

Vorrichtung und Verfahren zum Herstellen von Metallpulver unter Verwendung einer Induktions- und einer Zwischenspule

Die vorliegende Erfindung betrifft eine Vorrichtung und ein Verfahren zum Herstellen von hochreinem Pulver unter Verwendung einer Induktions- und einer Zwischenspule. Genauer gesagt betrifft die vorliegende Erfindung eine Vorrichtung und ein Verfahren zum Schmelzen und Verdüsen eines Materials zur Herstellung von Pulver. Das Pulver kann insbesondere hochreines Metallpulver sein, wie z. B. Ni-Superlegierungspulver, Edelmetallpulver oder hochschmelzendes und reaktives Metall-Legierungspulver. Beispielsweise können die Vorrichtung und das Verfahren zur Herstellung von Pulver aus Titan-, Zirkonium-, Niob- und/oder Tantallegierungen dienen.

Hintergrund der Erfindung

Metallpulver dienen in vielen Anwendungsbereichen als Ausgangsstoff zur Herstellung von Halbzeugen und Formteilen. Insbesondere können Metallpulver hierzu mittels Sintern oder additiven Fertigungstechniken weiterverarbeitet werden. Aufgrund ihres breiten Einsatzbereichs in beispielsweise der Luftfahrtindustrie, der Energietechnik, der chemischen Industrie, der Elektronikindustrie und der Biomedizintechnik steigen der Bedarf an (Metall-)Pulvern und die Anforderungen an die Qualität der (Metall-)Pulver kontinuierlich.

Herkömmliche Vorrichtungen zum Herstellen von Pulvern umfassen Mittel zum Herstellen oder Bereitstellen einer Materialschmelze sowie Mittel zum Verdüsen bzw. Zerstäuben eines Schmelzstrahls der Materialschmelze.

Bekannte Verfahren zur Herstellung der Materialschmelze sind zum Beispiel das EIGA-Verfahren (Electrode Induction Melting Inert Gas Atomization), das VIGA-Verfahren (Vacuum Induction Melting Inert Gas Atomization) und das PIGA-Verfahren (Plasma Inert Gas Atomization).

Vorrichtungen zur Herstellung von Metallpulver unter Aufschmelzung eines Materialstabs mittels EIGA-Technologie und unter anschließendem Zerstäuben des geschmolzenen Materials sind aus den Dokumenten DE 4 102 101 A1 und EP 3 083 107 A1 bekannt. Der Qualität, der mit diesen Vorrichtungen hergestellten Pulver, sind jedoch Grenzen gesetzt und es besteht ein Bedarf an noch feineren, gleichmäßigeren Pulvern mit einer verbesserten Pulverqualität.

Eine Aufgabe der Erfindung besteht daher darin, eine Vorrichtung und ein Verfahren bereitzustellen, die die Nachteile des Standes der Technik überwinden.

Insbesondere besteht eine Aufgabe der Erfindung darin, eine Vorrichtung und ein Verfahren bereitzustellen, die eine Herstellung von noch feineren, gleichmäßigeren und/oder qualitativ verbesserten Pulvern ermöglicht. Die Verbesserung der Pulverqualität kann eine Reduzierung von Satellitenbildungen und/oder von Gaseinschlüssen im Pulver und/oder Erreichen einer optimalen Sphärizität (Kugelförmigkeit) bedeuten.

Diese Aufgabe wird gelöst durch den Gegenstand der unabhängigen Patentansprüche. Weiterbildungen und Ausführungsformen der Vorrichtung und des Verfahrens sind Gegenstand der abhängigen Ansprüche und der nachstehenden Beschreibung.

Beschreibung der Erfindung

Ein Aspekt der Erfindung betrifft eine Vorrichtung oder Anlage zum Herstellen von Pulver, insbesondere zum Herstellen von Metallpulver. Die Vorrichtung kann eine Vorrichtung zum Herstellen von hochreinem Pulver aus Titan-, Zirkonium-, Niob- und/oder Tantallegierungen und/oder zum Herstellen von Ni-Superlegierungspulver, Edelmetallpulver oder hochschmelzendes und reaktives Metall-Legierungspulver sein.

Die Vorrichtung umfasst eine Schmelzkammer und einen der Schmelzkammer nachgelagerten Verdüsungsturm. Nachgelagert kann hier bedeuten, dass der Verdüsungsturm im Betrieb unterhalb der Schmelzkammer angeordnet ist. Die Schmelzkammer kann mit einem Vordruck beaufschlagt sein. Der Verdüsungsturm kann mit einem Gegendruck beaufschlagt sein. Der Gegendruck kann geringer als der Vordruck sein. Der Gegendruck kann gleich dem Vordruck sein. In einer Ausführung, in der der Gegendruck gleich dem Vordruck ist, kann die Schmelzkammer über einen Bypass mit dem Verdüsungsturm verbunden sein.

Die Vorrichtung umfasst eine Düsenanordnung zum Verdüsen eines Schmelzstrahls, über die die Schmelzkammer mit dem Verdüsungsturm verbunden ist.

In der Schmelzkammer ist eine Induktionsspule angeordnet. Die Induktionsspule kann eine Mehrzahl von Windungen haben. Die Induktionsspule ist mit einer Schmelzfrequenz f_{melt} betrieben und dazu ausgebildet, einen zumindest abschnittsweise darin aufgenommenen Materialstab anzuschmelzen, um den zu verdüsenden Schmelzstrahl zu erzeugen. Anschmelzen kann hier bedeuten, dass der Materialstab im Bereich eines Endes (eines in der Induktionsspule angeordneten Endes) von der Induktionsspule erwärmt und aufgeschmolzen wird. Der Materialstab kann kontinuierlich nachgeführt werden, sodass ein durchgehender, gleichmäßiger Schmelzstrahl erzeugbar ist. Der Materialstab kann ein Metallstab sein. Somit kann der Schmelzstrahl ein Metallschmelzstrahl sein. Der Materialstab kann eine Titan-, Zirkonium-,

Niob- und/oder Tantallegierung, eine Ni-Superlegierungspulver, ein Edelmetall oder eine sonstige hochschmelzende und reaktive Metalllegierung umfassen. Der Schmelzstrahl kann kontinuierlich oder aus kurz aufeinanderfolgenden Tröpfchen gebildet sein.

