorschubrichtung 48 mit Vorschubgeschwindigkeit über die im Rahmen der ersten Überfahrt 58 aufgebrauchte Oxidschicht 50 wird die Energie des Laserstrahls 40 über die Oxidschicht 50 stärker an der Oberfläche 44 in das Kupfermaterial absorbiert. Der Absorptionsgrad der Oxidschicht 50 aus Kupferoxid liegt um Faktoren höher verglichen mit dem Absorptionsgrad gängiger Laserwellenlängen in Kupfermaterial. Folglich wird mehr Energie im Werkstück 42 deponiert und die Einschweißtiefe erhöht sich von der im Rahmen der ersten Überfahrt 58 erzeugten Einschweißtiefe 56 auf die durch die zweite Überfahrt 60 erzeugte zweite Einschweißtiefe 62. Des Weiteren ist festzuhalten, dass die Bildung von Kupferoxid, d. h. die Bildung der Oxidschicht 50 unter Abgabe von Energie als exotherme Reaktion erfolgt, was wiederum zu einer erhöhten Deponierung von Energie im Werkstück 42 führt und damit die zweite gesteigerte Einschweißtiefe 62 ermöglicht.

**[0035]** In der Darstellung gemäß **Fig. 5** ist der Verlauf einer erreichbaren Einschweißtiefe bei laserstrahlgeschweißten Kupferproben aufgetragen über die Anzahl der Überfahrten. Ein Verlauf der Einschweißtiefe ist durch Bezugszeichen 70 angedeutet, aufgetragen über eine Anzahl 72 der Überfahrten

entsprechend der in den **Fig. 4.1** und **Fig. 4.2** angedeuteten Schweißnahtgeometrie 36.

**[0036]** Die jeweiligen Überfahrten entlang der Schweißnahtgeometrie 36 erfolgten mit beispielsweise einem ersten Parameterset 74. Entsprechend dem ersten Parameterset 74 wurde ein Laserstrahl 40 mit einer ersten Leistung  $P_1$  und einer ersten Vorschubgeschwindigkeit betrieben. Entsprechend den Überfahrten, die weniger als 5 betragen, werden Einschweißstiefen von bis zu 110  $\mu\text{m}$  erreicht. Wird die Vorschubgeschwindigkeit erhöht, d. h. übersteigt die Vorschubgeschwindigkeit  $v_2$  die Vorschubgeschwindigkeit  $v_1$  - bei konstanter Laserleistung  $P_1$  - werden bei bis zu 10 Überfahrten Einschweißstiefen bis zu 80  $\mu\text{m}$  erhalten. Wird bei konstanter Laserleistung die Vorschubgeschwindigkeit nochmals gesteigert, d. h.  $v_3 > v_2 > v_1$ , so verringert sich die Einschweißtiefe bei Überfahrten von weniger als 20  $\mu\text{m}$  auf bis zu 60  $\mu\text{m}$ .

**[0037]** Bei einer Erhöhung der Laserleistung auf  $P_2$  und einer erhöhten Vorschubgeschwindigkeit von z. B. 1 m/s werden hingegen bei zwei Überfahrten Einschweißstiefen von bis zu 85  $\mu\text{m}$  erreicht. Wird bei konstanter Laserleistung  $P_2$  die Vorschubgeschwindigkeit des Laserstrahls 40 in Vorschubrichtung 48 im Vergleich zum vierten Parameterset 80 verdoppelt, so werden lediglich Einschweißstiefen in der Größenordnung zwischen 30 und 40  $\mu\text{m}$  erreicht.

**[0038]** Dies bedeutet, dass bei geringer Vorschubgeschwindigkeit in Vorschubrichtung 48 die höchsten Einschweißstiefen erreicht werden. Aus der Darstellung gemäß **Fig. 5** geht mithin hervor, dass unabhängig von den Parametern Laserleistung und Schweißvorschub jeweils bei der zweiten Überfahrt die größte Zunahme der Einschweißtiefe zu verzeichnen ist. Dies ist unmittelbar auf die durch die während der ersten vorhergehenden Überfahrt oxidierte Oberfläche 44 des Werkstücks 42 zurückzuführen.

**[0039]** Die Erfindung ist nicht auf die hier beschriebenen Ausführungsbeispiele und die darin hervorgehobenen Aspekte beschränkt. Vielmehr ist innerhalb des durch die Ansprüche angegebenen Bereichs eine Vielzahl von Abwandlungen möglich, die im Rahmen fachmännischen Handelns liegen.

