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

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum
Internationales Büro

(43) Internationales Veröffentlichungsdatum
20. November 2014 (20.11.2014)

WIPO | PCT

(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2014/184007 A1

(51) Internationale Patentklassifikation:
C22B 9/16 (2006.01) *C22B 9/22* (2006.01)

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2014/058938

(22) Internationales Anmeldedatum:
1. Mai 2014 (01.05.2014)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:
10 2013 008 396.6 17. Mai 2013 (17.05.2013) DE

(71) Anmelder: **G. RAU GMBH & CO. KG** [DE/DE]; Kaiser-Friedrich-Str. 7, 75172 Pforzheim (DE).

(72) Erfinder: **SEDLMAYR, Gerhard**; Speckäcker 15, 75331 Engelsbrand (DE).

(74) Anwalt: **JANY, Peter**; Patentanwalt, Karlstraße 87, 76137 Karlsruhe (DE).

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

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

Veröffentlicht:

— *mit internationalem Recherchenbericht (Artikel 21 Absatz 3)*

— *vor Ablauf der für Änderungen der Ansprüche geltenden Frist; Veröffentlichung wird wiederholt, falls Änderungen eingehen (Regel 48 Absatz 2 Buchstabe h)*

(54) **Title**: METHOD AND DEVICE FOR REMELTING AND/OR REMELT-ALLOYING METALLIC MATERIALS, IN PARTICULAR NITINOL

(54) **Bezeichnung** : VERFAHREN UND VORRICHTUNG ZUM UMSCHMELZEN UND/ODER UMSCHMELZLEGIEREN METALLISCHER WERKSTOFFE, INSBESONDERE VON NITINOL

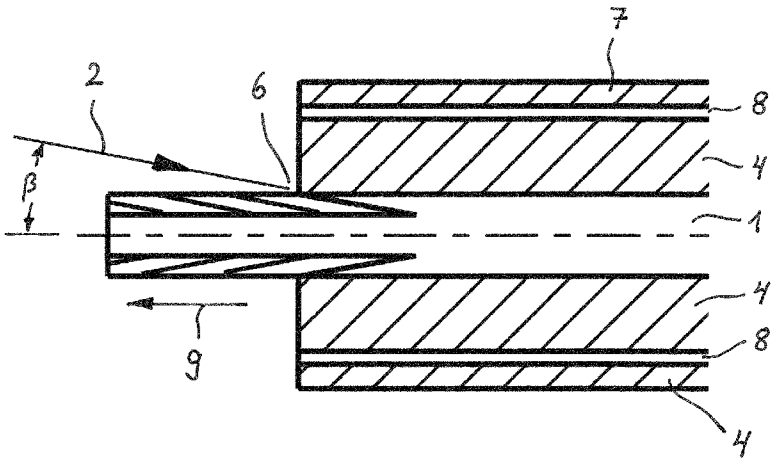

Fig. 5

(57) **Abstract**: The invention relates to a method and a device for producing metallic semifinished products by remelting and/or remelt-alloying. This involves selectively melting the material (1) locally by means of high-energy, focused radiation (2) in a melt capillary (3) in the volume of the material, passing the melt capillary (3) through the material (1) and cooling the material (1) down at a high cooling-down rate by means of a cooled heat sink (4), which is coupled to the material (1) in a good heat-conducting manner and is located near the melt capillary (3).

(57) **Zusammenfassung**: Die Erfindung betrifft ein Verfahren und eine Vorrichtung zum Herstellen metallischer Halbzeuge durch Umschmelzen

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

WO 2014/184007 A1

und/oder Umschmelzlegieren. Dabei wird der Werkstoff (1) mittels energiereicher, fokussierter Strahlung (2) in einer Schmelzkapillare (3) in dem Werkstoffvolumen selektiv lokal geschmolzen, die Schmelzkapillare (3) durch den Werkstoff (1) geführt und der Werkstoff (1) über eine gekühlte, an den Werkstoff (1) gut wärmeleitend angekoppelte Wärmesenke (4), die sich nahe an der Schmelzkapillare (3) befindet, mit einer hohen Abkühlrate abgekühlt.

Verfahren und Vorrichtung zum Umschmelzen und/oder Umschmelzlegieren metallischer Werkstoffe, insbesondere von Nitinol

Die Erfindung betrifft ein Verfahren und eine Vorrichtung zum Herstellen metallischer Halbzeuge durch Umschmelzen und/oder Umschmelzlegieren metallischer Werkstoffe, wobei die Erstarrung der Schmelze, d.h. die Wiedererstarrung/Abschreckung des geschmolzenen Materials, mittels einer Kühleinrichtung mit einer hohen Abkühlrate erfolgt (sogenanntes Quenchen). Die hierbei bearbeiteten Werkstoffe sind vorzugsweise platten-, band-, stab-, rundstab-, draht-, bolzen- oder rohrförmige Ausgangshalbzeuge. Insbesondere richtet sich die Erfindung auf die Herstellung bzw. Bearbeitung von Werkstoffen bzw. Halbzeugen aus Nitinol (NiTi). Daher wird die Erfindung im Folgenden im Wesentlichen anhand von Nitinol erläutert, bei dem die Erfindung bevorzugt, aber nicht ausschließlich angewendet werden kann.

Aus der DE 1121281 A ist eine Schmelzanlage zum Lichtbogenschmelzen und Elektronenschmelzen von Metallen unter reduziertem Druck bekannt, bei dem das Metall entgast wird. Das geschmolzene Metall tropft in einen gekühlten Tiegel und bildet dort einen flüssig gehaltenen Schmelzsee.

Es ist bekannt, dass sich beim Erstarren eines Metalls in Abhängigkeit von den verwendeten Elementen und deren Verhältnis verschiedene Phasen bilden können, siehe z.B. Gerhard Welsch, Rodney Boyer, E. W. Collings, Materials Properties Handbook: Titanium Alloys, ASM International 1993

und Gerd Lütjering, James C. Williams, Titanium, Springer 2003/2007 sowie Jan Frenzel, Werkstoffkundliche Untersuchungen zur schmelzmetallurgischen Herstellung von Ni-reichen NiTi-Formgedächtnislegierungen, Dissertation Ruhr-Universität Bochum 2005, Shaker-Verlag 2006. Ferner kann auch die Anwesenheit von Verunreinigungen wie Sauerstoff und Kohlenstoff beim Schmelzprozess Inklusionen in der gebildeten Legierung erzeugen, siehe die genannten Literaturstellen. Mit Inklusionen werden in der Metallkunde allgemein nichtmetallische, herstellungs- oder entstehungsbedingte Material-Einschlüsse in Metallen bezeichnet.

Die Phasen und Inklusionen haben häufig Einfluss auf die Materialeigenschaften, beispielsweise die Festigkeit, die Formbarkeit und das Ermüdungsverhalten. Daher kann die kontrollierte Bildung von Phasen und Inklusionen während des Schmelzprozesses genutzt werden, um vorhersehbare und gewünschte Materialeigenschaften zu erzielen. Zum Einfluss von Inklusionen auf das Ermüdungsverhalten von Stählen allgemein siehe z.B. P. Grad, B. Reuscher, A. Brodyanski, M. Kopnarski and E. Kerscher, Analysis of the Crack Initiation at Non-Metallic Inclusions in High-Strength Steels, Practical Metallography 49 (2012) 468-469.

Es ist bekannt, Metalle oder Metalllegierungssysteme aus der Schmelze mit Hilfe unterschiedlicher Verfahren schnell abzuschrecken, um dem Material im festen Aggregatzustand Eigenschaften zu verleihen, die es nach langsamen Gieß- und Erstarrungsvorgängen nicht besitzt, siehe z.B. folgende Literaturstellen: Pol Duwez, zitiert in US 4,400,208 A; Pol Duwez, R. H. Willens and W. Klement Jr., Continuous Series of Metastable Solid Solutions, Journal of Applied Physics 31 (1960) 1136; US 2003/056863 A1; US 2009/139612 A1; US 2009/260723 A1; EP 0 024 506 A1; US 4,537,239; US 5,564,490; US 5,842,511; US 5,365,664; US 2004/0043246 A1. So ist es möglich, durch schnelle Erstarrung Metalllegierungen in den amorphen Zustand zu überführen oder Elemente in fester Lösung zu halten (Legierungsübersättigung), die sich bei langsame-

rer Erstarrung bereits entmischen würden. Weiterhin kann eine schnelle Abkühlung bewirken, dass Legierungen mikrokristallin erstarren und Entmischungen nicht als grobe Phasen ausgeschieden werden.

Durch rasche Abkühlung aus der Schmelze kann die Bildung derartiger Gleichgewichtsphasen weitgehend unterdrückt werden. Aufgrund der begrenzten thermischen Leitfähigkeit vieler Werkstoffe liegen jedoch geometrie- bzw. volumenbedingt begrenzte Abkühlraten vor, wodurch das Entstehen von Fremdphasen meist nicht in dem gewünschten Ausmaß unterdrückt werden kann.

Eine schnelle Erstarrung wird dadurch erreicht, dass der Wärmeinhalt einer Schmelze in einer möglichst kurzen Zeit an ein mit der Schmelze in Kontakt stehendes Kühlmedium durch Wärmeleitung abgegeben wird. Dabei hängt die Abschreckrate in entscheidendem Maße von der Größe der Kontaktfläche der Schmelze zum Kühlmedium im Verhältnis der Menge der Schmelze und dem Material des Kühlmediums ab. Je größer die Kontaktfläche in Relation zur Menge der Schmelze ist umso höher ist die Abschreckrate.

Zum Abschrecken von Metallschmelzen ist im Stand der Technik das Melt-Spinning bekannt, siehe z.B. US 2013/0014860 A1, US 2012/0281510 A1, US 2007/0251665 A1 und WO 2000/47351 A1. Dabei wird ein dünner Strahl der Legierungsschmelze auf ein rotierendes, als Kühleinrichtung dienendes Kupferrad, gespritzt. Hierbei entstehen dünne, schmale Bänder. Nach einem anderen bekannten Verfahren erfolgt ein Verdüsen einer Metallschmelze in ein Kühlmedium, sodass dieses als feines Pulver vorliegt.

Den bekannten Verfahren ist gemeinsam, dass zum Erzeugen eines Kompaktwerkstoffes eine weitere Konsolidierung, d.h. ein Verbinden von Stoffen, folgen muss. Beispielsweise ist es durch Sprühkompaktieren möglich,

einen Körper mit mehr Volumen aufzubauen. Gleichfalls ist es möglich, durch selektives Pulverschmelzen (Rapid Prototyping) massive Körper aufzubauen. Die bekannten Verfahren sind jedoch in der Regel mit einer Gasaufnahme bzw. einer unerwünschten Restporosität verbunden.

Bei Nitinol (NiTi) ist es bekannt, zur Formgebung oder Beeinflussung der Umwandlungstemperatur bzw. der elastischen Eigenschaften eine Wärmebehandlung mit einem anschließenden Abschreckprozess, d.h. ein schnelles Abkühlen durchzuführen. Das Abschrecken erfolgt dabei nicht aus der Schmelze, sondern an einem festen Körper, d.h. es handelt sich um Festphasen- und nicht um Flüssigphasenprozesse. Beispiele hierfür sind WO 2013/119912 A1, US 2005/0082773 A1, US 2005/0096733 A1, US 2004/0059410 A1, US 6,422,010 B1, US 6,375,458 B1, JP 61106740 A, JP 61041752 A, JP 60169551 A, JP 60103166 A, JP 59150069 A und US 3,953,253.

Ferner ist es bei Nitinol bekannt, aus einem in einem Schmelztiegel vorliegenden, vollständig aufgeschmolzenen Ausgangsmaterial durch ein schnelles Abkühlen sehr dünne Filamente oder sehr dünnes Bandmaterial herzustellen. Hierzu wird die flüssige Metallschmelze auf ein gekühltes Kupferrad aufgebracht oder zwischen zwei gekühlten Walzen hindurchgeführt. Dabei tritt eine rasche Abkühlung auf, die als Quenchen bezeichnet wird, und das Material erstarrt. Derartige Verfahren sind beispielsweise in JP 8337854 A, JP 5118272 A und JP 59104459 A beschrieben.

Bei Nitinol (NiTi) ist es bisher nicht bekannt, durch eine schnelle Abkühlung der Schmelze die metallurgischen und mechanischen Eigenschaften des Materials in Form eines massiven Halbzeugs gezielt zu beeinflussen, insbesondere das Entstehen und die Größe, den Anteil und die Verteilung von Fremdphasen in dem massiven Halbzeug. Auch ist es bisher nicht bekannt, Nitinolhalbzeuge bei der Herstellung schnell aus Schmelze aktiv abzukühlen.

Nitinol wird nach dem Stand der Technik durch verschiedene Vakuumschmelzverfahren hergestellt, nämlich VIM (Vacuum-Induction-Melting, Vakuuminduktionsschmelzen) und VAR (Vacuum-Arc-Remelting, Vakuumlichtbogenumschmelzen). Bei dem beispielsweise aus der Herstellung hochschmelzender Refraktärmetalle wie Tantal und Niob bekannten konventionellen EBR (Electron-Beam-Remelting, Elektronenstrahlumschmelzen) erstarrt die Schmelze in wassergekühlten Kupfertiegeln, wobei das vergleichsweise große Schmelzvolumen eine rasche Erstarrung verhindert.

Aus der Literaturstelle Mohammad H. Elahinia, Mahdi Hashemi, Majid Tabesh, Sarit B. Bhaduri, Manufacturing and processing of NiTi implants: A review, Progress in Materials Science 57 (2012) 911–946 ist es bekannt, das EBM (Electron-Beam-Melting) zum Herstellen von Nitinol zu verwenden. Dabei wird ein stabförmiger Körper aus den Ausgangsmetallen Ni und Ti mittels eines Elektronenstrahls hoher Leistung mit einem großen Abschmelzvolumen geschmolzen, wobei der Körper gleichzeitig über seinen gesamten Querschnitt aufgeschmolzen wird. Das aufgeschmolzene Material tropft in eine gekühlte Kupferkokille und erstarrt dort volumenbedingt mit einer relativ geringen Abkühlgeschwindigkeit, damit die hinzukommende Schmelzmasse nicht auf festes, sondern auf flüssiges Material trifft und sich so zu einem homogenen Körper verbinden kann. Das EBR mit fokussierter Strahlung wurde bisher noch nicht zum Herstellen von Nitinol verwendet.

Beim Herstellen von Nitinol entsteht in dem Erstarrungsprozess neben der gewünschten intermetallischen Primärphase NiTi eine Vielzahl unerwünschter Fremdphasen und sekundärer Phasen in Form binärer, ternärer und quaternärer Phasen mit unterschiedlicher Größe und Verteilung. Darunter befinden sich beispielsweise Carbide wie TiC und die intermetallischen Phasen Ti_2Ni, Ti_2NiO_x, Ti_4Ni_2O und Ti_4Ni_3. Diese werden allgemein als Inklusionen bezeichnet, weil man annimmt, dass sie sehr großen Ein-

fluss auf die Materialeigenschaften haben. Die Ausbildung dieser Phasen ist konstitutionsbedingt nahezu unvermeidbar und wird insbesondere durch Sauerstoff und Kohlenstoffverunreinigungen, die über die Ausgangsstoffe (Ti und Ni) eingeschleppt werden bzw. aus der Prozessumgebung (Tiegelmaterial oder ggf. umgebende Atmosphäre) stammen, begünstigt. Insbesondere Sauerstoff- und Kohlenstoffverunreinigungen führen zu den Phasen Ti_2NiO_x und TiC. Diese werden in dem Standard ASTM F2063-5 als Inklusionen bezeichnet.

Neuere Untersuchungen bestätigen die Annahme, dass die Anzahl, die Größe und die Form solcher Phasen/Inklusionen in Halbzeugen, beispielsweise Rohren oder Drähten, die Eigenschaften daraus gefertigter Produkte sehr stark beeinflussen, beispielsweise die Korrosionsfestigkeit und das Ermüdungsverhalten von Nitinol-Stents, siehe z.B. US 2010/0274077 A1. Im Verlauf nachgelagerter Umformprozesse bilden sich um die schwerer umformbaren Inklusionen häufig Hohlräume (Voids) aus, die zusätzliche Angriffspunkte für Korrosion bilden, siehe z.B. US 2012/0039740 A1.

Nitinol ist ein Implantatwerkstoff. Es ist bekannt, dass Gefügeinhomogenitäten und Inklusionen dessen Dauerfestigkeit wie auch die Korrosionsbeständigkeit reduzieren können, siehe z.B. die Zitierungen in US 8,430,981 B1 von C. M. Wayman, Smart Materials - Shape Memory Alloys, MRS Bulletin 18 (1993) 49-56 und M. Nishida, C. M. Wayman, T. Honma, Precipitation processes in nearequiatomic TiNi shape memory alloys, Metallurgical Transactions A 17 (1986) 1505-1515 sowie H. Hosoda, S. Hanada, K. Inoue, T. Fukui, Y. Mishima, T. Suzuki, Martensite transformation temperatures and mechanical properties of ternary NiTi alloys with offstoichiometric compositions, Intermetallics 6 (1998) 291–301.