Die Schmelzfrequenz f_{melt} ist einstellbar. Über die gezielte Wahl der Schmelzfrequenz können ein Durchmesser des Schmelzstrahls und eine Schmelzgeschwindigkeit sowie Schmelzrate des Schmelzstrahls beeinflusst werden. Die Schmelzrate dm/dt kann zwischen 0,1 kg/min und 10 kg/min betragen, vorzugsweise zwischen 0,5 kg/min und 8 kg/min, bevorzugt zwischen 1,5 kg/min und 6 kg/min. Das zu schmelzende Material kann Magnesium umfassen und eine Dichte von 1600 kg/m³ haben. Das zu schmelzende Material kann Aluminium umfassen und eine Dichte von 2700 kg/m³ haben. Das zu schmelzende Material kann Wolfram umfassen und eine Dichte von 19000 kg/m³ haben. Der Durchmesser des Schmelzstrahls kann zwischen 2 mm und 10 mm betragen, vorzugsweise zwischen 3 mm und 9 mm, bevorzugt zwischen 4,5 mm und 7,5 mm. Die Schmelzgeschwindigkeit kann zwischen 0,01 m/s und 9 m/s betragen, vorzugsweise zwischen 0,1 m/s und 5 m/s, bevorzugt zwischen 0,5 m/s und 4 m/s. Die spezifizierten Wertebereiche für den Durchmesser des Schmelzstrahls und die Schmelzgeschwindigkeit sowie die Schmelzrate stellen vorteilhafte Kombinationen dar, d.h. eine optimale Balance, um einen möglichst geringen Schmelzstrahldurchmesser mit dennoch ausreichend hoher Schmelzgeschwindigkeit bereitzustellen.

In der Schmelzkammer ist ferner eine separate Zwischenspule angeordnet. Separat kann hier bedeuten, dass die Zwischenspule strukturell getrennt von der Induktionsspule ist, also nicht lediglich einen Abschnitt der Induktionsspule bildet. Die Zwischenspule kann zudem getrennt von der Induktionsspule ansteuerbar und nicht zwingend abhängig von der Ansteuerung und Frequenz der Induktionsspule sein, obgleich die Ansteuerungen der beiden Spulen aufeinander abgestimmt sein können. Die Zwischenspule kann eine Mehrzahl von Windungen haben.

Die Zwischenspule und/oder die Induktionsspule können jeweils von einem abschirmenden Material umschlossen sein, beispielsweise von einem Ferritmantel. Hierdurch kann eine gezielte Feldlinienführung realisiert sein. Dies ermöglicht es, dass der Frequenzbereich der separaten Spulen adaptiert werden kann, wobei gleichzeitig eine gegenseitige Beeinflussung der Spulen verhindert werden kann.

Die Zwischenspule ist der Induktionsspule nachgelagert und coaxial zu der Induktionsspule ausgerichtet. Die Zwischenspule ist somit zwischen der Induktionsspule und der Düsenanordnung angeordnet, wobei die Zwischenspule von der Induktionsspule beabstandet ist. Die Zwischenspule kann auch von der Düsenanordnung beabstandet sein, insbesondere kann eine letzte Windung der Zwischenspule von einer Eintrittsöffnung der Düsenanordnung beabstandet

sein. Alternativ kann sich die Zwischenspule mit einem unteren Ende in die Düsenanordnung hinein erstrecken. In diesem Fall kann die letzte Windung der Zwischenspule zumindest von einem Abschnitt mit dem geringsten Innendurchmesser der Düsenanordnung beabstandet sein.

Insbesondere sind die Induktionsspule und die Zwischenspule derart angeordnet (nachgelagert und koaxial zueinander ausgerichtet), dass der von der Induktionsspule erzeugte Schmelzstrahl durch die Zwischenspule hindurch fällt. Nachgelagert kann hier bedeuten, dass eine der Zwischenspule zugewandte letzte Windung der Induktionsspule von einer der Induktionsspule zugewandten ersten Windung der Zwischenspule axial (entlang einer Längsachse der Spulen beabstandet ist, wobei die erste Windung der Zwischenspule näher an dem Verdüsungsturm angeordnet ist als die letzte Windung der Induktionsspule, also die erste Windung der Zwischenspule in Richtung des Verdüsungsturms von der letzten Windung der Induktionsspule beabstandet ist.

Die Zwischenspule ist mit einer Basisfrequenz f_{base} betrieben und dazu ausgebildet, den Schmelzstrahl in einem Bereich zwischen der Induktionsspule und der Düsenanordnung zu überhitzen. Überhitzen (engl.: „superheating“) kann auch beschrieben werden als ein Erwärmen bzw. Erhitzen und/oder Halten des Schmelzstrahls über die Liquidustemperatur des Materials. Genauer gesagt, kann die mit der Basisfrequenz f_{base} betriebene Zwischenspule den Schmelzstrahl entlang der Längsachse der Zwischenspule und des Schmelzstrahls erwärmen, zumindest in einem Abschnitt eines Bereichs zwischen der letzten Windung der Induktionsspule und der einer den Spulen zugewandten Eintrittsöffnung der Düsenanordnung. Hierdurch kann ein Abkühlen des Schmelzstrahls vor dem Eintritt in die Düsenanordnung gezielt beeinflusst und damit verhindert oder reduziert werden. Durch das Verhindern oder Reduzieren des Abkühlens des Schmelzstrahls in diesem Bereich, kann vermieden werden, dass Bereiche des Schmelzstrahls schon vor Eintritt in die Düsenanordnung (teilweise) erstarren. Ein Erstarren vor der Verdüsung beeinflusst die Qualität des hergestellten Pulvers wesentlich. Dem kann durch die Zwischenspule gezielt entgegengewirkt werden, was die Pulverqualität verbessert.

Beispielsweise kann das aufgeschmolzene Material unmittelbar nach dem Aufschmelzen mittels der Induktionsspule und vor Eintritt in die Zwischenspule eine Temperatur oberhalb seiner Solidustemperatur und maximal 70°C oberhalb seiner Liquidustemperatur haben ($T_{\text{sol}} \leq T \leq (T_{\text{liq}} + 70^{\circ}\text{C})$). Der Schmelzstrahl kann durch das weitere Überhitzen mittels der Zwischenspule nach Durchtreten der Zwischenspule (also am unteren, dem Verdüsungsturm zugewandten Ende der Zwischenspule) eine Temperatur oberhalb seiner Solidustemperatur und maximal 100°C oberhalb seiner Liquidustemperatur haben ($T_{\text{sol}} \leq T \leq (T_{\text{liq}} + 100^{\circ}\text{C})$).

