

Ⓟ

Int. Cl. 2:

**G 21 C 15/18**

Ⓟ **BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND**

**DEUTSCHES PATENTAMT**



**DT 27 19 897 A 1**

Ⓟ

# **Offenlegungsschrift 27 19 897**

Ⓟ

Aktenzeichen: P 27 19 897.6

Ⓟ

Anmeldetag: 4. 5. 77

Ⓟ

Offenlegungstag: 1. 12. 77

Ⓟ

Unionspriorität:

Ⓟ Ⓟ Ⓟ

10. 5. 76 USA 684853

Ⓟ

Bezeichnung: Notkühlsystem mit Heißwasser-Strahlpumpen für Kernreaktoren

Ⓟ

Anmelder: Reinsch, Arnold Otto Winfried, 8000 München

Ⓟ

Erfinder: gleich Anmelder

**DT 27 19 897 A 1**

Patentansprüche:

1. Notkühlsystem für einen nuklearen Reaktorkern, der von einem Druckgefäß mit Eintritts- und Austrittsleitungen eingeschlossen ist,

gekennzeichnet durch eine Heißwasser-Strahlpumpe mit einer Lavaldüse, in der durch Reaktorwärme erhitztes Wasser entspannt wird, teilweise verdampft, als Zweiphasenströmung in der Lavaldüse auf hohe Geschwindigkeit beschleunigt wird und dadurch die Heißwasser-Strahlpumpe antreibt,

eine Kühlwasserquelle, die mit der Saugseite der Heißwasser-Strahlpumpe verbunden ist, so daß relativ kaltes Kühlwasser von der Heißwasser-Strahlpumpe angesaugt wird und sich mit der Zweiphasenströmung von der Lavaldüse vermischt,

eine Rohrleitung, die die Austrittsseite der Heißwasser-Strahlpumpe mit der Eintrittsleitung des Druckgefäßes verbindet.

2. Notkühlsystem nach Anspruch 1,

gekennzeichnet durch einen Unterkühler, der die Austrittsleitung des Druckgefäßes mit der Lavaldüse der Heißwasser-Strahlpumpe verbindet und im Druckgefäß erhitztes Wasser unterkühlt, so daß die Wassertemperatur am Eintritt zur Lavaldüse niedriger als die Sättigungstemperatur ist und die Verdampfung im verjüngten Teil der Lavaldüse unterdrückt wird.

3. Notkühlsystem nach Anspruch 1,

dadurch gekennzeichnet, daß die Kühlwasserquelle ein Gebäudesumpf ist, in dem sich vom Druckgefäß ausfließendes Wasser ansammelt.

4. Notkühlsystem nach Anspruch 3,

gekennzeichnet durch einen Wärmeaustauscher zur Abfuhr von Wärme aus dem Kühlwasser des Gebäudesumpfes.

5. Notkühlsystem nach Anspruch 1 einschließlich eines Kondensatorsystems zur Dampfentlastung,

gekennzeichnet durch einen mit dem Druckgefäß verbundenen Mischkondensator, der im Druckgefäß erzeugten Dampf kondensiert,

einen Kühler zur Abfuhr der Wärme, die beim Mischen des Dampfes mit Kondensatorwasser und der nachfolgenden Kondensation vom Gemisch aufgenommen wird,

eine Verbindungsleitung zwischen der Austrittsseite des Mischkondensators und der Eintrittsleitung des Druckgefäßes, durch die das Kondensat des verflüssigten Dampfes zum Druckgefäß zurückgeleitet wird.

6. Notkühlsystem nach Anspruch 5,

dadurch gekennzeichnet, daß der Mischkondensator eine Dampfstrahlpumpe ist, die mit Dampf vom Druckgefäß angetrieben wird und die Zirkulation des Kondensatorwassers durch den Kühler bewirkt,

daß die Dampfstrahlpumpe eine Mischstrecke hat, in der eine stehende Kondensationsstoßwelle den Dampf verflüssigt,

daß die Austrittsseite dieser Dampfstrahlpumpe mit der Einlassseite des Kühlers verbunden ist und

daß die Kühlerauslaßseite mit der Saugseite der Dampfstrahlpumpe verbunden ist.

7. Notkühlsystem nach Anspruch 6,

dadurch gekennzeichnet, daß die Dampfdüse der Dampfstrahlpumpe sich in Strömungsrichtung nur verjüngt, d. h. daß die Dampfdüse im wesentlichen keine erweiterte Mündung hat.

8. Notkühlsystem nach Anspruch 1 einschließlich eines Füllsystems,

gekennzeichnet durch einen Heißwasserspeicher und eine Rohrleitung, die den Heißwasserspeicher mit der Lavaldüse verbindet.

9. Notkühlsystem nach Anspruch 8,

dadurch gekennzeichnet, daß die Kühlwasserquelle ein Tank ist, der mit Wasser niedriger Temperatur gefüllt ist.

10. Notkühlsystem nach Anspruch 1,

dadurch gekennzeichnet, daß das Verhältnis zwischen Mündungsquerschnitt und engstem Querschnitt der Lavaldüse größer als 8:1 ist.

11. Notkühlsystem nach Anspruch 2,

dadurch gekennzeichnet, daß der Unterkühler ein Fallrohr ist, das die Austrittsleitung des Druckgefäßes mit der Lavaldüse der Heißwasser-Strahlpumpe verbindet und daß die Heißwasser-Strahlpumpe auf einem niedrigerem Niveau angeordnet ist.

12. Notkühlsystem nach Anspruch 11,

gekennzeichnet durch ein Fallrohr mit einem Niveauunterschied von mindestens 3 Metern.

A. O. Winfried Reinsch  
Adolf-Baeyer-Damm 34  
8000 München 83

4

Del Mar, 27. Aug. 1976  
13170 Carousel Lane  
California 92719897

### Notkühlsystem mit Heißwasser-Strahlpumpen für Kernreaktoren

#### Zusammenfassung:

Das Kühlsystem führt die vom Reaktorkern im Druckgefäß erzeugte Wärme ab und nützt dabei die im heißen Wasser gespeicherte Wärmeenergie aus, um kaltes Wasser in das Druckgefäß zu pumpen. Das System ist unabhängig von elektrischer Stromversorgung, hat keine beweglichen Teile während des Betriebs und ist sehr schnell betriebsbereit.

Wasser fließt nach der Erwärmung im Reaktorkern vom Druckgefäß durch einen "Unterkühler" und danach durch eine Düse mit sich erweiternder Mündung ("Lavaldüse"), wobei es teilweise verdampft und mit hoher Geschwindigkeit in die Mischstrecke einer Strahlpumpe ausströmt. Kaltes Wasser wird von der Mischstrecke angesaugt und mischt sich mit dem aus der Lavaldüse austretenden, heißen Dampf-Wassergemisch. Der Dampf kondensiert und die kinetische Energie des Wassers wird in eine Druckzunahme umgewandelt, die ausreicht, um das Wasser in das Druckgefäß zu fördern.

