

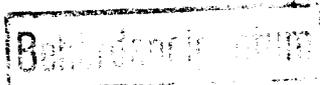
⑤1

Int. Cl. 2:

G 21 D 1/00

F 02 C 1/04

①9 **BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND**



DT 25 26 147 A 1

①1

Offenlegungsschrift 25 26 147

②1

Aktenzeichen: P 25 26 147.6-33

②2

Anmeldetag: 12. 6. 75

④3

Offenlegungstag: 23. 12. 76

③0

Unionspriorität:

③2 ③3 ③1 —

⑤4

Bezeichnung: Verfahren zum Betreiben einer Kernenergieanlage mit geschlossenem Arbeitsgaskreislauf und Kernenergieanlage zur Durchführung des Verfahrens

⑦1

Anmelder: Kernforschungsanlage Jülich GmbH, 5170 Jülich

⑦2

Erfinder: Förster, Siegfried, Dr., 5110 Alsdorf; Dibelius, Günther, Prof., 5100 Aachen; Hewing, Günter, Dr.; Singh, Jasbir, Dr.; 5170 Jülich

Prüfungsantrag gem. § 28 b PatG ist gestellt

DT 25 26 147 A 1

**Kernforschungsanlage Jülich
Gesellschaft mit beschränkter Haftung**

Verfahren zum Betreiben einer Kernenergieanlage mit geschlossenem Arbeitsgaskreislauf und Kernenergieanlage zur Durchführung des Verfahrens

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Betreiben einer Kernenergieanlage mit geschlossenem Arbeitsgaskreislauf und eine Kernenergieanlage zur Durchführung des Verfahrens. Das Verfahren geht davon aus, daß das von einem Kernreaktor erhitzte Arbeitsgas in drei parallel geführten Teilgasströmen drei jeweils gemeinsam mit einem Kompressor auf einer Welle angeordnete Turbinen, die Generatoren antreiben, durchströmt und nach Abgabe von Restwärme an von den Kompressoren komprimiertes, dem Reaktor wieder zugeführtes Arbeitsgas durch drei rekuperative Wärmeübertrager hindurchgeleitet und nach weiterer Abkühlung den Kompressoren zugeführt wird.

Bei Kernenergieanlagen mit geschlossenem Arbeitsgaskreislauf insbesondere bei Kernenergieanlagen, bei denen das Arbeitsgas in Hochtemperaturreaktoren erhitzt wird, ist es bekannt, mehrere geschlossene Arbeitsgaskreisläufe parallel zu schalten. Bei dieser sogenannten Mehrloop-Bauweise wird angestrebt, die im Reaktor aufheizbare Gasmenge durch Aufteilen in mehrere Teilgasströme optimal zu nutzen.

Aus der DT-OS 2 241 426 ist ein Kernkraftwerk mit geschlossenem Arbeitsgaskreislauf bekannt, bei dem innerhalb des den Kernreaktor umgebenden Spannbetonbehälters mehrere parallel

- 2 -

geschaltete Kreislaufkomponenten angeordnet sind. Jedoch wird das im Kernreaktor erhitzte Arbeitsgas einem einzigen, in einem gesonderten Raum unterhalb des Kernreaktors angeordneten Turbosatz zugeleitet, aus dem es dann nach Abgabe seiner Energie in parallel geschaltete Wärmeübertrager abströmt. Nachteilig ist bei dieser Kernenergieanlage, daß bei einer notwendigen Reparatur des Turbosatzes die gesamte Anlage stillgelegt werden muß. Nachteilig ist außerdem, daß infolge der Anordnung eines Niederdruck- und eines Hochdruckverdichters auf einer gemeinsamen Welle mit der Turbine eine verhältnismäßig lange und schwere Rotorwelle erforderlich ist. Darüber hinaus kompliziert die Anordnung des Turbosatzes unterhalb des Kernreaktors die Gasführung zu den Gasein- und Gasauslässen des Turbosatzes. Sie führt zu einem verhältnismäßig großen, von Spannbeton umbauten Raum, so daß die Kosten bei der Erstellung der Anlage erheblich erhöht werden.

Des Weiteren ist aus der DT-OS 1 764 249 eine Kernenergieanlage bekannt, bei der jeder Loop des geschlossenen Arbeitsgaskreislaufes alle zur Durchführung eines Kreisprozesses erforderlichen Komponenten aufweist. Das Komprimieren des Arbeitsgases erfolgt mit Zwischenkühlung. Der Vorteil, der bei dieser Kernenergieanlage durch das Aufteilen der erhitzten Arbeitsgasmenge auf mehrere, parallel geschaltete Arbeitsgaskreisläufe erreicht wird, wird hier mit dem Nachteil erkauft, daß insgesamt lange Gasführungen erforderlich sind. Nachteilig ist außerdem, daß je Loop neben der Nutzturbine ein Turbosatz bestehend aus Turbine und drei Verdichtern benötigt wird. Der apparative Aufwand für die Auslegung der drei gleichartigen Loops ist daher verhältnismäßig hoch.

- 3 -

609852/0482

- 3 -

Aufgabe der Erfindung ist es, ein Verfahren zum Betreiben einer Kernenergieanlage mit geschlossenem Arbeitsgaskreislauf zu schaffen, bei dem die Anlagekosten verringert werden und bei dem gleichzeitig bei optimaler Ausnutzung des umbauten Raumes ein hoher Wirkungsgrad der Kernenergieanlage erreicht wird.