Der Einfluss von Inklusionen auf das Ermüdungsverhalten von NiTi ist beispielsweise beschrieben in Tak Ahiro Sawaguchi, Gregor Kausträter,

Alejandro Yawny, Martin Wagner, Gunther Eggeler, Crack initiation and propagation in 50.9 At. pct Ni-Ti pseudoelastic shape-memory wires in bending-rotation fatigue, Metallurgical and Materials Transactions A 34 (2003) 2847-2860 und in M. Rahima, J. Frenzel, M. Frotscher, J. Pfetzing-Micklich, R. Steegmüller, M. Wohlschlögel, H. Mughrabi, G. Eggeler, Impurity levels and fatigue lives of pseudoelastic NiTi shape memory alloys, Acta Materialia 61 (2013) 3667–3686. Zum Einfluss von Inklusionen auf die Korrosionsbeständigkeit siehe die Literaturstelle Markus Wohlschlögel, Rainer Steegmüller and Andreas Schüßler, Potentiodynamic polarization study on electropolished nitinol vascular implants, Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials 100B (2012) 2231–2238.

Besonders bei filigranen Implantatstrukturen (Stents, Herzklappenrahmen), die durch die Körperflüssigkeiten einer zusätzlichen Korrosionsermüdung ausgesetzt sind, wirken sich erstarrungsbedingte Inklusionen negativ auf das Ermüdungs- und Korrosionsverhalten aus. Daher betreiben die Hersteller von Nitinol-Halbzeugen einen großen Aufwand, um Nitinol-Legierungen mit möglichst geringen Inklusionen zu produzieren, beispielsweise durch die Verwendung hochreiner Ausgangsmaterialien, z.B. dem sogenannten "iodide-reduced titanium crystal bar", mit der Konsequenz sehr hoher Produktionskosten.

Durch Prozessoptimierungen konnte in den letzten Jahren der Volumenanteil der Inklusionen zwar deutlich reduziert werden, es treten aber nach wie vor störende Inklusionen auf, die immer wieder als bruchauslösend identifiziert werden können, insbesondere im Fatigue-Verhalten. Das nach dem Stand der Technik mittels Vakuumschmelztechnologie hergestellte Nitinol enthält derzeit noch immer unerwünschte Inklusionen, deren Entstehung auch bei Verwendung höchst reiner, sehr teurer Ausgangsrohstoffe nicht vollständig vermieden werden kann. In der Fachwelt gibt es noch immer Diskussionen betreffend die Auswirkungen von Inklusionen in

Nitinol. Nahezu alle technischen Legierungen enthalten Inklusionen, und die Fachwelt geht derzeit noch davon aus, dass Nitinol nicht geschmolzen werden kann, ohne dass sich Inklusionen bilden und diese omnipräsent sind. Man nimmt an, dass ihre Größe, Verteilung und Art bis zu einem gewissen Grad beeinflusst werden kann und dass kleinere, rundere und weniger Inklusionen zu einem besseren Ermüdungsverhalten führen können, aber es ist nach dem Stand der Technik bisher nicht gelungen, Nitinol mit keinen, nahezu keinen oder sehr wenigen, sehr kleinen Inklusionen herzustellen.

Nach gängigen Standards darf der Volumenanteil der Inklusionen und Voids in medizinisch verwendetem Nitinol max. 2,8 % betragen und diese dürfen nicht größer als 39 µm sein. Technische Weiterentwicklungen ermöglichen heute Inklusionsgrößen zwischen 10 µm und 20 µm. Insbesondere die zunehmende Miniaturisierung medizinischer Implantate (Neurostents) und die steigenden Qualitätsanforderungen (Herzklappenrahmen) erfordern jedoch weitere Anstrengungen, den erreichten Stand weiter zu verbessern.

Ausgehend von diesem Stand der Technik liegt der vorliegenden Erfindung die Aufgabe zugrunde, ein verbessertes Verfahren und eine entsprechende Vorrichtung zu schaffen, mit denen ein Werkstoff derart umgeschmolzen und/oder umlegiert werden kann, dass das gebildete Halbzeug über einen wesentlichen Anteil seines Querschnittes ein Gefüge mit Merkmalen einer raschen Erstarrung aufweist. Insbesondere liegt der vorliegenden Erfindung die Aufgabe zugrunde, in einer bevorzugten Ausführungsform ein Verfahren und eine entsprechende Vorrichtung zu schaffen, die es ermöglichen, Halbzeuge aus Nitinol herzustellen, die keine störenden Inklusionen mehr aufweisen, d.h. keine, nahezu keine oder sehr wenige, sehr kleine Inklusionen aufweisen.

Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß durch ein Verfahren mit den Merkmalen des beigefügten Anspruchs 1 bzw. eine Vorrichtung mit den Merkmalen des Vorrichtungsanspruchs gelöst. Bevorzugte Ausgestaltungen, Weiterbildungen und Verwendungen der Erfindung ergeben sich aus den nebengeordneten und abhängigen Ansprüchen und der nachfolgenden Beschreibung mit zugehörigen Zeichnungen.

Ein erfindungsgemäßes Verfahren zum Herstellen metallischer Halbzeuge durch Umschmelzen und/oder Umschmelzlegieren metallischer Werkstoffe, wobei die Erstarrung der Schmelze mittels einer Kühleinrichtung mit einer hohen Abkühlrate erfolgt, weist die Besonderheit auf, dass der Werkstoff mittels energiereicher, fokussierter Strahlung in einer Schmelzkapillare in dem Werkstoffvolumen selektiv lokal geschmolzen wird, der Wärmeentzug aus der Schmelzkapillare über das an die Schmelzkapillare angrenzende, nicht umgeschmolzene, kalte Werkstoffvolumen durchgeführt wird, gleichzeitig mit dem Schmelzen des Werkstoffs mittels der fokussierten Strahlung zum Abführen der von der Schmelzkapillare an das Werkstoffvolumen abgegebenen Wärme das Werkstoffvolumen mittels einer Wärmesenke gekühlt wird, wobei die Wärmesenke an zumindest einen Teil einer wenigstens einen Fläche des Werkstoffvolumens gut wärmeleitend angekoppelt ist und die Wärmesenke mittels einer Kühlflüssigkeit gekühlt wird, die Wärmesenke an einer Stelle des Werkstoffvolumens gut wärmeleitend an das Werkstoffvolumen angekoppelt ist, die nahe zu dem Fokus der fokussierten Strahlung auf dem Werkstoff bzw. zu der Schmelzkapillare liegt, und zum Schmelzen des die Schmelzkapillare umgebenden Werkstoffvolumens des Werkstoffs der Fokus der fokussierten Strahlung über den Werkstoff bzw. die Schmelzkapillare durch den Werkstoff bewegt wird, wobei der Fokus der energiereichen, fokussierten Strahlung und der bestrahlte Werkstoff derart relativ zueinander bewegt werden, dass die gewünschte Fläche von dem Fokus überstrichen wird.

Die Erfindung besteht somit in einem selektiven Umschmelzverfahren mittels energiereicher, fokussierter Strahlung, die in einem Werkstoff eine Schmelzkapillare, d.h. einen Schmelzkanal mit geringem Durchmesser, bildet, wobei durch schnelles lokales Erhitzen und rasches Abkühlen der Schmelze die Ausbildung von Inklusionen in der unterkühlten Schmelze verhindert wird. Das erfindungsgemäße Verfahren dient zum Umschmelzen und/oder (Um)Legieren von vorzugsweise platten-, band-, stab-, rohrstab-, draht- oder rohrförmigen Werkstoffen als Ausgangshalbzeuge, wobei das Schmelzen mittels energiereicher, fokussierter Strahlung in einem kleinen lokalen Bereich in Form einer Schmelzkapillare erfolgt, die kontinuierlich durch das Werkstoffvolumen geführt wird, und durch eine intensive Kühlung des Werkstoffs nahe bei der Schmelzkapillare mittels einer gekühlten Wärmesenke eine rasche Erstarrung/Abschreckung des aufgeschmolzenen Werkstoffs erzwungen wird.

Die für eine ausscheidungsfreie Erstarrung erforderliche hohe Abkühlrate wird primär durch die Selektivität des Schmelzvolumens, d.h. durch ein lokales kleines Schmelzvolumen in einer Schmelzkapillare ermöglicht. Der Erfindung liegt zugrunde, durch Einsatz hochenergetischer, fokussierter Strahlung, das Aufschmelzvolumen derart zu reduzieren, dass der schnelle Wärmeentzug durch den unmittelbar an die Schmelzkapillare angrenzenden Werkstoff zu einer stark unterkühlten Schmelze führt. Zur Erzielung einer hohen Abkühlrate bei einem kontinuierlichen, stabil durchgeführten erfindungsgemäßen Verfahren wird die von der Strahlung in den Werkstoff zum Schmelzen eingebrachte Wärme abgeführt. Hierzu dient eine ortsnahe, effektive Kühlung des Werkstoffs im Bereich der Schmelzkapillare mit einer Wärmesenke, die von einer Kühlflüssigkeit gekühlt wird.

Eine entsprechende erfindungsgemäße Vorrichtung zum Herstellen metallischer Halbzeuge durch Umschmelzen und/oder Umschmelzlegieren metallischer Werkstoffe, wobei die Erstarrung der Schmelze mittels einer

Kühleinrichtung mit einer hohen Abkühlrate erfolgt, weißt die Besonderheit auf, dass sie eine Strahleinrichtung zum Erzeugen energiereicher, fokussierter Strahlung aufweist, die zum selektiven lokalen Schmelzen des Werkstoffs in einer Schmelzkapillare in dem Werkstoffvolumen ausgebildet ist, wobei der Wärmeentzug aus der Schmelzkapillare über das an die Schmelzkapillare angrenzende, nicht umgeschmolzene, kalte Werkstoffvolumen durchgeführt wird, eine Kühleinrichtung zum Kühlen mindestens einer Wärmesenke aufweist, die zum Abführen der von der Schmelzkapillare an das Werkstoffvolumen abgegebenen Wärme durch Kühlen des Werkstoffvolumens mittels der Wärmesenke ausgebildet ist, während gleichzeitig der Werkstoff mittels der fokussierten Strahlung geschmolzen wird, wobei die Wärmesenke an zumindest einen Teil einer wenigstens einen Fläche des Werkstoffvolumens gut wärmeleitend ankoppelbar ist und die Wärmesenke mittels einer Kühlflüssigkeit kühlbar ist, die Wärmesenke an einer Stelle des Werkstoffvolumens gut wärmeleitend an das Werkstoffvolumen ankoppelbar ist, die nahe zu dem Fokus der fokussierten Strahlung auf dem Werkstoff bzw. zu der Schmelzkapillare in dem Werkstoff liegt, und derart ausgebildet ist, dass zum Schmelzen des die Schmelzkapillare umgebenden Werkstoffvolumens des Werkstoffs der Fokus der fokussierten Strahlung über den Werkstoff bzw. die Schmelzkapillare durch den Werkstoff bewegbar ist, wobei der Fokus der energiereichen, fokussierten Strahlung und der bestrahlte Werkstoff derart relativ zueinander bewegbar sind, dass die gewünschte Fläche von dem Fokus überstrichen wird.

Im Rahmen der Erfindung wurde gefunden, dass in Nitinol die sekundären Phasen je nach Erstarrungsgeschwindigkeit mehr oder weniger vergröbert vorliegen. Im Rahmen der Erfindung wurde ferner gefunden, dass der hohe Anteil an Inklusionen in nach dem Stand der Technik hergestelltem Nitinol auf der geringen Abkühlgeschwindigkeit bei dessen gebräuchlicher Gussherstellung beruht und dass bei einem schnellen, aktiven Abkühlen die Ausbildung von Inklusionen in der unterkühlten Schmelze verhindert

wird. Das Auflösen der Inklusionen erfolgt somit durch Umschmelzen, kombiniert mit einer hohen Abkühlrate, die ein Entstehen der Ausscheidungen verhindert.

Die Abkühlrate könnte bei einer Herstellung nach dem Stand der Technik prinzipiell dadurch gesteigert werden, dass die zum Schmelzen in den Werkstoff eingebrachte Wärmemenge reduziert wird. Zum Auflösen der unerwünschten Phasen muss jedoch die Schmelztemperatur überschritten werden, also eine hohe Wärmemenge eingebracht werden. Der Erfindung liegt die Erkenntnis zugrunde, dass dennoch eine hohe Abkühlrate erzielt werden kann, indem die in den Werkstoff eingebrachte Wärmemenge mittels energiereicher, fokussierter Strahlung selektiv lokal nur in ein verringertes, kleines Schmelzvolumen, die einen Schmelzkanal bildende Schmelzkapillare, eingebracht wird, die schnell abgekühlt werden kann. Die rasche Erstarrung des geschmolzenen Materials in dem Schmelzkanal erfolgt durch Wärmeentzug aus der Schmelzkapillare über das an die Schmelzkapillare angrenzende, nicht umgeschmolzene, kalte Werkstoffvolumen (Selbstabschreckung), das seine Wärme an eine oder mehrere eng wärmeleitend angekoppelte Wärmesenken abführt, wobei die Wärmesenke an zumindest einen Teil einer wenigstens einen Fläche des Werkstoffvolumens eng wärmeleitend angekoppelt ist und die Wärmesenke selbst mittels einer Kühlflüssigkeit gekühlt wird.

Als direktes Kühlmedium für die Schmelzkapillare wirkt somit das der Schmelzkapillare benachbarte, nicht verflüssigte Grundmetall, an dem die Schmelze aufgrund der Stoffgleichheit epitaktisch am Grundgefüge kristallisiert/erstarrt. Dem sehr kleinen Schmelzvolumen der Schmelzkapillare wird dabei die Wärme nahezu schlagartig durch die Umgebung entzogen. Das Grundmetall leitet den Wärmeinhalt der Schmelze in der Schmelzkapillare ohne Übergangsverluste an eine mit gekühlte Wärmesenke ab, die mittels einer Kühlflüssigkeit gekühlt wird.

Da die Umschmelzung vorzugsweise im Vakuum erfolgt, scheidet in der Regel die Verwendung einer direkten Gas- oder Wasserkühlung als alleinige Wärmesenke aus. Eine Gaskühlung eignet sich in der Regel nicht zum Ableiten einer hohen Wärmemenge, und die Wärmekapazität von Gasen und Flüssigkeiten ist zumeist nicht so hoch, dass sie unmittelbar als Wärmesenke an den bearbeiteten Werkstoff zum Kühlen des Werkstoffs wärmeleitend angekoppelt werden können. In besonderen Ausführungsformen, insbesondere wenn keine sehr rasche Abkühlung erforderlich ist, kann aber auch vorgesehen sein, dass eine Gas- oder insbesondere Flüssigkeitskühlung als alleinige Wärmesenke ausreichend ist. In bevorzugten Ausführungsformen wird allerdings eine Wärmesenke verwendet, die aus einem massiven, gut wärmeleitenden Material besteht, das die Wärme aus dem bearbeiteten Werkstoff schnell und effektiv ableitet und selbst mittels einer Kühlflüssigkeit gekühlt wird. Durch eine Wärmesenke aus einem thermisch hochleitfähigen Material wird auch eine punktuelle Überhitzung der Kühlflüssigkeit infolge Dampfblasenbildung (Leidenfrost-Effekt) vermieden. Besonders gut geeignete, hoch wärmeleitfähige Materialien hierfür sind Kupfer oder Silber.

Die Wärmesenke kontaktiert den umzuschmelzenden Werkstoff in größtmöglicher Nähe zu der Schmelzkapillare möglichst großflächig und spaltfrei. Die Wärmesenke kann je noch Form des bearbeiteten Werkstoffs als separate, externe Halteeinrichtung, z.B. als Druck-, Klemm-, Press- oder Spanneinrichtung (z.B. Druckbacken, Halteplatten, Spanneinrichtung, Spannzange, Spannfutter) ausgebildet sein, die die Oberfläche des bearbeiteten Werkstoffs von außen kontaktiert, oder eine an den Werkstoff angeformte Wärmesenke sein, z.B. ein Kühlmantel aus einem (aufgeschrumpften, aufgepressten oder umgossenen) Rohr, insbesondere Kupferrohr, oder ein Kühlkern aus einem (eingeschrumpften oder aufgeweiteten) Kern oder Rohr, insbesondere Kupferkern oder Kupferrohr. Die verschiedenen Varianten können zur Erzielung einer sehr hohen Abkühlrate auch miteinander kombiniert werden.

Die Wärmesenke selbst wird mittels einer Kühlflüssigkeit gekühlt, beispielsweise mit Wasser, tiefgekühltem Alkohol oder Flüssigstickstoff, insbesondere über einen äußeren Kühlkreislauf. Die Kühlflüssigkeit kann die Wärmesenke umströmen. Vorzugsweise wird die Wärmesenke von der Kühlflüssigkeit durchströmt, wozu Kühlkanäle oder Kavitäten in die Wärmesenke zum Durchleiten der Kühlflüssigkeit durch die Wärmesenke eingebracht sind.

Zum Umschmelzen des gesamten Werkstoffvolumens, eines sehr großen Teils des Werkstoffvolumens oder eines gewünschten Teils des Werkstoffvolumens des Werkstoffs wird der Fokus der fokussierten Strahlung über den Werkstoff bzw. die Schmelzkapillare durch den Werkstoff bewegt. Dabei werden der Fokus der energiereichen, fokussierten Strahlung und das bestrahlte Material derart relativ zueinander bewegt, dass die gewünschte Fläche überstrichen wird. Die Bewegung kann durch ein Bewegen des Fokus bei stationärem bestrahltem Material, durch ein Bewegen des bestrahlten Materials bei stationärem Fokus oder durch ein Bewegen sowohl des Fokus als auch des bestrahlten Materials erfolgen und linear, zickzackförmig, spiralförmig, kreisförmig oder andersförmig sein.