Eine zweite Strahlpumpe füllt anfangs das Druckgefäß mit Kühlwasser. Der sich beim Auffüllen bildende Dampf wird durch eine stehende Verdichtungsstoßwelle in einem Stoßkondensator verflüssigt.

#### Allgemeines:

Sowohl beim Druckwasserreaktor (DWR) als auch beim Siedewasserreaktor (SWR) ist der Reaktorkern mit dem spaltbaren Material in einem Druckgefäß eingeschlossen. Während des normalen Betriebs zirkuliert Kühlwasser durch das Druckgefäß und wird von der Wärme, die sich bei der Kernspaltung bildet, erhitzt (DWR) oder teilweise verdampft (SWR). Das erhitzte Primärkühlwasser gibt seine Wärme an Wasser auf der Sekundärseite der Dampfer-

709848/0799

zeuger ab (DWR). In Kernkraftwerken, Schiffs- und Unterseebootantrieben wird der entstehende Dampf zum Betreiben von Turbinen verwendet.

Im Falle einer Kühlungsstörung wird der Reaktor durch Absorberstäbe abgeschaltet und die nukleare Kettenreaktion unterbrochen. Im Reaktorkern wird aber auch nach dem Abschalten noch Energie, die sog. "Nachwärme", erzeugt. Ohne Kühlung würde die Nachwärme zuerst das Hüllenmaterial, dann den Brennstoff des Reaktorkernes schmelzen und zuletzt das Reaktordruckgefäß zerstören, so daß radiaktive Spaltprodukte im Reaktorgebäude freigesetzt würden. Ein geringer Teil der Spaltprodukte könnte von da durch Leckage in die Umwelt gelangen und die Gesundheit der Bevölkerung gefährden.

Diese Überlegung hat zur Entwicklung von Notkühlssystemen geführt, die die Temperatur des Reaktorkernes nach einem Kühlmittelverlust-Unfall innerhalb zulässiger Grenzen halten sollen. Beim Bruch eines Rohres im Primärsystem eines Reaktors würde das Kühlwasser mit großer Geschwindigkeit aus der Bruchstelle ausströmen und die Wirksamkeit der Kernkühlung wäre vermindert. Wenn der Bruchquerschnitt relativ klein ist, kann der Hochdruckteil des Notkühlsystems (High Pressure Injection System) genügend Wasser in das Primärsystem pumpen, um es funktionsfähig zu halten. Nach einem großen Rohrbruch wird aber so viel Kühlwasser ausgestoßen, daß Hochdruckpumpen den Kühlmittelverlust nicht mehr schnell genug ersetzen können und daher der Niederdruckteil des Notkühlsystems (Low Pressure Injection System) Kühlwasser in das Primärsystem pumpen muß.

Das Notkühlsystem arbeitet in zwei Phasen: Zuerst wird Borwasser von einem Speichertank in das Primärsystem des Kernreaktors gepumpt. Wenn der Tank leer ist, werden die Pumpen mit dem im Reaktorgebäudesumpf angesammelten Wasser beaufschlagt. Sowohl die Hochdruck- wie die Niederdruckpumpen werden von Elektromotoren angetrieben, die von redundanten Dieselgeneratorsätzen mit Strom versorgt werden. Alle Primärkreisläufe des Reaktors werden gleichzeitig mit Notkühlwasser versehen, damit die Kühlwasserversorgung

nicht durch den Rohrbruch in einem Kreislauf unwirksam gemacht wird.

Wegen der hohen Temperatur des Kühlmittels ist die Ausströmgeschwindigkeit am Bruchquerschnitt so groß, daß im Falle eines großen Rohrbruchs der Reaktorkern innerhalb weniger Sekunden ungenügend gekühlt wird. Bevor das Wasser des Notkühlsystems den Reaktorkern erreicht, wird der Brennstoff durch die Nachwärme auf sehr hohe Temperaturen aufgeheizt, so daß beim Fluten des Kerns ein großer Teil des Wassers verdampft. Der Dampf kann nur langsam vom oberen Reaktorplenum des Druckgefäßes durch die Primärsystem-Kreisläufe entweichen. Dadurch entsteht ein Überdruck im oberen Plenum des Reaktordruckgefäßes und das Eindringen des Notkühlwassers vom unteren Reaktorplenum her wird verzögert. Dieser Effekt wird als "Steam Binding" bezeichnet und beeinträchtigt die Wirksamkeit des Notkühlsystems, so daß die Temperatur des Brennstoffs im Reaktorkern weiter ansteigt. Die Dampfbildung im Kern während der ersten Betriebsphase des Notkühlsystems und der dadurch verursachte Überdruck im oberen Reaktorplenum kann damit aus Sicherheitsgründen zum Kriterium werden, das die Maximalleistung des Reaktors begrenzt.

Ein Notkühlsystem sollte daher so konstruiert sein, daß es zuverlässig die Nachwärme eines Reaktorkernes abführen kann und eine kurze Anlaufzeit hat. Weitere, wünschenswerte Eigenschaften sind Unabhängigkeit von elektrischer Stromversorgung, eine kompakte, unkomplizierte Bauweise ohne bewegliche Teile, niedrige Kosten und die Möglichkeit, das System parallel zum konventionellen, elektrisch angetriebenen Notkühlsystem arbeiten zu lassen. Nach Möglichkeit sollte ein Notkühlsystem außerdem unempfindlich sein gegen Verdampfungseffekte, die das Kühlwasser daran hindern, in den Reaktorkern einzudringen und die Brennstoffelemente zu kühlen.

### Beschreibung der Erfindung

Im Folgenden wird ein Anwendungsbeispiel der Erfindung auf die Erfordernisse des Druckwasserreaktors beschrieben. Das System kann aber auch auf andere Reaktortypen angewendet werden, z. B. den Siedewasserreaktor. Charakteristisch für das Heißwasser-Notkühlsystem ist die direkte Ausnützung der Reaktorwärme für die Versorgung des Reaktorkerns mit Kühlwasser. Die Wärmeenergie wird mit Hilfe einer besonderen Strahlpumpe in eine Drucksteigerung des Kühlwassers umgesetzt, die den Bedingungen des Reaktorsystems über einen weiten Bereich von verschiedenen Bruchquerschnitten entspricht. Ein "Unterkühler", der eine Temperaturdifferenz zwischen der Sättigungsgrenze und der Kühlwasser-Austrittstemperatur erzeugt, stabilisiert das Betriebsverhalten des Notkühlsystems. Der Unterkühler ist so ausgelegt, daß die Verdampfung des heißen Wassers im verjüngten Teil der Strahlpumpe Düse unterdrückt wird und daher die Dampfblasen erst im divergierenden Teil der Laval-Düse auftreten. Aus diesem Grunde wird im engsten Querschnitt der Düse die Schallgeschwindigkeit von gesättigtem Wasser nicht erreicht und der Düsendurchsatz nimmt nicht mit dem Betriebsdruck ab, wie es sonst in Düsen mit Überschallströmung der Fall ist. Da die durch den Druckabfall in der Laval-Düse hervorgerufene Dampfentwicklung im heißen Wasser ("Flashing") das Dampf-Wasser-Gemisch beschleunigt und somit die Strahlpumpen antreibt, werden diese hier als "Heißwasser-Strahlpumpen" bezeichnet.