Diese Aufgabe wird gemäß einer ersten Variante der Erfindung bei einer Kernenergieanlage der oben bezeichneten Art dadurch gelöst, daß das in drei Teilgasströmen in den Turbinen entspannte Arbeitsgas nach Durchströmen der drei rekuperativen Wärmeübertrager und nach einer Vorkühlung als Gesamtstrom in einem der Kompressoren in einem ersten Schritt verdichtet und danach gekühlt wird, im Anschluß daran in einem weiteren der Kompressoren in einem zweiten Schritt verdichtet und danach gekühlt wird und im Anschluß daran im dritten Kompressor in einem dritten Schritt verdichtet und danach in drei parallelen Teilströmen in den Wärmeübertragern vorerhitzt wird. Vorteilhaft ist hierbei das Zusammenführen des Arbeitsgases zu einem Gesamtstrom vor der Kompression und die Verdichtung des Arbeitsgases in drei Schritten mit jeweiliger Zwischenkühlung. Einerseits wird hierdurch eine erhebliche Erhöhung des Nettoanlagenwirkungsgrades im Vergleich zu bekannten Kernenergieanlagen mit gleichem apparativen Aufwand erreicht. Es ergeben sich bei gleicher elektrischer Leistung niedrigere Brennstoffzykluskosten. Andererseits lassen sich Verdichter mit geringeren Schaufelzahlen einsetzen, die kostengünstiger herstellbar sind. Vorteilhaft ist beim erfindungsgemäßen Verfahren aber insbesondere, daß die bisher für eine Kernenergieanlage mit drei Loops benötigten Kühler für die Kühlung der einzelnen Teilgasströme vor der Kompression jetzt als Vor- und Zwischenkühler für die

- 4 -

G09852/0482

- 4 -

aufeinander folgenden Kompressionsstufen dienen und so die der Kernenergieanlage bei sonst unveränderten Werten der oberen und unteren Prozeßtemperatur und unveränderter Leistung gegenüber einer Kernenergieanlage mit drei Loops zuzuführende Energie verringert wird, ohne daß für die Zwischenkühlung zusätzliche Aggregate oder zusätzlicher Raum zur Verfügung gestellt werden muß.

Nach einer zweiten Variante der Erfindung wird die Aufgabe bei einer Kernenergieanlage der oben bezeichneten Art dadurch gelöst, daß das in drei Teilgasströmen in den Turbinen entspannte Arbeitsgas nach Durchströmen der drei rekuperativen Wärmeübertrager in zwei Teilgasströmen vorgekühlt und in zwei der Kompressoren in einem ersten Schritt verdichtet wird und danach als Gesamtstrom gekühlt und im dritten Kompressor in einem zweiten Schritt verdichtet und danach in drei parallelen Teilgasströmen in den Wärmeübertragern vorerhitzt wird. Vorteilhaft ist bei dieser Variante der Erfindung die schrittweise Zusammenfassung des Arbeitsgasstromes vor jeder Kompressionsstufe und die Zwischenkühlung des Gesamtgasstromes vor dem letzten Kompressionsschritt. Dies ermöglicht eine Optimierung hinsichtlich der Kosten sowohl bei der erforderlichen Gasverdichtung als auch bei der Auslegung der im geschlossenen Arbeitsgaskreislauf einzusetzenden Kühler auch bei Kernenergieanlagen, mit denen Leistungseinheiten von über 1 000 MWe erzielbar sind.

Eine Kernenergieanlage zur Durchführung der ersten Variante des erfindungsgemäßen Verfahrens besteht in vorteilhafter Weise aus einem in einem Spannbetonbehälter angeordneten Kernreaktor, drei symmetrisch um den Kernreaktor herum in horizontaler Lage angeordneten, Generatoren antreibenden Turbosätzen, zumindest drei parallel geschalteten, vom entspannten und komprimierten

- 5 -

609852/0482

Arbeitsgas durchströmten rekuperativen Wärmeübertragern und zumindest drei Kühlern für das Arbeitsgas, wobei die rekuperativen Wärmeübertrager und Kühler radial um die Kernreaktorachse verteilt, vertikal angeordnet sind und wobei die rekuperativen Wärmeübertrager für das entspannte Arbeitsgas eine mit einem der Auslässe der Turbinen verbundene Gasführung sowie einen Gasauslaß für das gekühlte, entspannte Arbeitsgas und für das komprimierte Arbeitsgas jeweils eine Zuführung zum Wärmeübertrager sowie eine zum Kernreaktor geführte Ableitung aufweisen. Die Erfindung besteht darin, daß den rekuperativen Wärmeübertragern nach Vorkühlung des entspannten Arbeitsgases einer der Kompressoren, ein Niederdruckverdichter, nachgeschaltet ist, daß an der Gasauslaßseite des Niederdruckverdichters eine über einen ersten Zwischenkühler zu einem weiteren der Kompressoren, einem Mitteldruckverdichter, geführte Gasleitung angeschlossen ist, daß an der Gasauslaßseite des Mitteldruckverdichters eine über einen zweiten Zwischenkühler zu dem dritten Kompressor, einem Hochdruckverdichter, geführte Gasleitung angeschlossen ist und daß an der Gasauslaßseite des Hochdruckverdichters drei parallel geführte, mit den Zuführungen der Wärmeübertrager für das komprimierte Arbeitsgas verbundene Gasführungen angeordnet sind. In vorteilhafter Weise wird bei diesem Aufbau der Kernenergieanlage der zur Unterbringung der Kreislaufkomponenten zur Verfügung stehende Raum in Verbindung mit einer zweifachen Zwischenkühlung des Arbeitsgases optimal genutzt. Als Kernenergieanlage zur Durchführung des Verfahrens gemäß der Erfindung eignen sich sowohl Kernenergieanlagen, bei denen Kernreaktor, Turbosätze, rekuperative Wärmeübertrager und Kühler in einem gemeinsamen Spannbetonbehälter untergebracht sind, als auch solche Kernenergieanlagen, bei denen im den Kernreaktor aufnehmenden Spannbetonbehälter rekuperative Wärmeübertrager und Kühler in sogenannten