Die Zwischenspule kann dazu dienen, Strahlungsverluste (die zu einer gewissen Abkühlung des Schmelzstrahls führen würden) zu kompensieren oder die Überhitzung des Schmelzstrahls noch zu erhöhen.

Für ein Frequenzverhältnis F_{BS} der Basisfrequenz f_{base} zu der Schmelzfrequenz f_{melt} kann gelten:

$$1 \leq F_{BS} = f_{base}/f_{melt} \leq 500;$$

$$\text{vorzugsweise } 1 \leq f_{base}/f_{melt} \leq 250;$$

$$\text{bevorzugt } 1 \leq f_{base}/f_{melt} \leq 100;$$

$$\text{weiter bevorzugt } 3 \leq f_{base}/f_{melt} \leq 50;$$

$$\text{noch weiter bevorzugt } 8 \leq f_{base}/f_{melt} \leq 25.$$

F_{BS} kann insbesondere zwischen 5 und 15 liegen, vorzugsweise zwischen 6,5 und 13,5, bevorzugt zwischen 8 und 12, weiter bevorzugt zwischen 9 und 11, noch weiter bevorzugt bei etwa 10.

Das spezifizierte Frequenzverhältnis F_{BS} der Basisfrequenz f_{base} zu der Schmelzfrequenz f_{melt} stellt eine besonders vorteilhafte Relation dar, da hierdurch einerseits ein Abkühlen sicher und ausreichend reduziert werden und andererseits ein sehr gleichmäßiger Übergang zwischen dem Aufschmelzen des Materialstabs (also dem Erzeugen des Schmelzstrahls) und dem Überhitzen des Schmelzstrahls realisiert werden kann.

Die Schmelzfrequenz f_{melt} , die Basisfrequenz f_{base} und/oder das Frequenzverhältnis F_{BS} kann/können nach Maßgabe des zu schmelzenden Materials und/oder nach Maßgabe des herzustellenden Pulvers (und dessen gewünschter Anwendung) und/oder nach Maßgabe der Spulengeometrie und -struktur gewählt werden. Mit anderen Worten können die Spulen nach Bedarf angesteuert und mit entsprechenden Frequenzen betrieben werden. Da hierzu die Konstruktion der Anordnung nicht modifiziert werden muss, ist die erfindungsgemäße Anordnung sehr flexibel auf unterschiedliche Anwendungsfälle anpassbar.

Der Bereich zwischen der Induktionsspule und der Düsenanordnung kann der geringste Abstand zwischen der Induktionsspule und der Düsenanordnung sein, also ein Abstand zwischen einer letzten, der Düsenanordnung zugewandten Windung der Induktionsspule und einer oberen Eintrittsöffnung der Düsenanordnung.

In einer Weiterbildung kann die Zwischenspule derart konfiguriert sein, dass eine Modulationsfrequenz f_{mod} auf die Basisfrequenz f_{base} aufmoduliert ist. Die aufmodulierte Modulationsfrequenz f_{mod} kann dazu dienen, ein gezieltes Auftrennen oder Aufbrechen des kontinuierlichen Schmelzstrahls in einzelne aufeinanderfolgende Tröpfchen zu bewirken bzw. zu verursachen, die im Wesentlichen dieselbe Größe haben. Mit anderen Worten stellt die aufmodulierte Modulationsfrequenz f_{mod} somit eine Perturbations- oder Störfrequenz dar, die das gezielte Auftrennen oder Aufbrechen des Schmelzstrahls in einzelne Tröpfchen derselben Größe verursacht. Im Falle einer Auftrennung des Schmelzstrahls in aufeinanderfolgende Tröpfchen kann die anschließende Zerstäubung optimal vorbereitet werden, wodurch eine effizientere und eine in Bezug auf die erreichbare Pulverqualität noch bessere Zerstäubung erreicht werden kann. Die zusätzliche Basisfrequenz f_{base} , die auf die Schmelztröpfchen in dem Bereich zwischen der Induktionsspule und der Düsenanordnung einwirkt, verhindert ein ungewünschtes Abkühlen und insbesondere Erstarren des Schmelzstrahls, was insbesondere bei einem aus einer Vielzahl an Schmelztröpfchen gebildeten Schmelzstrahl noch wichtiger ist, um eine gewünschte Pulverqualität sicherzustellen. Das gezielte Aufbrechen des Schmelzstrahls mittels der Modulationsfrequenz f_{mod} zusammen dem vorherigen gezielten Einstellen des Durchmessers des Schmelzstrahls und der Schmelzgeschwindigkeit des Schmelzstrahls mittels der Schmelzfrequenz f_{melt} , ermöglicht es, die Korngröße und die Qualität des Pulvers gezielt und anwendungsbezogen einzustellen. Diese Einstellung kann variabel und einfach angepasst werden. Das Einstellen von Tröpfchen mit im Wesentlichen derselben Größe sorgt dafür, dass die Erstarrung gleichmäßig verläuft und ein sehr homogenes Pulver hergestellt wird.

Die Zwischenspule kann einen Störabschnitt oder eine Störzone umfassen, der an einem der Induktionsspule zugewandten Endbereich der Zwischenspule ausgebildet ist. Somit kann der Störabschnitt auch als Anfangsstörabschnitt oder Eingangsstörabschnitt bezeichnet werden, da er in einem Bereich der Zwischenspule vorgesehen ist, in dem der Schmelzstrahl in die Zwischenspule eintritt. Der restliche Teil der Zwischenspule, der sich an den Störabschnitt oder die Störzone anschließt kann als Überhitzungsabschnitt oder Überhitzungszone beschrieben werden. Der Störabschnitt stellt einen Konzentrationsabschnitt dar und kann dazu ausgebildet sein, den Schmelzstrahl lokal, kurz und stark abzuquetschen. Die Zwischenspule kann in dem Störabschnitt einen verringerten Innendurchmesser aufweisen, genauer gesagt einen gegenüber dem Überhitzungsabschnitt oder dem restlichen Zwischenspulenteil verringerten Durchmesser. Der Störabschnitt kann sich über 5 % und 25 % der Länge der Zwischenspule erstrecken, vorzugsweise zwischen 10 % und 20 %, bevorzugt zwischen 12,5 % und 17,5 %. Der Störabschnitt kann eine bestimmte Windung mit verringertem Durchmesser aufweisen. In dem Störabschnitt können innerhalb der Windung Kaltwandtiegelpalisaden angeordnet sein, die den Durchmesser reduzieren, durch den der Schmelzstrahl tritt. Der Störabschnitt kann eine von den restlichen

Windungen der Zwischenspule separate Windung umfassen, die parallel zu den restlichen Windungen geschaltet ist. Die separate Windung kann mit einem höheren Strom betrieben werden als die restlichen Windungen.