In der Konstruktion unterscheiden sich Heißwasser-Strahlpumpen von herkömmlichen Dampfstrahlpumpen durch das extrem hohe Öffnungsverhältnis der Heißwasser-Laval-Düsen: Als Öffnungsverhältnis wird hier das Querschnittsverhältnis der Düsenmündung zum engsten Querschnitt bezeichnet. Für Dampfstrahlpumpen liegt dieses Verhältnis zwischen 1:1 und 8:1. Die Laval-Düsen von Heißwasser-Strahlpumpen haben dagegen ein Öffnungsverhältnis von 10:1 bis 50:1. Dieses große Verhältnis zwischen Mündungsquerschnitt und engstem Querschnitt wird durch die Unterdrückung



der Dampfbildung im verjüngten Teil der Düse bewirkt und durch die Tatsache, daß flüssiges Wasser wegen seiner hohen Dichte nur einen relativ kleinen Strömungsquerschnitt benötigt.

Die Bildung von Dampfblasen in der sich erweiternden Mündung der Lavaldüse setzt Wärme in Arbeit um und beschleunigt das Dampf-Wasser-Gemisch auf Überschallgeschwindigkeit. Der aus der Düse austretende Zwei-Phasen-Strahl mischt sich mit Kühlwasser, das in die Mischstrecke der Strahlpumpe angesaugt wird, und teilt seine kinetische und thermische Energie dem Kühlwasser mit. Der größte Teil der kinetischen Energie wird in einem Verdichtungsstoß in eine Druckzunahme umgewandelt, wobei die Dampfphase in der Stoßwellenfront plötzlich kondensiert ("Kondensationsstoß"). Im Diffusor der Strahlpumpe wird die kinetische Energie des Wassers weiter reduziert und der Druck des Wassers nimmt entsprechend zu. Die gesamte Druckerhöhung in der Heißwasser-Strahlpumpe genügt um das Wassergemisch in das Druckgefäß zu pumpen.

Das Kühlwasser wird entweder einem Speichertank oder dem Sumpf des Reaktorgebäudes entnommen. Aus dem Primärsystem durch die Bruchstelle ausströmendes Kühlwasser wird im Sumpf gesammelt und durch einen Wärmeaustauscher zur Saugseite der Heißwasser-Strahlpumpen geleitet. Solange die Sekundärseite des Wärmeaustauschers gekühlt wird, ist damit das System unabhängig von Strom- oder Wasserversorgung.

In seiner einfachsten Form besteht der Unterkühler aus einem Fallrohr, das heißes Wasser vom Austrittsstutzen des Reaktor-gefäßes (oder Sekundärseite des Dampferzeugers) nach unten zu den Strahlpumpen leitet, die sich auf einem niedrigeren Niveau befinden. Da der hydrostatische Wasserdruck - und damit die Sättigungstemperatur - im Fallrohr mit abnehmender Höhe zunimmt während die Wassertemperatur konstant bleibt, wird das Wasser beim Abwärtsströmen zunehmend unterkühlt und erreicht den Düsen-eintritt ungefähr 5 bis 20 °C unter der Sättigungstemperatur.

Die Unterkühlung bewirkt, daß sich keine Dampfblasen im verjüngten Teil der Düse bilden und das Wasser im engsten Düsenquerschnitt ungefähr mit Fallgeschwindigkeit (anstatt mit Schallgeschwindigkeit) strömt. Die Fallgeschwindigkeit ist für einen bestimmten Höhenunterschied zwischen Druckgefäß-Austrittsstutzen und Strahlpumpendüse konstant. Deshalb nimmt der Düsendurchsatz nicht mit dem Druck im Reaktorprimärsystem ab.

Das Heißwasser-Notkühlsystem kann den Reaktorkern vor allem bei niedrigem Primärsystemdruck kühlen, d. h. es funktioniert als Niederdruckteil des Gesamtnotkühlsystems für die Kernkühlung nach einem Unfall mit großem Bruchquerschnitt. Teile des Heißwasser-Notkühlsystems können aber auch noch bei wesentlich höheren Drücken arbeiten, z. B. zusammen mit dem elektrisch angetriebenen Hochdruck-Notkühlsystem.

Das Heißwasser-Notkühlsystem besteht aus drei Teilsystemen:

1. Füllsystem
2. Umwälzsystem
3. Stoßkondensator

Das Füllsystem hat die Aufgabe, nach dem Unfall Borwasser von einem Speichertank in das Druckgefäß zu pumpen, damit genügend Borwasser im Druckgefäß vorhanden ist, um **den Reaktorkern zu kühlen**. Das System wird nur nach einem großen Rohrbruch gebraucht, bei dem so viel Kühlwasser verloren geht, daß der Druck im Primärsystem sehr stark abfällt. Das Füllsystem kann das Borwasser mit Strahlpumpen, die nach dem oben beschriebenen Heißwasserprinzip arbeiten, relativ schnell vom Borwassertank in das Reaktordruckgefäß pumpen. Als Strahlpumpenantrieb dient heißes Wasser von der Sekundärseite der Dampferzeuger (DWR). Das heiße Wasser kann aber auch von einem separaten Heißwasserspeicher bezogen werden, der durch Wärmezufuhr vom Reaktorsystem während des normalen Reaktorbetriebs einsatzbereit gehalten wird. In den Dampferzeugern ist genügend Sekundärwasser enthalten, um den Inhalt des Borwassertanks in das Reaktordruckgefäß zu pumpen und dabei durch Leckage den Sumpf des Reaktorgebäudes zu füllen.

Da der Druck auf der Sekundärseite des Dampferzeugers oder im Heißwasser-Speichertank beim Anzapfen nur wenig abnimmt, ist die Unterkühlung des Heißwassers zur Stabilisierung des Füllsystemverhaltens von geringerer Bedeutung als beim Umwälzsystem, das innerhalb eines größeren Druckbereichs arbeiten muß. Ein kleiner Teil der Dampfblasen kann also schon vor dem engsten Düsenquerschnitt auftreten, ohne daß das Betriebsverhalten beeinträchtigt würde.