- 6 -

aus Spannbeton
Satellitenbehältern, die den Kernreaktor umgeben, untergebracht sind und die Turbosätze frei unterhalb des Spannbetonbehälters aufgestellt sind. In vorteilhafter Weise wird gemäß der Erfindung einer der bei Kernenergieanlagen mit drei Loops vorhandenen Kühler als Vorkühler für das gesamte Arbeitsgas vor dem ersten Verdichtungsschritt genutzt. Die übrigen Kühler sind erfindungsgemäß als Zwischenkühler ausgeführt. Dabei sind alle Wärmeübertrager und alle Kühler jeweils in einer der vertikalen Ausnehmungen des Spannbetonbehälters eingesetzt.

Um die zur Führung des Arbeitsgases erforderlichen Gasleitungen oder Gasführungen möglichst kurz zu halten, ist es zweckmäßig, im Umlaufsinn um den Kernreaktor herum neben dem Turbosatz mit Hochdruckverdichter den Vorkühler anzuordnen und neben diesem einen rekuperativen Wärmeübertrager einzusetzen, neben dem Turbosatz mit Niederdruckverdichter den ersten Zwischenkühler anzuordnen und neben diesem einen zweiten rekuperativen Wärmeübertrager einzusetzen und neben dem Turbosatz mit Mitteldruckverdichter den zweiten Zwischenkühler anzuordnen und neben diesem den dritten Wärmeübertrager einzusetzen.

Eine günstige Raumausnutzung des Spannbetonbehälters ist dadurch gegeben, daß die das entspannte Arbeitsgas von den rekuperativen Wärmeübertragern zum Vorkühler führenden Gasleitungen oberhalb der Wärmeübertrager und oberhalb des Vorkühlers im Spannbetonbehälter verlegt sind und oberhalb der Wärmeübertrager und Kühler vorhandene Arbeitsgasräume miteinander verbinden, wobei die Wärmeübertrager und Kühler im Umlaufsinn um den Kernreaktor herum so

- 7 -

609852/0482

- 7 -

angeordnet sind, daß sich neben dem Turbosatz mit Hochdruckverdichter der Vorkühler und neben diesem einer der rekuperativen Wärmeübertrager befindet und daß neben dem Turbosatz mit Niederdruckverdichter der erste und der zweite Zwischenkühler eingesetzt sind und neben dem Turbosatz mit Mitteldruckverdichter die übrigen zwei rekuperativen Wärmeübertrager angeordnet sind. Bei dieser Ausbildung der Kernenergieanlage entfallen in vorteilhafter Weise die sonst erforderlichen Rückführungen des Arbeitsgases nach Durchströmen der Wärmeübertrager in den unteren Bereich des Spannbetonbehälters, die bisher in den dafür bestimmten Ausnehmungen in den Wärmeübertragern vorhanden waren. Es vergrößert sich daher der für den Einbau der rekuperativen Wärmeübertrager zur Verfügung stehende Raumquerschnitt, so daß Wärmeübertrager einsetzbar sind, mit denen sich die austauschbare Wärmemenge erhöhen läßt.

Eine andere Ausgestaltung der Kernenergieanlage gemäß der ersten Variante der Erfindung besteht darin, daß in jeder der einen der rekuperativen Wärmeübertrager aufnehmenden Ausnehmung im Spannbetonbehälter unterhalb der rekuperativen Wärmeübertrager ein Vorkühler angeordnet ist. In diesem Falle durchströmt das die rekuperativen Wärmeübertrager verlassende Arbeitsgas auch die Vorkühler in drei parallel geführten Teilgasströmen. Das Arbeitsgas wird erst nach Durchströmen der Vorkühler als Gesamtgasstrom dem Niederdruckverdichter zugeführt. Mit dieser Maßnahme wird im Vergleich zur bekannten Kernenergieanlage mit drei Loops eine Ausnehmung, die sonst zur Unterbringung von rekuperativen Wärmeübertragern oder Kühlern benötigt wird, eingespart, was den effektiv erforderlich^{en} umbauten Raum für die

- 8 -

609852/0482

- 8 -

Kernenergieanlage verringert und die Herstellungskosten der Anlage erniedrigt. Kurze Gasleitungen oder Gasführungen werden bei dieser Ausgestaltung dadurch erzielt, daß im Umlaufsinn um den Kernreaktor herum neben dem Turbosatz mit Hochdruckverdichter zwei der rekuperativen Wärmeübertrager mit Vorkühler angeordnet sind und daß neben dem Turbosatz mit Niederdruckverdichter der erste Zwischenkühler angeordnet ist und neben diesem ein weiterer Wärmeübertrager mit Vorkühler eingesetzt ist und daß sich neben dem Turbosatz mit Mitteldruckverdichter der zweite Zwischenkühler befindet.