Die Zwischenspule kann abschnittsweise von einem nicht leitfähigen Ferritmaterial umschlossen sein, um die Induktion der Zwischenspule weiter zu erhöhen.

Durch den verringerten Innendurchmesser bzw. Innenquerschnitt des Störabschnitts kann eine Konzentration der Beeinflussung des Schmelzstrahls durch die Zwischenspule, insbesondere durch die aufmodulierte Modulationsfrequenz f_{mod} realisiert werden. Hierdurch kann der Schmelzstrahl in diesem Störabschnitt und somit bereits am Anfang des Eintritts in die Zwischenspule in einzelne aufeinanderfolgende Tröpfchen aufgebrochen werden. Diese Tröpfchen werden anschließend beim Durchtreten des Überhitzungsabschnitts überhitzt.

Die Schmelzfrequenz f_{melt} kann zwischen 10 kHz und 500 kHz betragen, vorzugsweise zwischen 100 kHz und 400 kHz, bevorzugt zwischen 200 kHz und 300 kHz. Die Schmelzfrequenz f_{melt} kann wenigstens 10 kHz betragen, vorzugsweise wenigstens 50 kHz, bevorzugt wenigstens 100 kHz, weiter bevorzugt wenigstens 200 kHz, noch weiter bevorzugt wenigstens 250 kHz. Die Schmelzfrequenz f_{melt} kann 500 kHz oder weniger betragen, vorzugsweise 450 kHz oder weniger, bevorzugt 350 kHz oder weniger, weiter bevorzugt 300 kHz oder weniger, noch weiter bevorzugt 250 kHz oder weniger. Durch Schmelzfrequenzen f_{melt} in den spezifizierten Bereichen ist bei den hier relevanten Materialien ein Schmelzstrahldurchmesser zwischen 2 mm und 10 mm einstellbar.

Die Basisfrequenz f_{base} kann zwischen 100 kHz und 5000 kHz betragen, vorzugsweise zwischen 200 kHz und 4500 kHz, bevorzugt zwischen 500 kHz und 4000 kHz, weiter bevorzugt zwischen 1000 kHz und 3000 kHz, noch weiter bevorzugt zwischen 1500 kHz und 2500 kHz. Die Basisfrequenz f_{base} kann wenigstens 100 kHz betragen, vorzugsweise wenigstens 200 kHz, bevorzugt wenigstens 500 kHz, weiter bevorzugt wenigstens 1000 kHz, noch weiter bevorzugt wenigstens 1500 kHz. Die Basisfrequenz f_{base} kann 5000 kHz oder weniger betragen, vorzugsweise 4500 kHz oder weniger, bevorzugt 4000 kHz oder weniger, weiter bevorzugt 3000 kHz oder weniger, noch weiter bevorzugt 2500 kHz oder weniger. Durch Basisfrequenz f_{base} in den spezifizierten Bereichen kann bei den hier relevanten Materialien, insbesondere mit dem bevorzugt eingestellten Schmelzstrahldurchmesser zwischen 2 mm und 10 mm, ein ungewünschtes Abkühlen des Schmelzstrahls verhindert oder reduziert werden.

Die Modulationsfrequenz f_{mod} kann zwischen 0,001 kHz und 5 kHz betragen, vorzugsweise zwischen 0,005 kHz und 4,5 kHz, bevorzugt zwischen 0,01 kHz und 4 kHz, weiter bevorzugt zwischen 0,05 kHz und 3,5 kHz, noch weiter bevorzugt zwischen 0,1 kHz und 3 kHz, noch weiter bevorzugt zwischen 1 kHz und 2,5 kHz. Die Modulationsfrequenz f_{mod} kann wenigstens 0,001 kHz betragen, vorzugsweise wenigstens 0,005 kHz, bevorzugt wenigstens 0,01 kHz, weiter bevorzugt wenigstens 0,05 kHz, noch weiter bevorzugt wenigstens 0,1 kHz, noch weiter bevorzugt wenigstens 1 kHz. Die Modulationsfrequenz f_{mod} kann 5 kHz oder weniger betragen, vorzugsweise 4,5 kHz oder weniger, bevorzugt 4 kHz oder weniger, weiter bevorzugt 3,5 kHz oder weniger, noch weiter bevorzugt 3 kHz oder weniger, noch weiter bevorzugt 2,5 kHz oder weniger. Durch Modulationsfrequenz f_{mod} in den spezifizierten Bereichen kann bei den hier relevanten Materialien, insbesondere mit dem bevorzugt eingestellten Schmelzstrahldurchmesser zwischen 2 mm und 10 mm, ein gezieltes Aufbrechen des Schmelzstrahls in aufeinanderfolgende Tröpfchen mit dem gewünschten Durchmesser realisiert werden.

Die Modulationsfrequenz f_{mod} kann nach Maßgabe des Schmelzstrahldurchmessers und der Schmelzgeschwindigkeit, insbesondere in dem Störabschnitt, gewählt werden. Hierbei kann gelten:

$$f_{\text{mod}} = \frac{v_m}{\lambda},$$

wobei

$$\lambda = \sqrt{2} \pi d_0 \sqrt{1 + \frac{3\mu}{\sqrt{\rho} \gamma d_0}},$$

mit v_m = Schmelzgeschwindigkeit in m/s, μ = Schmelzviskosität des jeweiligen Materials in Pa.s, ρ = Schmelzdichte des jeweiligen Materials in kg/m³ und γ = Schmelzoberflächenspannung des jeweiligen Materials in N/m.

Die Zwischenspule kann eine zylindrische Gestalt haben. Die Zwischenspule kann eine zylindrische Gestalt mit zumindest abschnittsweise und/oder überwiegend konstantem Durchmesser haben. Mit überwiegend konstantem Durchmesser kann hier bedeuten, dass entlang der Längsachse der Zwischenspule betrachtet zumindest 70 % der Zwischenspule, vorzugsweise zumindest 80 % der Zwischenspule, bevorzugt wenigstens 85 % der Zwischenspule einen konstanten Durchmesser hat. Hierdurch kann erreicht werden, dass der Schmelzstrahl an jeder Stelle im Bereich der Zwischenspule denselben Energieeintrag erfährt und somit über den Durchgang

(das Fallen) durch die Zwischenspule hinweg an jeder Stelle im Wesentlichen gleich erwärmt wird.

