



(19)
Bundesrepublik Deutschland
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 600 17 666 T2 2005.12.29**

(12) **Übersetzung der europäischen Patentschrift**

(97) **EP 1 095 721 B1**

(21) Deutsches Aktenzeichen: **600 17 666.5**

(96) Europäisches Aktenzeichen: **00 309 256.6**

(96) Europäischer Anmeldetag: **20.10.2000**

(97) Erstveröffentlichung durch das EPA: **02.05.2001**

(97) Veröffentlichungstag

der Patenterteilung beim EPA: **26.01.2005**

(47) Veröffentlichungstag im Patentblatt: **29.12.2005**

(51) Int Cl.⁷: **B22D 27/04**
B22D 21/02

(30) Unionspriorität:

425307 25.10.1999 US

(73) Patentinhaber:

General Electric Co., Schenectady, N.Y., US

(74) Vertreter:

**Sieb, R., Dipl.-Chem. Dr.rer.nat., Pat.-Anw., 69514
Laudenbach**

(84) Benannte Vertragsstaaten:

CH, DE, FR, GB, IT, LI

(72) Erfinder:

**Gigliotti, Michael Francis Xavier, Scotia, New York
12302, US; Huang, Shyh-Chin, Latham, New York
12110, US; Petterson, Roger John, Fultonville, US;
Zhao, Ji-CFheng, Niskayuna, New York 12309, US**

(54) Bezeichnung: **Verfahren zur Herstellung eines Gussstückes mit gerichteter Erstarrung durch Kühlung mit flüssigem Metall**

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach der Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents kann jedermann beim Europäischen Patentamt gegen das erteilte europäische Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch ist schriftlich einzureichen und zu begründen. Er gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist (Art. 99 (1) Europäisches Patentübereinkommen).

Die Übersetzung ist gemäß Artikel II § 3 Abs. 1 IntPatÜG 1991 vom Patentinhaber eingereicht worden. Sie wurde vom Deutschen Patent- und Markenamt inhaltlich nicht geprüft.

Beschreibung

[0001] Die vorliegende Erfindung bezieht sich auf ein Gießverfahren unter gerichteter Erstarrung und Flüssigmetall-Kühlung. Mehr im Besonderen bezieht sich die Erfindung auf ein Verfahren zum Gießen von Superlegierungen unter gerichteter Erstarrung und Flüssigmetall-Kühlung.

[0002] Zusätzlich zur Zusammensetzung können die Kristallkorn-Charakteristika einer Superlegierung die Eigenschaften der Superlegierung bestimmen. So wird, z.B., die Festigkeit einer Superlegierung teilweise durch die Korngröße bestimmt. Bei hohen Temperaturen sind Verformungs-Verfahren durch Diffusion kontrolliert, und die Diffusion entlang Korngrenzen ist sehr viel größer als innerhalb der Körner. Bei hohen Temperaturen können daher Gefüge bzw. Strukturen mit großer Korngröße fester sein als feine Kornstrukturen. Im Allgemeinen gehen Fehler von Korngrenzen aus, die senkrecht zur Richtung einer angewendeten Spannung orientiert sind. Durch Gießen einer Superlegierung zur Herstellung eines langgestreckten stängeligen Gefüges, bei dem gerichtete Kristalle im Wesentlichen parallel zur langen Achse des Gusskörpers ausgerichtet sind, können Korngrenzen senkrecht zur primären Spannungsachse verringert werden. Durch Herstellen eines Einkristall-Gusskörpers aus einer Superlegierung können Korngrenzen-Versagensmodi fast vollständig beseitigt werden.

[0003] Die gerichtete Erstarrung ist ein Verfahren zum Herstellen von Turbinenschaufeln und Ähnlichem mit stängeligen und einkristallinen Gefügen. Im Allgemeinen wird eine einkristalline Wachstumsstruktur auf der Grundlage einer vertikal angeordneten Form erzeugt, die ein Teil bildet. Dann verläuft eine einkristalline Erstarrungsfront durch die Struktur bzw. das Gefüge unter dem Einfluss eines sich bewegenden Wärmegradienten.