Damit eine hohe Abkühlrate erzielt wird, ist die Wärmesenke an einer Stelle des Werkstoffvolumens gut wärmeleitend an das Werkstoffvolumen angekoppelt, die nahe zu dem Fokus der fokussierten Strahlung auf dem Werkstoff bzw. zu der Schmelzkapillare in dem Werkstoff liegt. Nahe zu in diesem Sinne bedeutet dicht bei, dicht an, unmittelbar angrenzend oder unmittelbar benachbart. Die Länge des Weges, den die Wärme von der Schmelzkapillare durch den bearbeiteten Werkstoff zu der Wärmesenke nehmen muss, sollte so kurz wie möglich sein, um eine effiziente Kühlung der Schmelzkapillare mittels der Wärmesenke über den sie umgebenden Werkstoff zu erzielen. In vorteilhaften Ausführungsformen beträgt der

Abstand des Fokus der fokussierten Strahlung auf dem Werkstoff zu der Wärmesenke bzw. der Abstand der Schmelzkapillare in dem Werkstoff zu der Wärmesenke weniger als das 50fache, vorzugsweise weniger als das 25fache und besonders bevorzugt weniger als das 10fache des Durchmessers der Schmelzkapillare. Der Abstand bezieht sich dabei auf den nicht umgeschmolzenen bzw. nicht geschmolzenen Wandrestquerschnitt in dem Werkstoff. Wenn eine maximale Abkühlrate angestrebt wird, kann der Fokus der Strahlung bzw. die Schmelzkapillare bis auf einen Restabstand an die Wärmesenke herangeführt werden, der dem doppelten Durchmesser der Schmelzkapillare entspricht.

Beim Umschmelzen von Rohren mit Innenkühlung befindet sich die Wärmesenke direkt unterhalb der Schmelzkapillare und entzieht somit ohne jedweden Umweg dem vor wie nachgelagerten Werkstoffvolumen Energie. Es wird hiermit eine voreilende wie nacheilende Wärmeströmung abgeführt, eine nähere Platzierung ist nicht möglich. Bei Wanddicken größer als 2 mm bzw. massiven Stäben oder Blöcken ergibt sich durch eine ergänzende Außenkühlung eine zusätzliche Beschleunigung der Wärmeableitung, die durch schräges Einstrahlen der fokussierten Strahlung noch gesteigert werden kann.

Je geringer die Wärmeleitfähigkeit des Werkstoffs ist, umso mehr ist es erforderlich, die Wärmesenke dicht an der Schmelzkapillare zu platzieren. Weil die Wärmeleitfähigkeit von Nitinol sehr gering ist, ist dieses Merkmal insbesondere bei diesem Werkstoff wichtig. Durch die Kombination der Kühlung der Schmelzkapillare über das sie umgebende Grundmetall mit der intensiven Kühlung durch eine eng angekoppelte Wärmesenke, die ihre Wärme an einen äußeren Kühlkreislauf abführt, kann eine sehr hohe Abkühlrate erzielt werden, sodass eine sehr rasche Erstarrung erzwungen wird.

Aufgrund der hohen Temperatur in der Dampfkapillare werden alle Ausscheidungen/Fremdphasen in kürzester Zeit vollständig aufgelöst. Die Metallschmelze umfließt hierbei die Dampfkapillare und erstarrt auf deren Rückseite, d.h. "stromabwärts" bezogen auf die Bewegungsrichtung des Fokus auf dem Werkstoff. Die ausgeprägte Bewegung des Materials der Schmelzkapillare, d.h. die Umströmung des Materials in einer sogenannten Marangoni-Konvektion, führt zu einer intensiven und homogenen Durchmischung des Materials in der Schmelzkapillare. Während der fortlaufenden Umschmelzung erfolgt der Wärmeübergang in drei Raumrichtungen. Die epitaktische Erstarrung zum Gitter des Grundmetalls bewirkt hierbei eine sehr hohe Wärmeableitung.

Durch eine rasche Abkühlung der kleinvolumigen Schmelzkapillare kann die Bildung von Ausscheidungen vollständig unterdrückt werden. Somit kann mittels einer lokalen, fokussierten bewegten Schmelzkapillare durch schnelles Abkühlen ein massives Halbzeug gebildet werden, dessen Erstarrungs-Gussgefüge keine Ausscheidungen bzw. Inklusionen aufweist. Das erfindungsgemäße Verfahren könnte man somit als "Focused Quench Casting" bezeichnen.

Die Prozessparameter werden werkstoffspezifisch so gewählt, dass der Schmelzpunkt der aufzulösenden Phasen erreicht wird. Das in dem schmalen Schmelzkanal vorliegende geringe Schmelzvolumen erstarrt durch Wärmeableitung in die gekühlte Umgebung mit hoher Erstarrungsgeschwindigkeit. Die Erstarrungsgeschwindigkeit ist über die Vorschubgeschwindigkeit, d.h. die Geschwindigkeit, mit der sich die Schmelzkapillare durch den Werkstoff bewegt, einstellbar. Über die Steuerung der Erstarrungsgeschwindigkeit können der Typ, der Volumenanteil und die Größe der Ausscheidungen beeinflusst und eingestellt werden.

Diese erfindungsgemäße Erkenntnis lässt sich nicht nur bei Nitinol, sondern auch bei anderen Werkstoffen vorteilhaft einsetzen, um einen homo-

genen Gefügeaufbau bzw. eine äußerst feine Verteilung ausgeschiedener Phasen zu erzielen oder Halbzeuge herzustellen oder zu bearbeiten.

In bevorzugten Ausführungsformen wird als energiereiche, fokussierte Strahlung ein Elektronenstrahl, Laserstrahl, Ionenstrahl oder Plasmastrahl verwendet. Mit diesen Ausführungsformen lässt sich sowohl eine hohe Energie als auch eine hohe Energiedichte im Fokus der Strahlung auf dem Werkstoff erzielen. Bevorzugt ist in dieser Hinsicht ein Elektronenstrahl. Die energiereiche, fokussierte Strahlung kann ein Dauerstrahl oder eventuell auch ein intermittierender, gepulster Strahl sein.

Im Stand der Technik ist die Elektronenstrahl-Randschichtbehandlung bekannt, siehe z.B. US 2005/0263219 A1. Sie dient zur Behandlung der Randschichten metallischer Werkstoffe mit einem Elektronenstrahl zum Schutz vor Verschleiß und Korrosion. Man unterscheidet zwischen Festphasenprozessen (Härten, Glühen, Anlassen) und Flüssigphasenprozessen (Umschmelzen, Legieren, Dispergieren, Auftragen). Im Unterschied zu der Erfindung erfolgt dabei aber keine Wärmeabfuhr über eine mit einer Kühlflüssigkeit gekühlte Wärmesenke und es wird kein Halbzeug bzw. Zwischenprodukt, sondern ein Endprodukt bearbeitet. Ferner wird bei der Elektronenstrahl-Randschichtbehandlung nur die Oberfläche behandelt, wogegen bei der Erfindung das Gefüge eines massiven Materials in einer großen Tiefe und zu 100 % oder nahezu 100 % seines Querschnitts und/oder seines Volumens umgeschmolzen wird. Eine Variante hierzu ist die Plasma- Randschichtbehandlung, siehe z.B. US 2008/0000881 A1.

In Analogie zu dem bekannten Tiefschweißen könnte die Erfindung als Tiefstrahlumschmelzen bzw. Tiefstrahlumlegieren bezeichnet werden, da sie für alle verwendeten energiereichen, fokussierten Strahlungen, d.h. auch für einen bevorzugten Elektronenstrahl, eine Schmelzkapillare erzeugt, wie sie als Dampfkapillare aus dem Tiefschweißen mit einem Laserstrahl bekannt ist. Das Laserstrahlschweißen wird unterschieden in

Wärmeleitungsschweißen, bei dem der Werkstoff nur an der Oberfläche schmilzt, und das Lasertiefschweißen oder Tiefschweißen, das auf der Erzeugung einer Dampfkapillare (auch Keyhole genannt) im Material beruht. Dabei ist die geringe thermische Belastung des Werkstückes von Bedeutung, die ein verzugsarmes bzw. verzugsfreies Bearbeiten ermöglicht. Bei hohen Strahlintensitäten im Fokus bildet sich in der Schmelze in Strahlrichtung eine Dampfkapillare, ein mit Metalldampf oder teilionisiertem Metalldampf gefüllter, schlauchförmiger Hohlraum, der auch Keyhole genannt wird, in der Tiefe des Werkstückes aus. Der Werkstoff wird dadurch auch in der Tiefe aufgeschmolzen, und hierbei kann die Tiefe der Schmelzzone ein Vielfaches ihrer Breite betragen. Die Dampfkapillare erhöht aufgrund von Mehrfachreflexionen an den Wandungen die Absorption der Laserstrahlung im Material, wodurch ein gegenüber dem Wärmeleitungsschweißen vergrößertes Schmelzvolumen erzeugt werden kann.

Ausreichende Intensität vorausgesetzt, wird die Schmelztemperatur erreicht und es setzt lokale Verdampfung ein. Wird die zugeführte Leistung weiter gesteigert, bildet sich schließlich ein Dampfkanal aus, dessen Geometrie von den Strahl- und Prozessparametern beeinflusst wird. Das Entstehen der Dampfkapillare, die auch als Keyhole bezeichnet wird, ist charakteristisch für das Tiefschweißen. Der Druck des verdampfenden Materials wirkt dem hydrostatischen Druck der umgebenden Schmelze sowie deren Oberflächenspannungen entgegen und verhindert das Schließen der Kapillare. Durch die Relativbewegung zwischen Laserstrahl und Werkstück wird stetig neues Material aufgeschmolzen, das die Dampfkapillare seitlich umströmt und dahinter infolge Energietransport durch Leitung und Konvektion wieder erstarrt.

Das Schmelzen erfolgt bei der Erfindung mit einer so hohen Energiedichte, dass sich ein Schmelzkanal in Analogie zum Tiefschweißeffekt ausbildet, der kontinuierlich durch das umzuschmelzende Werkstoffvolumen geführt wird. Der den Dampfkanal umgebende schmale Schmelzfilm

fließt hinter dem sich vorwärtsbewegenden Dampfkanal wieder zusammen und erstarrt durch Wärmeabgabe. Die Erstarrung erfolgt hierbei umso rascher, je schlanker der Schmelzkanal ausgebildet ist und je höher die Vorschubbewegung abläuft.

Ein erfindungsgemäß hergestelltes Halbzeug kann in der vorliegenden Form verwendet oder in konventionellen Umformprozessen zu einem endgültigen Produkt weiterverarbeitet werden. Beispielsweise kann das mit einem erfindungsgemäßen Umschmelzen oder Umlegieren gewonnene Erstarrungs-Gussgefüge in einem anschließenden Wärmebehandlungsprozess, gefolgt von einem weiteren Warm- und/oder Kaltumformprozess, homogenisiert werden, bevor es in einem bestehenden Regelprozess weiterverarbeitet wird. Ein erzeugter Werkstoff kann z.B. über einen Strangpressprozess zu einem Draht ausgepresst werden oder durch Schmieden oder andere spanlose Umformprozesse wie Walzen und Ziehen bearbeitet werden. Nicht umgeschmolzene Bereiche des Werkstoffs, z.B. eine an eine Kühlfläche angrenzende, nicht umgeschmolzene Randschale in dem Werkstoff oder ein nicht umgeschmolzener Kern des Werkstoffs, oder eine an den Werkstoff angeformte Wärmesenke, z.B. ein Kupfermantel oder Kupferkern, können vor, im Verlauf oder auch nach der abschließenden Endumformung des erzeugten massiven Halbzeugs durch mechanische oder chemische Prozesse entfernt werden, beispielsweise durch Überfräsen, Überschleifen oder durch Ausbohren analog zur Rohrfertigung.

Die folgende Tabelle zeigt die Vorteile in der Inklusionsgröße von erfindungsgemäß hergestelltem Nitinol. Dargestellt ist das Ergebnis metallographischer Untersuchungen an Nitinol-Halbzeugen, die nach dem Stand der Technik (VAR) und nach dem erfindungsgemäßen Verfahren durch Elektronenstrahlumschmelzen mit aktiver Abschreckung hergestellt wurden. Die Untersuchungsmethode wurde optimiert, um die geringe Größe von Inklusionen des Typs Ti_2NiO_x erkennbar zu machen.

	VAR	Erfindung
Flächenanteil der Inklusionen	0,73 %	0,15 %
Durchschnittliche Größe der Inklusionen	2,80 µm	0,40 µm
Maximale Größe der Inklusionen	16,5 µm	1,54 µm

Man erkennt, dass die Erfindung erhebliche Vorteile erzielt, da sich der Flächenanteil der Inklusionen, die durchschnittliche Größe der Inklusionen und die maximale Größe der Inklusionen signifikant verringert. Die Tabelle zeigt Ergebnisse einfacher Ausführungsformen der Erfindung. Es hat sich gezeigt, dass mit verbesserter Prozessführung, insbesondere einer höheren Abkühlrate, die Inklusionen auch vollständig oder nahezu vollständig vermieden werden können. Mit der Erfindung kann ein hochreines, keine, nahezu keine oder nur sehr wenige Inklusionen enthaltendes Material mit einer homogenen Verteilung von Inklusionen hergestellt werden, die viel kleiner als nach dem Stand der Technik sind. Durch das Veredeln (auch Refining genannt) von Nitinol durch selektives Umschmelzen mittels energiereicher Strahlung und rasches Erstarren gemäß dem erfindungsgemäßen Verfahren lassen sich die Fremdphasen und Inklusionen gänzlich vermeiden oder auflösen bzw. können in nicht störender feinster Verteilung gleichmäßig im Gefüge dispergiert werden. Ferner lassen sich mit der Erfindung kompakte, massive Halbzeuge mit einem großen Volumen umschmelzen bzw. umlegieren oder herstellen, wobei dennoch eine hohe Abkühlrate erzielt wird. Die Erfindung bietet somit erhebliche Vorteile gegenüber dem Stand der Technik.

Hinsichtlich der Vorteile der Erfindung, insbesondere bei Nitinol, wird auch auf folgendes hingewiesen. Die Biegewechselfestigkeit eines Materials wird bestimmt durch:

(i) Das Belastungsniveau (Dehnung/Scherung),

(ii) Strukturfehler (Gefügeinhomogenitäten/Inklusionen, Voids)

(iii) und gegebenenfalls überlagerte Korrosionsermüdung.

Bei einer Biegebelastung liegt das Spannungsmaximum (aufgrund der größten Dehnung in der Randfase) immer an der Oberfläche. Folglich beginnt die Materialermüdung in randnahen Bereichen. Durch einen erfindungsgemäßen Umschmelzprozess von Nitinol mit rascher Erstarrung werden vorhandene sekundäre Phasen aufgelöst. Die Matrixzusammensetzung wird hierdurch titanreicher, wodurch die Umwandlungstemperatur ansteigt. Bei Nitinol besteht eine ausgeprägte Temperaturabhängigkeit der "Plateauspannung" (je 1 °C steigt die Spannung um 7 N/mm^2). Durch Anheben der Umwandlungstemperatur in einer oberflächennahen Randzone wird folglich eine Reduzierung der Randfasenspannungen erzielt. Die Gefügeinhomogenitäten werden durch das erfindungsgemäße Umschmelzen und rasche Erstarren vollständig aufgelöst. Ebenso werden vorliegende Voids geschlossen. Die im bisher nach dem Stand der Technik verwendeten Werkstoff vorliegenden, oberflächennahen bzw. freiliegenden Inklusionen sowie Voids begünstigen eine Korrosionsermüdung durch die Elektrolyte in den Körperflüssigkeiten, bei der Erfindung werden die Inklusionen vermieden und daher die Korrosionsfestigkeit erhöht.

Durch ein erfindungsgemäßes Reduzieren bzw. Auflösen oder Vermeiden der Inklusionen werden obige Mängel vermieden, insbesondere in Nitinol. Dies führt zu einer höheren Dauerfestigkeit, einem verbesserten Ermüdungsverhalten und einer gesteigerten Korrosionsbeständigkeit und Biokompatibilität. Damit lassen sich mit der Erfindung vorteilhafte Halbzeuge aus Nitinol herstellen, z.B. für Implantate wie geflochtene Stents oder flexible Führungs- und Leitungsdrähte.

Die Erfindung ist aber nicht nur bei der Herstellung von Nitinol vorteilhaft verwendbar, sondern kann allgemein zum Umschmelzen und/oder Umschmelzlegieren metallischer Werkstoffe benutzt werden, um die im geschmolzenen, flüssigen Zustand bzw. bei hoher Temperatur vorliegende gegenseitige Löslichkeit über einen sehr raschen Erstarrungsvorgang ein-

zufrieren. Auf diese Weise ist die schmelzmetallurgische Herstellung von Werkstoffen, die bisher nur aufwändig über pulvermetallurgische Verfahren hergestellt werden konnten, mit einem großen massiven Volumen möglich.

Andere Beispiele für Legierungen, die mit dem erfindungsgemäßen Verfahren eine maßgebliche Gefügeverbesserung erlangen können bzw. deren Herstellung überhaupt erst damit möglich ist, sind folgende.

Es können schwer mischbare Werkstoffe hergestellt werden, bei denen z.B. Schwierigkeiten wie keine Löslichkeit oder Dichteseigerung überwunden werden müssen. Ein Beispiel sind hochfeste Kupferwerkstoffe wie CuNb mit sehr guter elektrischer Leitfähigkeit und hoher Festigkeit. Beispiele möglicher Anwendungsgebiete sind Hochfeldmagnete, Wicklungen für Elektromotoren, gepulste Magnete mit hoher Flussdichte und dadurch hoher mechanischer Belastung oder Hochfrequenzspindeln mit hohen Fliehkräften. Aufgrund der sehr hohen Schmelztemperatur und der äußerst geringen gegenseitigen Löslichkeit ist der Werkstoff über konventionelle Schmelzmethoden nicht herstellbar. Ein nach dem Stand der Technik möglicher Fertigungsweg besteht in aufwändigen pulvermetallurgischen Prozessen über mechanisches Legieren in Kugelmühlen und anschließendem Verdichten über Strangpressen. Mit der Erfindung ist eine schmelzmetallurgische Herstellung möglich. Die hohe Temperatur in der Dampfkapillare sowie die Marangonikonvektion führen zu einer homogenen Durchmischung, während die hohe Abschreckgeschwindigkeit zu einer übersättigten Lösung und feinsten Niobausscheidungen führt.