Die Länge der Zwischenspule entlang ihrer Längsachse betrachtet kann größer als das Vierfache des geringsten Innendurchmessers der Düsenanordnung sein, vorzugsweise größer als das Fünffache, bevorzugt größer als das Sechsfache. Hierdurch kann eine besonders effektive Überhitzung des Schmelzstrahls in dem Bereich zwischen der Induktionsspule und der Düsenanordnung erreicht werden.

Die Zwischenspule kann dazu ausgebildet sein, den Schmelzstrahl in wenigstens 50 % einer durch den geringsten Abstand zwischen der Düsenanordnung und der Induktionsspule definierten Strecke zu überhitzen (entlang der Längsachse der Zwischenspule bzw. der Vorrichtung betrachtet), vorzugsweise wenigstens 60 %, bevorzugt wenigstens 70 %, weiter bevorzugt wenigstens 75 %, noch weiter bevorzugt wenigstens 80 %. Durch Abdecken eines solchen Mindestanteils der Strecke kann ein unerwünschtes Abkühlen des Schmelzstrahls effektiv und ausreichend reduziert werden.

Die Induktionsspule kann eine in Richtung auf die Düsenanordnung zu zumindest abschnittsweise konische Gestalt haben, wodurch ein effektives Aufschmelzen des Materialstabs realisiert werden kann.

Die Düsenanordnung kann eine Lavaldüse umfassen oder in Form einer Lavaldüse ausgebildet sein.

Die Düsenanordnung kann eine Ringdüse umfassen oder in Form einer Ringdüse ausgebildet sein.

Die Lavaldüse kann derart ausgebildet und angeordnet sein, dass der Schmelzstrahl durch die Lavaldüse von der Schmelzkammer in den Verdüsungsturm tritt und ein Zusatzgas durch die Lavaldüse von der Schmelzkammer in den Verdüsungsturm strömt, wobei das Zusatzgas den Schmelzstrahl beim Durchströmen der Lavaldüse beschleunigt. Die Ringdüse kann der Lavaldüse derart nachgelagert und/oder kann derart im Bereich der Lavaldüse angeordnet sein, dass durch die Ringdüse ein zusätzliches Verdüsungsgas von einer Verdüsungsgasquelle in den Verdüsungsturm strömt, wodurch in einem Bereich einer an den Verdüsungsturm angrenzenden Austrittsöffnung der Lavaldüse ein lokal reduzierter Gegendruck erzeugbar ist, sodass für ein Druckverhältnis D zwischen einem Vordruck P_0 der Schmelzkammer und dem lokal reduzierten Gegendruck P_2 gilt:

$$D = P_0/P_2 \geq 2.$$

Durch eine solche Doppeldüsenanordnung und das spezifizierte Druckverhältnis kann eine kritische Durchströmung der Düse erreicht und die Zerstäubung des Schmelzstrahls verbessert werden.

Ein weiterer Aspekt der Erfindung betrifft ein Verfahren zum Herstellen von Metallpulver. Das Verfahren umfasst die Schritte:

- Erzeugen eines zu verdüsenden Schmelzstrahls durch Anschmelzen eines Materialstabs mittels einer den Materialstab zumindest abschnittsweise umgebenden Induktionsspule in der Schmelzkammer, wobei die Induktionsspule mit einer Schmelzfrequenz f_{melt} betrieben wird;
- Überhitzen des Schmelzstrahls in einem Bereich zwischen der Induktionsspule und einer Düsenanordnung mittels einer der Induktionsspule nachgelagerten und coaxial zu der Induktionsspule ausgerichteten separaten Zwischenspule, wobei die Zwischenspule mit einer Basisfrequenz f_{base} betrieben wird, und wobei für ein Frequenzverhältnis F_{BS} der Basisfrequenz f_{base} zu der Schmelzfrequenz f_{melt} gilt: $1 \leq F_{\text{BS}} = f_{\text{base}}/f_{\text{melt}} \leq 500$; und
- Verdüsen des überhitzten Schmelzstrahls mittels der Düsenanordnung, wobei die Schmelzkammer über die Düsenanordnung mit einem Verdüsungsturm verbunden ist.

Ein weiterer Aspekt der Erfindung betrifft eine Vorrichtung zum Herstellen von Metallpulver. Die Vorrichtung umfasst:

- eine Schmelzkammer,
- einen der Schmelzkammer nachgelagerten Verdüsungsturm,
- eine Düsenanordnung zum Verdüsen eines Schmelzstrahls, über die die Schmelzkammer mit dem Verdüsungsturm verbunden ist,
- eine in der Schmelzkammer angeordnete und mit einer Schmelzfrequenz f_{melt} betriebene Induktionsspule, die dazu ausgebildet ist, einen zumindest abschnittsweise darin aufgenommenen Materialstab anzuschmelzen, um den zu verdüsenden Schmelzstrahl zu erzeugen,
- eine in der Schmelzkammer angeordnete und mit einer Basisfrequenz f_{base} betriebene separate Zwischenspule, die der Induktionsspule nachgelagert und coaxial zu der Induktionsspule ausgerichtet ist, wobei die Zwischenspule dazu ausgebildet ist, den Schmelzstrahl in einem Bereich zwischen der Induktionsspule und der Düsenanordnung zu überhitzen,
- wobei die Zwischenspule derart konfiguriert ist, dass eine Modulationsfrequenz f_{mod} auf die Basisfrequenz f_{base} aufmoduliert ist.

Obgleich einige Merkmale, Vorteile, Funktionen, Wirkweisen, Ausführungsformen und Weiterbildungen vorstehend nur in Bezug auf einen Aspekt der Vorrichtung beschrieben wurden, können diese entsprechend auch für das Verfahren und einen anderen Aspekt gelten und andersherum.

Kurzbeschreibung der Figuren

Ausführungsbeispiele der vorliegenden Erfindung werden nachstehend in Bezug auf die beiliegende schematische Figur näher erläutert. Es stellt dar:

- Fig. 1 eine schematische Darstellung einer Vorrichtung gemäß einer Ausführungsform der Erfindung;
- Fig. 2 eine schematische Darstellung einer Vorrichtung gemäß einer weiteren Ausführungsform der Erfindung.
- Fig. 3 ein Diagramm zur Darstellung der Basisfrequenz f_{base} und der Modulationsfrequenz f_{mod} mit der die Zwischenspule betrieben wird.