Eine Kernenergieanlage zur Durchführung des Verfahrens nach der zweiten Variante der Erfindung besteht zunächst in gleicher Weise wie die bereits beschriebene Kernenergieanlage zur Durchführung des Verfahrens nach der ersten Variante der Erfindung aus einem in einem Spannbetonbehälter angeordneten Kernreaktor, drei symmetrisch um den Kernreaktor herum in horizontaler Lage angeordneten, Generatoren antreibenden Turbosätzen, zumindest drei parallel geschalteten, vom entspannten und komprimierten Arbeitsgas durchströmten Wärmeübertragern und zumindest drei Kühlern für das Arbeitsgas, wobei die rekuperativen Wärmeübertrager und Kühler radial um die Kernreaktorachse verteilt, vertikal angeordnet sind und wobei die rekuperativen Wärmeübertrager für das entspannte Arbeitsgas jeweils eine mit einem der Gasauslässe der Turbinen verbundene Gasführung sowie einen Gasauslaß für das gekühlte, entspannte Arbeitsgas und für das komprimierte Arbeitsgas jeweils eine Zuführung zum Wärmeübertrager sowie eine zum Kernreaktor geführte Ableitung aufweisen. In vorteilhafter Weise sind bei der Kernenergieanlage gemäß der zweiten Variante jedoch den Wärmeübertragern nach Vorkühlung

- 9 -

609852/0482

- 9 -

des entspannten Arbeitsgases zwei der Kompressoren, zwei Niederdruckverdichter, nachgeschaltet und an den Gasauslassseiten der Niederdruckverdichter zu einem gemeinsamen Zwischenkühler geführte Gasleitungen angeschlossen, wobei dem Zwischenkühler der dritte Kompressor, ein Hochdruckverdichter nachgeschaltet ist, an dessen Gasauslassseite drei parallel geführte, mit den Gaszuführungen der Wärmeübertrager für das komprimierte Arbeitsgas verbundene Gasleitungen angeschlossen sind. Dabei ist in vorteilhafter Weise vorgesehen, daß nur die Turbosätze mit Niederdruckverdichter jeweils einen Generator antreiben. Der Vorteil liegt darin, daß in diesem Falle der Turbosatz mit Hochdruckverdichter ohne eine Ankopplung eines Generators nicht mit der Synchrondrehzahl der Netzfrequenz betrieben werden muß und daher nach strömungsmechanischen Gesichtspunkten optimal auslegbar ist. Überdrehzahlen der Turbowelle z.B. bei Lastabwurf sind beherrschbar.

Auch die Kernenergieanlage zur Durchführung des Verfahrens nach der zweiten Variante der Erfindung kann als Kernenergieanlage mit gemeinsamen Spannbetonbehälter für Kernreaktor, Turbosätze, rekuperative Wärmeübertrager und Kühler aber auch als Kernenergieanlage mit Satellitenbehältern für die rekuperativen Wärmeübertrager und Kühler und frei unterhalb des den Kernreaktor aufnehmenden Spannbetonbehälters aufgestellten Turbosätzen ausgeführt sein.

Bei dieser Variante der Erfindung werden von den bei der Kernenergieanlage vorhandenen Kühlern in vorteilhafter Weise zwei in Parallelschaltung als Vorkühler und der

- 10 -

609852/0482

letzte der Kühler als Zwischenkühler für das gesamte Arbeitsgas benutzt. Dabei erfolgt die Anordnung von im Spannbetonbehälter untergebrachten Vorkühlern und Zwischenkühlern zweckmäßig so, daß im Umlaufsinn um den Kernreaktor herum neben dem Turbosatz mit Hochdruckverdichter der Zwischenkühler und neben diesem ein rekuperativer Wärmeübertrager eingesetzt ist, und daß darauf folgend jeweils neben einem der Turbosätze mit Niederdruckverdichter einer der Vorkühler und ein weiterer rekuperativer Wärmeübertrager angeordnet sind. Eine besonders raumsparende Ausbildung ist auch bei dieser Kernenergieanlage dadurch gegeben, daß in jeder der einen rekuperativen Wärmeübertrager aufnehmenden Ausnehmung im Spannbetonbehälter ein Vorkühler angeordnet ist. In diesem Fall durchströmt das Arbeitsgas die Vorkühler unmittelbar nach Verlassen der rekuperativen Wärmeübertrager in drei parallel geführten Teilgasströmen, die erst nach Durchströmen der Vorkühler auf zwei Teilgasströme reduziert werden.

Bei allen Kernenergieanlagen zur Durchführung der beiden Varianten des erfindungsgemäßen Verfahrens werden die vom Gesamtstrom des Arbeitsgases durchströmten Zwischenkühler und Vorkühler vorzugsweise so ausgeführt, daß jeder Zwischenkühler oder Vorkühler aus zwei vom Arbeitsgas parallel durchströmten Zwischenkühler- oder Vorkühlerapparaten besteht, die in der für die Zwischenkühler oder den Vorkühler vorgesehenen Ausnehmung im Spannbetonbehälter so hintereinander angeordnet sind, daß die Gasaustrittsseite des einen Apparates der Gaseintrittsseite des anderen Apparates gegenübersteht. Bei dieser Anordnung der vom Arbeitsgas parallel durchströmten Zwischen- und Vorkühlerapparate wird die für die Unterbrindung der Kühler vorgesehene Ausnehmung von dem durch die Apparate geleiteten Arbeitsgas

- 11 -

in gleicher Richtung durchströmt, so daß in vorteilhafter Weise die Gasführungen zwischen den Kompressoren und den Zwischenkühlern, beziehungsweise zwischen rekuperativen Wärmeübertragern und Vorkühler jeweils nur an einer der Stirnseiten der Ausnehmungen anzuschließen sind.