Die Hochtemperatur-Formgedächtnislegierung TiTa stellt aufgrund des hohen Schmelzpunktes von Tantal hohe Anforderungen an die Schmelztechnologie. Beim konventionellen Elektronenstrahlschmelzen treten infolge zu geringer Abkühlgeschwindigkeit starke Inhomogenitäten durch

Seigerung auf. Durch Umschmelzen bzw. Legieren mit der Erfindung lässt sich eine gute Homogenität erreichen.

Andere Anwendungsgebiete der Erfindung sind das Auflösen von Inklusionen, beispielsweise in Kobaltlegierungen, das Auflösen von Ausscheidungen, beispielsweise in Magnesiumlegierungen, das Auflösen von Inklusionen in WolframCarbid und in Cobalt-Basislegierungen, das Legieren schwer mischbarer Werkstoffe und das tiegelfreie Legieren hochschmelzender reaktiver Metalle.

Da die in Betracht gezogenen Legierungen in der Regel hochreaktiv sind, erfolgt der Umschmelzprozess vorzugsweise unter Schutzgas, beispielsweise Edelgas, oder vorzugsweise im Vakuum. Das Umschmelzen im Vakuum hat den weiteren Vorteil, dass dabei zusätzlich eine Werkstoffreinigung infolge Ausgasung und durch Abdampfen niedrigsiedender Verunreinigungen erfolgt.

Typische oder bevorzugte Parameter eines erfindungsgemäßen Verfahrens und einer entsprechenden Vorrichtung sind folgende. Der Durchmesser des Fokus der Strahlung auf dem Werkstoff und der Durchmesser der Schmelzkapillare in dem Werkstoff betragen 0,1 mm bis 10 mm, bevorzugt 0,1 mm bis 4 mm und besonders bevorzugt 0,2 mm bis 2 mm. Die Tiefe der Schmelzkapillare in dem Werkstoff beträgt 1 mm bis 400 mm. Die Streckenenergie kann typischerweise im Bereich von 5-1000 J/mm liegen, abhängig von der Verfahrgeschwindigkeit, der Umschmelztiefe und dem Werkstoff. Die Intensität der Strahlung kann beispielsweise 0,1 kW/mm² bis 25 kW/mm² oder mehr betragen, ebenfalls in Abhängigkeit von der Verfahrgeschwindigkeit, der Umschmelztiefe und dem Werkstoff. Die Verfahrgeschwindigkeit liegt im Bereich von 2 mm/sec bis 500 mm/sec. Die Abkühlrate des bearbeiteten Werkstoffs lässt sich über die Parameter der Strahlung, die Verfahrgeschwindigkeit und die Wärmeableitung bzw. Kühlung steuern. Hierdurch liegt die Abkühlrate im Bereich

von 10^2-10^5 K/sec, bevorzugt über 10^3 K/sec. Die Umschmelzgeschwindigkeit bzw. Erstarrungsgeschwindigkeit des bearbeiteten Werkstoffs, d.h. die Vorschubgeschwindigkeit, mit der er in einem kontinuierlichen Prozess aus einer gekühlten Spanneinrichtung herausschoben werden kann, kann je nach Wärmeleitvermögen und Erstarrungsbereich des umzuschmelzenden Werkstoffes im Bereich von 1 mm/sec bis 10 m/sec liegen. Der Außendurchmesser bearbeiteter Stäbe und Rohre kann im Bereich von 1 mm bis 200 mm liegen oder mehr betragen, wobei bei dicken Stäben gegebenenfalls ein nicht umgeschmolzener Kern verbleibt. Die Wandstärke von Rohren kann im Bereich von 0,2 mm bis 100 mm oder darüber liegen, bevorzugt über 1 mm. Bolzen, die auf ihrer Stirnseite bearbeitet werden, können bis ca. 400 mm hoch sein, bei einem Durchmesser von 2 mm bis 250 mm, bevorzugt über 10 mm und besonders bevorzugt über 20 mm. Die Dicke bearbeiteter Platten und Bänder ist nahezu beliebig, typischerweise 1 mm bis 5 mm oder bis 20 mm, und ihre in Strahlrichtung oder quer dazu gemessene Breite beträgt 1 mm bis 400 mm oder eventuell darüber.

Bei einem typischen Anwendungsbeispiel wurde Nitinol mit einem Elektronenstrahl mit einer Energie von 5 kW mit einer Größe des Fokus von 1 mm², einer Tiefe der Schmelzkapillare von 3 mm und einer Verfahrgeschwindigkeit von 50 mm/sec umgeschmolzen.

Die Erfindung wird nachfolgend anhand in den Figuren dargestellter Ausführungsbeispiele näher erläutert. Die darin beschriebenen Besonderheiten können einzeln oder in Kombination miteinander eingesetzt werden, um bevorzugte Ausgestaltungen der Erfindung zu schaffen. Gleiche oder gleich wirkende Teile werden in den verschiedenen Figuren mit denselben Bezugszeichen bezeichnet und gewöhnlich nur einmal beschrieben, auch wenn sie bei anderen Ausführungsformen vorteilhaft eingesetzt werden können. Es zeigen:

Figur 1 ein erfindungsgemäßes Verfahren bei einem Rohr mit Innenkühlung und senkrechtem Strahl,

Figur 2 ein erfindungsgemäßes Verfahren bei einem Rohr mit Außenkühlung und senkrechtem Strahl,

Figur 3 ein erfindungsgemäßes Verfahren bei einem Rohr mit Innen- und Außenkühlung und senkrechtem Strahl,

Figur 4 ein erfindungsgemäßes Verfahren bei einem Rohr mit Außenkühlung und schrägem Strahl,

Figur 5 ein erfindungsgemäßes Verfahren bei einem Stab mit Außenkühlung und schrägem Strahl,

Figur 6 ein erfindungsgemäßes Verfahren bei einem Rohr mit Innen- und Außenkühlung und schrägem Strahl

Figur 7 die Figur 6 gegen Beginn der Bearbeitung,

Figur 8 die Figur 6 gegen Ende der Bearbeitung,

Figur 9 eine Ansicht zu Figur 8,

Figur 10 erfindungsgemäße Verfahren bei einer Platte,

Figur 11 ein abgewandeltes erfindungsgemäßes Verfahren bei einer Platte,

Figur 12 ein erfindungsgemäßes Verfahren bei einem Bolzen mit Außenkühlung und

Figur 13 ein erfindungsgemäßes Verfahren bei einem Bolzen mit Außen- und Innenkühlung.

Die Figur 1 veranschaulicht ein erfindungsgemäßes Verfahren zum Herstellen metallischer Halbzeuge durch Umschmelzen eines metallischen Werkstoffes 1 in Form eines Rohres. Der Werkstoff wird mittels energiereicher, fokussierter Strahlung 2 in einer Schmelzkapillare 3 in dem Werkstoffvolumen selektiv lokal geschmolzen, wobei der Wärmeentzug aus der Schmelzkapillare 3 über das an die Schmelzkapillare 3 angrenzende, nicht umgeschmolzene, kalte Werkstoffvolumen durchgeführt wird. Gleichzeitig mit dem Schmelzen des Werkstoffs 1 mittels der fokussierten Strahlung 2 wird zum Abführen der von der Schmelzkapillare 3 an das Werkstoffvolu-

men abgegebenen Wärme das Werkstoffvolumen mittels einer Wärmesenke 4 gekühlt, wobei die Wärmesenke 4 an zumindest einen Teil einer wenigstens einen Fläche des Werkstoffvolumens gut wärmeleitend angekoppelt ist und die Wärmesenke 4 mittels einer Kühlflüssigkeit 5 gekühlt wird.

Die Figur 1 zeigt ein Beispiel, bei dem ein rohrförmiger Werkstoff 1 als Ausgangshalbzeug bearbeitet wird, wobei als Wärmesenke 4 für den rohrförmigen Werkstoff 1 ein aus einem hoch wärmeleitfähigen Material gebildetes Rohr verwendet wird, das von einer Kühlflüssigkeit 5 durchströmt wird. Die Wärmesenke 4 wird als ein von innen an den Werkstoff 1 angepresstes, gut wärmeleitfähiges Rohr realisiert.

In dem Beispiel von Figur 1 ist die Wärmesenke 4 ein Innenrohr aus einem Material mit guter Wärmeleitfähigkeit, das in den Werkstoff 1 eingebracht ist und von einer Kühlflüssigkeit durchströmt wird. Die spaltfreie Kontaktierung des Innenrohrs mit dem Werkstoff 1 kann beispielsweise durch Aufweiten des Innenrohres erzielt werden, wobei die beim Umschmelzen des Werkstoffs 1 auftretenden Schrumpfspannungen den Kontakt mit der Wärmesenke 4 zusätzlich unterstützen. Das mittels einer durchgeleiteten Flüssigkeit 5 gekühlte Innenrohr wirkt einerseits zur direkten Wärmeableitung und verhindert andererseits ein Durchsacken der Schmelze beim Bearbeiten. Die Wärmesenke 4 ist somit an einer Stelle des Werkstoffvolumens gut wärmeleitend an das Werkstoffvolumen angekoppelt ist, die nahe zu dem Fokus 6 der fokussierten Strahlung 2 auf dem Werkstoff bzw. zu der Schmelzkapillare in dem Werkstoff liegt.

Bei rotationssymetrischen Ausgangshalbzeugen (Bolzen, Stange, Draht) wird die Wärmesenke z.B. durch eine Spannzange gebildet. Bei rotationsförmigen Hohlkörpern kann die Wärmeabfuhr über eine äußere wie auch innenliegende Wärmesenke erzielt werden. Die innenliegende Wärmesenke kann aus massivem Material bestehen, wobei die Wärme über ein

gekühltes Spannfutter abgeführt wird. Die Wärmesenke kann ebenso von einer Kühlflüssigkeit direkt durchflossen werden. Die in die Wärmesenke eingeleitete Wärme wird über einen externen Kühlkreislauf abgeführt.

Bei kurzen rohrförmigen Werkstoffen kann als Wärmesenke anstelle des gekühlten Innenrohres ein Kühlstab, z.B. ein Kupferstab, in das Kernloch des Werkstoffs eingebracht werden, wobei die aufgenommene Wärme über die Einspannung des Kühlstabs in eine gekühlte Spanneinrichtung abgeführt wird. Die Wärmesenke wird dann durch das Zusammenwirken des Kühlstabes mit der Spanneinrichtung gebildet. Bei längeren rohrförmigen Werkstoffen wird bevorzugt in das umzuschmelzende Ausgangsrohr ein Kupferrohr als Wärmesenke eingebracht, das direkt von der Kühlflüssigkeit durchflossen wird.

Zum Schmelzen des die Schmelzkapillare 3 umgebenden Werkstoffvolumens des Werkstoffs 1 wird der Fokus 6 der fokussierten Strahlung 2 über den Werkstoff 2 bzw. die Schmelzkapillare 3 durch den Werkstoff 1 bewegt, wobei der Fokus 6 der energiereichen, fokussierten Strahlung 2 und der bestrahlte Werkstoff 1 derart relativ zueinander bewegt werden, dass die gewünschte Fläche von dem Fokus 6 überstrichen wird. Der bereits umgeschmolzene Bereich des Werkstoffs 1 ist gestrichelt gezeichnet. Der Werkstoff 1 wird dabei bis in eine Tiefe umgeschmolzen, die der Tiefenausdehnung der Schmelzkapillare 3 entspricht. Das kann die gesamte Materialstärke des Werkstoffs 1, hier die Wandstärke des Rohres, oder ein Teil der Materialstärke des Werkstoffs 1 sein.

Die Figur 2 zeigt in einem Längsschnitt durch eine erfindungsgemäße Vorrichtung die Durchführung eines abgewandelten Beispiels eines erfindungsgemäßen Verfahrens, bei dem ein stab-, rundstab-, draht-, bolzen- oder rohrförmiger Werkstoff 1 als Ausgangshalbzeug bearbeitet wird, und zwar ein Rohr mit Außenkühlung. Als Wärmesenke wird hier eine das Ausgangshalbzeug umgreifende Spanneinrichtung 7, z.B. eine Spann-

zange oder ein Spannfutter, aus einem hoch wärmeleitfähigen Material verwendet, in die das Ausgangshalbzeug eingespannt wird. Entsprechend könnte auch ein Rundstab in der Spanneinrichtung 7 gefasst und über seine Mantelfläche mit der Strahlung 2 bearbeitet werden. Um eine hohe Kühlleistung zu erzielen, ist die Spanneinrichtung 7 formschlüssig zum Ausgangshalbzeug ausgebildet und wird über eine Segmentierung spaltfrei an das Ausgangshalbzeug angepresst.

Die Spanneinrichtung 7 wird mittels einer Kühlflüssigkeit gekühlt, die durch in der Spanneinrichtung angebrachte Kühlkanäle 8 fließt. Um eine möglichst gute Kühlung der Schmelzkapillare 3 in dem Werkstoff 1 zu erzielen, liegt der Fokus 6 der Strahlung 2 auf dem Mantel des Ausgangshalbzeugs unmittelbar neben der Spanneinrichtung 7, sodass die Bearbeitung, d.h. die Umschmelzung, des Werkstoffs 1 unmittelbar am Übergang des Werkstoffs 1 zu der gekühlten Spanneinrichtung 7 erfolgt.

Die Figur 3 zeigt eine Kombination der Ausführungsformen von Figur 1 und 2, d.h. einen rohrförmigen Werkstoff 1, der sowohl mit einer Innenkühlung gemäß Figur 1 als auch einer Außenkühlung gemäß Figur 2 gekühlt wird, um eine besonders hohe Abkühlrate zu erzielen. Die Kombination einer inneren Wärmesenke 4 mit einer äußeren Wärmesenke 4 kann auch bei besonders großen Durchmessern oder Wandstärken des Werkstoffs 1 vorteilhaft sein. Beim Umschmelzen rohrförmiger Körper kann über eine innenliegende Wärmesenke in Form eines dicht anliegenden Innenrohres oder Innenstabes zusätzlich zu der Spanneinrichtung Wärme aus dem bearbeiteten Werkstoff 1 abgeführt werden.

Bei den Ausführungsbeispielen der Figuren 2 und 3 wird das Ausgangshalbzeug während der Bearbeitung mit der Strahlung 2 in axialer Richtung des Ausgangshalbzeugs, d.h. in einer Vorschubrichtung 9, aus der Spanneinrichtung 7 herausgezogen oder herausgeschoben. Die Spanneinrichtung 7 ist hierzu entsprechend ausgebildet. Ferner wird gemäß einer

bevorzugten Ausführungsform das Ausgangshalbzeug während der Bearbeitung mit der Strahlung 2 um seine Längsachse gedreht und die Spanneinrichtung hierzu entsprechend ausgebildet, damit der Fokus 3 der Strahlung 2 den Mantel des Werkstoffs 1 überstreichen kann. Der Werkstoff tritt also schraubenförmig aus der Spanneinrichtung 7 heraus und wird dabei umgeschmolzen.

Durch die rotatorische Bewegung des Ausgangshalbzeugs und seinen gleichzeitigen axialen Vorschub aus der Spanneinrichtung 7 kann, wie auch bei einer Ausführungsform gemäß Figur 1, das Werkstoffvolumen durch eine rotatorisch erzeugte Spiralbahn des Fokus 6 auf dem Werkstoff 1 oder durch eine überlappende Aneinanderreihung axial verlaufender Bahnen umgeschmolzen werden. Zur Steigerung der Abkühlgeschwindigkeit können in zeitlich bzw. örtlich versetzter Abfolge Spiralbahnen aneinandergereiht werden. Eine weitere Erhöhung der Abkühlrate kann dabei durch ein nichtüberlappendes Umschmelzen in mehreren Spiralen erfolgen, die in einem zeitlichen Versatz nach einer gewissen thermischen Abklingzeit aufeinanderfolgen. Dies kann sowohl nach Fertigstellung der ersten Spirale in einem weiteren Durchgang als auch durch Strahlsplitting mit mehreren Schmelzkapillaren 3 ausgeführt werden.

Bei den Ausführungsbeispielen der Figuren 1 bis 3 beträgt der Einstrahlwinkel β der Strahlung 2 auf das Ausgangshalbzeug etwa 90°, bezogen auf die Längsachse des Ausgangshalbzeugs. Eine Abwandlung hierzu zeigt die Figur 4, die im Übrigen der Figur 2 entspricht. In Figur 4 beträgt der Einstrahlwinkel β der Strahlung 2 auf das Ausgangshalbzeug etwa 10°, bezogen auf die axiale Richtung, in der das Ausgangshalbzeug aus der Spanneinrichtung 7 herausragt. Allgemein kann der Einstrahlwinkel β zwischen 0° und 90° betragen. Je kleiner der Einstrahlwinkel β ist, desto mehr begünstigt dies die Erzielung einer höheren Abkühlrate in dem Werkstoff 1 durch die Wärmesenke 4, weil die von der Strahlung 2 in dem Werkstoff 1 ausgebildete Schmelzkapillare 3 bis unter die Spanneinrich-

tung 7 in die Spanneinrichtung 7 hineinragt und somit näher an die Wärmesenke 4 heranreicht.