### Patentansprüche

1. Verfahren zur Reduzierung von Poren (26) und zur Erhöhung der Einschweißtiefe (56, 62) in einem Werkstück (42) beim Schweißen von Kupferwerkstoffen mittels Laserstrahlschweißen mit zumindest nachfolgenden Verfahrensschritten:

a) Aktive Oxidation (24) einer Oberfläche (44) eines Werkstücks (42) durch einmalige Überfahrt (58) eines Laserstrahls (40) mit reduzierter Laserleistung

entlang einer Schweißnahtgeometrie (36),  
 b) Durchführen mindestens einer zweiten Überfahrt (60) entlang der Schweißnahtgeometrie (36), vorbehandelt gemäß a) mit reduzierter Laserleistung gemäß a) unten Ausnutzung einer erhöhten Absorption des Laserstrahls (40) durch die in a) hervorgerufene Modifikation der Oberfläche (44), oder  
 c) Durchführen mindestens einer zweiten Überfahrt (60) des Laserstrahls (40) mit Laserleistung  $>$  reduzierter Laserleistung gemäß a), entlang der Schweißnahtgeometrie (36) unter Ausnutzung einer erhöhten Absorption des Laserstrahls (40) durch die in a) hervorgerufene Modifikation der Oberfläche (44) zur  
 d) Erhöhung einer ersten Einschweißtiefe (56) auf zumindest eine zweite Einschweißtiefe (62) im Werkstück (42).

2. Verfahren gemäß Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass eine Erhöhung einer ersten Einschweißtiefe (56) auf zumindest eine zweite Einschweißtiefe (62) im Werkstück (42) durch die Kombination von a) und b) gegenüber ausschließlicher Durchführung von b) erfolgt.

3. Verfahren gemäß Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass eine Erhöhung einer ersten Einschweißtiefe (56) auf zumindest eine zweite Einschweißtiefe (62) im Werkstück (42) durch die Kombination von a) und c) gegenüber ausschließlicher Durchführung von c) erfolgt.

4. Verfahren gemäß Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass eine Verringerung einer  $H_2$ -Aufnahme durch eine Kombination von a) und b) gegenüber ausschließlicher Durchführung von b) erfolgt.

5. Verfahren gemäß Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass eine Verringerung einer  $H_2$ -Aufnahme durch eine Kombination von a) und c) gegenüber ausschließlich c) erfolgt.

6. Verfahren gemäß Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Laserstrahlschweißen mit einer Laserstrahlung unterhalb einer Wellenlänge von 0,6  $\mu\text{m}$ , bevorzugt mit einer Wellenlänge grünen Laserlichts von 0,515  $\mu\text{m}$  sowie weiter bevorzugt mit einer Wellenlänge blauen Laserlichts im Bereich von 0,44 bis 0,46  $\mu\text{m}$  durchgeführt wird.

7. Verfahren gemäß Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, dass während der Durchführung von Verfahrensschritt a) die Temperatur  $\tau$  an der Oberfläche (44) des Werkstücks (42) unterhalb der Verdampfungstemperatur von Kupfer liegt.

8. Verfahren gemäß einem der Ansprüche 1 bis 7, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Absorptionsgrad von Laserstrahlung in Kupferoxid den Absorp-

tionsgrad von Laserstrahlung in blankem Kupfer um ein Vielfaches übersteigt.

9. Verfahren gemäß einem der vorstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass sich bei einer Kombination der Verfahrensschritte a) und b) Einschweißstiefen (56, 62) im Bereich zwischen 20 µm bis 300 µm erzielen lassen.

10. Verfahren gemäß einem der vorstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass sich bei einer Kombination der Verfahrensschritte a) und c) Einschweißstiefen (56, 62) im Bereich zwischen 100 µm bis 2000 µm erzielen lassen.

11. Verfahren gemäß einem der vorstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Anzahl der Überfahrten (58, 60) entlang der Schweißnahtgeometrie (36) bei Durchführung der Verfahrensschritte a) und b) < 10, bevorzugt < 5 ist.

12. Verfahren gemäß einem der vorstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Anzahl der Überfahrten (58, 60) entlang der Schweißnahtgeometrie (36) bei Durchführung der Verfahrensschritte a) und c) < 10 bevorzugt < 5 ist.

13. Verfahren gemäß den Ansprüchen 1 bis 11, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Oxidschicht (50) an der Oberfläche (44) des Werkstücks (42) durch den Laserstrahl (40) selbst erzeugt wird.