Nachdem das Reaktordruckgefäß vom Füllsystem aufgefüllt worden ist und sich im Gebäudesumpf genügend Borwasser angesammelt hat, kann das Umwälzsystem die Kühlwasserversorgung übernehmen. Das Umwälzsystem arbeitet nach demselben Prinzip wie das Füllsystem: Von der Reaktorwärme erhitztes Wasser verdampft in Lavaldüsen und treibt Strahlpumpen an, die den Reaktorkern im Druckgefäß mit Kühlwasser versorgen. Das heiße Wasser für die Umwälzsystem-Strahlpumpen wird dem Druckgefäß entnommen. Kühlwasser liefert ein Wärmeaustauscher, durch den die Strahlpumpen Wasser vom Gebäudesumpf ansaugen. Solange die Sekundärseite dieses Wärmeaustauschers gekühlt und Wasser im Reaktordruckgefäß erwärmt wird, liefert das Umwälzsystem genügend Kühlwasser, um die Temperatur des Reaktorkerns innerhalb zulässiger Grenzen zu halten.

Das dritte Teilsystem des Heißwasser-Notkühlsystems, der Stoßkondensator, beschleunigt das Fluten des heißen Reaktorkerns nach dem Kühlmittelverlust-Unfall durch Kondensation des Dampfes, der bei der Berührung des Kühlwassers mit den Brennelementen des Reaktorkerns entsteht. Der Stoßkondensator hat ebenfalls keine beweglichen Teile und ist daher schnell betriebsbereit: Dampf vom Reaktordruckgefäß strömt mit Schallgeschwindigkeit durch eine verjüngte Düse und mischt sich mit Kühlwasser in einer Mischstrecke, wobei das Kühlwasser erwärmt und beschleunigt wird. Das Dampfwassergemisch kondensiert in einem Kondensationsstoß und wird in einem Diffusor weiter verzögert. Dadurch ist der Austrittsdruck des Wassers größer als der Eintrittsdruck des Dampfes, so daß das Kondensat in das Druckgefäß zurückgeleitet werden kann.

Nur ein Bruchteil des Wassers, das am Diffusor austritt, ist Kondensat. Der überwiegende Teil ist vom Dampf mitgerissenes Kühlwasser, das in einem Kühler die absorbierte Verdampfungswärme wieder abgibt und dann zum Kühlwassereinlaß des Stoßkondensators zurückfließt. Auch dieses System erfordert keinen mechanischen Antrieb, Dampfzufuhr vom Reaktordruckgefäß und Kühlung der Sekundärseite des Stoßkondensatorkühlers genügen zum Betrieb.

Die Wärmestromdichte im Kondensationsstoß ist mehrere Größenordnungen höher als die in herkömmlichen Kondensatoren. Dadurch wird der eigentliche Kondensator, die Mischstrecke, sehr kompakt. Ein Stoßkondensator mit einem Mischstreckendurchmesser von 10 bis 20 Zentimetern kann deshalb genügend Dampf abführen und verflüssigen, um das Kernfluten merklich zu beschleunigen und damit die maximale Kerntemperatur nach dem Unfall herabzusetzen. Da das charakteristische Merkmal dieses Teilsystems die hohe Wärmestromdichte im Kondensationsstoß ist, wird es hier Stoßkondensator genannt. Der kleine Durchmesser hat dabei nicht nur wirtschaftliche Bedeutung wegen seines Einflusses auf die Gesamtsystemkosten, sondern verbessert auch die Sicherheit des Reaktors während des normalen Betriebs, da ein kompakter Stoßkondensator für den vollen Betriebsdruck ausgelegt werden kann und damit ein Versagen eines Stoßkondensator-Einlaßventils nicht zu einem Kühlmittelverlust-Unfall führen kann.

Gegenstand der Erfindung ist daher ein neues und verbessertes Heißwasser-Notkühlsystem.

Ein weiterer Gegenstand der Erfindung ist ein neues und verbessertes Heißwasser-Notkühlsystem mit wenigen, beweglichen Teilen.

Ein weiterer Erfindungsgegenstand ist ein neues Heißwasser-Notkühlsystem mit einer besonders zuverlässigen Kühlwirkung.

Ein weiterer Zweck der Erfindung ist, daß das neue Heißwasser-Notkühlsystem innerhalb eines weiten Druckbereiches arbeiten kann.

Weiterhin Gegenstand der Erfindung ist ein neues und verbessertes Heißwasser-Notkühlsystem, das zuverlässig den Inhalt eines Wassertanks in das Reaktordruckgefäß pumpt.

Ein weiterer Gegenstand der Erfindung ist ein neues und verbessertes Heißwasser-Notkühlsystem, bei dem die Dampfbildung im Druckgefäß während des Auffüllens nur eine geringe Verzögerung des Kernflutens verursacht.

Weitere Vorteile der Erfindung sind aus der folgenden, detaillierten Beschreibung und den Zeichnungen ersichtlich, in denen bestimmte Zahlen immer den gleichen Bauteilen entsprechen.

#### Beschreibung der Zeichnungen:

- Fig. 1 ist eine schematische Darstellung des Systems, die das Umwälzsystem und den Stoßkondensator enthält.
- Fig. 2 zeigt das Schema einer Heißwasser-Strahlpumpe im Schnitt.
- Fig. 3 ist eine schematische Darstellung des Füllsystems.
- Fig. 4 und 5 sind Diagramme, die die Massenstromdichte von gesättigtem bzw. unterkühltem Wasser in Lavaldüsen abhängig vom Expansionsdruck zeigen.

#### Detaillierte Beschreibung der Zeichnungen:

Fig. 1 zeigt ein Reaktordruckgefäß 10 mit einem Eintrittsstutzen 12 und einem Austrittsstutzen 14. Nur ein einzelner Kühlkreislauf ist dargestellt, obwohl Reaktorsysteme im allgemeinen mehrere, parallele Kreisläufe haben. Das Heißwasser-Notkühlsystem gemäß der Erfindung kann mit einem Kühlkreislauf verbunden werden, wie es in Fig. 1 dargestellt ist. In analoger Weise kann aber auch jeder Kühlkreislauf des Reaktors mit je einem Heißwasser-Notkühlsystem verbunden werden, die dann parallel zueinander arbeiten.

Im Reaktordruckgefäß 10 ist der Reaktorkern 16 mit den in Brennelementen gebündelten Brennstäben eingeschlossen. Während des nor-

malen Reaktorbetriebs tritt Kühlwasser durch den Eintrittsstutzen 12 in das Druckgefäß ein, strömt am Reaktorkern nach unten, dann durch den Reaktorkern 16 aufwärts in das obere Reaktorplenium 18 und wird durch den Stutzen 14 zu einem Dampferzeuger geleitet. Aus Gründen der Übersichtlichkeit ist der Dampferzeuger nicht in Fig. 1 dargestellt. Zum Betrieb des Notkühlsystems gemäß der Erfindung wird das Ventil 19 geöffnet und das im Reaktorkern erhitzte Kühlwasser fließt in das Fallrohr 20.