Die Gasleitungen für das hochkomprimierte Arbeitsgas werden zweckmäßig so verlegt, daß vom Gasauslaß des Hochdruckverdichters ausgehend eine Gasführung vertikal nach oben verläuft, während zwei weitere Gasführungen zunächst zu den Turbosätzen mit Niederdruck- oder Mitteldruckverdichter geführt sind und erst dann vertikal nach oben verlaufen.

Eine weitere vorteilhafte Ausgestaltung der Erfindung besteht darin, daß die Wellen der aus Turbine und Niederdruckverdichter oder Turbine und Mitteldruckverdichter bestehenden Turbosätze zwischen einem den Turbineneinlaß umgebenden Raum und einem den Verdichterauslaß umgebenden Raum eine Labyrinthdichtung aufweisen, wobei der den Turbineneinlaß umgebende Raum mit einer der am Gasauslaß der Hochdruckverdichter angeschlossenen Gasleitungen in Verbindung steht.

Anhand von Ausführungsbeispielen, die in den Zeichnungen schematisch wiedergegeben sind, werden die Erfindung und weitere vorteilhafte Ausgestaltungen der Erfindung näher erläutert.

Es zeigen

Fig. 1 Schaltplan einer Kernenergieanlage mit geschlossenem Arbeitsgaskreislauf, Schaltung 1

- 12 -

609852/0482

- Fig. 2** Schaltplan einer Kernenergieanlage mit geschlossenem Arbeitsgaskreislauf, Schaltung 2
- Fig. 3** Schaltplan einer Kernenergieanlage mit geschlossenem Arbeitsgaskreislauf, Schaltung 3
- Fig. 4** Draufsicht auf einen Spannbetonbehälter einer Kernenergieanlage, ohne die Darstellung des Kernreaktors, Ausführungsbeispiel 1.1
- Fig. 5** Draufsicht auf einen Spannbetonbehälter einer Kernenergieanlage mit Satellitenbehältern ohne Darstellung des Kernreaktors, Ausführungsbeispiel 1.2
- Fig. 6** Draufsicht auf einen Spannbetonbehälter einer Kernenergieanlage mit im oberen Bereich des Spannbetonbehälters verlegten Gasleitungen für das entspannte Arbeitsgas zwischen rekuperativen Wärmedübertragern und Vorkühler, Ausführungsbeispiel 1.3

- 13 -

Fig. 7 Draufsicht auf einen Spannbetonbehälter einer Kernenergieanlage ohne Darstellung des Kernreaktors, Ausführungsbeispiel 2.1

Fig. 8 Draufsicht auf einen Spannbetonbehälter einer Kernenergieanlage mit Satellitenbehältern, ohne Darstellung des Kernreaktors, Ausführungsbeispiel 2.2

Fig. 9 Draufsicht auf einen Spannbetonbehälter einer Kernenergieanlage, ohne Darstellung des Kernreaktors, Ausführungsbeispiel 3.1

Fig. 10 Zwei in einer Ausnehmung des Spannbetonbehälters hintereinander angeordnete Vorkühlerapparate in Parallelschaltung

Fig. 11 Zwei in einer Ausnehmung hintereinander angeordnete Zwischenkühlerapparate in Parallelschaltung

Fig. 12 Turbosatz mit Hochdruckverdichter

Fig. 13 Turbosatz mit Niederdruckverdichter

- 14 -

Die in der Zeichnung dargestellten Ausführungsbeispiele gehen von drei verschiedenen Schaltungen des Arbeitsgaskreislaufes aus, Fig. 1 bis Fig. 3. Die Schaltungen 1 und 2 der Fig. 1 und 2 entsprechen der ersten Variablen des erfindungsgemäßen Verfahrens zum Betreiben einer Kernenergieanlage, die Schaltung, Fig. 3 entspricht der zweiten Variablen des erfindungsgemäßen Verfahrens. Die Ausführungsbeispiele der in den nachfolgenden Figuren der Zeichnung schematisch wiedergegebenen Kernenergieanlagen gemäß der Erfindung beziehen sich auf diese Schaltungen. Zur Verdeutlichung der Zugehörigkeit zwischen Ausführungsbeispiel und Schaltung sind die Ausführungsbeispiele zur Schaltung 1 mit 1.1, 1.2, 1.3, die Ausführungsbeispiele zur Schaltung 2 mit 2.1, 2.2 und ein Ausführungsbeispiel zur Schaltung 3 mit 3.1 bezeichnet.

Bei allen Ausführungsbeispielen sind symmetrisch um einen Kernreaktor 1 herum drei Turbosätze 2 bis 4 in horizontaler Lage angeordnet. In Strömungsrichtung des Arbeitsgases gesehen sind den drei Turbinen T der Turbosätze 2 bis 4 drei parallel geschaltete rekuperative Wärmeübertrager 5 nachgeordnet, von denen jeder der Übersichtlichkeit halber in der Zeichnung mit der gleichen Ziffer versehen ist. Von den Turbinen verlaufen zu den Wärmeübertragern 5 Gasführungen 6. Das hoch komprimierte Arbeitsgas strömt den Wärmeübertragern 5 über Gasführungen 7 zu und wird durch Gasleitungen 8 aus den Wärmeübertragern zum Kernreaktor 1 geführt. Nach Erhitzung im Kernreaktor fließt das Arbeitsgas durch parallel geschaltete Gasführungen 9 zu den

Einlassseiten der Turbinen der Turbosätze 2 bis 4. Von den Turbosätzen werden Generatoren G angetrieben.

