

19) BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENTAMT

12) Patentschrift
11) DE 31 26 191 C 2

51) Int. Cl. 3:
G 21 G 4/02

21) Aktenzeichen: P 31 26 191.4-33
22) Anmeldetag: 3. 7. 81
43) Offenlegungstag: 20. 1. 83
45) Veröffentlichungstag
der Patenterteilung: 14. 7. 83

DE 31 26 191 C 2

Innerhalb von 3 Monaten nach Veröffentlichung der Erteilung kann Einspruch erhoben werden

73) Patentinhaber:
Kernforschungsanlage Jülich GmbH, 5170 Jülich, DE

72) Erfinder:
Fassbender, Josef, Dr.; Meister, Gerhard, Dr., 5170
Jülich, DE

56) Im Prüfungsverfahren entgegengehaltene
Druckschriften nach § 44 PatG:

DE-AS 15 89 431
DE-AS 12 89 923

54) Flüssigmetall-Target für eine Spallationsneutronenquelle

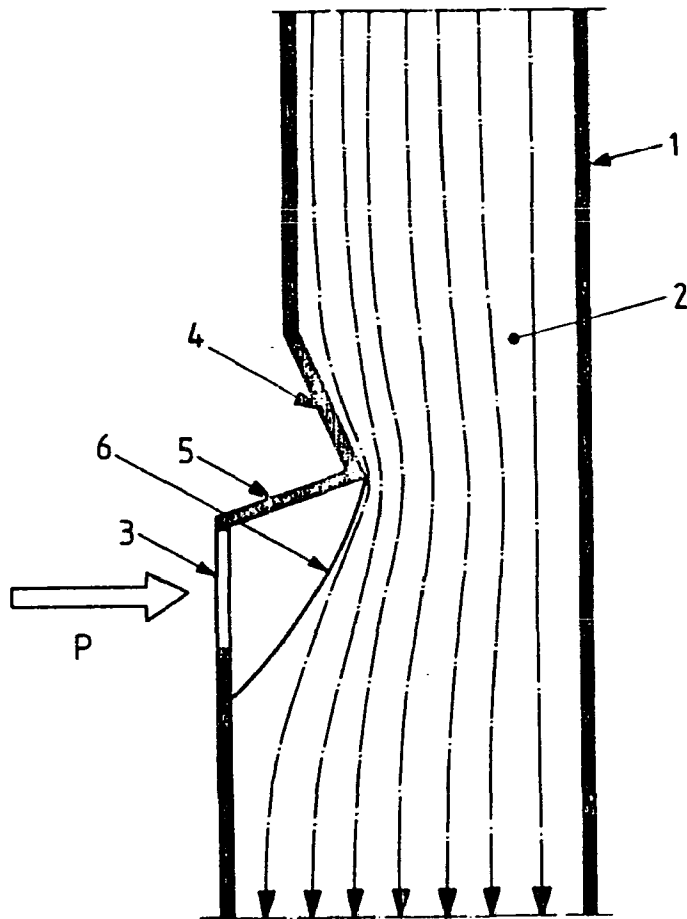


Fig. 1

Patentansprüche:

1. Target für eine Spallationsneutronenquelle, das aus flüssigem Metall besteht, welches im Kreislauf in einem Kanal mit darin angeordneter Umwälzpumpe sowie einem Wärmetauscher umläuft, wobei ein zur Freisetzung energiereicher Neutronen vorgesehener Protonenstrahl hoher Energie durch eine im Kanal angebrachte, unabgedeckte Eintrittsöffnung auf eine freie Oberfläche des flüssigen Metalls auftrifft und wobei der Kanal mit einer Heizvorrichtung zum Aufheizen des strömenden Metalls auf eine oberhalb seiner Schmelztemperatur liegende Betriebstemperatur vor der Inbetriebnahme der Neutronenquelle in Verbindung steht, dadurch gekennzeichnet, daß der Kanal (1) im Bereich der senkrecht oder nahezu senkrecht angeordneten Protonenstrahl-Eintrittsöffnung (3) eine solche Formgebung aufweist, daß der Flüssigkeitsstrom (2) eine nahezu parallel zur Eintrittsöffnung verlaufende freie Oberfläche (6) ausbildet.

2. Target nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß der Kanal (1) mit einem Vorratsbehälter mit einstellbarem Flüssigkeitspegel verbunden ist.

3. Target nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß eine den Austritt von metallischer Flüssigkeit aus der Eintrittsöffnung (3) für den Protonenstrahl (P) beim nicht stationären Betrieb verhindernde fernbedienbare Abdeckung der Eintrittsöffnung (3) vorgesehen ist.

4. Target nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, daß unterhalb der Eintrittsöffnung (3) für den Protonenstrahl (P) eine mit dem Kreislauf für die metallische Flüssigkeit (2) oder dem Vorratsbehälter in Verbindung stehende Auffangvorrichtung für etwa aus der Eintrittsöffnung (3) für den Protonenstrahl (P) austretendes flüssiges Metall (2) vorgesehen ist.

5. Target nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, daß der Kanal (1) in Strömungsrichtung vor der Protonenstrahl-Eintrittsöffnung (3) eine solche Querschnittsverengung (4) aufweist, daß sich der anschließend an die Einschnürung wieder expandierende Flüssigkeitsstrom (2) erst jenseits der Eintrittsöffnung (3) wieder an die Kanalwand anlegt.