Wie bereits erwähnt, hat das Fallrohr die Wirkung eines "Unterkühlers", weil der hydrostatische Druck im Fallrohr vom Austrittsstutzen 14 an mit abnehmender Höhe zunimmt und sich damit die Sättigungstemperatur erhöht, während die Wassertemperatur konstant bleibt. Dieser Unterkühlungseffekt wird ohne Verluste der im Wasser gespeicherten Wärmeenergie erreicht. Andere Formen der Unterkühlung, die das Fallrohr 20 ersetzen könnten aber eine niedrigere Heißwassertemperatur zur Folge hätten, sind Wärmeentzug oder Mischung mit kaltem Wasser. Wärme konnte in einem Wärmeaustauscher abgeführt werden. Für die Mischung mit kaltem Wasser wäre eine Einspritzstelle notwendig, die eine relativ kleine Menge kalten Wassers (z. B. vom Strahlpumpenauslaß) dem heißen, gesättigten Wasser beimischt. Unabhängig von der Form der Unterkühlung, die gewählt wird, ist die Austrittsseite des Unterkühlers mit dem Heißwassereinlaß der Strahlpumpe 22 verbunden.

Die Heißwasser-Strahlpumpe in Fig. 2 besteht aus einer Düse 23 mit einem verjüngten Teil 24, dem engsten Querschnitt 26 und der Erweiterung 28. Die Düse 23 wird von einem Gehäuse 30 eingeschlossen. Kühlwasser wird durch die Leitung 34 in den zwischen Düse 23 und Gehäuse 30 gelegenen Raum 32 gesaugt, der sich in Strömungsrichtung verjüngt. Eine Kühlwasserquelle ist der Gebäudesumpf 50, in dem sich das Kühlwasser ansammelt, das vom Primärsystem durch den Bruch ausgeströmt ist. Ein Wärmeaustauscher 44 kühlt das Wasser bevor es von der Strahlpumpe 22 angesaugt wird. Sekundärkühlwasser zur Rückkühlung des Wärmeaustauschers tritt

durch die Verbindung 46 in die Sekundärseite des Wärmeaustauschers ein, fließt im Gegenstrom durch den Wärmeaustauscher 44 und wird durch die Verbindung 48 abgeleitet. Das Ventil 35 in der Rohrleitung 34 verhindert das Eindringen des Wassers vom Sumpf 50 in die Strahlpumpe 22 vor der Inbetriebnahme des Systems. Das Kühlwasser und das in der Lavaldüse 23 entspannte, heiße Wasser tauschen Wärme und Impuls in der Mischstrecke 36 aus und strömen anschließend durch den Diffusor 38. Sowohl in der Mischstrecke wie im Diffusor wird kinetische Energie des Wassers in eine hydrostatische Druckzunahme umgewandelt. Die Drucksteigerung genügt, um das Gemisch durch die Rohrleitung 40 und das Ventil 52 in den Eintrittsstutzen 12 und damit in das Druckgefäß 10 zu pumpen.

Das Öffnungsverhältnis der Heißwasser-Lavaldüse 23 in der Strahlpumpe 22 (definiert als Verhältnis zwischen Austrittsquerschnitt und engstem Querschnitt) bewegt sich in der Anwendung für ein Notkühlsystem in dem Bereich von 10 : 1 bis 40 : 1. Die durch die Entspannung verursachte Verdampfung des heißen Wassers in der Düsenerweiterung beschleunigt das Dampfwassergemisch auf Überschallgeschwindigkeit und wandelt Wärme in kinetische Energie um. Das Zusammenwirken von Unterkühler 20 und Lavaldüse 23 im System hat zur Folge, daß im verjüngten Teil 24 der Lavaldüse 23 einschließlich des engsten Querschnitts 26 hydrodynamische Strömung (incompressible flow) erhalten bleibt und erst in der Düsenerweiterung 28 Dichte-, Temperatur- und Enthalpieänderungen auftreten, d.h. sich eine gasdynamische Strömungsform (compressible flow) ausbildet. Der Unterkühler hat die praktische Bedeutung, daß der Heißwasserdurchsatz in der Lavaldüse 23 nicht mit dem Systemdruck abnimmt und daß deshalb das System innerhalb eines größeren Druckbereiches funktionieren kann als ohne Unterkühler.

Ein Anfahrtsbehälter 51 hält das Innere der Strahlpumpe 22 und der Rohrleitung 40 während des normalen Reaktorbetriebs auf Unter-

druck, um die Dampfbildung im heißen Wasser, daß durch die Düsen-  
erweiterung strömt, bei der Inbetriebnahme des Systems zu ver-  
bessern. Sobald die Strahlpumpen Wasser fördern, wird der Unter-  
druck in der Mischstrecke 36 durch das Mischen mit Kühlwasser  
und die damit verbundene Dampfdruckerniedrigung aufrechterhalten.  
Der Unterdruck in der Mischstrecke 36 verbessert nicht nur die  
Dampfblasenbildung in der Düse sondern erhöht auch die Saugwir-  
kung der Strahlpumpe, die dadurch Kühlwasser gegen einen Höhen-  
unterschied ansaugen kann.

Der Unterdruck in der Strahlpumpe 22 und der Leitung 40 wird vor  
der Inbetriebnahme des Notkühlsystems durch Kühlung des Wassers  
im Anfahrtdank 51 mithilfe einer Kühltischlange 57 erzeugt. Wasser  
in der Pumpe 22 oder dem Rohr 40 fließt durch das offene Ventil  
53 nach unten in den Tank 51. Dampf in den Volumina 22, 40 und  
51 wird durch Wärmeaustausch teilweise kondensiert und nimmt den  
Sättigungsdruck des Wassers in Tank 51 an. Wenn das Notkühlsys-  
tem in Betrieb genommen wird, strömt anfangs ein Teil des geför-  
derten Gemisches in den Anfahrtdank 51. Sobald die Strahlpumpe  
eine ausreichende Druckerhöhung erzeugt, kann das Ventil 53 ge-  
schlossen werden.

Durch Dampfbildung beim Fluten des heißen Reaktorkerns 16 nach  
einem Kühlmittelverlust-Unfall entsteht ein Überdruck im oberen  
Plenum 18 des Druckgefäßes 10. Dieser Überdruck verzögert das  
weitere Eindringen des Kühlwassers in den Reaktorkern. Zur Ver-  
ringerung des Druckes wird Dampf durch das Rohr 56 und das Ven-  
til 58 in den Stoßkondensator 60 geleitet. Der Dampf strömt  
durch eine verjüngte Düse 61 mit hoher Geschwindigkeit in die  
Mischstrecke 63, mischt sich mit Kühlwasser und kondensiert.  
Wärme und Impuls werden dabei vom Dampf an das Wasser abgegeben,  
das in der Mischstrecke 63 und dem Diffusor 72 wieder verzögert  
wird und dadurch eine Drucksteigerung erzeugt. Das Wasser fließt  
vom Diffusor 72 durch eine Leitung 64 und einen Kühler 66, der  
die in der Mischstrecke aufgenommene Wärme abführt, zum Kühl-  
wassereinlaß 62, von wo es wieder in die Mischstrecke 63 gesaugt



wird. Ein kleiner Teil des Wassers, der in der Menge dem Kondensat des verflüssigten Dampfes entspricht, wird vom Diffusor 72 durch eine Verbindungsleitung 74 und ein Ventil 76 zum Druckgefäßeinlaß 12 zurückgeleitet. Der Kühler 66 wird durch den Anschluß 68 mit Sekundärkühlwasser versorgt, das im Gegenstrom durch den Kühler fließt und durch den Stutzen 70 wieder austritt.