Bei den Ausführungsbeispielen, die den Schaltungen 1 und 2 entsprechen, ist jeweils der Turbosatz 2 mit einem Niederdruckverdichter 2a, der Turbosatz 3 mit einem Mitteldruckverdichter 3a und der Turbosatz 4 mit einem Hochdruckverdichter 4a ausgerüstet. Erfindungsgemäß wird das Arbeitsgas vor jedem Kompressionsschritt in Zwischenkühlern 10, 11 gekühlt. Für die Vorkühlung des Arbeitsgases vor Eintritt in den Niederdruckverdichter 2a ist gemäß Schaltung 1 bei den Ausführungsbeispielen 1.1 bis 1.3 jeweils ein Vorkühler 12 für das gesamte Arbeitsgas vorgesehen. Zum Vorkühler 12 führt eine das Arbeitsgas zusammenführende Gasleitung 13. Im Gegensatz hierzu weisen die gemäß der Schaltung 2 ausgeführten Kernenergieanlagen 2.1 und 2.2 drei Vorkühler 12', 12'', 12''' auf, die, wie aus den Fig. 7 und 8 ersichtlich ist, in den für die rekuperativen Wärmeübertrager 5 vorgesehenen Ausnehmungen eines den Kernreaktor 1 umgebenden Spannbetonbehälters 14 untergebracht und unterhalb der Wärmeübertrager 5 angeordnet sind. Den Vorkühlern 12', 12'', 12''' wird das Arbeitsgas von den Wärmeübertragern 5 über Gasleitungen 13', 13'', 13''' zugeführt. Das vorgekühlte Arbeitsgas strömt dem Niederdruckverdichter 2a des Turbosatzes 2 durch die Gasleitung 15 als Gesamtstrom zu.

- 16 -

An der Auslassseite des Niederdruckverdichters 2a ist eine Gasführung 16 angeschlossen, die zum ersten Zwischenkühler 10 führt. Nach der Zwischenkühlung wird das Arbeitsgas in einer Gasführung 17 zum Mitteldruckverdichter 3a geleitet. Vom Mitteldruckverdichter strömt das Arbeitsgas über die Gasführung 18 zum zweiten Zwischenkühler 11 und von hier aus über die Gasführung 19 zur Einlassseite des Hochdruckverdichters 4a. Das hoch komprimierte Arbeitsgas wird in drei Teilgasströmen in jeweils mit den Zuführungen 7 der Wärmeübertrager 5 verbundenen Gasleitungen 2c zu den rekuperativen Wärmeübertragern 5 geführt.

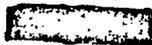
In Fig. 4 ist ein Ausführungsbeispiel 1.1 nach Schaltung 1 dargestellt. Bei dieser Kernenergieanlage sind alle Komponenten des Arbeitsgaskreislaufes in einem gemeinsamen Spannbetonbehälter 14 untergebracht. Die Anordnung der Kreislaufkomponenten im Spannbetonbehälter ist mit Vorteil so getroffen, daß möglichst kurze Gasleitungen und Gasführungen entstehen. Im Umlaufsinn um den Kernreaktor 1 herum, auf dessen Darstellungen in den Fig. 4 bis 9 der Übersichtlichkeit halber verzichtet wurde, in den Ausführungsbeispielen jeweils im Umlaufsinn eines Uhrzeigers um den Kernreaktor herum sind in einzelnen, den Kreislaufkomponenten angepaßten Ausnehmungen des Spannbetonbehälters 14 neben dem Turbosatz 1 mit Hochdruckverdichter 4a der Vorkühler 12 und daneben einer der rekuperativen Wärmeübertrager 5 angeordnet. Neben dem Turbosatz 2 mit Niederdruckverdichter 2a ist der Zwischenkühler 10 und neben diesem ein weiterer rekuperativer

- 17 -

609852/0482

COPY

Wärmeübertrager 5 eingesetzt. Auf den Turbosatz 3 mit Mitteldruckverdichter 3a folgen der zweite Zwischenkühler 11 und der dritte Wärmeübertrager 5. Die gleiche Anordnung der Kreislaufkomponenten im Umlaufsinn zeigt Fig. 5 für eine Kernenergieanlage, bei der die rekuperativen Wärmeübertrager 5, der Vorkühler 12 und die Zwischenkühler 10 und 11 in sogenannten Satellitenbehältern 21 eingesetzt sind. Bei dieser Kernenergieanlage stehen die Turbosätze 2 bis 4 unterhalb des Spannbetonbehälters 14 in Freiaufstellung. Auch die Gasleitungen und Gasführungen zwischen den einzelnen Kreislaufkomponenten sind als Freileitungen verlegt.

In den Ausführungsbeispielen nach Fig. 4 und 5 sind die gemäß der Erfindung vorgesehenen Kreislaufkomponenten in Spannbetonbehältern eingesetzt, wie sie sonst für Kernenergieanlagen mit drei Loops benötigt werden. Die Anzahl und die Anordnung der Ausnehmungen für die Unterbringung der Kreislaufkomponenten bleibt unverändert. Es ist daher bei der Durchführung des erfindungsgemäßen Verfahrens in vorteilhafter Weise möglich, auf bereits bestehende  Konzeptionen für den Bau von Spannbetonbehältern zurückzugreifen.