[0004] Während der gerichteten Erstarrung sind Kristalle von Superlegierungen auf Nickel-, Cobalt- oder Eisen-Basis durch eine "dendritische" Morphologie charakterisiert. Dendritisch bezieht sich auf eine Form des Kristallwachstums, bei der sich der Festkörper in eine noch geschmolzene Flüssigkeit als eine Anordnung feiner verzweigter Nadeln erstreckt. Der Abstand zwischen den Nadeln in der Erstarrungsrichtung wird "primärer Dendritenarm-Abstand" genannt. Ein Temperaturgradient muss vor einer fortschreitenden Erstarrungsfront vorhanden sein, um die Kristallkeimbildung und das Wachstum parasitärer dendritischer Körner zu vermeiden. Die Größe des erforderlichen Gradienten ist proportional der Erstarrungsgeschwindigkeit. Aus diesem Grund muss die Geschwindigkeit der Verschiebung der Erstarrungsfront, die in der Größenordnung eines Bruchteiles eines Zentimeters bis zu mehreren Zentimetern pro Stunde betragen kann, sorgfältig kontrolliert werden. Verfahren zur gerichteten Erstarrung unter Flüssigmetall-Kühlung wurden entwickelt, um diese Anforderungen zu erfüllen. Bei einem Verfahren wird das erhitzte Legierungsmaterial zuerst durch eine Erhitzungszone und dann in eine Kühlzone geführt. Die Erhitzungszone kann aus einem Induktionsspulen- oder Widerstandserhitzer bestehen, während die Kühlzone durch ein Flüssigmetallbad gebildet wird. Bei einem anderen Verfahren wird das Flüssigmetallbad sowohl zum Erhitzen als auch Abkühlen benutzt, um eine verbesserte planere Erstarrungsfront zum Giessen komplexer Gegenstände zu schaffen.

[0005] Metalle, die typischerweise für das Flüssigmetallbad benutzt werden, schließen Metalle mit Schmelzpunkten von weniger als 700°C ein. Metalle mit Schmelzpunkten von weniger als 700°C schließen Lithium (186°C), Natrium (98°C), Magnesium (650°C), Aluminium (660°C), Kalium (63°C), Zink (419°C), Gallium (30°C), Selen (220°C), Rubidium (39°C), Cadmium (320°C), Indium (156°C), Zinn (232°C), Antimon (630°C), Tellur (450°C), Cäsium (28°C), Quecksilber (-39°C), Thallium (300°C), Blei (327°C) und Wismut (276°C) ein. Lithium, Natrium, Kalium und Cäsium sind sehr entflammbar und würden Sicherheitsprobleme darstellen, würde man sie als ein Flüssigmetallbad benutzen. Magnesium, Calcium, Zink, Rubidium, Cadmium, Antimon, Wismut und Quecksilber haben geringe Dampfdrucke. Sie würden verdampfen und die Gusslegierung und den Ofen verunreinigen. Selen, Cadmium, Tellur, Quecksilber, Thallium und Blei sind toxisch. Gallium und Indium sind teuer. Aluminium und Zinn sind bevorzugte Kühlmittel. Zinn ist schwerer und teurer als Aluminium, und Zinn wird eine Superlegierung verunreinigen, wenn es durch die Form dringt. Aluminium wird nicht verunreinigen, da es Bestandteil der meisten Superlegierungen ist, doch ist der Schmelzpunkt von Aluminium höher als der von Zinn. Da die Wärmeübertragung zwischen einem Gusskörper und dem Kühlmittel eine Funktion des Temperatur-Unterschiedes ist, ist flüssiges Zinn besser als flüssiges Aluminium bei der Entfernung von Wärme aus einem Gusskörper.

[0006] Es bleibt ein Bedarf zur Identifizierung eines Kühlmittels für ein Verfahren zur gerichteten Erstarrung unter Flüssigmetall-Kühlung, das die Vorteile von Zinn und Aluminium aufweist, wobei der Schmelzpunkt geringer ist als der von Aluminium und Dichte und Kosten geringer sind als die von Zinn.

ZUSAMMENFASSUNG DER ERFINDUNG

[0007] Die Erfindung bezieht sich auf ein Verfahren zur gerichteten Erstarrung unter Flüssigmetall-Kühlung, das verbesserte Erstarrungs-Charakteristika an der Erstarrungsfront bietet. Bei dem Verfahren wird eine Form mit flüssigem Metall gefüllt und man lässt eine Erstarrungs-Grenzfläche durch das geschmolzene Metall wandern, indem man die Form fortschreitend in eine Kühlflüssigkeit eintaucht. Die Kühlflüssigkeit ist eine eutektische oder nahezu eutektische Metallzusammensetzung.