Nach einem Kühlmittelverlust-Unfall wird Borwasser zum Auffüllen des Druckgefäßes 10 einem Borwassertank 86 entnommen (Fig. 3) und von einer Heißwasser-Strahlpumpe 78 in das Druckgefäß gefördert. Die Strahlpumpe 78 ist im Aufbau und der Wirkungsweise ähnlich wie die oben beschriebene Strahlpumpe 22 mit einigen Ausnahmen, die später noch erläutert werden. Sie wird von einem Heißwasserspeicher 84 durch den Unterkühler 82 mit heißem Antriebswasser versorgt. Beim Druckwasserreaktor kann auch der Dampferzeuger als Heißwasserquelle 84 dienen, dessen Sekundärseite genügend Wasser mit hoher Sättigungstemperatur enthält, um den Inhalt des Borwassertanks in das Druckgefäß zu pumpen.

In Fig. 3 ist ein Fallrohr als Unterkühler gezeigt. Wegen der relativ geringen Druckabnahme im Verlauf der Entleerung eines Heißwasserspeichers muß die Dampfblasenbildung im verjüngten Teil der Lavalldüse 80 nicht vollständig unterdrückt werden, d.h. das heiße Wasser kann weniger unterkühlt werden als notwendig ist, um den Heißwasserdurchsatz in den Lavalldüse 80 konstant zu halten. Das im Fallrohr 82 unterkühlte Wasser fließt durch ein Ventil 81 in die Lavalldüse 80, in der die Entspannung mit der damit verbundenen Dampfbildung das Dampfwassergemisch beschleunigt. Kaltes Borwasser von Tank 86 wird von der Strahlpumpe durch die Rohrleitung 85 und Ventil 88 angesaugt, mischt sich in der Mischstrecke 89 mit dem heißen Zweiphasenstrahl und wird dadurch beschleunigt. Die Geschwindigkeit des Gemisches wird in der Mischstrecke 89 und dem Diffusor 90 in analoger Weise wie beim Umwälzsystem in Druck umgewandelt. Der in der Strahlpumpe 78 erzeugte Überdruck treibt dann das Gemisch aus Borwasser und

Treibwasser durch die Rohrleitungen 54 und 55 zum Eintrittsstutzen 12 und in das Reaktordruckgefäß 10.

Das System wird durch das Öffnen der Ventile 81, 88 und 42 in Betrieb genommen. Keine beweglichen Teile sind während des Betriebs im System notwendig. Stoßkondensatoren erhöhen die Wirksamkeit des Füllsystems und beschleunigen das Kernfluten durch Kondensation von Dampf, der das Eindringen des Wassers in den Reaktorkern behindert.

Um das Abnehmen des Heißwasserdurchsatzes in der Lavaldüse 80 mit abfallendem Druck im Heißwasserspeicher 84 zu verhindern, wäre ein Höhenunterschied im Unterkühler-Fallrohr 82 von mehr als 50 Metern erforderlich. Da dies aus räumlichen Gründen unpraktisch ist und außerdem der Druck im Heißwasserspeicher während des Füllsystembetriebs relativ wenig abfällt (ungefähr 20 % beim Entleeren), genügen 10 bis 20 Meter Fallrohrhöhenunterschied. Das Füllsystem-Fallrohr könnte unter Umständen sogar ganz weggelassen werden, ohne daß der Betriebsbereich in einer Weise eingeschränkt würde, daß der Reaktorkern ungenügend gekühlt wäre. Wegen der hohen Sättigungstemperatur und dem hohen Druck des heißen Treibwassers ist das Öffnungsverhältnis der Lavaldüse 80 größer als das des Umwälzsystems. Im allgemeinen wird das Öffnungsverhältnis zwischen 20 : 1 und 50 : 1 liegen, nur bei einem Füllsystem mit besonders hohem Strahlpumpenförderdruck wird das heiße Wasser weniger stark expandiert und das Öffnungsverhältnis dadurch kleiner als 20 : 1.

In Fig. 4 und 5 ist die Massenstromdichte in einer Lavaldüse bei der Entspannung von gesättigtem bzw. unterkühltem Wasser als Funktion des Expansionsdruckes dargestellt: Das Maximum der Massenstromdichte von gesättigtem Wasser, das aus Kontinuitätsgründen in der engsten Stelle der Lavaldüse auftreten muß und damit den Durchsatz der Düse bestimmt, wird stark vom Sättigungsdruck beeinflusst. Fig. 4 zeigt, daß die maximale Stromdichte bei 14 ata (= 200 psia) ungefähr dreimal so groß ist wie die bei 3,5 ata (= 50 psia). Eine Strahlpumpe, deren Heißwasserdüse solche Durchsatzschwankungen hätte, würde wegen des schwa-

chen Heißwasserstrahls nicht genügend Förderhöhe bei niedrigem Heißwasserdruck erzeugen. Bei hohem Druck ergäbe sich dagegen ein Überschuß an heißem Wasser in der Mischstrecke, so daß das Gemisch nicht vollständig kondensieren könnte und die Pumpleistung wegen der geringen Dichte des Dampfwassergemisches abfallen würde.

Ebenfalls ist ersichtlich aus Fig. 4, daß der Austrittsdruck der Düse bei der Versorgung mit gesättigtem Wasser stark vom Eintrittsdruck abhängt. In einer Strahlpumpe könnte das den Druck in der Mischstrecke und damit die angesaugte Menge des Kühlwassers beeinflussen, wodurch der Überschuß an heißem Wasser bei hohem Sättigungsdruck noch weiter vergrößert würde.

Zum Vergleich ist in Fig. 5 die Massenstromdichte bei der Expansion von unterkühltem Wasser in einer Lavaldüse als Funktion des Expansionsdruckes dargestellt. Das ursprünglich gesättigte Wasser ist nach dem Durchströmen eines Unterkühler-Fallrohres von 12 Metern vertikaler Wassersäule weniger als  $10^{\circ}\text{C}$  unterkühlt: Das Maximum der Massenstromdichte fällt nicht mehr mit dem Eintrittsdruck ab, so daß der Heißwasserdurchsatz fast konstant bleibt und damit die Wärmebilanz in der Strahlpumpe nicht gestört wird.