Ein weiteres auf der Schaltung 1 beruhendes Ausführungsbeispiel 1.3 ist schematisch in Fig. 6 dargestellt. Bei dieser Kernenergieanlage ist die Gasleitung 13 zwischen rekuperativen Wärmeübertragern 5 und Vorkühlern 12 im oberen Bereich des Spannbetonbehälters 14 verlegt. Die Gasleitung 13 verbindet jeweils oberhalb der rekuperativen Wärmeübertrager 5 in den Ausnehmungen für die Wärmeübertrager vorhandene Gasräume mit einem Gasraum, der in der Ausnehmung für den Vorkühler 12 oberhalb des Vorkühlers vorhanden ist. Dabei ist es zweckmäßig,

die Kreislaufkomponenten im Spannbetonbehälter 14 so anzuordnen, daß zwei der rekuperativen Wärmeübertrager 5 unmittelbar benachbart sind. Beim Ausführungsbeispiel 1.3 ist daher im Uhrzeigersinn um den Kernreaktor herum die folgende Reihenfolge der Kreislaufkomponenten gegeben: Turbosatz 4, Vorkühler 12, einer der rekuperativen Wärmeübertrager 5, Turbosatz 2, der erste Zwischenkühler 10, der zweite Zwischenkühler 11, Turbosatz 3 und zwei weitere rekuperative Wärmeübertrager 5.

In Fig. 6 ist der notwendige Aufbau des Spannbetonbehälters 14 für die Kernenergieanlage gemäß Ausführungsbeispiel 1.3 sehr schematisiert dargestellt. Außer den das hoch komprimierte Arbeitsgas zu den rekuperativen Wärmeübertragern 5 leitenden Gasführungen 7 sind in der Fig. 6 auch Sperrorgane aufweisende Bypasleitungen 22 dargestellt, die die Gaszuführungen 7 mit den Gasleitungen 13 verbinden. Die Bypasleitungen 22 dienen in weiterer Ausgestaltung der Erfindung zur Durchführung von An- und Abfahrvorgängen sowie zur Leistungsänderung und zur Beherrschung der Kernenergieanlage für den Fall des Lastabwurfs, d.h. für den Fall, daß von den Turbosätzen keine Leistung an die Generatoren G abgegeben wird. Eine Bypasleitung 22 ist auch in den Ausführungsbeispielen 1.1 und 1.2 vorgesehen. Zur Steuerung der Kernenergieanlage besteht des weiteren über mit Ab-sperrorganen ausgerüstete Bypasleitungen 23 eine Verbindung zwischen der hoch komprimiertes Arbeitsgas führenden Gasleitung 20 und den Gasführungen 6, die zur Leitung des von den Turbinen entspannten Arbeitsgases zu den rekuperativen Wärmeübertragern 5 dienen. Zusätzlich sind auch die Hochdruck- und Niederdruckseiten

609852/0482

der Verdichter der Turbosätze 2 und 3 über Bypässe 24 kurzgeschlossen. Die Bypaßleitungen 22 und die Bypässe 24 werden im unteren Bereich des Spannbetonbehälters 14, beziehungsweise bei außerhalb des Spannbetonbehälters in Freiaufstellungen angeordneten Turbosätzen unterhalb des Spannbetonbehälters verlegt.

Um die Durchführung von Leistungsänderungen bei den gemäß der Erfindung ausgeführten Kernenergieanlagen zu erleichtern, ist in weiterer Ausgestaltung der Erfindung vorgesehen, daß ein Frequenzregelspeicher 25 eingesetzt ist, der über Absperrorgane 26 einerseits mit dem am Gasauslaß des Hochdruckverdichters 4a angeschlossenen Gasleitungen 20 und andererseits mit dem am Gasinlaß des Hochdruckverdichters 4a angeschlossenen Gasführungen 19 verbunden ist. Der Frequenzregelspeicher 25 läßt sich in vorteilhafter Weise auch in den Ausführungsbeispielen 2.1, 2.2 und 3.1 verwenden, wie aus Fig. 2 und 3 ersichtlich ist.

Die Ausführungsbeispiele 2.1 und 2.2 gemäß Schaltung 2 nach Fig. 2 zeigen Fig. 7 und 8. Das Ausführungsbeispiel 2.1 bezieht sich auf eine Kernenergieanlage, bei der alle Komponenten des Arbeitsgaskreislaufes im Spannbetonbehälter 14 untergebracht sind. Beim Ausführungsbeispiel 2.2, Fig. 8 sind - in gleicher Weise wie im Ausführungsbeispiel 1.2, Fig. 5 - Satellitenbehälter 21 zur Unterbrindung der rekuperativen Wärmeübertrager 5 mit Vorkühlern 12', 12'', 12''' und für die Zwischenkühler 10 und 11 vorgesehen. In den Ausführungsbeispielen 2.1 und 2.2 wird das Arbeitsgas erst nach Durchströmen der Vorkühler 12', 12'', 12''' und der Gasleitung 15 am Niederdruckverdichter 2a des