Figurenbeschreibung

Figur 1 zeigt eine Vorrichtung bzw. Anlage 10 zum Herstellen von hochreinem Metallpulver. Die Vorrichtung 10 umfasst eine Schmelzkammer 12 und einen der Schmelzkammer 12 nachgelagerten Verdüsungsturm 14. Die Schmelzkammer 12 ist in der gezeigten Ausführungsform im Betrieb oberhalb des Verdüsungsturms 14 angeordnet. Die Schmelzkammer 12 ist mit dem Verdüsungsturm 14 über eine Düsenanordnung 16 verbunden. Das heißt, ein oberes Ende der Düsenanordnung 16 grenzt an oder erstreckt sich in die Schmelzkammer 12. Ein unteres Ende der Düsenanordnung 16 grenzt an oder erstreckt sich in den Verdüsungsturm 14.

Die Düsenanordnung 16 kann als Bauteil in die Schmelzkammer 12 integriert sein. Die Düsenanordnung 16 kann als Bauteil in die Schmelzkammer 12 und in den Verdüsungsturm 14 integriert sein. Die Düsenanordnung 16 kann als Bauteil in den Verdüsungsturm 14 integriert sein. Die Düsenanordnung 16 kann als separates Bauteil zwischen der Schmelzkammer 12 und dem Verdüsungsturm 14 vorgesehen sein. In der in Figur 1 gezeigten Ausführungsform ist die Düsenanordnung 16 als separates Bauteil zwischen der Schmelzkammer 12 und dem Verdüsungsturm 14 vorgesehen.

In der Schmelzkammer 12 ist eine EIGA-Anordnung (Electrode Induction Melting Inert Gas Atomization) 18 mit einer Induktionsspule 20 vorgesehen, die eine Mehrzahl von Windungen aufweist. Die Induktionsspule 20 ist oberhalb der Düsenanordnung 16 und coaxial zu dieser angeordnet. Die Induktionsspule 20 weist eine auf die Düsenanordnung 16 zu konisch zulaufende Gestalt auf.

In der Schmelzkammer 12 ist des Weiteren ein Materialstab 22 angeordnet, hier ein Materialstab 22 aus einem Metall oder einer Metalllegierung, vorzugsweise aus Ti64-Legierung. Ein der Düsenanordnung 16 zugewandtes Ende des Materialstabs 22 ist zumindest teilweise in der Induktionsspule 20 aufgenommen bzw. erstreckt sich in die Induktionsspule 20 hinein.

Die Induktionsspule 20 ist mit einer Schmelzfrequenz f_{melt} betrieben und dazu ausgebildet, das Ende des darin aufgenommenen Materialstabs 22 anzuschmelzen. Hier ist die Induktionsspule mit einer Schmelzfrequenz f_{melt} von 250 kHz betrieben. Hierdurch wird ein zu verdüsender Schmelzstrahl 24 mit einem Schmelzstrahldurchmesser d_0 von im vorliegenden Beispiel 5 mm erzeugt. Der Schmelzstrahl 24 ist in der gezeigten Ausführungsform zunächst ein im Wesentlichen kontinuierlich zusammenhängender Schmelzstrahl 24. Wie durch die Pfeile 26, 28 angedeutet, ist der Materialstab 22 bewegbar gelagert. So ist der Materialstab 22 um seine Längsachse A drehbar (Pfeil 28), wodurch ein gleichmäßiges Abschmelzen des Materialstabs 22 erreicht werden kann. Zudem ist der Materialstab 22 in Richtung der Düsenanordnung 16 verlagbar (Pfeil 26), sodass der Materialstab 22 kontinuierlich nachgeführt werden kann, sodass während des Verdüungs- bzw. Zerstäubungsprozesses kontinuierlich aufzuschmelzendes (und anschließend zu verdüsendes bzw. zu zerstäubendes) Material nachgeführt werden kann. Zum Bewegen des Materialstabs 22 ist dieser an seinem entgegengesetzten Ende mit einem entsprechenden Aktuator verbunden (nicht gezeigt). Der Materialstab 22 ist koaxial zu der Induktionsspule 20 und koaxial zu der Düsenanordnung 16 angeordnet. Die Achse A stellt die Längs- bzw. Mittelachse der EIGA-Anordnung 18, der Induktionsspule 20, des Materialstabs 22 und der Düsenanordnung 16 dar.

Die Vorrichtung 10 umfasst eine in der Schmelzkammer 12 angeordnete und mit einer Basisfrequenz f_{base} betriebene Zwischenspule 30. Die Basisfrequenz beträgt in der gezeigten Ausführungsform 2000 kHz. Das Frequenzverhältnis F_{BS} der Basisfrequenz f_{base} zu der Schmelzfrequenz f_{melt} ist hier somit 8.

Wie in der Fig. 1 (und auch der Fig. 2) zu erkennen ist, ist die Zwischenspule 30 als separate Zwischenspule 30 zusätzlich zu der Induktionsspule 20 strukturell getrennt von dieser ausgebildet. Die Zwischenspule 30 ist der Induktionsspule 20 nachgelagert und koaxial zu der Induktionsspule 20 ausgerichtet. Somit tritt bzw. fällt der Schmelzstrahl 24 durch die Zwischenspule 30 hindurch entlang der Längsachse A von der Induktionsspule 20 in die Düsenanordnung 16. Die Basisfrequenz f_{base} der Zwischenspule 30 ist so gewählt, dass die Zwischenspule 30 den Schmelzstrahl 24 in einem Bereich zwischen der Induktionsspule 20 und der Düsenanordnung 16 überhitzt und somit ein Abkühlen des Schmelzstrahls 24 vor Eintritt in die Düsenanordnung 16 verhindert oder zumindest reduziert. In der gezeigten Ausführungsform überhitzt die Zwischenspule 30 den Schmelzstrahl 24 über eine Strecke von etwa 50 % der geringsten Distanz

zwischen der Induktionsspule 20, genauer gesagt einem unteren Ende der Induktionsspule 20, und der Düsenanordnung 16, genauer gesagt einer oberen Eintrittsöffnung der Düsenanordnung 16.