-19-  
Leerseite

2719897

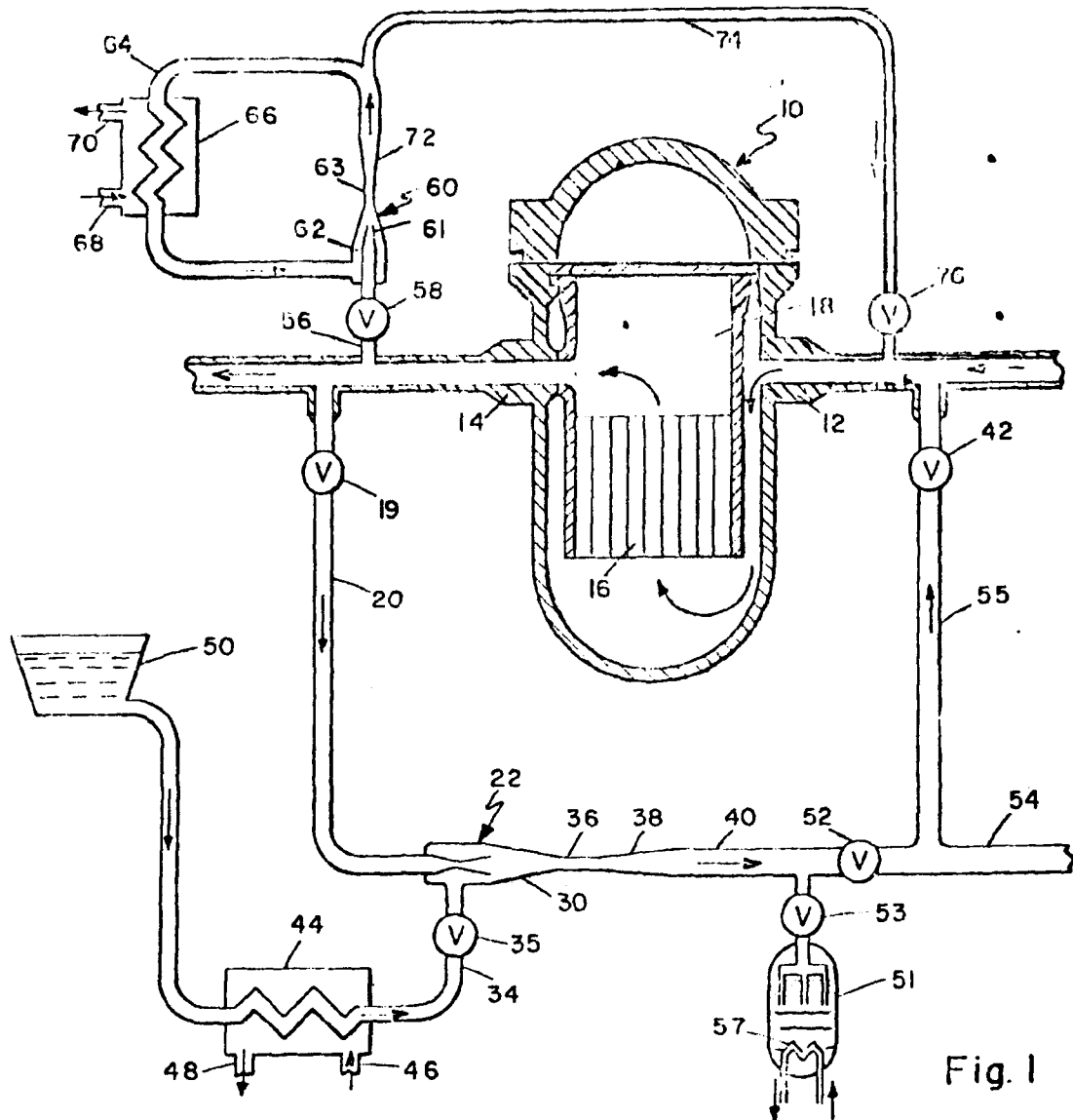


Fig. 1

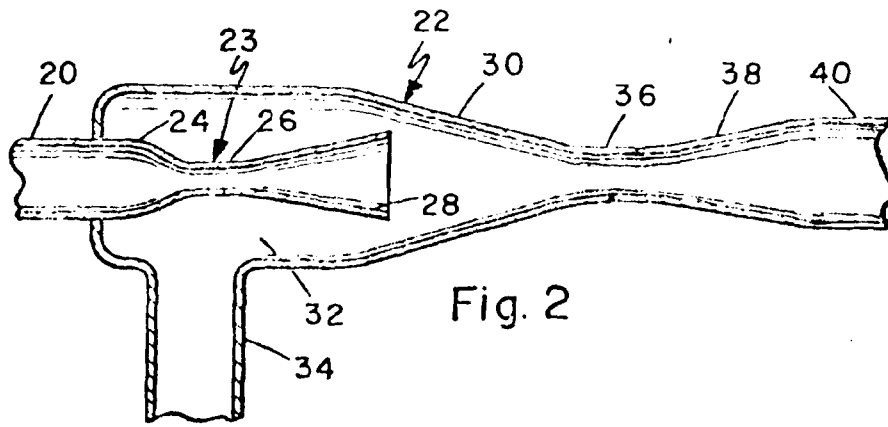


Fig. 2

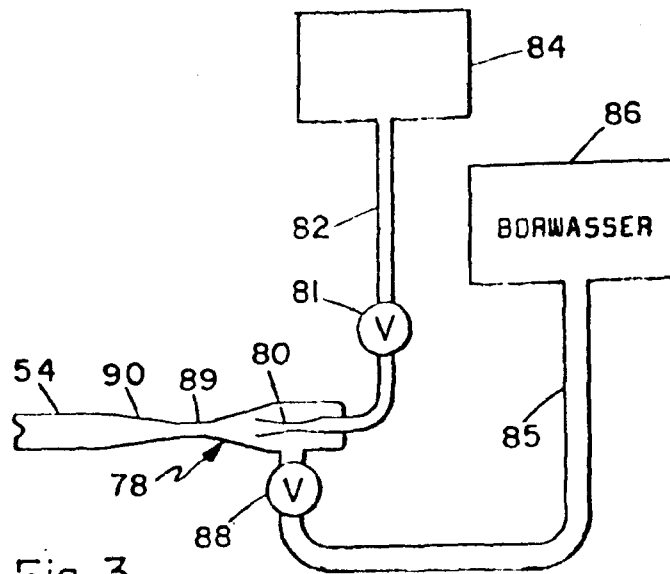