Die Figur 5 zeigt eine der Figur 4 entsprechende Ausführungsform, wobei in Abwandlung zu Figur 4 der bearbeitete Werkstoff 1 kein Rohr, sondern ein Stab ist. Der Stab wird unter Rotation um seine Längsachse aus der Spanneinrichtung 7 herausgeschoben. Der bereits umgeschmolzene Bereich ist hierbei gestrichelt gezeichnet. Es verbleibt ein nicht umgeschmolzener Kernbereich in dem Stab, der später abgetrennt werden kann.

Die Figur 6 zeigt eine der Figur 5 entsprechende Ausführungsform, wobei in Abwandlung zu Figur 5 der bearbeitete Werkstoff 1 kein Stab, sondern ein Rohr ist, das zusätzlich eine Innenkühlung gemäß Figur 3 aufweist. Das Rohr wird unter Rotation um seine Längsachse aus der Spanneinrichtung 7 herausgeschoben. Der bereits umgeschmolzene Bereich ist hierbei gestrichelt gezeichnet. In Figur 6 ist nicht nur der Einstrahlwinkel β von 10° dargestellt, sondern gestrichelt auch ein Einstrahlwinkel von 90°.

Die Figur 7 zeigt einen längeren Schnitt zu Figur 6 gegen Beginn der Bearbeitung und die Figur 8 einen längeren Schnitt zu Figur 6 gegen Ende der Bearbeitung des Werkstoffs 1 mit der Strahlung. Man erkennt hier gut, wie der rohrförmige Werkstoff 1 in einer Vorschubrichtung 9 durch die Spanneinrichtung 7 geschoben wird, während er eine Rotation durchführt und dabei mittels der Strahlung 2 auf seiner Mantelfläche umgeschmolzen wird, wobei er durch die in Kühlkanälen 8 von einer Kühlflüssigkeit 5 durchströmte Spanneinrichtung 7 und das von einer Kühlflüssigkeit 5 durchströmte Innenrohr gekühlt wird.

Die Figur 9 zeigt eine perspektivische Ansicht der Spanneinrichtung 7 von Figur 8, in der besonders gut die in die Spanneinrichtung 7 eingebrachten Kühlkanäle 8 für die Kühlflüssigkeit 5 und die Segmentierung der Spann-

einrichtung 7, die ein spaltfreies Andrücken an den Mantel des Werkstoffs 1 ermöglicht, zu erkennen sind.

Die Figur 10 veranschaulicht ein erfindungsgemäßes Verfahren, bei dem ein platten- oder bandförmiger Werkstoff 1 als Ausgangshalbzeug bearbeitet wird, wobei als Wärmesenke 4 gegenüberliegende Klemmplatten 10 aus einem hoch wärmeleitfähigen Material einer Halteeinrichtung verwendet werden, zwischen denen das Ausgangshalbzeug unter Druck eingespannt oder hindurchgeführt wird, und das Ausgangshalbzeug durch eine zwischen den Klemmplatten 10 ausgebildete Schmelzkapillare 3, die in Längsrichtung des Ausgangshalbzeugs durch das Ausgangshalbzeug geführt wird, bearbeitet wird. Die Schmelzkapillare 3 kann zusätzlich auch quer zur Längsrichtung des Ausgangshalbzeugs durch das Ausgangshalbzeug geführt werden. Bevorzugt sind die Klemmplatten 10 senkrecht angeordnet und der Strahl 2 kommt von oben. Die Tiefe der Schmelzkapillare 3 entspricht vorzugsweise in etwa der Höhe der Klemmplatten 10, damit das Ausgangshalbzeug über seinen gesamten Querschnitt bearbeitet werden kann.

In Figur 10 sind in einem Querschnitt durch eine erfindungsgemäße Vorrichtung aufeinanderfolgende Verfahrensschritte (a) bis (f) dargestellt. In Schritt (a) wird das umzuschmelzende Ausgangshalbzeug, z.B. eine Tafel/Platte oder ein Band, zwischen zwei sich gegenüberstehenden Klemmplatten 10, die mit von einer Kühlflüssigkeit durchströmten Kühlkanälen 8 versehen sind, eingelegt, und in Schritt (b) zwischen den an das Ausgangshalbzeug angesetzten Klemmplatten 10 unter Druck eingespannt. Danach erfolgt in Schritt (c) das Umschmelzen mit einer fokussierten, energiereichen Strahlung 2, die auf die seitliche Stirnfläche des Ausgangshalbzeugs wirkt und in diesem eine Schmelzkapillare 3 ausbildet. Aufgrund der guten Kühlung durch die Umschließung der Schmelzkapillare 3 mit Kühlmaterial, nämlich dem bearbeiteten Werkstoff 1 selbst, und der guten Kühlung des Werkstoffs 1 mittels der als Wärmesenke 4

dienenden gekühlten Klemmplatten 10, wird der Werkstoff 1 schroff abgekühlt. Es ist aber ebenso möglich, das Ausgangshalbzeug nicht fest als Platte zwischen den Klemmplatten 10 einzuspannen, sondern als Band in einem kontinuierlichen Prozess in einer Vorschubrichtung, die bevorzugt quer zur Einfallsrichtung der Strahlung 2 liegt, zwischen den an dem Band anliegenden Klemmplatten 10 hindurchzuführen und dabei umzuschmelzen.

Das Ausgangshalbzeug wird in einer Bahnkurve des Fokus 6 der Strahlung 2 auf dem Ausgangshalbzeug oder, insbesondere bei größerer Dicke des Ausgangshalbzeugs, in mehreren Bahnkurven des Fokus 6 mittels einer Schmelzkapillare 3 hochkant umgeschmolzen. Wenn nur eine einzige, geradlinige Bahnkurve des Fokus 6 verwendet wird, ist die Dicke des Werkstoffs 1 nur geringfügig größer als der Durchmesser der Schmelzkapillare 3. Bei Verwendung aufeinanderfolgender Bahnkurven des Fokus 6 wird die Schmelzkapillare 3 wiederholt durch das Ausgangshalbzeug geführt wird, bis der gewünschte Teil des Ausgangshalbzeugs bearbeitet ist. Das durch die Strahlung 2 erzeugte Keyhole durchdringt das Halbzeug in Form einer Schmelzkapillare 3, die beispielsweise in Längsrichtung durch das Halbzeug geführt wird. Dieser Vorgang wird so oft mit einer versetzen Bahnkurve des Fokus 6 wiederholt, bis nahezu das gesamte Halbzeug umgeschmolzen ist. Die Nahtüberdeckung von einer Bahnkurve zur nächsten kann hierbei beispielsweise zwischen 10 % und 90 % der Breite einer Bahn, d.h. des Durchmessers des Fokus 6 der Strahlung 2, betragen. Zwischen den einzelnen Umschmelzschritten kann erforderlichenfalls eine Pause zur vollständigen Wärmeableitung in die Wärmesenke 4 eingefügt werden. Die Verfahrgeschwindigkeit des Fokus 6 kann je nach angestrebter Abschreckrate beispielsweise zwischen 0,1 m/min und 20 m/min variiert werden. Hierbei werden Abkühlraten bis über 10^4 K/sec erreicht.

Nach dem Schritt (c) kann das Ausgangshalbzeug fertig bearbeitet sein. Wenn die Dicke des bearbeiteten Werkstoffs 1 ausreicht, sind die weiteren Schritte (d) bis (f) nicht erforderlich. Stattdessen kann in einem auf den Schritt (c) folgenden, nicht dargestellten Arbeitsgang das so erzeugte massive umgeschmolzene Halbzeug überfräst oder überschliffen werden, um den nicht umgeschmolzenen Bereich zu entfernen.

Wenn dagegen die Dicke des bearbeiteten Werkstoffs 1 aus Schritt (c) nicht ausreicht, können sich die Schritte (d) bis (f) anschließen, in denen die Schritte (a) bis (c) ein oder mehrfach wiederholt werden, um schrittweise ein beliebig dickes, massives Halbzeug mit durchgängig unterkühltem Gefügezustand herzustellen. In Schritt (d) wird die aus Schritt (c) erhaltene umgeschmolzene Platte mit einer weiteren, daran angelegten Platte aus einem noch nicht umgeschmolzenen Werkstoff 1 zwischen die Klemmplatten 10 eingespannt und durch die Strahlung 2 umgeschmolzen. Die Breite der Überlappung des dabei erneut umgeschmolzenen Bereichs in der bereits umgeschmolzenen Platte aus der vorausgegangenen Bearbeitung kann beispielsweise zwischen 10 % und 90 % der Breite der neu hinzugefügten Platte, bevorzugt zwischen 1/3 und 2/3 der Breite der neu hinzugefügten Platte betragen. Dabei werden die Breite der Überlappung und die Dicke der Platte in derselben Richtung, nämlich quer zur Richtung der Strahlung 2, betrachtet. Es wird also nach dem Bearbeiten eines ersten Ausgangshalbzeuges ein zweites, zu dem ersten Ausgangshalbzeug gleichartiges Ausgangshalbzeug aus demselben Werkstoff 1 neben das erste, bereits bearbeitete Halbzeug zwischen den Klemmplatten 10 eingespannt und das so gebildete schichtförmige Ausgangshalbzeug mit einer Schmelzkapillare 3 bearbeitet. Optional wird dieser Vorgang ein- oder mehrfach wiederholt, bis ein bearbeiteter Werkstoff 1 gewünschter Dicke hergestellt ist. Beim Wiederholen wird jeweils eine letzte bearbeitete Platte als neue erste Platte verwendet und eine weitere Platte daneben eingelegt und damit umgeschmolzen.

Der Schritt (d) kann beliebig oft wiederholt werden. In Schritt (e) ist ein Zwischenschritt dargestellt, bei dem auf einen zuvor aus vier nacheinander miteinander verbundenen Platten gebildeten Block 11 eine fünfte Platte aus einem noch nicht umgeschmolzenen Werkstoff aufgelegt und mit dem bereits umgeschmolzenen Block 11 überlappend umgeschmolzen wird. Am Ende wird so nach beliebig vielen Wiederholungen des Schrittes (d) ein Block 11 in der gewünschten Dicke erhalten, wie er in Schritt (f) veranschaulicht ist. Auf diese Weise kann durch schrittweises Umschmelzen ein beliebig dickes, massives Halbzeug aufgebaut werden, der bei hoher Unterkühlung erstarrt ist. Die nicht umgeschmolzene Randschale um den Körper des Halbzeugs kann durch umseitiges Überfräsen entfernt und das so hergestellte Halbzeug in dieser Form verwendet oder in konventionellen Umformprozessen zum endgültigen Produkt weiterverarbeitet werden.

Die Figur 11 zeigt eine Abwandlung des Verfahrens von Figur 10 bei einer Platte, bei dem ein Ausgangshalbzeug zwischen den Klemmplatten 10 eingespannt und bearbeitet wird, das aus einer Schichtung nebeneinander angeordneter Ausgangshalbzeuge aus unterschiedlichen Werkstoffen besteht. Das Verfahren nach Figur 10 kann zur Herstellung neuartiger Legierungen dahingehend modifiziert werden, dass neben einer Gefügeoptimierung durch Umschmelzen gleichzeitig ein Umschmelzlegieren mit weiteren Elementen erfolgt, verbunden mit rascher Erstarrung und hoher Unterkühlung der Schmelze.

Hierzu werden mehrere dünne Bleche aus unterschiedlichen reinen Metallen, Metalllegierungen oder Werkstoffverbunden nebeneinander geschichtet angeordnet und mittels einer Schmelzkapillare 3 miteinander verbunden und hierbei legiert. In dem Beispiel von Schritt (a) wird zwischen zwei gleichartige, plattenförmige Ausgangswerkstoffe A eine Zwischenfolie aus einem anderen Ausgangswerkstoff B eingelegt und in Schritt (b) mittels einer Schmelzkapillare 3 gemeinsam umgeschmolzen und hierbei zu

einem geänderten Werkstoff legiert. Für eine homogene Durchmischung der Komponenten kann ein mehrmaliges Überschmelzen bzw. eine schräge Einstrahlung unter wechselnden Winkeln von Vorteil sein. Das in Figur 10 veranschaulichte Verfahren lässt sich somit gemäß Figur 11 zum Herstellen von Legierungen modifizieren, indem im Ausgangszustand unterschiedliche Werkstoffe gegeneinander geschichtet werden. Über die Verwendung unterschiedlicher Ausgangsdicken je Werkstoff lassen sich so Legierungen und Gefügezustände einstellen, die in konventionellen Schmelzverfahren nicht herstellbar sind. Auf diese Weise ist es möglich, bisher nicht herstellbare metallische Legierungen in einer massiven Halbzeugform herzustellen.

In Figur 11 ist in Schritt (c) veranschaulicht, wie analog zu Figur 10 der Vorgang wiederholt werden kann, bis ein Block 11 eines dicken, massiven Halbzeugs der Legierung in gewünschter, beliebiger Dicke schichtweise aufgebaut ist, das in Schritt (d) veranschaulicht ist. Der schrittweise, schichtförmige Aufbau ermöglicht eine sehr hohe Abkühlrate auch über große Bauteilquerschnitte.

Die Figuren 12 und 13 veranschaulichen in stirnseitigen Aufsichten auf entsprechende erfindungsgemäße Vorrichtungen erfindungsgemäße Verfahren, bei denen ein bolzenförmiger Werkstoff als Ausgangshalbzeug bearbeitet wird, wobei als Wärmesenke 4 ein den Bolzen auf seiner Mantelfläche umschließender Kühlmantel 13 aus einem hoch wärmeleitfähigen Material verwendet wird und der Fokus der Strahlung über die Stirnseite des Ausgangshalbzeugs geführt wird. Die Figur 12 zeigt das Umschmelzen eines Bolzens 12 mittels einer durch fokussierte Strahlung erzeugten Schmelzkapillare mit Außenkühlung und die Figur 13 das Umschmelzen eines gelochten Bolzens 12 mit gleichzeitiger Außen- und Innenkühlung. Die Bolzenhöhe kann beispielsweise bis 400 mm betragen, der Durchmesser 5 mm bis 200 mm. Der umgeschmolzene Bolzen 12 kann durch anschließende Umformung zu einem Produkt oder Halbzeug verarbeitet

werden, z.B. durch Strangpressen, Schmieden und weitere spanlose Umformprozesse wie Walzen und Ziehen. Der umgeschmolzene Bolzen 12 kann beispielsweise als Ausgangshalbzeug für eine anschließende Strangpressumformung einer Drahtherstellung verwendet werden.

Unter einem Bolzen 12 oder bolzenförmigen Werkstoff wird dabei eine zylinderförmige Form eines Ausgangswerkstoffs verstanden. Als bolzenförmiger Werkstoff kann ein Ausgangswerkstoff verwendet werden, der aus einem massiven Werkstoff, aus einem Wickelkörper aus aufgewickelten Bändern oder Folien oder aus zusammengesetzten Schalen von Rohrhülsen gebildet ist. Der bolzenförmige Werkstoff kann vollvolumig (Figur 12) oder mit einer axialen Lochung (Figur 13) ausgebildet sein. Wenn eine besonders hohe Abkühlrate erzielt werden soll, kann ein bolzenförmiger Werkstoff verwendet werden, der als Wärmesenke einen gekühlten Dorn 14 aufweist (Figur 13), d.h. eine Wärmesenke 4 in Form eines Innenrohres aus einem gut wärmeleitenden Material, das mittels einer Kühlflüssigkeit gekühlt, vorzugsweise durchströmt wird.

Zur Erzielung einer wirksamen Ableitung der Schmelzwärme aus dem Werkstoff 1 ist das bolzenförmige Ausgangshalbzeug von einem Kühlmantel 13 aus gut wärmeleitendem Material, wie beispielsweise Kupfer, umgeben bzw. umschlossen, der als Wärmesenke 4 dient. Um eine gute Wärmeabfuhr von dem Werkstoff 1 an den Kühlmantel 13 zu erzielen, ist der zylinderförmige Bolzen 12 in einen Kühlmantel 13 aus Kupfer eingebettet, beispielsweise durch Einpressen des Bolzens 12 in den Kühlmantel 13 oder durch Umgießen des Bolzens mit dem Kühlmantel 13. Der Kühlmantel 13 kann durch Umgießen des umzuschmelzenden Werkstoffs 1 erzeugt werden, wobei dieser infolge der Erstarrungsschrumpfung unter hohen Zugspannungen spaltfrei an dem Kühlmantel 12 anliegt. In den Kühlmantel 13 können Kühlkanäle 8 zum Durchleiten einer Kühlflüssigkeit eingebracht werden. Die Kühlkanäle 8 können aber auch dadurch erzeugt

werden, dass eine vorgeformte rohrförmige Kühlschlange mit dem Material des Kühlmantels 13 umgossen wird.

Die Einstrahlrichtung der fokussierten Strahlung ist in axialer Richtung des Bolzens 12, d.h. rechtwinklig zur Stirnseite des Bolzens 12. Der Fokus der Strahlung wird beispielsweise in kreis- oder spiralförmigen Bahnkurven 15 über die Stirnseite des Bolzens 12 geführt, wodurch der Bolzen 12 durch die darin ausgebildete wandernde Schmelzkapillare umgeschmolzen und über die gekühlte Wärmesenke schnell abgekühlt wird. Die Strahlung kann kontinuierlich wirken oder durch Abkühlpausen unterbrochen werden.