6. Target nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, daß der Querschnitt des Kanals (1) etwa von der senkrecht zur Strömungsrichtung verlaufenden oberen Kante der Eintrittsöffnung (3) für den Protonenstrahl (P) ab, von der das Flüssigmetall (2) abströmt, gegenüber dem Querschnitt des Teils des Kanals (1), in dem das Flüssigmetall auf den Bereich des Kanals (1), in dem sich die Eintrittsöffnung für den Protonenstrahl (P) befindet, zuströmt, erweitert ist.

7. Target nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, daß die Verbreiterung des Kanals (1) bis zu der in dem Strömungskreislauf liegenden Pumpe reicht.

8. Target nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, daß die Verbreiterung des Kanals (1) auf eine Strecke begrenzt ist, die zum Auffangen von in Strömungsrichtung aus der Eintrittsöffnung (3) für den Protonenstrahl (P) eventuell austretendem flüssigem Metall (2) hinreichend ist.

9. Target nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß der Kanal

(1) eine auf den Flüssigkeitsstrom (2) Zentrifugalkräfte hervorrufende Krümmung aufweist, durch die sich im Bereich der Eintrittsöffnung (3) für den Protonenstrahl (P) eine stabile freie Oberfläche des Flüssigkeitsstrahls ausbildet, wobei die Eintrittsöffnung (3) für den Protonenstrahl (P) an der Innenwandung der Kanalkrümmung vorgesehen ist.

10. Target nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß an beiden, parallel zur Strömungsrichtung verlaufenden Rändern der Eintrittsöffnung (3) für den Protonenstrahl (P) die Beeinflussung der Strömung im Bereich der freien Oberfläche ausschließende, ein Mehrfaches der laminaren Grenzschicht betragende Leitprofile (9, 10) vorgesehen sind.

11. Target nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, daß der Kanal (1) im Bereich der Krümmung gegenüber der Waagerechten eine Neigung aufweist.

12. Target nach einem der Ansprüche 1 bis 11, dadurch gekennzeichnet, daß an der der Eintrittsöffnung (3) für den Protonenstrahl (P) gegenüberliegenden Wandung des Kanals (1) ein ebenfalls als Target verwendbarer, mit einem Kühlsystem in Berührung stehender Feststoffkörper (11) mit einer der Eintrittsöffnung (3) für den Protonenstrahl (P) zugewandten Fläche von mindestens dem Querschnitt des Protonenstrahls (P) angeordnet ist.

13. Target nach einem der Ansprüche 1 bis 11, dadurch gekennzeichnet, daß ein der Eintrittsöffnung (3) für den Protonenstrahl (P) gegenüberliegender Teil der Wandung des Kanals (1) von einem ebenfalls als Target verwendbaren, mit einem Kühlsystem (12) in Berührung stehenden Festkörper (11) mit einer dem Protonenstrahl (P) zugewandten Fläche von mindestens dem Querschnitt des Protonenstrahls (P) gebildet wird.

14. Target nach Anspruch 13, dadurch gekennzeichnet, daß die Abmessungen des Feststoffkörpers (11) so bemessen sind, daß die bei der Spallation entstehende Wärme durch das zur Kühlung des Feststoffkörpers (11) vorgesehene Kühlsystem (12) bis auf eine Temperatur unterhalb der Temperatur abgeführt wird, bei der das Material des Feststoffkörpers (11) schmilzt und/oder in der Metallflüssigkeit (2) in Lösung geht.

15. Target nach einem der Ansprüche 12 bis 14, dadurch gekennzeichnet, daß die Querschnittsmessung des Kanals (1) in Richtung des Protonenstrahls (P) von der freien Oberfläche (6) des Flüssigkeitsstroms (2) aus gemessen um den Teil des Feststoffkörpers (11), der bei der Spallation der Tiefe nach zur Wirkung kommt, verringert ist.

16. Target nach einem der Ansprüche 12 bis 15, dadurch gekennzeichnet, daß der Feststoffkörper (11) aus einem neutronenvervielfachenden Material wie Uran besteht.

Die Erfindung bezieht sich auf ein Target für eine Spallationsneutronenquelle, das aus flüssigem Metall besteht, welches im Kreislauf in einem Kanal mit darin angeordneter Umwälzpumpe sowie einem Wärmetauscher umläuft, wobei ein zur Freisetzung energiereicher Neutronen vorgesehener Protonenstrahl hoher Energie durch eine im Kanal angebrachte, unabgedeckte

Eintrittsöffnung auf eine freie Oberfläche des flüssigen Metalls auftrifft und wobei der Kanal mit einer Heizvorrichtung zum Aufheizen des strömenden Metalls auf eine oberhalb seiner Schmelztemperatur liegende Betriebstemperatur vor der Inbetriebnahme der Neutronenquelle in Verbindung steht.

Spallationsneutronenquellen sind Vorrichtungen, bei denen ein Protonenstrahl hoher Energie (Größenordnung: 1 GeV) zur Erzeugung von Neutronen in eine geeignete Substanz eingeschlossen wird. Der Protonenstrahl wird von einem Beschleuniger erzeugt, dessen Beschleunigungsstrecke unter Hochvakuum steht. Um die angestrebten hohen Neutronenquellstärken zu erreichen, werden Protonenenergien und Protonenströme benötigt, bei denen innerhalb eines Volumens von einigen 100 cm³ des Targetmaterials Leistungen in der Größenordnung von einigen MW erzeugt werden.