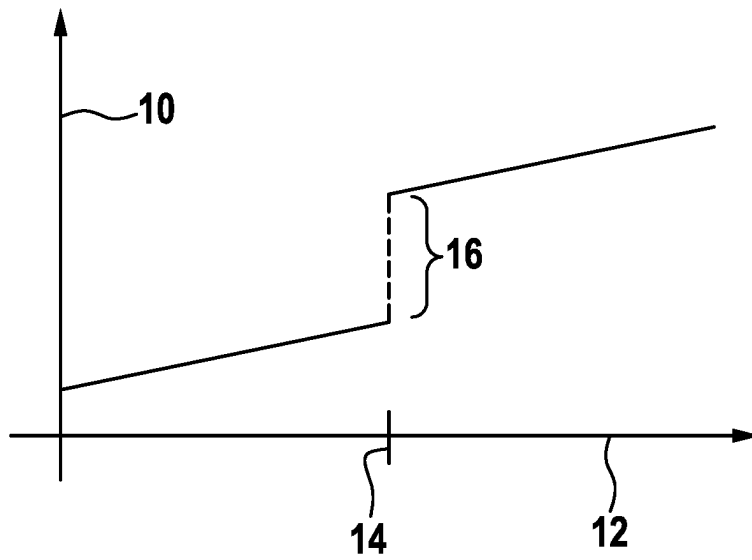
14. Verwendung des Verfahrens gemäß einem der vorstehenden Ansprüche zum Schweißen von mit Cu beschichteten Substraten aus Kunststoff oder Keramik, bei dem eine Cu-Metallisierungsdicke zwischen 20 µm bis 500 µm vorliegt.

15. Verwendung des Verfahrens gemäß einem der Ansprüche 1 bis 12 zum Verschweißen von Folienstapeln aus Kupferfolien in der Batteriefertigung.

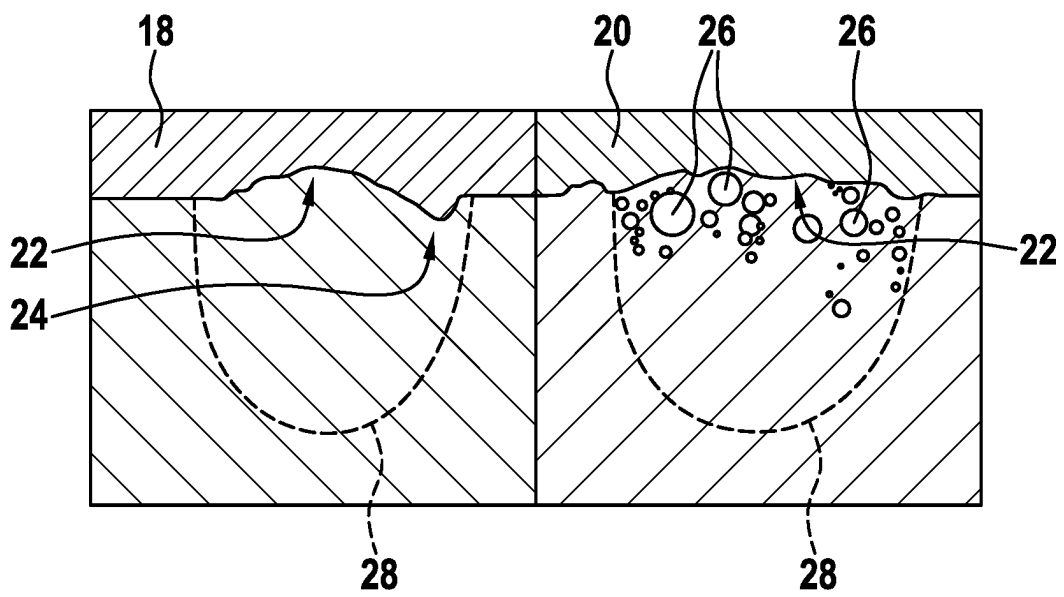
16. Verwendung des Verfahrens gemäß einem der Ansprüche 1 bis 12 in der Elektronikfertigung zum Fügen dünn beschichteter Flexfolien mit einer Dicke von 10 µm bis 100 µm auf dünn beschichtete Substrate mit einer Dicke von 10 µm bis 100 µm.