Die in Fig. 1 gezeigte Zwischenspule 30 der Vorrichtung 10 umfasst einen Störabschnitt 32 bzw. eine Störzone 32 und eine/n sich daran anschließende/n Überhitzungsabschnitt 34 bzw. Überhitzungszone 34. Der Störabschnitt 32 ist an einem der Induktionsspule 20 zugewandten oberen Endbereich der Zwischenspule 30 ausgebildet, also in einem Bereich, in dem der Schmelzstrahl 24 in die Zwischenspule 30 eintritt. Die Zwischenspule 30 hat in dem Bereich des Störabschnitts 32 einen Innendurchmesser, der gegenüber einem Innendurchmesser des Überhitzungsabschnitts 34 verringert ist. Der Störabschnitt 32 erstreckt sich hier über ca. 15 % der Gesamtlänge der Zwischenspule 30.

Der Basisfrequenz f_{base} , mit der die Zwischenspule 30 betrieben wird, ist eine zusätzliche Modulationsfrequenz f_{mod} von 0,006 kHz aufmodelliert, d.h. die Basisfrequenz f_{base} ist mit dieser Modulationsfrequenz f_{mod} überlagert. Diese Modulationsfrequenz f_{mod} bewirkt, dass der Schmelzstrahl 24 gestört und dadurch gezielt in einzelne Tröpfchen T aufgebrochen wird. Diese Tröpfchen T folgen kontinuierlich aufeinander und bilden so gemeinsam den Schmelzstrahl 24. Der Schmelzstrahl 24 tritt folglich in der gezeigten Ausführungsform bereits in Form von einzelnen Tröpfchen T in die Düsenanordnung 16 ein, durch die sie anschließend zerstäubt werden. Durch die gezielte Einstellung des Schmelzstrahldurchmessers d_0 mittels der Schmelzfrequenz f_{melt} der Induktionsspule 20 und der gezielten Einstellung des Modulationsfrequenz f_{mod} nach Maßgabe von f_{melt} bzw. dem Schmelzstrahldurchmesser d_0 und der Schmelzgeschwindigkeit kann die Vorrichtung 10 die Tröpfchengröße gezielt beeinflussen und einstellen. Hierdurch können die Pulvereigenschaften gezielt beeinflusst werden. Die Basisfrequenz f_{base} und die Modulationsfrequenz f_{mod} sind in Fig. 3 schematisch dargestellt.

Nach dem Zerstäuben des Schmelzstrahls 24 (also der Tröpfchen T) kühlen die zerstäubten Tröpfchen in dem Verdüsungsturm 14 ab und erstarren dort zu Pulver.

Fig. 2 zeigt eine Vorrichtung bzw. Anlage 100 zum Herstellen von hochreinem Metallpulver gemäß einer weiteren Ausführungsform. Die Vorrichtung 100 ähnelt im Wesentlichen der Vorrichtung 10 aus Fig. 1.

Im Unterschied zu der Vorrichtung 10 der Fig. 1, umfasst die Zwischenspule 130 der Vorrichtung 100 der Fig. 2 keine unterschiedlichen Abschnitte oder Zonen, sondern ist über ihre gesamte Länge durchgehend als Überhitzungszone 134 ausgebildet. Dennoch kann auch in dieser Ausführungsform einer Basisfrequenz f_{base} , mit der die Zwischenspule 130 zum Überhitzen

des Schmelzstrahls (in Fig. 2 nicht dargestellt) betrieben wird, optional eine Modulationsfrequenz f_{mod} aufmoduliert sein. Es können dieselben oder andere Frequenzen vorgesehen sein wie in der Ausführungsform der Fig. 1.

Ein weiterer Unterschied zwischen der Vorrichtung 100 der Fig. 2 und der Vorrichtung 10 der Fig. 1 ist, dass sich die Zwischenspule 130 der Vorrichtung 100 abschnittsweise in die Düsenanordnung 1 hinein erstreckt. Insbesondere ist hier zumindest eine letzte, dem Verdüsungsturm 14 zugewandte Windung der Zwischenspule 130 innerhalb der Düsenanordnung 130 angeordnet.

In der Ausführungsform der Fig. 2 deckt die Zwischenspule 130 ca. 80 % eines geringsten Abstandes zwischen einer letzten, der Düsenanordnung 16 zugewandten Windung der Induktionsspule 130 und einer oberen Eintrittsöffnung der Düsenanordnung 16 ab und überhitzt den Schmelzstrahl in diesem Bereich. Die Zwischenspule 130 erstreckt sich zudem in dieser Ausführungsform über ca. 77 % der Strecke des geringsten Abstandes zwischen der letzten, der Düsenanordnung 1 zugewandten Windung der Induktionsspule 20 und einem Abschnitt mit dem geringsten Innendurchmesser der Düsenanordnung 16 ab. Somit überhitzt die Zwischenspule 130 den Schmelzstrahl auch noch in einem Eintrittsbereich der Düsenanordnung 16.

Fig. 3 zeigt ein schematisches Diagramm einer Ausführungsform zur Veranschaulichung der Frequenzen, mit der die Zwischenspule 30, 130 betrieben wird. So veranschaulicht das Diagramm die Basisfrequenz f_{base} und die aufmodulierte Modulationsfrequenz f_{mod} über die Zeitachse.

Bezugszeichenliste

10	Vorrichtung
12	Schmelzkammer
14	Verdüsungsturm
16	Düsenanordnung
18	EIGA-Anordnung
20	Induktionsspule
22	Materialstab
24	Schmelzstrahl
26	Bewegungsrichtung
28	Bewegungsrichtung
30	Zwischenspule
32	Störabschnitt
34	Überhitzungsabschnitt
d_0	Schmelzstrahldurchmesser
A	Längsachse
T	Tröpfchen