Targets für Spallationsneutronenquellen sind in verschiedener Ausführungsform bekannt. Sie können als Feststoff-Targets, Verdampfungs-Targets oder Flüssigmetall-Targets ausgebildet sein. Infolge der hohen Protonen-Energie, die zur Erzeugung von Spallations-Neutronen erforderlich ist, liegt eines der Probleme darin, eine hinreichende Wärmeabfuhr aus dem Bereich der Wechselwirkung zwischen Protonenstrahl und dem Target an der Stelle, an der der Protonenstrahl auf das Target auftrifft, zu gewährleisten. Bei Feststoff-Targets wird die Wärme durch Wärmeleitung bei unterhalb des Schmelzpunktes des Targetmaterials liegenden Temperaturen abgeführt. Das hat zur Folge, daß die abführbare Wärmemenge begrenzt ist. Um diesem Nachteil zu begegnen, ist daher auch schon eine Targetanordnung für Spallationsneutronenquellen vorgeschlagen worden, bei der kontinuierlich Targetmaterial dadurch am Auftreffpunkt des Protonenstrahls vorbeigeführt wird, daß das Targetmaterial am Umfang eines rotierenden, innen gekühlten Rades angeordnet ist (vgl. DE-OS 28 50 069). Platzbedarf und Gewicht einer derartigen Konstruktion sind jedoch erheblich, da der notwendige Raddurchmesser bei etwa 2,5 m liegt. Nachteilig ist ferner, daß das Kühlmittel zur Kühlung des Targets über Rotationskupplungen, die an der Radwelle angeordnet sind, zu- und abgeführt werden muß.

In Betracht gezogen wurden auch schon sogenannte Verdampfungs-Targets, bei denen die erzeugte Wärme ganz oder zum Teil durch Verdampfung von Targetmaterial abgeführt wird. Problematisch ist hierbei jedoch die Entwicklung von Metaldampf, der vom Protonenbeschleuniger ferngehalten werden muß.

Zur Lösung des Problems der Abführung der beim Betreiben einer Spallationsneutronenquelle entstehenden Wärme hat man daher auch schon vorgeschlagen, Targets aus (bei Betriebstemperatur) flüssigem Metall (wie Blei oder Blei-Wismuth-Entektikum) zu verwenden, weil dabei die Wärme durch (Zwangs)-Konvektion an ein Kühlsystem abgeführt werden kann. So gehört zum bekannten Stand der Technik eine Ausführungsform, bei der ein Flüssigmetall-Strahl durch ein senkrecht stehendes Rohr von oben nach unten strömt. Dabei wird der Protonenstrahl senkrecht von oben in die Flüssigkeitssäule eingeschossen. Targets dieses Typs sind z. B. in den Auslegeschriften Nr. 15 89 431 und 12 89 923 beschrieben. Vorteilhaft ist dabei zwar, daß ein materielles Fenster zwischen Protonenstrahl und Flüssigmetall nicht erforderlich ist, nachteilig ist jedoch, daß der Protonenbeschleuniger entweder vertikal angeordnet oder aber bei horizontaler Anordnung der Strahl des Protonenbeschleunigers um 90° umgelenkt

werden muß. Wegen der großen Baulänge des Beschleunigers im einen Fall und wegen der Schwierigkeit der Umlenkung hochenergetischer Strahlen um große Winkel im andern Fall entstehen dadurch nicht unerhebliche bauliche Probleme.

Der Erfindung liegt daher die Aufgabe zugrunde, ein im wesentlichen durch einen Flüssigmetallstrom (in einem Strömungskanal) gebildetes Target für eine Spallationsneutronenquelle zu schaffen, bei dem der Protonenstrahl ohne Umlenkung horizontal oder nahezu horizontal (d. h. bis etwa 45° geneigt) auf das Target auftrifft, ohne daß es notwendig ist, eine die Eintrittsöffnung für den Protonenstrahl abdeckende Scheibe vorzusehen. Die freie Oberfläche des Flüssigmetallstromes, auf die der Protonenstrahl auftrifft und die im wesentlichen senkrecht zum Protonenstrahl verlaufen soll, muß daher im wesentlichen vertikal verlaufen oder doch eine beachtliche Vertikalkomponente aufweisen. Dabei soll die Mächtigkeit des Flüssigmetallstroms in Protonenstrahlrichtung ausreichen, so daß die Protonenenergie vollständig oder zu wesentlichen Teilen innerhalb des flüssigen Metalls absorbiert wird.

Die der Erfindung zugrunde liegende Aufgabe wird bei einem Target für eine Spallationsneutronenquelle der eingangs bezeichneten Art gemäß der Erfindung dadurch gelöst, daß der Kanal (1) im Bereich der senkrecht oder nahezu senkrecht angeordneten Protonenstrahl-Eintrittsöffnung (3) eine solche Formgebung aufweist, daß der Flüssigkeitsstrom (2) eine nahezu parallel zur Eintrittsöffnung verlaufende freie Oberfläche (6) ausbildet.

Gemäß der Erfindung wird also durch Ausnutzung hydrodynamischer Kräfte eine Vertikalkomponente des Flüssigkeitsspiegels im Bereich der Eintrittsöffnung erzwungen, wobei gleichzeitig die Tatsache ausgenutzt wird, daß der Flüssigmetallstrom im Bereich der Wechselwirkung mit dem Protonenstrahl ohnehin eine solche Geschwindigkeit haben muß, daß die durch Energieabsorption bedingte Temperaturerhöhung unterhalb von Werten bleibt, bei denen der Dampfdruck der Flüssigkeit in die Nähe der Hochvakuum-Druckwerte kommt.

Die Erfindung nutzt ferner die Erkenntnis aus, daß wegen des äußeren Vakuums im Bereich der Protonenstrahl-Eintrittsöffnung eine Reibung zwischen Flüssigkeitsstrom und umgebendem Gas entfällt. An der freien Flüssigkeitsoberfläche kann es daher auch nicht zur Bildung von Wirbeln kommen, die die Ausbildung einer gleichbleibenden freien Oberfläche der metallischen Flüssigkeit im Auftreffbereich des Protonenstrahls beeinträchtigen könnten.