[0008] In einem anderen Aspekt ist die Erfindung ein Ofen zur gerichteten Erstarrung, umfassend einen Heizofen, ein flüssiges Kühlbad und einen Formpositionierer bzw. eine Vorrichtung zum Anordnen einer Form. Der Heizofen hat ein offenes Ende, durch das eine erhitzte Form, die geschmolzenes Metall enthält, aus dem Ofen abgesenkt wird. Das flüssige Kühlbad umfasst eine eutektische oder nahezu eutektische Metallzusammensetzung, die unterhalb des offenen Endes des Ofens angeordnet ist. Der Formpositionierer senkt graduell die erhitzte Form aus dem Ofen durch das offene Ende ab und taucht die Form in das flüssige Kühlbad.

KURZE BESCHREIBUNG DER ZEICHNUNG

[0009] [Fig. 1](#) ist eine schematische Schnittansicht eines Ofens zum Ausführen eines Verfahrens zum gerichteten Erstarren.

DETAILLIERTE BESCHREIBUNG DER ERFINDUNG

[0010] Der Begriff "Superlegierung", wie er hier benutzt wird, bezieht sich auf eine wärmebeständige Legierung auf Nickel-, Cobalt- oder Eisen-Grundlage, die eine hervorragende Festigkeit und Oxidationsbeständigkeit bei hohen Temperaturen aufweist. Die Superlegierung kann Chrom, um Oberflächen-Stabilität zu verleihen, und eine oder mehrere untergeordnete Bestandteile, wie Molybdän, Wolfram, Niob, Titan oder Aluminium, für Verfestigungszwecke enthalten. Die physikalischen Eigenschaften einer Superlegierung machen sie besonders brauchbar zur Herstellung einer Gasturbinen-Komponente.

[0011] Ein befriedigendes Metall für das Kühlbad eines Ofens zur gerichteten Erstarrung sollte einen Schmelzpunkt, der signifikant unter dem der gegossenen Metalllegierung liegt, sowie eine hohe Wärmeleitfähigkeit haben. Das Metall sollte chemisch inert sein und einen geringen Dampfdruck aufweisen. Gemäß Ausführungsformen der Erfindung wird eine Zusammensetzung für das Kühlbad eines Ofens zum gerichteten Erstarren unter Flüssigmetall-Kühlung bereitgestellt, die höhere Wärmegradienten bei vernünftigen Kosten bereitstellt. Ausführungsformen der Erfindung stellen Legierungs-Zusammensetzungen auf der Grundlage binärer und ternärer Eutektika mit Aluminium bereit, die geringere Schmelzpunkte ohne einige der Nachteile von Zinn bieten.

[0012] Eine eutektische Mischung ist eine Kombination von Metallen in einem Anteil, der durch den geringsten Schmelzpunkt einer Mischung der gleichen Metalle charakterisiert ist. Der eutektische Punkt ist die geringste Temperatur, bei der eine eutektische Mischung in flüssiger Phase existieren kann. Der eutektische Punkt ist der geringste Schmelzpunkt einer Legierung in Lösung von zwei oder mehr Metallen, der durch Variieren der Anteile der Komponenten erhältlich ist. Eutektische Legierungen haben definierte und minimale Schmelzpunkte im Gegensatz zu anderen Kombinationen der gleichen Metalle.

[0013] In [Fig. 1](#) wird ein Ofen **10** zur gerichteten Erstarrung durch widerstandserhitzte Graphitstreifen **12** innerhalb eines isolierten Ofenkastens **14** erhitzt. Eine Keramikhüllenform **16** ist innerhalb des Ofenkastens **14** durch Formpositionierer **18** angeordnet. Die gerichtete Erstarrung wird erzielt durch Absenken einer Form **16**, die eine Superlegierung enthält, aus dem erhitzten Ofenkasten **14** in ein Flüssigmetall-Kühlbad **20**. Eine Heizvorrichtung erwärmt den Gusskörper; das Bad **20** entfernt Wärme aus dem Gusskörper und die Erstarrung schreitet vom Boden zum Oberteil innerhalb der Form **16** fort. Das flüssige Kühlmittelbad **20** ist in einem Tiegel **22** aus Metall oder hochschmelzendem Material enthalten. Das flüssige Kühlbad **20** ist eine eutektische Metall-Zusammensetzung, die als ein Kühlmedium gemäß der vorliegenden Erfindung wirkt.