Das in den Figuren 12 und 13 veranschaulichte Verfahren kann nicht nur zum Umschmelzen eines Werkstoffs 1, sondern auch zum Bilden von Legierungen aus Ausgangswerkstoffen verwendet werden. Hierzu wird ein Bolzen 12 aus verschiedenen, geschichteten Werkstoffen zusammengesetzt, die überlappend umgeschmolzen und dabei legiert werden. Ein solcher zylinderförmiger, zusammengesetzter Bolzen 12 kann beispielsweise aus ineinandergefügten Schalen von Rohren oder Rohrhülsen unterschiedlicher Metalle oder Metalllegierungen oder zur besseren Homogenisierung auch durch einen Wickelkörper aus geschichteten Metallfolien zusammengesetzt und dann umgeschmolzen und legiert werden. Durch Wickeln auf einen gekühlten Kupferdorn 14 kann zusätzlich Schmelzwärme nach innen abgeführt werden.

Bezugszeichenliste

1	Werkstoff
2	fokussierte Strahlung
3	Schmelzkapillare
4	Wärmesenke
5	Kühlflüssigkeit
6	Fokus
7	Spanneinrichtung
8	Kühlkanal
9	Vorschubrichtung
10	Klemmplatte
11	Block
12	Bolzen
13	Kühlmantel
14	Dorn
15	Bahnkurve
β	Einstrahlwinkel
A	Werkstoff A
B	Werkstoff B

Patentansprüche

1. Verfahren zum Herstellen metallischer Halbzeuge durch Umschmelzen und/oder Umschmelzlegieren metallischer Werkstoffe (1), wobei die Erstarrung der Schmelze mittels einer Kühleinrichtung mit einer hohen Abkühlrate erfolgt,
dadurch gekennzeichnet, dass
der Werkstoff (1) mittels energiereicher, fokussierter Strahlung (2) in einer Schmelzkapillare (3) in dem Werkstoffvolumen selektiv lokal geschmolzen wird,
der Wärmeentzug aus der Schmelzkapillare (3) über das an die Schmelzkapillare (3) angrenzende, nicht umgeschmolzene, kalte Werkstoffvolumen durchgeführt wird,
gleichzeitig mit dem Schmelzen des Werkstoffs (1) mittels der fokussierten Strahlung (2) zum Abführen der von der Schmelzkapillare (3) an das Werkstoffvolumen abgegebenen Wärme das Werkstoffvolumen mittels mindestens einer Wärmesenke (4) gekühlt wird,
wobei die Wärmesenke (4) an zumindest einen Teil einer wenigstens einen Fläche des Werkstoffvolumens gut wärmeleitend angekoppelt ist und die Wärmesenke (4) mittels einer Kühlflüssigkeit (5) gekühlt wird,
die Wärmesenke (4) an einer Stelle des Werkstoffvolumens gut wärmeleitend an das Werkstoffvolumen angekoppelt ist, die nahe zu dem Fokus (6) der fokussierten Strahlung (2) auf dem Werkstoff (1) bzw. zu der Schmelzkapillare (3) in dem Werkstoff (1) liegt, und
zum Schmelzen des die Schmelzkapillare (3) umgebenden Werkstoffvolumens des Werkstoffs (3) der Fokus (6) der fokussierten Strahlung (2) über den Werkstoff (1) bzw. die Schmelzkapillare (3)

durch den Werkstoff (1) bewegt wird, wobei der Fokus (6) der energiereichen, fokussierten Strahlung (2) und der bestrahlte Werkstoff (1) derart relativ zueinander bewegt werden, dass die gewünschte Fläche von dem Fokus (6) überstrichen wird.

2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass als energiereiche, fokussierte Strahlung (2) ein Elektronenstrahl, Laserstrahl, Ionenstrahl oder Plasmastrahl verwendet wird.

3. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass ein platten-, band-, stab-, rundstab-, draht-, bolzen- oder rohrförmiger Werkstoff (1) als Ausgangshalbzeug bearbeitet, d.h. umgeschmolzen und/oder umschmelzlegiert wird.

4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass ein Werkstoff (1) aus Nitinol bearbeitet, d.h. umgeschmolzen und/oder umschmelzlegiert wird.

5. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass eine Wärmesenke (4) verwendet wird, die allein als Gas- oder Flüssigkeitskühlung ausgebildet ist.

6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, dass eine Wärmesenke (4) verwendet wird, die aus einem massiven, gut wärmeleitenden Material besteht.

7. Verfahren nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, dass eine Wärmesenke (4) verwendet wird, die aus Kupfer oder Silber besteht.

8. Verfahren nach Anspruch 6 oder 7, dadurch gekennzeichnet, dass eine Wärmesenke (4) verwendet wird, die als separate, externe

Halte- oder Spanneinrichtung (7) ausgebildet ist, die die Oberfläche des bearbeiteten Werkstoffs (1) von außen kontaktiert.

9. Verfahren nach einem der Ansprüche 6 bis 8, dadurch gekennzeichnet, dass eine Wärmesenke (4) verwendet wird, die an den bearbeiteten Werkstoff (1) angeformt ist.

10. Verfahren nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, dass als an den bearbeiteten Werkstoff (1) angeformte Wärmesenke (4) ein Kühlmantel (13) aus einem Rohr oder ein Kühlkern aus einem Kern oder Rohr verwendet wird.

11. Verfahren nach einem der Ansprüche 6 bis 10, dadurch gekennzeichnet, dass eine Wärmesenke (4) verwendet wird, die Kühlkanäle (8) oder Kavitäten zum Durchleiten der Kühlflüssigkeit (5) durch die Wärmesenke (4) aufweist.

12. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass ein stab-, rundstab-, draht-, bolzen- oder rohrförmiger Werkstoff (1) als Ausgangshalbzeug bearbeitet wird.

13. Verfahren nach Anspruch 12, dadurch gekennzeichnet, dass ein rohrförmiger Werkstoff (1) als Ausgangshalbzeug bearbeitet wird, wobei als Wärmesenke (4) für den rohrförmigen Werkstoff (1) ein aus einem hoch wärmeleitfähigen Material gebildetes Rohr verwendet wird, das von einer Kühlflüssigkeit (5) durchströmt wird.

14. Verfahren nach Anspruch 12, dadurch gekennzeichnet, dass als Wärmesenke (4) eine das Ausgangshalbzeug umgreifende Spanneinrichtung (7) aus einem hoch wärmeleitfähigen Material verwendet wird, in die das Ausgangshalbzeug eingespannt wird.

15. Verfahren nach Anspruch 14, dadurch gekennzeichnet, dass der Fokus (6) der Strahlung (2) auf dem Mantel des Ausgangshalbzeugs unmittelbar neben der Spanneinrichtung (7) liegt.

16. Verfahren nach einem der Ansprüche 13 bis 15, dadurch gekennzeichnet, dass der Einstrahlwinkel (β) der Strahlung (2) auf das Ausgangshalbzeug etwa 90° beträgt, bezogen auf die Längsachse des Ausgangshalbzeugs.

17. Verfahren nach einem der Ansprüche 13 bis 15, dadurch gekennzeichnet, dass der Einstrahlwinkel (β) der Strahlung (2) auf das Ausgangshalbzeug zwischen 0° und 90° beträgt, bezogen auf die axiale Richtung, in der das Ausgangshalbzeug aus der Spanneinrichtung (7) herausragt.

18. Verfahren nach einem der Ansprüche 14 bis 17, dadurch gekennzeichnet, dass das Ausgangshalbzeug während der Bearbeitung mit der Strahlung (2) in axialer Richtung des Ausgangshalbzeugs aus der Spanneinrichtung (7) herausgezogen oder herausgeschoben wird.

19. Verfahren nach einem der Ansprüche 14 bis 18, dadurch gekennzeichnet, dass das Ausgangshalbzeug während der Bearbeitung mit der Strahlung (2) um seine Längsachse gedreht wird.

20. Verfahren nach Anspruch 13 und nach Anspruch 14.

21. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 11, dadurch gekennzeichnet, dass ein platten- oder bandförmiger Werkstoff (1) als Ausgangshalbzeug bearbeitet wird, wobei als Wärmesenke (4) gegenüberliegende Klemmplatten (10) aus einem hoch wärmeleitfähigen Material einer Halteeinrichtung verwendet werden, zwischen denen das Ausgangshalbzeug unter Druck eingespannt oder hindurchgeführt wird,

und das Ausgangshalbzeug durch eine zwischen den Klemmplatten (10) ausgebildete Schmelzkapillare (3), die in Längsrichtung des Ausgangshalbzeugs durch das Ausgangshalbzeug geführt wird, bearbeitet wird.

22. Verfahren nach Anspruch 21, dadurch gekennzeichnet, dass die Schmelzkapillare (3) wiederholt durch das Ausgangshalbzeug geführt wird, bis der gewünschte Teil des Ausgangshalbzeugs bearbeitet ist.

23. Verfahren nach Anspruch 21 oder 22, dadurch gekennzeichnet, dass nach dem Bearbeiten eines ersten Ausgangshalbzeuges ein zweites, zu dem ersten Ausgangshalbzeug gleichartiges Ausgangshalbzeug aus demselben Werkstoff (1) neben das erste, bereits bearbeitete Halbzeug zwischen den Klemmplatten (10) eingespannt und das so gebildete schichtförmige Ausgangshalbzeug mit einer Schmelzkapillare (3) bearbeitet wird.

24. Verfahren nach Anspruch 23, dadurch gekennzeichnet, dass der Vorgang ein- oder mehrfach wiederholt wird, bis ein bearbeiteter Werkstoff gewünschter Dicke hergestellt ist.

25. Verfahren nach Anspruch 21 oder 22, dadurch gekennzeichnet, dass ein Ausgangshalbzeug zwischen den Klemmplatten (10) eingespannt und bearbeitet wird, das aus einer Schichtung nebeneinander angeordneter Ausgangshalbzeuge aus unterschiedlichen Werkstoffen besteht.

26. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 11, dadurch gekennzeichnet, dass ein bolzenförmiger Werkstoff (1) als Ausgangshalbzeug bearbeitet wird, wobei als Wärmesenke (4) ein den Bolzen (12) auf seiner Mantelfläche umschließender Kühlmantel (13) aus einem hoch wärmeleitfähigen Material verwendet wird und der Fokus (6) der

Strahlung (2) über die Stirnseite des Ausgangshalbzeugs geführt wird.

27. Verfahren nach Anspruch 26, dadurch gekennzeichnet, dass ein bolzenförmiger Werkstoff verwendet wird, der aus einem massiven Werkstoff, aus einem Wickelkörper aus aufgewickelten Bändern oder Folien oder aus zusammengesetzten Schalen von Rohrhülsen gebildet ist.

28. Verfahren nach Anspruch 27, dadurch gekennzeichnet, dass ein bolzenförmiger Werkstoff verwendet wird, der vollvolumig oder mit einer axialen Lochung ausgebildet ist.

29. Verfahren nach Anspruch 26 oder 27, dadurch gekennzeichnet, dass ein bolzenförmiger Werkstoff verwendet wird, der als Wärmesenke einen gekühlten Dorn (14) aufweist.

30. Vorrichtung zum Herstellen metallischer Halbzeuge durch Umschmelzen und/oder Umschmelzlegieren metallischer Werkstoffe(1), wobei die Erstarrung der Schmelze mittels einer Kühleinrichtung mit einer hohen Abkühlrate erfolgt,
dadurch gekennzeichnet, dass
sie eine Strahleinrichtung zum Erzeugen energiereicher, fokussierter Strahlung (2) aufweist, die zum selektiven lokalen Schmelzen des Werkstoffs (1) in einer Schmelzkapillare (3) in dem Werkstoffvolumen ausgebildet ist,
wobei der Wärmeentzug aus der Schmelzkapillare (3) über das an die Schmelzkapillare (3) angrenzende, nicht umgeschmolzene, kalte Werkstoffvolumen durchgeführt wird,
eine Kühleinrichtung zum Kühlen mindestens einer Wärmesenke (4) aufweist, die zum Abführen der von der Schmelzkapillare (3) an das Werkstoffvolumen abgegebenen Wärme durch Kühlen des Werkstoff-

volumens mittels der Wärmesenke (4) ausgebildet ist, während gleichzeitig der Werkstoff (1) mittels der fokussierten Strahlung (2) geschmolzen wird,

wobei die Wärmesenke (4) an zumindest einen Teil einer wenigstens einen Fläche des Werkstoffvolumens gut wärmeleitend ankoppelbar ist und die Wärmesenke (4) mittels einer Kühlflüssigkeit (5) kühlbar ist,

die Wärmesenke (4) an einer Stelle des Werkstoffvolumens gut wärmeleitend an das Werkstoffvolumen ankoppelbar ist, die nahe zu dem Fokus (6) der fokussierten Strahlung (2) auf dem Werkstoff (1) bzw. zu der Schmelzkapillare (3) in dem Werkstoff (1) liegt, und

derart ausgebildet ist, dass zum Schmelzen des die Schmelzkapillare (3) umgebenden Werkstoffvolumens des Werkstoffs (1) der Fokus (6) der fokussierten Strahlung (2) über den Werkstoff (1) bzw. die Schmelzkapillare (3) durch den Werkstoff (1) bewegbar ist, wobei der Fokus (6) der energiereichen, fokussierten Strahlung (2) und der bestrahlte Werkstoff (1) derart relativ zueinander bewegbar sind, dass die gewünschte Fläche von dem Fokus (6) überstrichen wird.