Unter dem Einfluß der zur Wirkung gebrachten Kräfte wird hinter der von der Eintrittsebene für den Protonenstrahl gebildeten Ebene eine ebenfalls senkrechte oder nahezu senkrechte freie Flüssigmetalloberfläche erzeugt. Diese Oberfläche ist bei dem Target gemäß der Erfindung eine isobare Fläche, auf der überall der Außendruck herrscht. Unter den gegebenen Bedingungen ist dieser Außendruck gleich dem Vakuumdruck des Protonen-Beschleunigers. Dabei wird also durch die zur Wirkung kommenden Kräfte im stationären Betrieb die Differenz zwischen dem Außendruck und dem Druck innerhalb des Flüssigmetalls aufrechterhalten. Die sich dabei im Bereich der Eintrittsöffnung für den Protonenstrahl ausbildende, nahezu senkrechte freie Oberfläche der Flüssigmetall-Strömung ermöglicht den Einschub eines horizontalen

oder nahezu horizontalen Protonenstrahls, ohne daß es erforderlich ist, während des stationären Betriebes eine Scheibe zur Abdeckung der Eintrittsöffnung für den Protonenstrahl vorzusehen. Beim Betreiben des Targets gemäß der Erfindung muß dafür Sorge getragen werden, daß die Strömungsgeschwindigkeit im Kanal so groß ist, daß im Bereich der Wechselwirkung zwischen Protonenstrahl und dem Flüssigkeitsmetall die Temperatur des Flüssigmetalls die Verdampfungstemperatur nicht erreicht. Bei einem Druck von 10^{-6} torr beträgt beispielsweise, wenn Blei als Flüssigmetall verwendet wird, die Spanne zwischen Verdampfungs- und Schmelztemperatur etwa 100 K. Daraus ergibt sich, daß bei Hochleistungstargets die Mindest-Strömungsgeschwindigkeit in der Größenordnung von einigen Metern pro Sekunde liegen muß.

Um beim Betreiben der Spallationsneutronenquelle ständig eine optimale Füllung des in dem Kanalkreislauf des Targets geführten Flüssigkeitsstroms zu erreichen, besteht eine zweckmäßige Ausführungsform des Targets gemäß der Erfindung darin, daß der Kanal mit einem Vorratsbehälter mit einstellbarem Flüssigkeitspegel verbunden ist.

Es ist ferner zweckmäßig, für die Eintrittsöffnung für den Protonenstrahl eine fernbedienbare Abdeckung vorzusehen, damit während der Dauer, die benötigt wird, um dem Flüssigmetall die für den Betriebszustand erforderliche Mindestgeschwindigkeit zu erteilen, der Austritt von Flüssigmetall aus der Eintrittsöffnung des Kanals für den Protonenstrahl verhindert wird. Dieser Verschuß wird geöffnet, sobald der vorgesehene Durchsatz erreicht und der Protonenbeschleuniger eingeschaltet wird.

Da während des Betriebes der Spallationsneutronenquelle Störungen des Flüssigkeitsdurchsatzes auftreten können, die dazu führen könnten, daß aus der Eintrittsöffnung für den Protonenstrahl in unerwünschter Weise Flüssigmetall austritt, besteht eine vorteilhafte Weiterausgestaltung des Targets gemäß der Erfindung darin, daß unterhalb der Eintrittsöffnung für den Protonenstrahl eine mit dem Kreislauf für die metallische Flüssigkeit oder dem gegebenenfalls vorgesehenen Vorratsbehälter in Verbindung stehende Auffangvorrichtung für etwa aus der Eintrittsöffnung für den Protonenstrahl austretendes flüssiges Metall vorgesehen ist. Diese Auffangvorrichtung ist zweckmäßig so ausgestaltet, daß sie mit einer Heizung verbunden ist, durch die das Metall im flüssigen Zustand erhalten bleibt und über eine in einer mit dem Kreislauf oder dem Vorratsbehälter verbundenen Leitung angeordneten Pumpe in den Kreislauf oder den Vorratsbehälter zurückbefördert wird.

Eine sehr vorteilhafte Ausgestaltung des Targets gemäß der Erfindung besteht darin, daß oberhalb der senkrecht zur Strömungsrichtung verlaufenden Kante der Eintrittsöffnung für den Protonenstrahl, die von der Strömung angeströmt wird, eine sich mindestens über die Länge der Kante erstreckende, eine Einschnürung der Strömung von senkrecht zur Strömungsrichtung mindestens der Breite und parallel zur Strömungsrichtung mindestens der Länge der Eintrittsöffnung für den Protonenstrahl entsprechenden Abmessungen hervorrufoende Querschnittsverengung des Kanals vorgesehen ist. Die Verengung des Strömungskanals hat eine lokale Vergrößerung der Strömungsgeschwindigkeit mindestens über den Bereich der Eintrittsöffnung für den Protonenstrahl hinweg und infolgedessen eine Absenkung des lokalen Drucks innerhalb der Flüssigkeit in