[0014] Beispielhafte Kühlbad-Legierungen der Erfindung schließen binäre Eutektika von Aluminium mit Kupfer, Germanium, Magnesium oder Silicium und ternäre von Aluminium mit Kupfer und Germanium, Kupfer und Magnesium, Kupfer und Silicium oder Magnesium und Silicium ein. Einige geeignete Legierungen sind in der folgenden Tabelle aufgeführt.

TABELLE

Legierungsart	Schmelzpunkt °C	Al	Cu	Ge	Mg	Si
	660	100				
binär	548	67,3	32,7			
binär	420	48,4		51,6		
binär	450	64			36	
binär	437	33			67	
binär	577	87,4				12,6
ternär	<420	21	24	55		
ternär	507	60,8	33,1		6,1	
pseudobinär	518	66,1	23,9		10	
ternär	524	67,7	27			5,3
ternär	449	46,5		51	2,5	
ternär	419	46		52	2	
ternär	550	81			4,3	14,7
ternär	444	67,8			32	0,2
ternär	445	65,8			34	0,2
ternär	434	34,7			65	0,3

[0015] In der Tabelle sind die Bestandteile in Gew.-% angegeben. Die Tabelle zeigt, dass Legierungen mit Germanium und Magnesium die tiefsten Schmelztemperaturen bieten. Wegen der Dampfdrucke schließen bevorzugte Legierungen jedoch ein ternäres Aluminium-Kupfer-Silicium-Eutektikum mit einem Schmelzpunkt von 524°C und ein ternäres Aluminium-Kupfer-Germanium-Eutektikum mit einem Schmelzpunkt von weniger als 420°C ein.

[0016] Das ternäre Aluminium-Kupfer-Silicium-Eutektikum kann zwischen etwa 22 und etwa 32 Gew.-% Kupfer und zwischen etwa 2 und etwa 8 Gew.-% Silicium, Rest Aluminium, umfassen. Erwünschtermaßen umfasst das Eutektikum oder Beinah-Eutektikum zwischen etwa 24 und etwa 30 Gew.-% Kupfer und zwischen etwa 3 und etwa 7 Gew.-% Silicium, Rest Aluminium und vorzugsweise zwischen etwa 25,5 und etwa 28,5 Gew.-% Kupfer und zwischen etwa 4 und etwa 6 Gew.-% Silicium, Rest Aluminium.

[0017] Das ternäre Aluminium-Kupfer-Germanium-Eutektikum oder eine entsprechende Zusammensetzung nahe dem Eutektikum kann zwischen etwa 19 und etwa 34 Gew.-% Kupfer, zwischen 45 und etwa 66 Gew.-% Germanium, Rest Aluminium umfassen. Erwünschtermaßen umfasst das Eutektikum oder das Material nahe dem Eutektikum zwischen etwa 21 und etwa 27 Gew.-% Kupfer und zwischen etwa 52 und etwa 68 Gew.-% Germanium, Rest Aluminium und vorzugsweise zwischen etwa 22,5 und etwa 26,6 Gew.-% Kupfer und zwischen etwa 63,6 und etwa 66,5 Gew.-% Germanium, Rest Aluminium.

[0018] Die eutektische oder in ihrer Zusammensetzung nahe dem Eutektikum liegende Legierung kann hergestellt werden als ein Barren außerhalb des Ofens zur gerichteten Erstarrung durch Schmelzen und Gießen der Legierungs-Bestandteile zu Barren. Oder die eutektische oder nahezu eutektische Legierung kann an Ort und Stelle durch Schmelzen von Bestandteilen innerhalb des Tiegels **22** zubereitet werden.