Ansprüche

1. Vorrichtung (10, 100) zum Herstellen von Metallpulver, wobei die Vorrichtung (10, 100) umfasst:

eine Schmelzkammer (12),

einen der Schmelzkammer (12) nachgelagerten Verdüsungsturm (14),

eine Düsenanordnung (16) zum Verdüsen eines Schmelzstrahls (24), über die die Schmelzkammer (12) mit dem Verdüsungsturm (14) verbunden ist,

eine in der Schmelzkammer (12) angeordnete und mit einer Schmelzfrequenz f_{melt} betriebene Induktionsspule (20), die dazu ausgebildet ist, einen zumindest abschnittsweise darin aufgenommenen Materialstab (22) anzuschmelzen, um den zu verdüsenden Schmelzstrahl (24) zu erzeugen,

eine in der Schmelzkammer (12) angeordnete und mit einer Basisfrequenz f_{base} betriebene separate Zwischenspule (30, 130), die der Induktionsspule (20) nachgelagert und coaxial zu der Induktionsspule (20) ausgerichtet ist, wobei die Zwischenspule (30, 130) dazu ausgebildet ist, den Schmelzstrahl (24) in einem Bereich zwischen der Induktionsspule (20) und der Düsenanordnung (16) zu überhitzen,

wobei für ein Frequenzverhältnis F_{BS} der Basisfrequenz f_{base} zu der Schmelzfrequenz f_{melt} gilt:

$$1 \leq F_{\text{BS}} = f_{\text{base}}/f_{\text{melt}} \leq 500.$$

2. Vorrichtung (10, 100) nach Anspruch 1, wobei die Zwischenspule (30, 130) derart konfiguriert ist, dass eine Modulationsfrequenz f_{mod} auf die Basisfrequenz f_{base} aufmoduliert ist.

3. Vorrichtung (10, 100) nach Anspruch 2, wobei die Zwischenspule (30, 130) einen Störabschnitt (32) umfasst, der an einem der Induktionsspule (20) zugewandten Endbereich der Zwischenspule (30, 130) ausgebildet ist, wobei die Zwischenspule (30, 130) in dem Störabschnitt (32) einen verringerten Innendurchmesser aufweist.

4. Vorrichtung (10, 100) nach einem der vorangehenden Ansprüche, wobei
die Schmelzfrequenz f_{melt} zwischen 10 kHz und 500 kHz beträgt, vorzugsweise zwischen 100 kHz und 400 kHz, bevorzugt zwischen 200 kHz und 300 kHz; und/oder
die Basisfrequenz f_{base} zwischen 100 kHz und 5000 kHz beträgt, vorzugsweise zwischen 200 kHz und 4500 kHz, bevorzugt zwischen 500 kHz und 4000 kHz, weiter bevorzugt zwischen 1000 kHz und 3000 kHz, noch weiter bevorzugt zwischen 1500 kHz und 2500 kHz; und/oder

die Modulationsfrequenz f_{mod} zwischen 0,001 kHz und 5 kHz beträgt, vorzugsweise zwischen 0,005 kHz und 4,5 kHz, bevorzugt zwischen 0,01 kHz und 4 kHz, weiter bevorzugt zwischen 0,05 kHz und 3,5 kHz, noch weiter bevorzugt zwischen 0,1 kHz und 3 kHz, noch weiter bevorzugt zwischen 1 kHz und 2,5 kHz.

5. Vorrichtung (10, 100) nach einem der vorangehenden Ansprüche, wobei die Zwischenspule (30, 130) eine zylindrische Gestalt mit vorzugsweise überwiegend konstantem Durchmesser hat.

6. Vorrichtung (10, 100) nach einem der vorangehenden Ansprüche, wobei eine Länge der Zwischenspule (30, 130) größer als das Vierfache des geringsten Innendurchmessers der Düsenanordnung (16) ist, vorzugsweise größer als das Fünffache, bevorzugt größer als das Sechsfache.

7. Vorrichtung (10, 100) nach einem der vorangehenden Ansprüche, wobei die Zwischenspule (30, 130) dazu ausgebildet ist, den Schmelzstrahl (24) in wenigstens 70 % einer durch den geringsten Abstand zwischen der Düsenanordnung (16) und der Induktionsspule (20) definierten Strecke zu überhitzen, vorzugsweise wenigstens 80 %, bevorzugt wenigstens 90 %.

8. Vorrichtung (10, 100) nach einem der vorangehenden Ansprüche, wobei die Düsenanordnung (16) eine Lavaldüse umfasst.

9. Vorrichtung (10, 100) nach einem der vorangehenden Ansprüche, wobei die Düsenanordnung (16) eine Ringdüse umfasst.

10. Vorrichtung (10, 100) nach zumindest den Ansprüchen 8 und 9,

wobei die Lavaldüse derart ausgebildet und angeordnet ist, dass der Schmelzstrahl (24) durch die Lavaldüse von der Schmelzkammer (12) in den Verdüsungsturm (14) tritt und ein Zusatzgas durch die Lavaldüse von der Schmelzkammer (12) in den Verdüsungsturm (14) strömt, wobei das Zusatzgas den Schmelzstrahl (24) beim Durchströmen der Lavaldüse beschleunigt, und

wobei die Ringdüse der Lavaldüse derart nachgelagerte und/oder derart im Bereich der Lavaldüse angeordnet ist, dass durch die Ringdüse ein zusätzliches Verdüsungsgas von einer Verdüsungsgasquelle in den Verdüsungsturm (14) strömt, wodurch in einem Bereich einer an den Verdüsungsturm (14) angrenzenden Austrittsöffnung der Lavaldüse ein lokal reduzierter

Gegendruck erzeugbar ist, sodass für ein Druckverhältnis D zwischen einem Vordruck P_0 der Schmelzkammer (12) und dem lokal reduzierten Gegendruck P_2 gilt:

$$D = P_0/P_2 \geq 2.$$

11. Verfahren zum Herstellen von Metallpulver, das die Schritte umfasst:

- Erzeugen eines zu verdüsenden Schmelzstrahls (24) durch Anschmelzen eines Materialstabs (22) mittels einer den Materialstab (22) zumindest abschnittsweise umgebenden Induktionsspule (20) in der Schmelzkammer (12), wobei die Induktionsspule (20) mit einer Schmelzfrequenz f_{melt} betrieben wird;

- Überhitzen des Schmelzstrahls (24) in einem Bereich zwischen der Induktionsspule (20) und einer Düsenanordnung (16) mittels einer der Induktionsspule (20) nachgelagerten und koaxial zu der Induktionsspule (20) ausgerichteten separaten Zwischenspule (30, 130), wobei die Zwischenspule (30, 130) mit einer Basisfrequenz f_{base} betrieben wird, und wobei für ein Frequenzverhältnis F_{BS} der Basisfrequenz f_{base} zu der Schmelzfrequenz f_{melt} gilt: $1 \leq F_{\text{BS}} = f_{\text{base}}/f_{\text{melt}} \leq 500$; und

- Verdüsen des überhitzten Schmelzstrahls (24) mittels der Düsenanordnung (16), wobei die Schmelzkammer (12) über die Düsenanordnung (16) mit einem Verdüsungsturm (14) verbunden ist.