diesem Bereich zur Folge. Dabei ist nach einer bevorzugten Weiterausgestaltung dieser Ausführungsform des Targets gemäß der Erfindung der Querschnitt des Kanals etwa von der senkrecht zur Strömungsrichtung verlaufenden Kante der Eintrittsöffnung für den Protonenstrahl ab, von der das Flüssigmetall von der Eintrittsöffnung abströmt, gegenüber dem stromaufwärts liegenden Teil des Kanals, erweitert. Die Folge der in Strömungsrichtung hinter der Eintrittsöffnung für den Protonenstrahl vorgesehenen Erweiterung des Strömungsquerschnittes ist eine lokale Ablösung des Flüssigmetall-Stroms von der Wand. Zwar expandiert der Flüssigkeitsstrahl im erweiterten Teil des Strömungsquerschnittes quer zur Strömungsrichtung. Das geschieht jedoch in der Weise, daß der Flüssigkeitsstrahl sich erst nach einer von dem Maße der Erweiterung und der Strömungsgeschwindigkeit abhängigen Strecke wieder an die Wand des Kanals anlegt. Bei dieser Ausführungsform des Targets gemäß der Erfindung entsteht somit hinter der engsten Stelle der Strömung eine Kanalzone, innerhalb derer die Strömung keine sie vollständig umgreifende Wandung benötigt. An dieser Stelle in der Kanalwandung ist also die Eintrittsöffnung für den Protonenstrahl vorgesehen.

Die Erweiterung des Kanals kann aus strömungstechnischen Gründen bis zu der im Strömungskreislauf liegenden Pumpe reichen. Doch kann sie auch auf eine Strecke begrenzt sein, die zum Auffangen von in Strömungsrichtung aus der Eintrittsöffnung für den Protonenstrahl anderenfalls austretendem flüssigen Metall hinreichend ist.

Bei der Ausführungsform des Targets gemäß der Erfindung, bei der eine Querschnittsverengung des Kanals senkrecht zur Strömungsrichtung vorgesehen ist, kann die Kanalführung entsprechend dem jeweiligen Bedarfsfall senkrecht sein, sie kann auch horizontal verlaufen oder gegenüber der Horizontalen geneigt sein.

Eine andere Ausführungsform des Targets gemäß der Erfindung besteht darin, daß der Kanal eine in dem Flüssigkeitsstrom Zentrifugalkräfte hervorrufende Krümmung aufweist, durch die sich im Bereich der Eintrittsöffnung für den Protonenstrahl eine stabile freie Oberfläche des Flüssigkeitsstrahls ausbildet, wobei die Eintrittsöffnung für den Protonenstrahl in der Innenwandung der Kanalkrümmung vorgesehen ist. Dabei ist also der Kanal für die Flüssigkeitsströmung im Bereich der Eintrittsöffnung für den Protonenstrahl ein gekrümmtes Rohrstück, das in Richtung des Krümmungsradius nach außen und von der Eintrittsöffnung weg gerichtete Zentrifugalkräfte hervorruft. In diesem Fall heben bei hinreichend großer Strömungsgeschwindigkeit die Zentrifugalkräfte im gekrümmten Teil des Kanals die Gravitations- und sonstigen auf die strömende Flüssigkeit einwirkenden Druckkräfte so weit auf, daß die Flüssigkeit aus der Eintrittsöffnung für den Protonenstrahl nicht austreten kann. Bemessung und Formgebung der Eintrittsöffnung für den Protonenstrahl sind unter der Berücksichtigung, daß die freie Flüssigkeitsoberfläche eine solche Form annimmt, daß die Resultierende aus der Gravitations- und der Zentrifugalkraft in jedem Punkt senkrecht auf der freien Flüssigkeitsoberfläche steht, so gewählt, daß der Teil der freien Oberfläche, auf den der Protonenstrahl auftrifft, nahezu senkrecht steht.

Wesentlich erleichtert wird die Ausbildung einer gleichbleibenden freien Oberfläche der strömenden Flüssigkeit im Bereich der Eintrittsöffnung für den

Protonenstrahl im stationären Betrieb, wenn nach einer zweckmäßigen Weiterausgestaltung des Targets gemäß der Erfindung an der Eintrittsöffnung für den Protonenstrahl ein sich über die Breite der Kante erstreckendes, in die Strömung hineinragendes Strömungsleitprofil vorgesehen ist, durch das zusätzlich eine Einschnürung des metallischen Flüssigkeitsstromes hervorgerufen wird. An der stromabwärts gelegenen, senkrecht zur Strömungsrichtung verlaufenden Kante der Eintrittsöffnung für den Protonenstrahl ist die Kanalwandung zweckmäßig so geformt und/oder ein so geformtes Strömungsleitprofil vorgesehen, daß sich die Flüssigkeit nach Durchlaufen des Bereiches der Eintrittsöffnung für den Protonenstrahl erst hinter der stromabwärts gelegenen Kante an die Wandung des Kanals anlegt. Dadurch wird zugleich der Tatsache Rechnung getragen, daß sich neben den infolge der Krümmung des Kanals hervorgerufenen Zentrifugalkräften auch Wandreibungseffekte einstellen. Es ist also in vorteilhafter Weise möglich, beide in den Fig. 1 und 2 dargestellten Ausführungsformen des Targets gemäß der Erfindung in der Weise miteinander zu kombinieren, daß neben einer Querschnittsverengung des Kanals zugleich auch eine Krümmung im Bereich der Eintrittsöffnung für den Protonenstrahl vorgesehen ist, falls dies gewünscht wird.

Wegen der Haftung der Flüssigkeit an der Wand des Kanals sind dort die Zentrifugalkräfte parallel und senkrecht zur Wand gleich Null; sie steigen erst mit zunehmender Entfernung von der Wandung, und zwar in dem Maße an, wie auch die Strömungsgeschwindigkeit ansteigt. Dieser Bereich entspricht etwa der Dicke der laminaren Grenzschicht der Strömung. Auftretende Wandeffekte werden dadurch kompensiert, daß an beiden, parallel zur Strömungsrichtung verlaufenden Rändern der Eintrittsöffnung für den Protonenstrahl die Beeinflussung der Strömung im Bereich der freien Oberfläche ausschließende, ein Mehrfaches der laminaren Grenzschicht betragende Leitprofile vorgesehen sind.