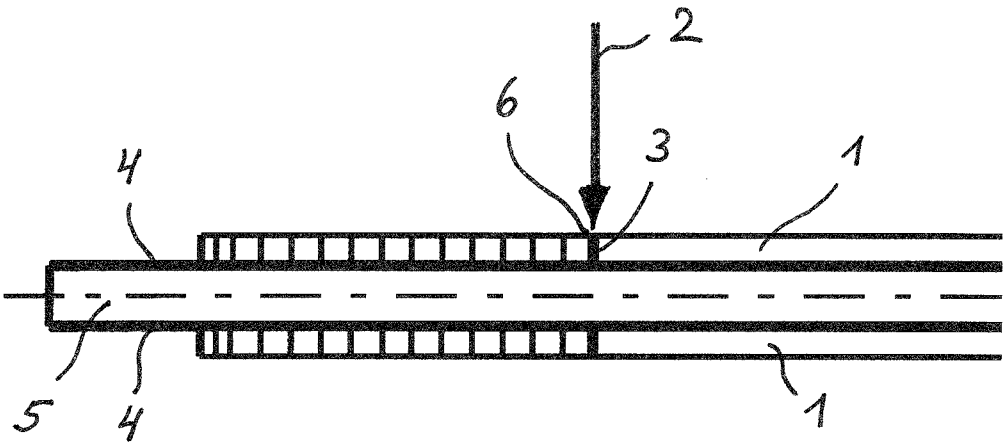

Fig. 1

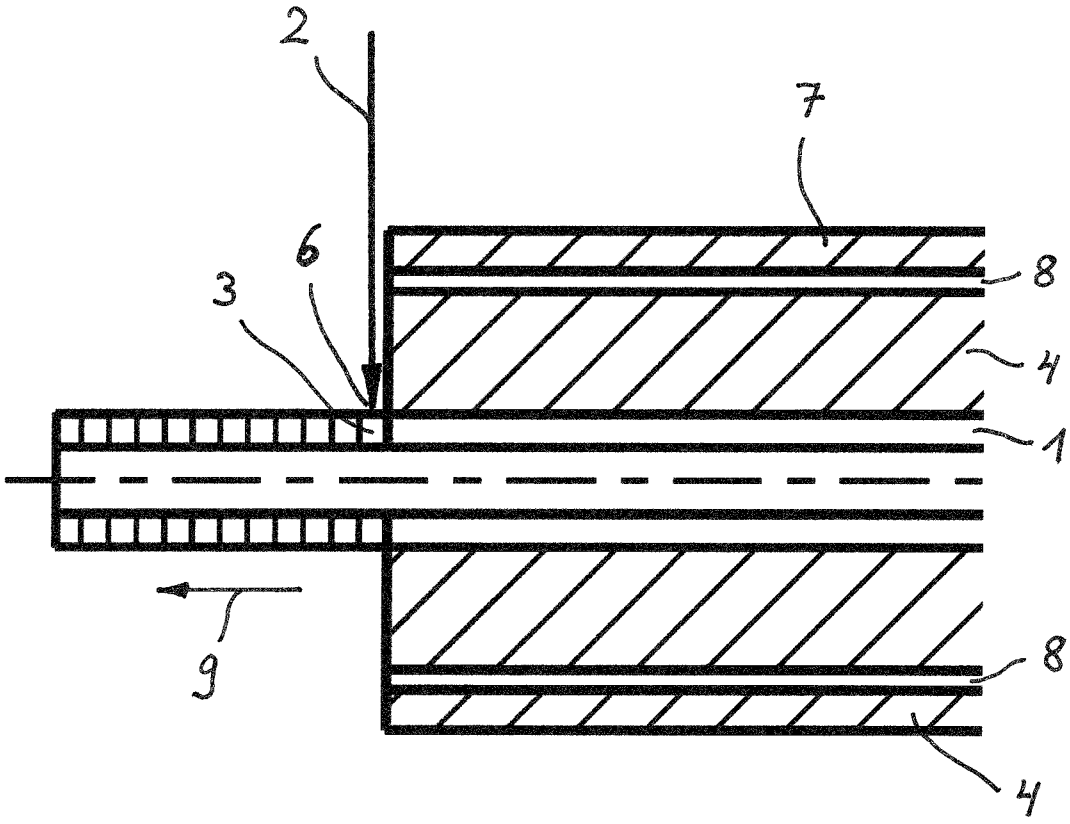

Fig. 2

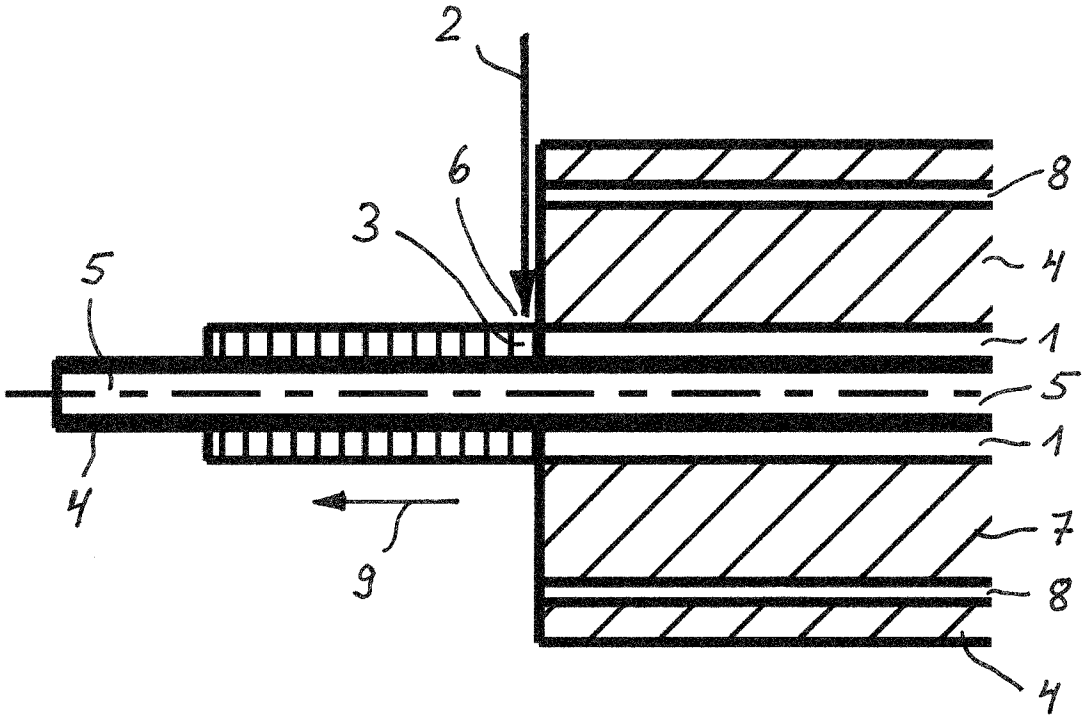

Fig. 3

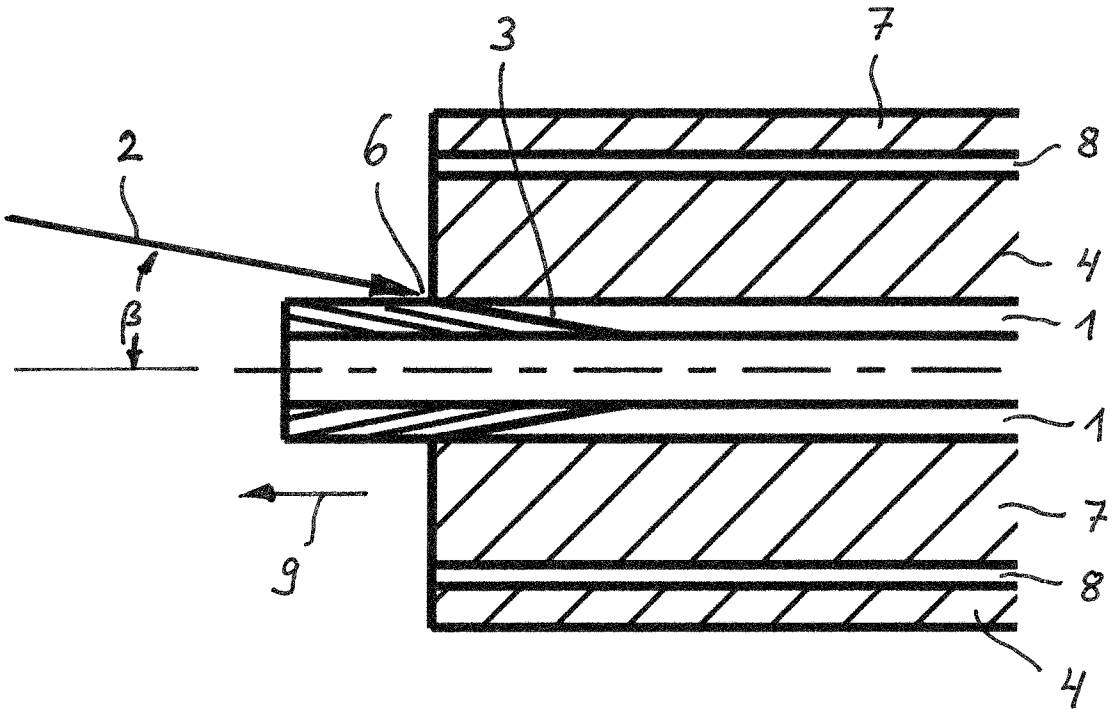

Fig. 4

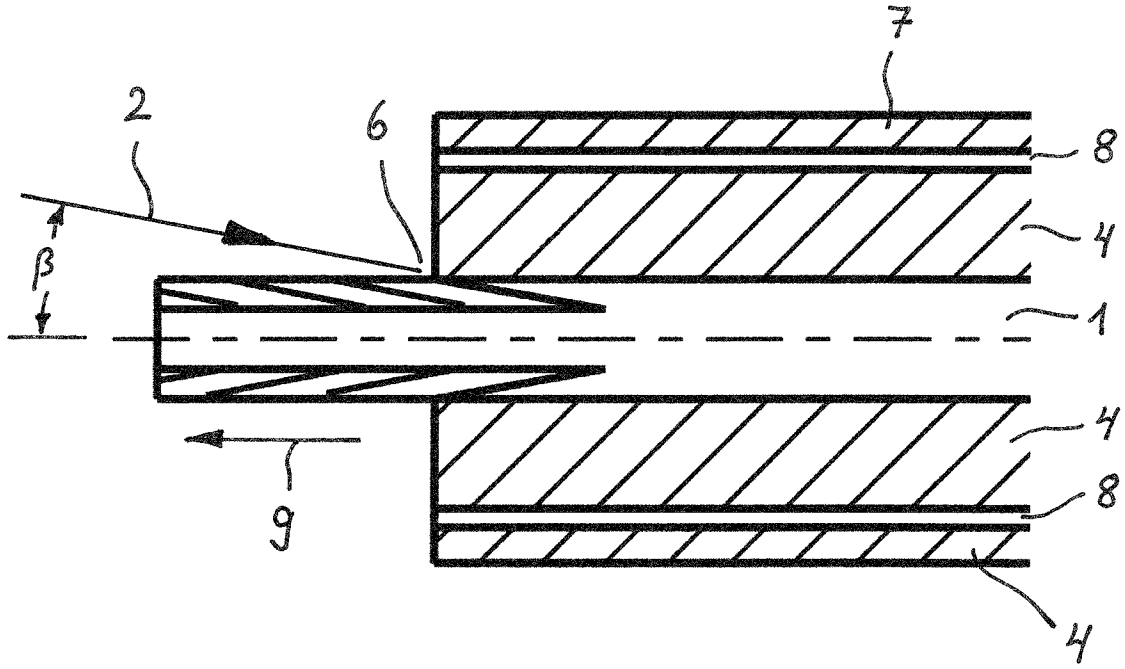

Fig. 5

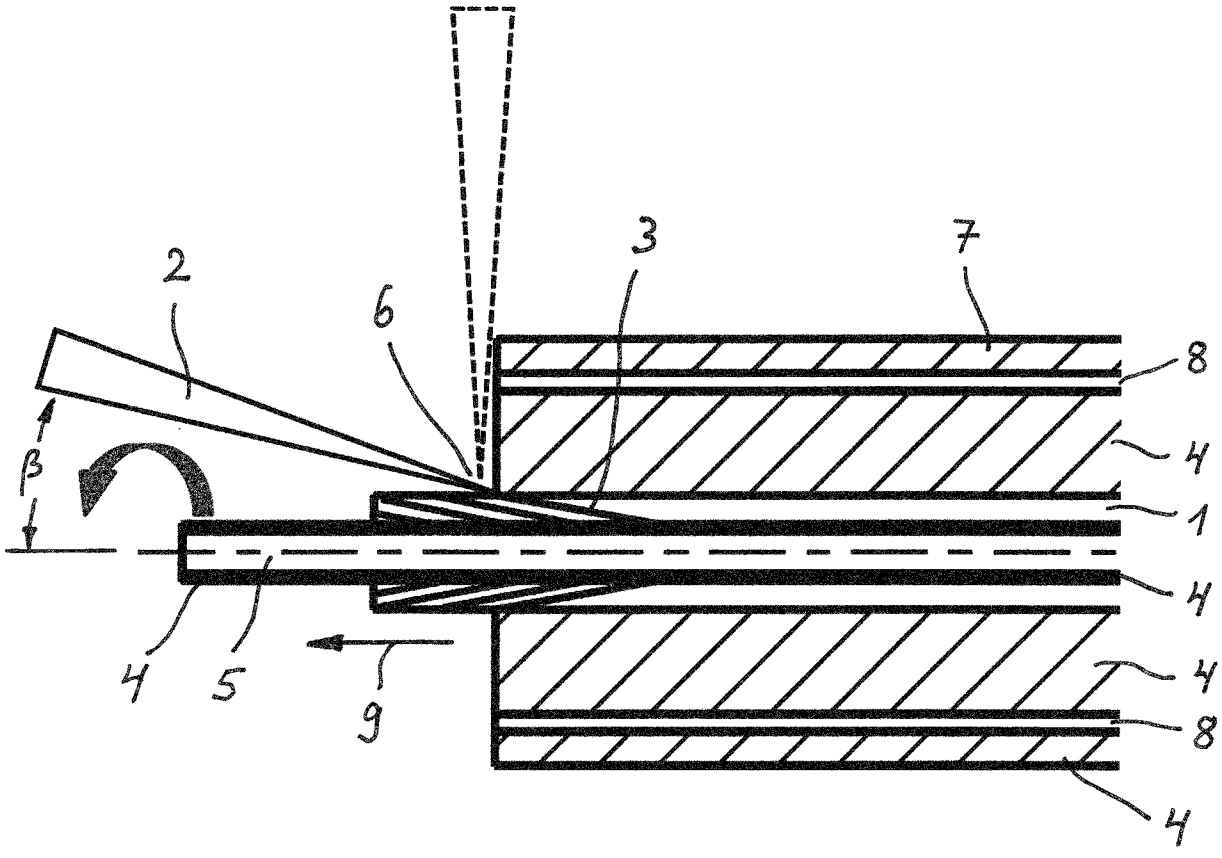

Fig. 6

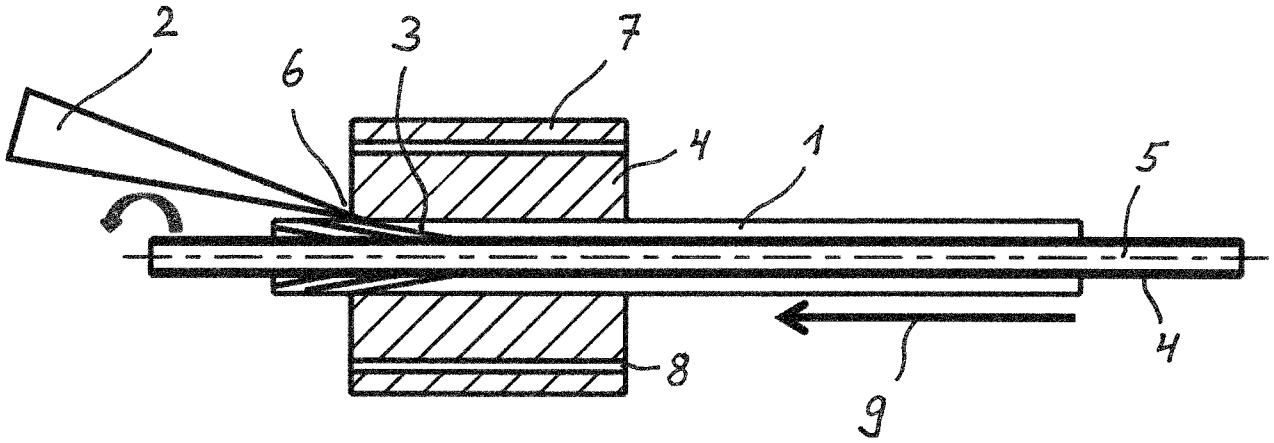

Fig. 7

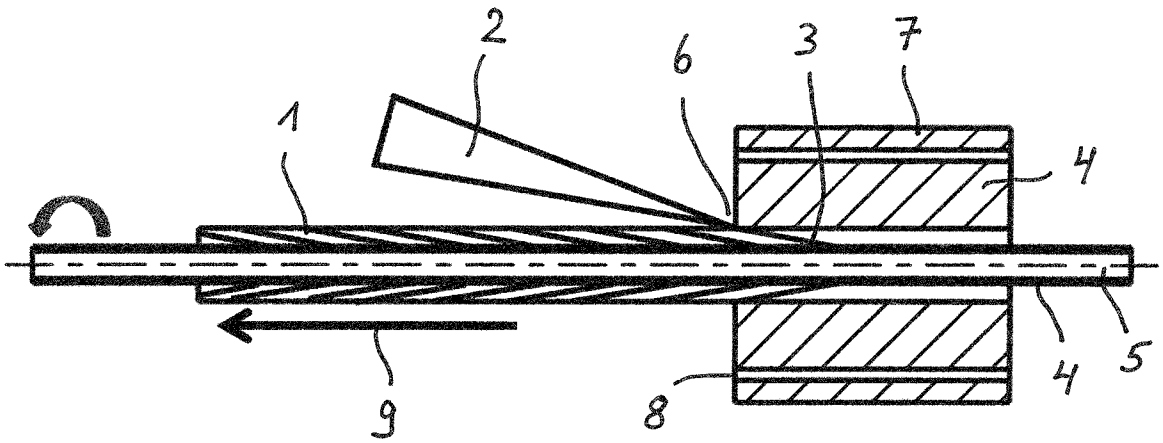

Fig. 8

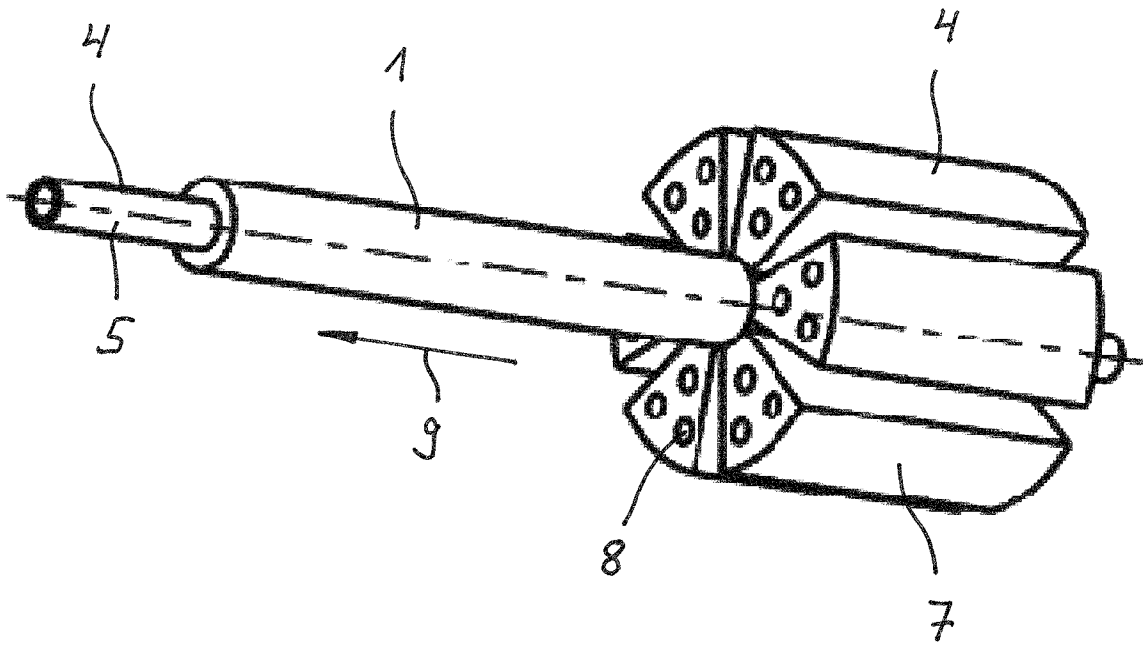

Fig. 9

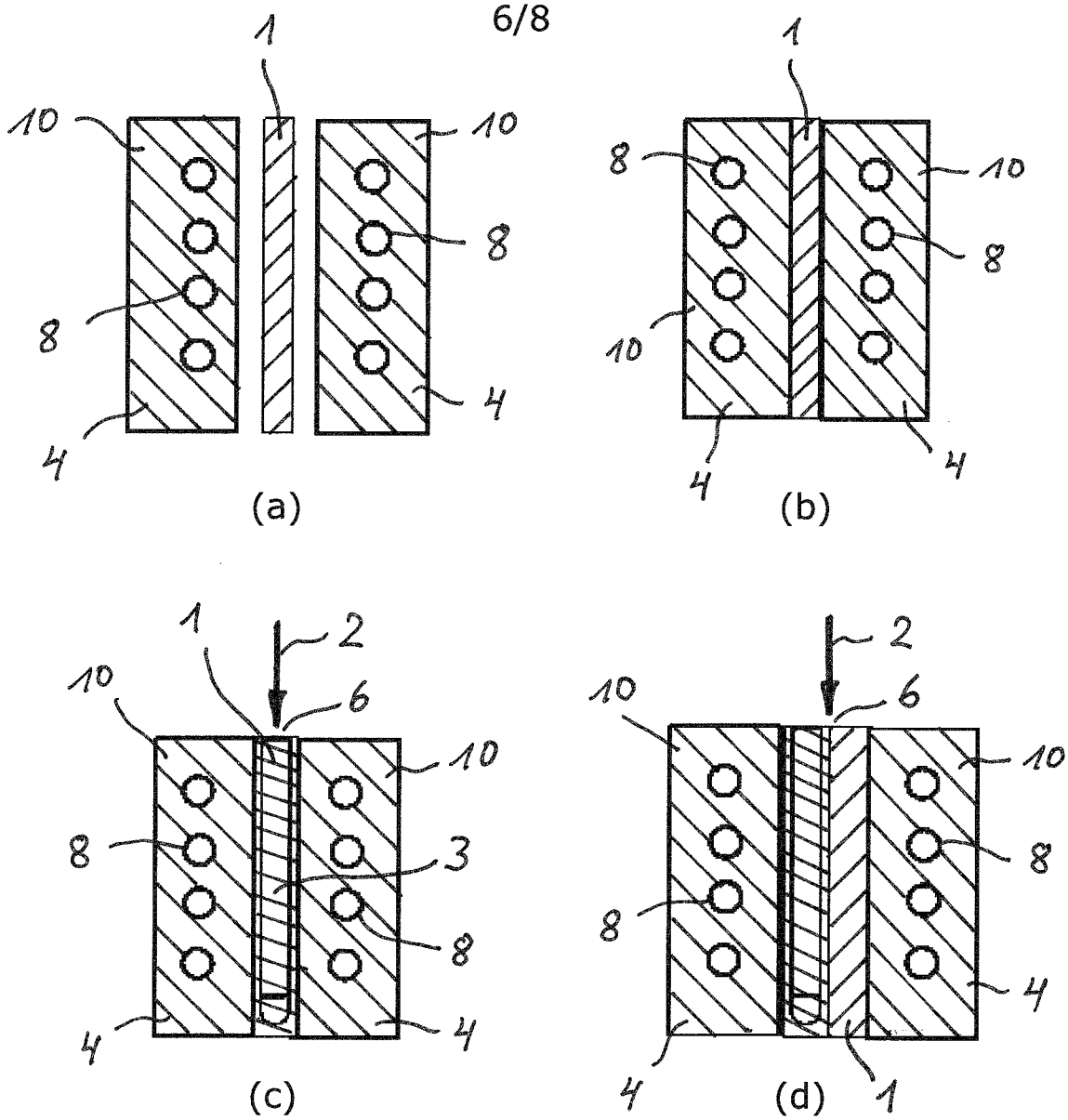
1
10
10
8
8
4
4
(a)
1
8
10
10
8
10
4
4
(b)
1
2
6
10
10
8
3
8
4
4
(c)
2
6
10
10
8
8
4
4
1
(d)
11
1
10
10
8
8
4
4
(e)
11
(f)

Fig. 10

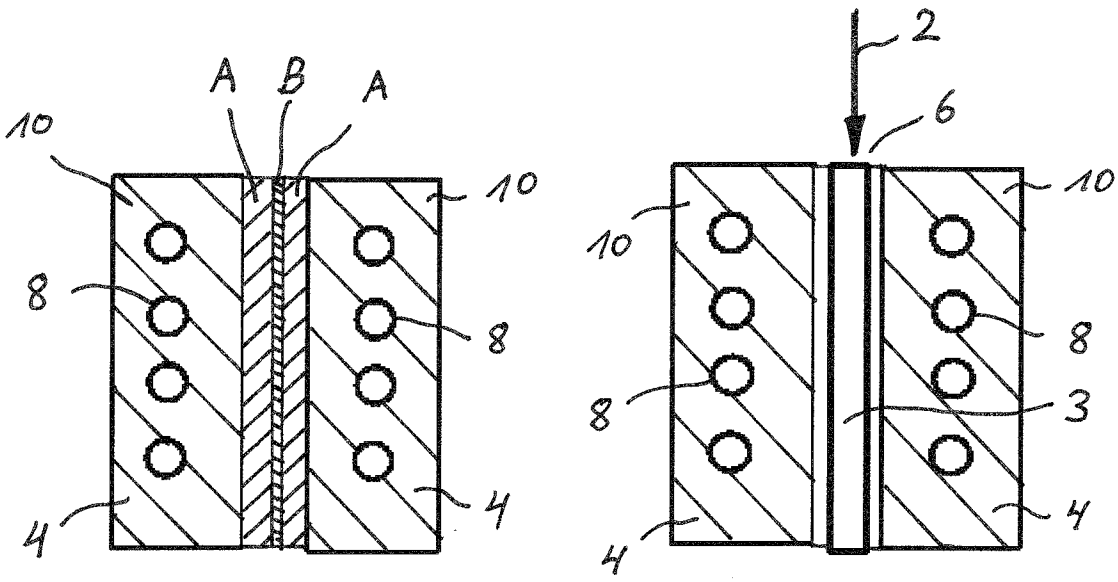

Fig. 11

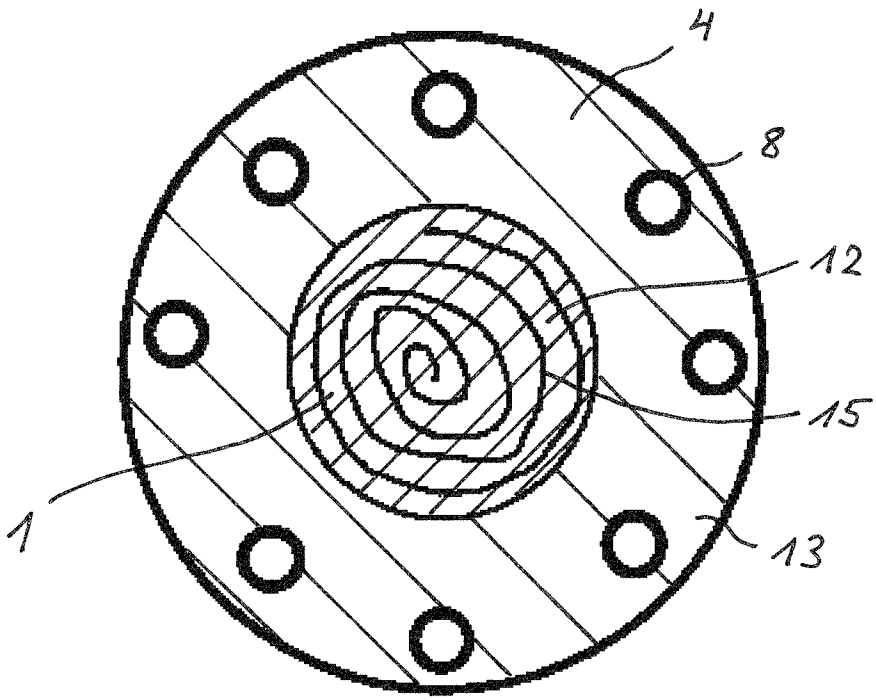

Fig. 12

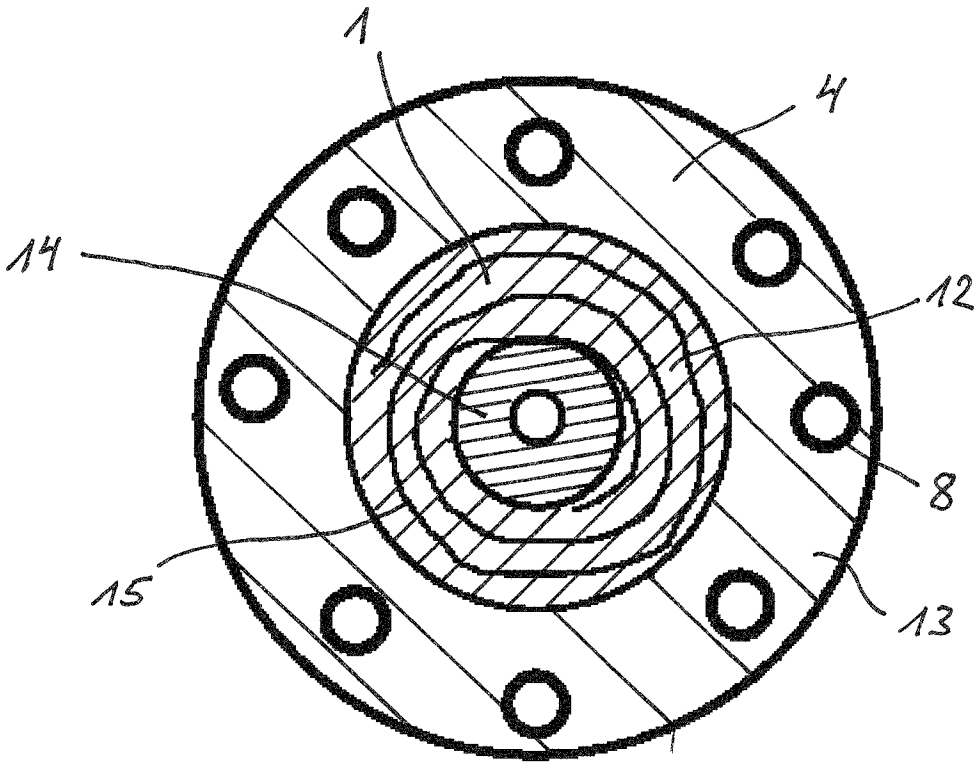

Fig. 13

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/EP2014/058938

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
INV. C22B9/16 C22B9/22
ADD.

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)
C22B

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)
EPO-Internal, WPI Data

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	LIANG SHUHUA ET AL: "Structure and properties of CuCr50 prepared by laser fast remelt", JIGUANG JISHU - LASER TECHNOLOGY, JIGUANGJISHU BIANWEIHUI, CN, vol. 24, 1 January 2000 (2000-01-01), pages 388-391, XP009179687, ISSN: 1001-3806 page 389 - page 390 figures 1-4 -----	1-30
A	US 2012/097653 A1 (YABE TAKASHI [JP] ET AL) 26 April 2012 (2012-04-26) figures 1-10 paragraph [0001] - paragraph [0094] ----- -/--	1-30

[X] Further documents are listed in the continuation of Box C.

[X] See patent family annex.

* Special categories of cited documents :

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search	Date of mailing of the international search report
2 September 2014	15/09/2014

Name and mailing address of the ISA/	Authorized officer
European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016	Zimmermann, Frank

1

Form PCT/ISA/210 (second sheet) (April 2005)

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No
PCT/EP2014/058938

C(Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	DE 22 09 148 A1 (STEIGERWALD STRAHLTECH) 20 September 1973 (1973-09-20) figures 1-14 page 2 - page 9	1-30
A	FR 2 599 640 A1 (TURBOMECA [FR]; HEURCHROME [FR]) 11 December 1987 (1987-12-11) page 2, line 21 - page 5, line 7	1-30
A	US 3 838 288 A (STOLZ H ET AL) 24 September 1974 (1974-09-24) column 1, line 40 - column 2, line 21	1-30
A	VAMSI KRISHNA B ET AL: "Laser Processing of Net-Shape NiTi Shape Memory Alloy", METALLURGICAL AND MATERIALS TRANSACTIONS A, SPRINGER-VERLAG, NEW YORK, vol. 38, no. 5, 21 April 2007 (2007-04-21) , pages 1096-1103, XP019695801, ISSN: 1543-1940 the whole document	1-30
A	Z. SUN, I. ANNERGREN, D. PAN, T.A. MAI: "Effect of laser surface remelting on the corrosion behavior of commercially pure titanium sheet", MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING, vol. A345, 2003, pages 293-300, XP002729141, the whole document	1-30

1

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No
PCT/EP2014/058938

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
US 2012097653 A1	26-04-2012	AU 2009310941 A1	06-05-2010
		CN 102264927 A	30-11-2011
		CN 103498049 A	08-01-2014
		EP 2351861 A1	03-08-2011
		US 2012097653 A1	26-04-2012
		WO 2010050450 A1	06-05-2010
DE 2209148 A1	20-09-1973	DE 2209148 A1	20-09-1973
		FR 2173303 A1	05-10-1973
		IT 977495 B	10-09-1974
		JP S4899014 A	15-12-1973
FR 2599640 A1	11-12-1987	NONE	
US 3838288 A	24-09-1974	DE 2209147 A1	13-09-1973
		FR 2173302 A1	05-10-1973
		GB 1405335 A	10-09-1975
		IT 977469 B	10-09-1974
		JP S4899002 A	15-12-1973
		US 3838288 A	24-09-1974

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Internationales Aktenzeichen
PCT/EP2014/058938

A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES
INV. C22B9/16 C22B9/22
ADD.

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

B. RECHERCHIERTE GEBIETE

Recherchierter Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole)
C22B

Recherchierte, aber nicht zum Mindestprüfstoff gehörende Veröffentlichungen, soweit diese unter die recherchierten Gebiete fallen

Während der internationalen Recherche konsultierte elektronische Datenbank (Name der Datenbank und evtl. verwendete Suchbegriffe)