Fig. 3

709848/0799

709848/0799

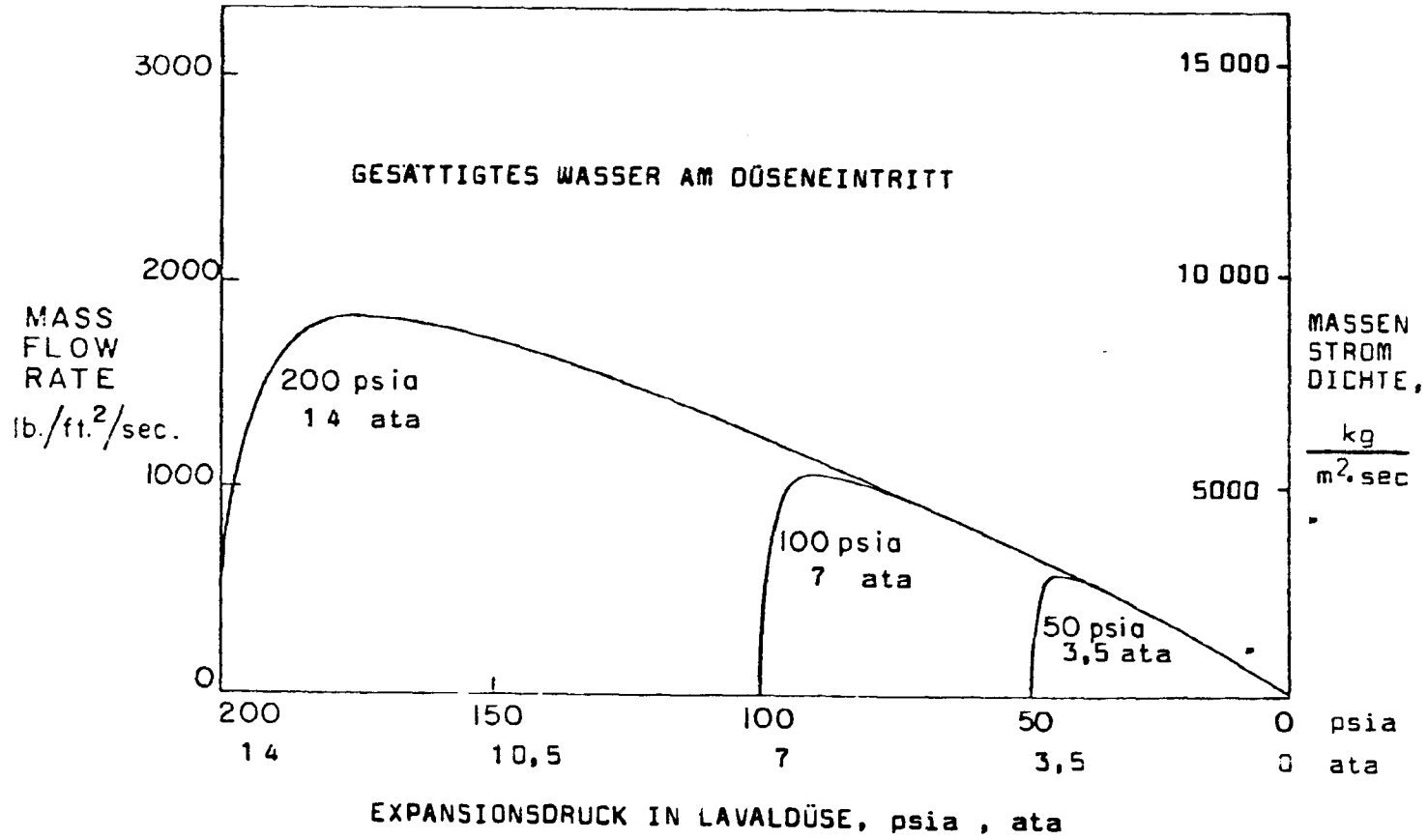


Fig. 4

- 21 -

2719897

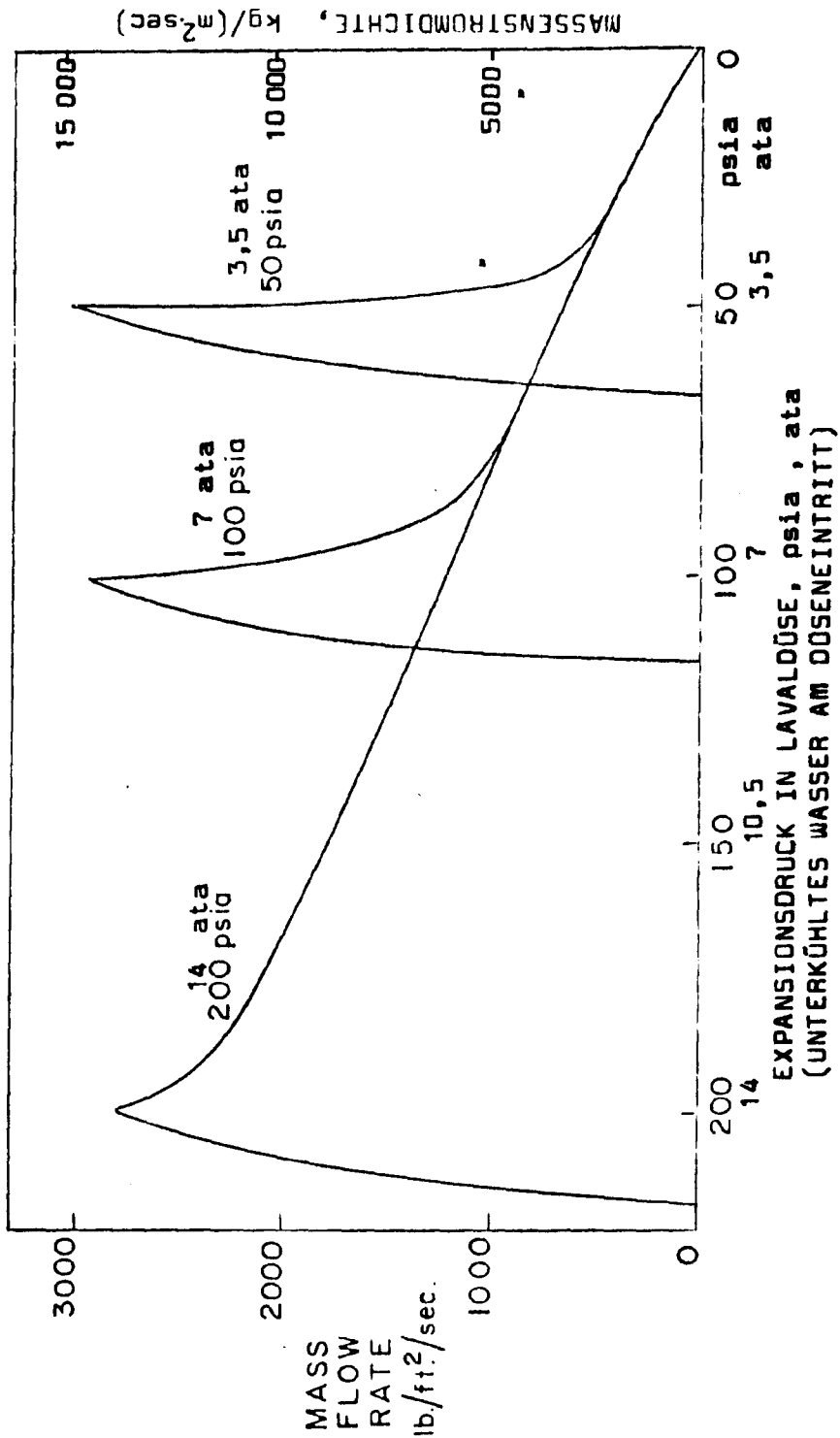


Fig. 5

709848/0799