Dem jeweiligen Bedarfsfall entsprechend ist es möglich, den Kanal im Bereich der Krümmung so zu führen, daß er gegenüber der Waagerechten eine beliebige Neigung aufweist.

Wird der Kreislauf des Flüssigmetalls nicht ausschließlich in einer horizontalen Ebene geführt, so ist es zweckmäßig, die Eintrittsöffnung für den Protonenstrahl an oder nahe der höchsten Stelle des Kreislaufes anzuordnen, um den hydrostatischen Druck in der Flüssigkeit an dieser Stelle möglichst klein zu halten.

Es ist ferner zweckmäßig, die Tiefe des Kanals für den Flüssigkeitsstrom in Richtung des Protonenstrahls im Bereich der Eintrittsöffnung für den Protonenstrahl bei dieser Ausführungsform des Targets gemäß der Erfindung mindestens entsprechend der Reichweite der Protonen in dem verwendeten Metall zu wählen. Die Reichweite ist abhängig von der Energie des Strahls. Die in Frage kommenden Werte liegen etwa zwischen 30 cm und 50 cm.

Nun ist aber die lokale Wärmeproduktionsdichte in der strömenden Flüssigkeit nicht konstant; sie nimmt vielmehr innerhalb des Protonenstrahls mit zunehmendem Abstand von der Flüssigkeitsfläche zunächst exponentiell ab und geht nach Erreichen der Reichweite der Protonenstrahlen rasch gegen Null. Im exponentiellen Bereich fällt die Leistungsdichte um mehr als eine Größenordnung. Daher ist die hohe, durch Konvektion bewirkte Wärmeabfuhrate nur im vorderen, der

Protonenstrahlquelle zugewandten Teil des Targets erforderlich. Aus diesem Grund besteht eine sehr vorteilhafte Ausgestaltung des Targets gemäß der Erfindung darin, daß an der der Eintrittsöffnung für den Protonenstrahl gegenüberliegenden Wandung des Kanals ein mit einem Kühlsystem in Verbindung stehender, als Target verwendbarer Feststoffkörper mit einer der Eintrittsöffnung für den Protonenstrahl zugekehrten Fläche von mindestens dem Querschnitt des Protonenstrahls angeordnet ist. Eine andere vorteilhafte Ausführungsform des Targets gemäß der Erfindung besteht darin, daß obenerwähnte Feststoffkörper Teil der Wandung des Kanals an der der Eintrittsöffnung für den Protonenstrahl gegenüberliegenden Stelle ist. Die Abmessungen des Feststoffkörpers sind dabei zweckmäßig so bemessen, daß die bei der Spallation entstehende Wärme durch ein zur Kühlung des Feststoffkörpers vorgesehenes Kühlsystem unterhalb der Temperatur abgeführt wird, bei der das Material des Feststoffkörpers schmilzt und/oder in der Metallflüssigkeit in Lösung geht.

Die Kühlung erfolgt durch Gas oder durch eine Flüssigkeit. Zweckmäßig ist es, die Querschnittsabmessung des Kanals in Richtung des Protonenstrahls von der freien Oberfläche des Flüssigkeitsstroms aus gemessen, um den Teil des Feststoffkörpers, der bei der Spallation der Tiefe nach zur Wirkung kommt, zu verringern. Um die Neutronenausbeute der Neutronenquelle zu verstärken, ist es vorteilhaft, als Material für den Feststoffkörper ein neutronenvervielfachendes Material wie Uran, beispielsweise Uran-238, zu verwenden.

In der Zeichnung sind einige Ausführungsbeispiele des Targets gemäß der Erfindung schematisch als Prinzipskizzen wiedergegeben und werden im folgenden näher erläutert. Es zeigt

Fig. 1 ein Target mit Querschnittsverengung des Strömungskanals im Längsschnitt,

Fig. 2 ein Target mit gekrümmter Kanalführung in perspektivischer Darstellung,

Fig. 3 eine andere Ausführungsform eines Targets mit gekrümmter Kanalführung im Längsschnitt,

Fig. 4 einen Schnitt durch die Ausführungsform des Targets nach Fig. 3 nach der Linie A-B,

Fig. 5 einen Querschnitt durch eine andere Ausführungsform des Targets unter Verwendung eines Feststoffkörpers.

Wie aus der Zeichnung hervorgeht, wird bei dem Target gemäß der Erfindung ein Kanal 1 mit rechteckigem Querschnitt von Flüssigmetall 2 durchströmt. Als Flüssigmetall kann dabei beispielsweise Blei oder ein Blei-Wismuth-Eutektikum verwendet werden. Der durch einen Pfeil gekennzeichnete Protonenstrahl P gelangt durch eine in seiner Richtung liegende, senkrecht in der Kanalwandung angeordnete Eintrittsöffnung 3 in das Kanallinnere und trifft dort auf die strömende Metallflüssigkeit auf. Dabei ist bei der in Fig. 1 dargestellten Ausführungsform des Targets gemäß der Erfindung oberhalb der in dem senkrecht geführten Kanal 1 angeordneten Eintrittsöffnung 3 eine Querschnittsverengung 4 vorgesehen. Dadurch wird eine die Eintrittsöffnung 3 übergreifende Einschnürung des Flüssigkeitsstromes 2 hervorgerufen. Wie aus Fig. 1 ferner hervorgeht, ist der sich in Strömungsrichtung der metallischen Flüssigkeit 2 an die Eintrittsöffnung 3 anschließende Teil des Kanals 1 gegenüber dem oberhalb der Querschnittsverengung 4 liegenden Teil des Kanals 1 erweitert. Querschnittsverengung 4 und