Es folgen 4 Seiten Zeichnungen

**Fig. 1**

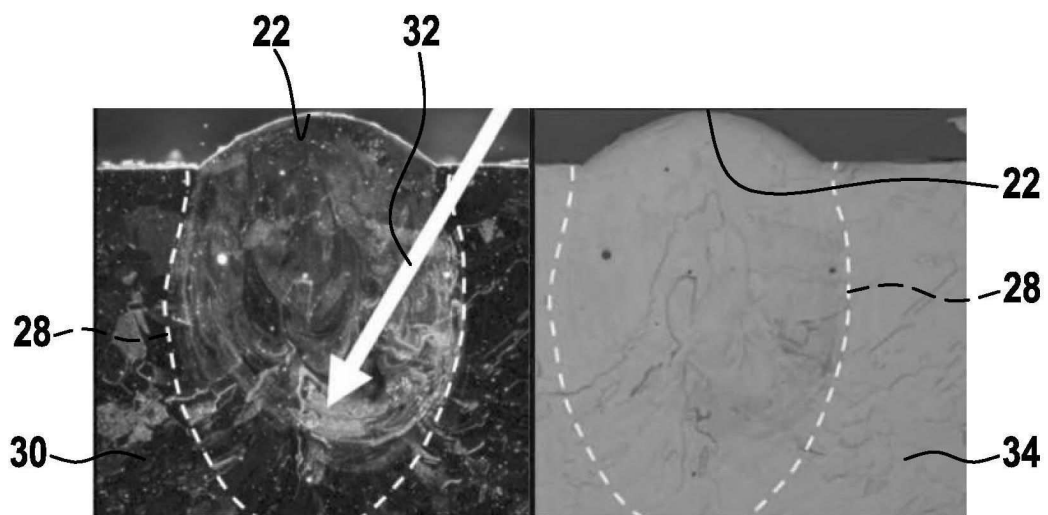


**Fig. 2**

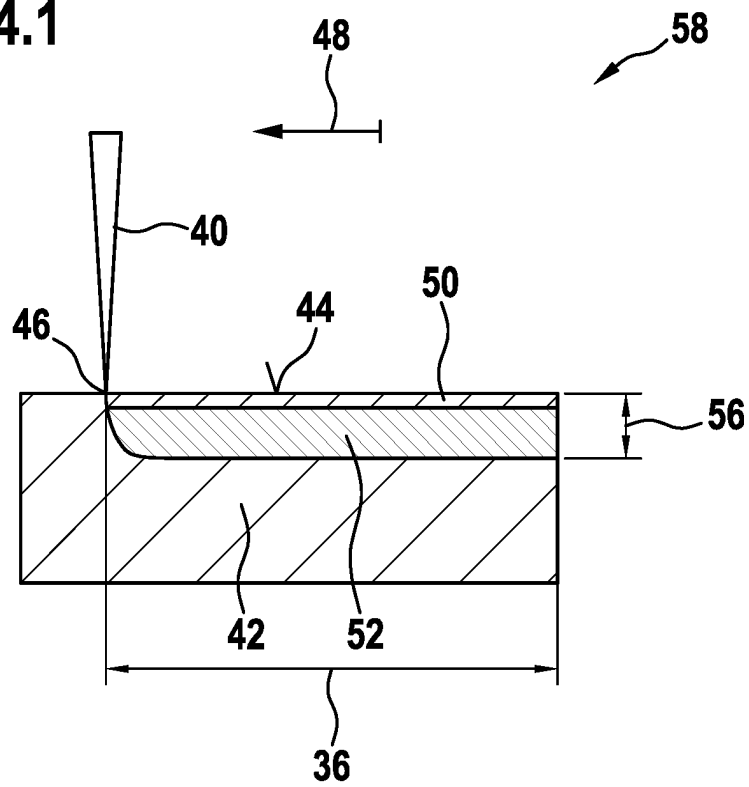




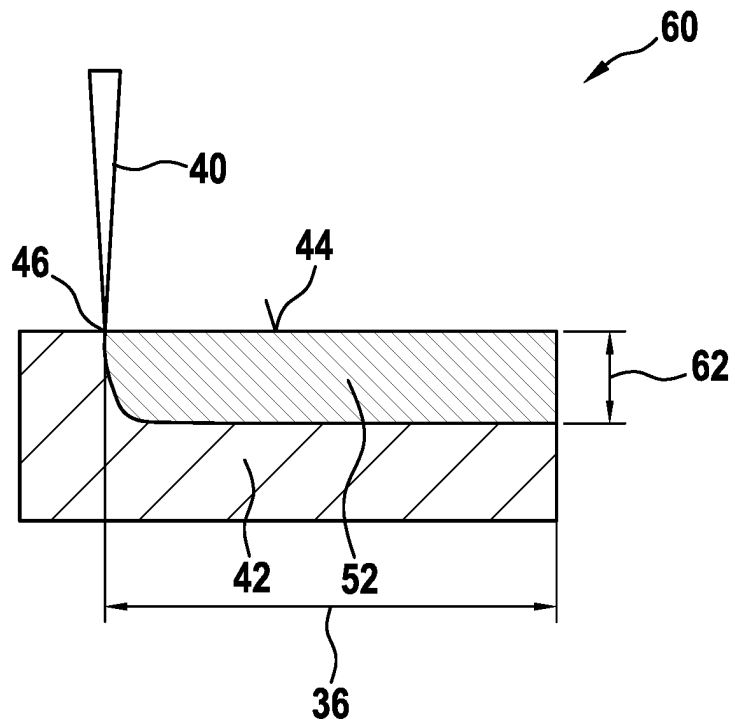
**Fig. 3**



**Fig. 4.1**



**Fig. 4.2**



**Fig. 5**