EPO-Internal, WPI Data

C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
A	LIANG SHUHUA ET AL: "Structure and properties of CuCr50 prepared by laser fast remelt", JIGUANG JISHU - LASER TECHNOLOGY, JIGUANGJISHU BIANWEIHUI, CN, Bd. 24, 1. Januar 2000 (2000-01-01), Seiten 388-391, XP009179687, ISSN: 1001-3806 Seite 389 - Seite 390 Abbildungen 1-4	1-30
A	US 2012/097653 A1 (YABE TAKASHI [JP] ET AL) 26. April 2012 (2012-04-26) Abbildungen 1-10 Absatz [0001] - Absatz [0094]	1-30

-/--

[X] Weitere Veröffentlichungen sind der Fortsetzung von Feld C zu entnehmen [X] Siehe Anhang Patentfamilie

* Besondere Kategorien von angegebenen Veröffentlichungen :
"A" Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert, aber nicht als besonders bedeutsam anzusehen ist
"E" frühere Anmeldung oder Patent, die bzw. das jedoch erst am oder nach dem internationalen Anmeldedatum veröffentlicht worden ist
"L" Veröffentlichung, die geeignet ist, einen Prioritätsanspruch zweifelhaft erscheinen zu lassen, oder durch die das Veröffentlichungsdatum einer anderen im Recherchenbericht genannten Veröffentlichung belegt werden soll oder die aus einem anderen besonderen Grund angegeben ist (wie ausgeführt)
"O" Veröffentlichung, die sich auf eine mündliche Offenbarung, eine Benutzung, eine Ausstellung oder andere Maßnahmen bezieht
"P" Veröffentlichung, die vor dem internationalen Anmeldedatum, aber nach dem beanspruchten Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist
"T" Spätere Veröffentlichung, die nach dem internationalen Anmeldedatum oder dem Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist und mit der Anmeldung nicht kollidiert, sondern nur zum Verständnis des der Erfindung zugrundeliegenden Prinzips oder der ihr zugrundeliegenden Theorie angegeben ist
"X" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann allein aufgrund dieser Veröffentlichung nicht als neu oder auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden
"Y" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann nicht als auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese Verbindung für einen Fachmann naheliegend ist
"&" Veröffentlichung, die Mitglied derselben Patentfamilie ist

Datum des Abschlusses der internationalen Recherche	Absendedatum des internationalen Recherchenberichts
2. September 2014	15/09/2014

Name und Postanschrift der Internationalen Recherchenbehörde	Bevollmächtigter Bediensteter
Europäisches Patentamt, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040, Fax: (+31-70) 340-3016	Zimmermann, Frank

1

C. (Fortsetzung) ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
A	DE 22 09 148 A1 (STEIGERWALD STRAHLTECH) 20. September 1973 (1973-09-20) Abbildungen 1-14 Seite 2 - Seite 9	1-30
A	FR 2 599 640 A1 (TURBOMECA [FR]; HEURCHROME [FR]) 11. Dezember 1987 (1987-12-11) Seite 2, Zeile 21 - Seite 5, Zeile 7	1-30
A	US 3 838 288 A (STOLZ H ET AL) 24. September 1974 (1974-09-24) Spalte 1, Zeile 40 - Spalte 2, Zeile 21	1-30
A	VAMSI KRISHNA B ET AL: "Laser Processing of Net-Shape NiTi Shape Memory Alloy", METALLURGICAL AND MATERIALS TRANSACTIONS A, SPRINGER-VERLAG, NEW YORK, Bd. 38, Nr. 5, 21. April 2007 (2007-04-21) , Seiten 1096-1103, XP019695801, ISSN: 1543-1940 das ganze Dokument	1-30
A	Z. SUN, I. ANNERGREN, D. PAN, T.A. MAI: "Effect of laser surface remelting on the corrosion behavior of commercially pure titanium sheet", MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING, Bd. A345, 2003, Seiten 293-300, XP002729141, das ganze Dokument	1-30

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

Internationales Aktenzeichen
PCT/EP2014/058938

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
US 2012097653 A1	26-04-2012	AU 2009310941 A1	06-05-2010
		CN 102264927 A	30-11-2011
		CN 103498049 A	08-01-2014
		EP 2351861 A1	03-08-2011
		US 2012097653 A1	26-04-2012
		WO 2010050450 A1	06-05-2010
DE 2209148 A1	20-09-1973	DE 2209148 A1	20-09-1973
		FR 2173303 A1	05-10-1973
		IT 977495 B	10-09-1974
		JP S4899014 A	15-12-1973
FR 2599640 A1	11-12-1987	KEINE	
US 3838288 A	24-09-1974	DE 2209147 A1	13-09-1973
		FR 2173302 A1	05-10-1973
		GB 1405335 A	10-09-1975
		IT 977469 B	10-09-1974
		JP S4899002 A	15-12-1973
		US 3838288 A	24-09-1974