Querschnittserweiterung 5 wirken dabei in der Weise zusammen, daß im Bereich der Querschnittsverengung die Strömungsgeschwindigkeit vergrößert wird und infolgedessen eine Absenkung des lokalen Druckes innerhalb der Flüssigkeit eintritt. Die Kanalerweiterung 5 und infolgedessen die Erweiterung des Querschnittes der Strömung führt zu einer lokalen Ablösung des Flüssigmetallstroms von der Wandung dieses sich erweiternden Kanalbereiches. Dabei expandiert der Flüssigkeitsstrahl im Bereich der Querschnittserweiterung 5 des Kanals 1 quer zur Strömungsrichtung in der Weise, daß er sich erst nach einer vorbestimmten Strecke hinter der Querschnittserweiterung an die Wandung des Kanals 1 anlegt. Auf diese Weise wird erreicht, daß im Bereich der Eintrittsöffnung 3 für den Protonenstrahl keine begrenzende Wandung erforderlich ist. Gegenüber der Eintrittsöffnung 3 bildet sich eine Flüssigkeitsoberfläche 6 aus, die gegenüber der Senkrechten nur eine geringe Neigung aufweist.

Es ist nicht notwendig, den Kanal 1, wie in Fig. 1 dargestellt, senkrecht zu führen, vielmehr kann der Kanal 2 im Bedarfsfall auch waagrecht oder geneigt gegenüber der Waagerechten angeordnet sein. Auch in diesen Fällen ist die Eintrittsöffnung 3 für den Protonenstrahl P in einer senkrechten Kanalwandung angeordnet.

In Fig. 2 ist ein anderes Ausführungsbeispiel des Targets gemäß der Erfindung wiedergegeben. Dabei ist der einen rechteckigen Querschnitt aufweisende Kanal 1 für die Flüssigmetall-Strömung im Bereich der Eintrittsöffnung 3 für den Protonenstrahl P gekrümmt geführt. Dabei ist die Eintrittsöffnung 3 für den Protonenstrahl P an der senkrechten Innenwandung des Kanals 1 angeordnet. Infolge der Krümmung des Kanals 1 werden auf die darin strömende Flüssigkeit in Richtung des Krümmungsradius radial nach außen gerichtete Zentrifugalkräfte ausgeübt. Strömungsgeschwindigkeit der Flüssigkeit und Krümmung sind so aufeinander abgestimmt, daß die Zentrifugalkräfte im gekrümmten Teil des Kanals 1 die Gravitations- und sonstigen Druckkräfte so weit aufheben, daß die metallische Flüssigkeit 2 nicht aus der Eintrittsöffnung 3 für den Protonenstrahl P austreten kann.

Wie am besten aus Fig. 4 zu entnehmen ist, nimmt die freie Oberfläche 6 der strömenden metallischen Flüssigkeit 2 eine solche Form an, daß in jedem Punkt der Oberfläche 6 die resultierende R aus der Gravitationskraft G und der Zentrifugalkraft Z auf der Oberfläche senkrecht steht.

Außerdem ist — wie aus Fig. 3 hervorgeht — an der stromaufwärts liegenden Kante der Eintrittsöffnung 3 für den Protonenstrahl P ein über die Breite der Fensterabmessung senkrecht zur Strömungsrichtung sich erstreckendes Strömungsleitprofil 7 angeordnet. Dieses Strömungsleitprofil weist, wie aus Fig. 3 hervorgeht, eine in die Strömung hineinragende, den

Querschnitt der Strömung verengende Kante auf. An der stromabwärts gelegenen Kante 8 der Eintrittsöffnung 3 für den Protonenstrahl P ist die Kanalwand so geformt, daß sich die Flüssigkeit nach Durchlaufen des Bereiches der Eintrittsöffnung 3 für den Protonenstrahl P erstreckende winkelförmige Leitprofile 9 und 10 so angeordnet, daß der eine Schenkel jeweils senkrecht zu der Kante der Eintrittsöffnung 3 für den Protonenstrahl P verläuft und der andere Schenkel parallel zu der Wandung des Kanals 1 verlaufend, senkrecht zur Eintrittsöffnung 3 für den Protonenstrahl P in das Innere des Kanals 1 hineinragt. Die senkrecht zu den Kanten der Eintrittsöffnung 3 für den Protonenstrahl P angeordneten Schenkel der Leitprofile 9 und 10 weisen eine mindestens ein Mehrfaches der laminaren Grenzschicht an der Wandung des Kanals 1 betragende Breite auf. Durch diese Formgebung wird erreicht, daß alle Flächen, an denen Wandreibung auftritt, so innerhalb des Kanals 1 liegen, daß sie zur Einschnürung der strömenden Flüssigkeit 2 infolge der zur Anwendung gebrachten Zentrifugalkräfte nicht beitragen, so daß an der freien Flüssigkeitsoberfläche 6 die Strömung durch Wandreibung nicht oder nur unwesentlich beeinflusst wird.