[0019] Während des Betriebes wird der Ofenkasten **14** zu einer genügend hohen Temperatur erhitzt, um sicherzustellen, dass die Legierung in der Hüllenform **16** geschmolzen ist. Die Form **16** wird dann mittels eines Formpositionierers **18** in das flüssige eutektische Metallkühlmittel **20** mit einer vorgeschriebenen Rate abgesenkt. Eine Fest-Flüssig-Grenzfläche schreitet nach oben hin fort, während Wärme aus der Legierung innerhalb der Hüllenform **16** abgeleitet und durch das eutektische Kühlmetall abgeführt wird. Ein Barren ist vollständig gebildet, nachdem die Legierung durch Eintauchen in das Kühlbad **20** genügend abgekühlt ist. Der Barren kann dann leicht aus der Hüllenform **16** entfernt werden.

BEISPIEL 1

[0020] Das folgende Beispiel 1 veranschaulicht das Verfahren zur gerichteten Erstarrung, das unter Nutzung eines Aluminiummetall-Kühlbades ausgeführt wird. Bei diesem Verfahren wird zuerst ein Turbinenschaukel-Gusskörper in einer Form aus korrosionsbeständigem Stahl AISI 309 (Fe – 13,6 Gew.-% Ni, 23 Gew.-% Cr

und 0,2 Gew.% C) gegossen. Die Form und der Gusskörper werden dann mit einer Rate von 0,5 cm/min in ein Bad aus geschmolzenem Aluminium abgesenkt. Die Temperatur des geschmolzenen Aluminiums wird bei 710°C, etwa 60°C oberhalb der Schmelztemperatur reinen Aluminiums, gehalten. Der in dem Gussteil gemessene Wärmegradient beträgt 98°C/cm. Die gemessene Rate der Auflösung der Form aus korrosionsbeständigem Stahl in dem geschmolzenen Aluminium beträgt 0,001 mm/Stunde.

BEISPIEL 2

[0021] Ein Turbinenschaufel-Gusskörper wurde hergestellt nach einem Verfahren unter Flüssigmetallkühlung unter Einsatz eines Kühlbades einer geschmolzenen Aluminiumlegierung (12 Gew.-% Si). Ein Turbinenschaufel-Gusskörper wurde in einer Form aus korrosionsbeständigem Stahl AISI 309 gegossen und in einer Rate von 0,5 cm/min in das Kühlbad aus geschmolzener binärer eutektischer Aluminiumlegierung abgesenkt. Die Temperatur des geschmolzenen Legierungs-Kühlbades wurde bei 625°C, etwa 60°C oberhalb der Schmelztemperatur der Legierung von 677°C, gehalten. Der Wärmegradient in dem Gussteil betrug 103°C/cm, was eine 5%-ige Verbesserung gegenüber dem Basisfall von Beispiel 1 ist. Die gemessene Rate der Auflösung des Behälters aus korrosionsbeständigem Stahl in der geschmolzenen Aluminiumlegierung betrug 0,0002 mm/Stunde, eine Verringerung der Angriffsrate auf ein Fünftel, verglichen mit Beispiel 1.

BEISPIEL 3

[0022] Ein Turbinenschaufel-Gusskörper wurde hergestellt durch ein Verfahren unter Flüssigmetall-Kühlung unter Benutzung eines Kühlbades aus einer geschmolzenen Aluminiumlegierung (27 Gew.-% Cu, 5,3 Gew.-% Si). Ein Turbinenschaufel-Gusskörper wurde in einer Form aus korrosionsbeständigem Stahl AISI 309 gegossen und mit einer Rate von 0,6 cm/min in das Kühlbad aus geschmolzener ternärer eutektischer Aluminiumlegierung abgesenkt. Die Temperatur des geschmolzenen Legierungs-Kühlbades wurde bei 675°C, etwa 50°C oberhalb der Schmelztemperatur der Legierung von 524°C, gehalten. Der Wärmegradient im Gussteil betrug 106°C/cm, eine 8%-ige Verbesserung gegenüber dem Basisfall von Beispiel 1. Die gemessene Rate der Auflösung des Behälters aus korrosionsbeständigem Stahl in der geschmolzenen Aluminiumlegierung betrug 0,0001 mm/h, eine Verringerung der Angriffsrate auf ein Zehntel, verglichen mit Beispiel 1.