Um darüber hinaus eine Beeinflussung der Strömung durch Wandreibungseffekte auszuschließen, sind an den beiden einander gegenüberliegenden, parallel zur Strömungsrichtung verlaufenden Rändern der Eintrittsöffnung 3 für den Protonenstrahl P — wie aus Fig. 4 hervorgeht — sich über die Länge der Kanten hinweg erstreckende winkelförmige Leitprofile 9 und 10 so angeordnet, daß der eine Schenkel jeweils senkrecht zu der Kante der Eintrittsöffnung 3 für den Protonenstrahl P verläuft und der andere Schenkel parallel zu der Wandung des Kanals 1 verlaufend, senkrecht zur Eintrittsöffnung 3 für den Protonenstrahl P in das Innere des Kanals 1 hineinragt. Die senkrecht zu den Kanten der Eintrittsöffnung 3 für den Protonenstrahl P angeordneten Schenkel der Leitprofile 9 und 10 weisen eine mindestens ein Mehrfaches der laminaren Grenzschicht an der Wandung des Kanals 1 betragende Breite auf. Durch diese Formgebung wird erreicht, daß alle Flächen, an denen Wandreibung auftritt, so innerhalb des Kanals 1 liegen, daß sie zur Einschnürung der strömenden Flüssigkeit 2 infolge der zur Anwendung gebrachten Zentrifugalkräfte nicht beitragen, so daß an der freien Flüssigkeitsoberfläche 6 die Strömung durch Wandreibung nicht oder nur unwesentlich beeinflusst wird.

Wie aus Fig. 5 hervorgeht, besteht eine weitere Ausführungsform des Targets gemäß der Erfindung darin, daß der Kanal 1 für das Flüssigmetall 2 in Richtung der Verlängerung des Protonenstrahls P im Bereich der Eintrittsöffnung 3 für den Protonenstrahl einen verminderten Querschnitt aufweist und daß am rückwärtigen Teil des Kanals 1 ein als Feststofftarget geeigneter Feststoffkörper 11 vorgesehen ist. Wie aus der Zeichnung nicht zu entnehmen ist, hat der Feststoffkörper 11 mindestens die Abmessung des Querschnitts des Protonenstrahl P . Zum Abführen der beim Betreiben der Spallationsneutronenquelle in dem Feststoffkörper 11 entstehenden Wärme ist ein Kühlsystem 12, bei dem die Kühlung entweder durch strömendes Gas oder strömende Flüssigkeit erfolgt, vorgesehen. Das Kühlsystem 12 umgibt — wie aus Fig. 5 hervorgeht — die von der Fläche des Kanals 1, mit der der Feststoffkörper 11 in Verbindung steht, abgewandten Flächen. Die Abmessungen sind so gewählt, daß die Wärmeproduktion in dem Feststoffkörper 11 hinreichend klein bleibt, und zwar so, daß die dort entstehende Wärme unterhalb der Schmelztemperatur des Targetmaterials abgeführt werden kann.

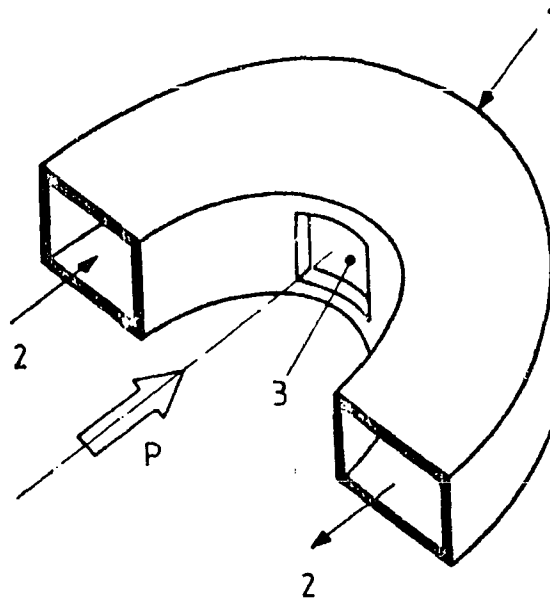


Fig. 2

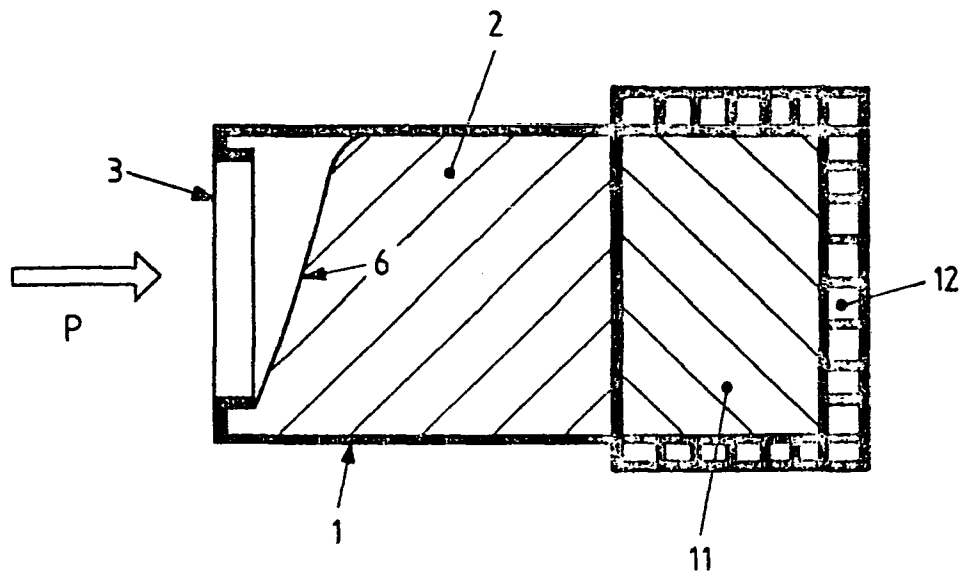


Fig. 5