[0023] Die Beispiele veranschaulichen die verbesserten Kühlcharakteristika, die mit den eutektischen Metalllegierungs-Kühlbädern der Ausführungsformen der vorliegenden Erfindung erhältlich sind.

[0024] Während bevorzugte Ausführungsformen der Erfindung beschrieben wurden, ist die vorliegende Erfindung zur Variation und Modifikation in der Lage und sie sollte daher nicht auf die genauen Einzelheiten der Beispiele beschränkt sein. Die Erfindung schließt Änderungen ein, die in den Rahmen der folgenden Ansprüche fallen.

Patentansprüche

1. Verfahren zur gerichteten Erstarrung unter Köhlen mit flüssigem Metall, umfassend:
Aufrechterhalten einer heißen Zone bei einer Temperatur oberhalb der Liquidus-Temperatur eines Metalles innerhalb einer Form,
Aufrechterhalten einer kalten Zone, umfassend eine flüssige eutektische oder nahezu eutektische Metall-Zusammensetzung, bei einer Temperatur unterhalb der Solidus-Temperatur des Metalles und
Ziehen der Form fortschreitend aus der heißen Zone in die kalte Zone, um die Bewegung einer Erstarrungs-Grenzfläche durch das Metall innerhalb der Form zu bewirken, um einen Gusskörper aus dem Metall zu bilden.
2. Verfahren nach Anspruch 1, worin die eutektische oder nahezu eutektische Metall-Zusammensetzung ein Aluminium-Kupfer-Silicium-Eutektikum oder dem Eutektikum nahes derartiges Material ist oder ein Aluminium-Kupfer-Germanium-Eutektikum oder ein dem Eutektikum nahes derartiges Material ist.
3. Verfahren nach Anspruch 2, worin die eutektische oder nahezu eutektische Metall-Zusammensetzung zwischen etwa 22 und etwa 32 Gew.-% Kupfer und zwischen etwa 2 und etwa 8 Gew.-% Silicium, Rest Aluminium, umfasst.
4. Verfahren nach Anspruch 2, worin die eutektische oder nahezu eutektische Metall-Zusammensetzung Aluminium mit zwischen etwa 24 und etwa 30 Gew.-% Kupfer und zwischen etwa 3 und etwa 7 Gew.-% Silicium umfasst.

5. Verfahren nach Anspruch 2, worin die eutektische oder nahezu eutektische Metall-Zusammensetzung Aluminium mit zwischen etwa 25,5 und etwa 28,5 Gew.-% Kupfer und zwischen etwa 4 und etwa 6 Gew.-% Silicium umfasst.

6. Verfahren nach Anspruch 2, worin die eutektische oder nahezu eutektische Metall-Zusammensetzung Aluminium mit zwischen etwa 19 und etwa 34 Gew.-% Kupfer und zwischen etwa 45 und etwa 65 Gew.-% Germanium umfasst.

7. Verfahren nach Anspruch 2, worin die eutektische oder nahezu eutektische Metall-Zusammensetzung Aluminium mit zwischen etwa 21 und etwa 27 Gew.-% Kupfer und zwischen etwa 52 und etwa 58 Gew.-% Germanium umfasst.

8. Verfahren nach Anspruch 2, worin die eutektische oder nahezu eutektische Metall-Zusammensetzung Aluminium mit zwischen etwa 22,5 und etwa 25,5 Gew.-% Kupfer und zwischen etwa 53,5 und etwa 56,5 Gew.-% Germanium umfasst.

9. Verfahren nach Anspruch 1, worin die eutektische oder nahezu eutektische Metall-Zusammensetzung ein binäres Eutektikum oder dem Eutektikum nahes Material von Aluminium mit Kupfer, Germanium, Magnesium oder Silicium ist.

10. Verfahren nach Anspruch 1, worin die eutektische oder nahezu eutektische Metall-Zusammensetzung ein ternäres Eutektikum oder dem Eutektikum nahes Material von (i) Aluminium mit Kupfer und Magnesium oder (ii) Aluminium mit Magnesium und Silicium ist.

11. Verfahren nach Anspruch 1, worin die Form fortschreitend in die kühlende Flüssigkeit eingetaucht wird, um zu verursachen, dass eine Erstarrungs-Grenzfläche durch das geschmolzene Metall wandert.

Es folgt ein Blatt Zeichnungen

FIG. 1