- 20 -

Turbosatzes 2 zusammengefaßt. Die Schaltung 2 hat den Vorteil, daß bei Verwendung von Spannbetonbehältern, wie sie für Kernenergieanlagen mit drei Loops erforderlich sind, eine der im Spannbetonbehälter 14 vorhandene Ausnehmung leer bleibt. In dieser Ausnehmung lassen sich dann andere Anlagenteile der Kernenergieanlage einsetzen, die sonst zusätzlichen Raum benötigen. Für die Unterbringung der gemäß Schaltung 2 erforderlichen Wärmeübertrager, Vorkühler und Zwischenkühler sind nur fünf Ausnehmungen, beziehungsweise Satellitenbehälter erforderlich. Die Kreislaufkomponenten werden im Hinblick auf einen optimalen Verlauf der Gasleitungen und Gasführungen im Uhrzeigersinn um den Kernreaktor herum mit Vorteil so angeordnet, daß nach dem Turbosatz 4 mit Hochdruckverdichter 4a zwei rekuperative Wärmeübertrager 5 - jeweils in einer Ausnehmung mit einem der Vorkühler 12', 12'' - angeordnet sind, daß auf den Turbosatz 2 mit Niederdruck^{verdichter} 2a der erste Zwischenkühler 10 und der dritte rekuperative Wärmeübertrager 5 mit einem dritten Vorkühler 12''' folgen und daran anschließend der Turbosatz 3 mit Mitteldruckverdichter 3a und der zweite Zwischenkühler 11 eingesetzt sind. Bei den Ausführungsbeispielen 2.1 und 2.2 ist es zweckmäßig, die rekuperativen Wärmeübertrager 5 und die daran angeschlossenen Vorkühler 12', 12'', 12''' vom entspannten Arbeitsgas von oben nach unten durchströmen zu lassen. Die Gasführungen 6 sind daher als Steigleitungen verlegt und münden in oberhalb der rekuperativen Wärmeübertrager 5 vorhandenen Gasräumen. Auch bei den Ausführungsbeispielen 2.1 und 2.2 sind Bypassleitungen 22 bis 24 vorgesehen, wobei allerdings für den Bypass

- 21 -

609852/0482

zwischen Gasführungen 7 und zu den Vorkühlern $12'$, $12''$, $12'''$ führenden Gasleitungen $13'$, $13''$, $13'''$ je eine Bypassleitung $22'$, $22''$, $22'''$ angeordnet sind, die im oberen Bereich, beziehungsweise oberhalb des Spannbetonbehälters 14 verlaufen.

Die in Fig. 9 dargestellte Kernenergieanlage, Ausführungsbeispiel 3.1 weist zwei Turbosätze 2^I und 2^{II} mit je einem Niederdruckverdichter $2a^I$ und $2a^{II}$ und zwei Vorkühlern 12^I und 12^{II} auf. Das entspannte Arbeitsgas wird bei diesem Ausführungsbeispiel gemäß Schaltung 3 nach Durchströmen der rekuperativen Wärmeübertrager 5 zunächst in zwei parallel geführten Teilgasströmen vorgekühlt und in einem ersten Schritt verdichtet. Vor dem zweiten Kompressionsschritt im Hochdruckverdichter 4a des Turbosatzes 4 wird das Arbeitsgas zusammengefaßt und als Gesamtstrom vom Ausgang der Niederdruckverdichter 2^I und 2^{II} über eine Gasleitung 27 einem Zwischenkühler 28 zugeführt. Vom Zwischenkühler 28 strömt das Arbeitsgas über die Gasführungen 19 zum Hochdruckverdichter 4a. Es ist vorgesehen, daß nur die Turbosätze mit Niederdruckverdichter, die Turbosätze 2^I und 2^{II} mit Generatoren G_I und G_{II} verbunden sind. Die Generatoren G_I und G_{II} sind für gleichgroße Leistung ausgelegt. Mit dem Turbosatz 4 mit Hochdruckverdichter ist kein Generator verbunden. Die von der Turbine dieses Turbosatzes erzeugte Energie wird im wesentlichen zum Antrieb des Hochdruckverdichters verwendet. In Abänderung des Ausführungsbeispiels kann ein geringer Energieüberschuß einem Generator geringer Leistung zugeführt werden.

- 22 -

Zweckmäßig sind beim Ausführungsbeispiel 3.1 die Kreislaufkomponenten in folgender Reihenfolge im Uhrzeigersinn um den Kernreaktor herum angeordnet: Turbosatz 4 mit Hochdruckverdichter 4a, Zwischenkühler 28, ein erster rekuperativer Wärmeübertrager 5, ein Turbosatz 2^I mit Niederdruckverdichter 2a^I, ein Vorkühler 12^I, ein zweiter rekuperativer Wärmeübertrager 5, der zweite Turbosatz 2^{II} mit Niederdruckverdichter 2a^{II}, der zweite Vorkühler 12^{II} und der dritte rekuperative Wärmeübertrager 5. Diese Anordnung der Kreislaufkomponenten würde in gleicher Weise auch bei einer Kernenergieanlage zweckmäßig sein, bei der die Wärmeübertrager, die Vorkühler und der Zwischenkühler in Satellitenbehältern untergebracht sind. Ein Ausführungsbeispiel dieser Art, das bis auf das Verlegen der Gasleitungen und Gasführungen keine Besonderheiten aufweisen würde, ist in der Zeichnung nicht dargestellt.

Für die Auslegung der Zwischenkühler 10 und 11 oder für den Vorkühler 12, der vom gesamten Arbeitsgas durchströmt wird, aber auch für die Vorkühler 12^I, und 12^{II} ist es in einer weiteren Ausgestaltung der Erfindung zweckmäßig, in den für diese Kühler vorgesehenen Ausnehmungen im Spannbetonbehälter 14 jeweils zwei parallel geschaltete Apparate einzusetzen, die so hintereinander angeordnet sind, daß die Gasaustrittsseite des einen Apparates der Gaseintrittsseite des anderen Apparates gegenüberliegt, Fig. 10 und 11. Aus Fig. 10 ist schematisch die Ausbildung eines Vorkühlers 12 nach Ausführungsbeispiel 1.3 ersichtlich. Das Arbeitsgas wird dem Vorkühler 12 über die Gasleitung 13 von oben zugeführt. Der Vorkühler 12 besteht aus zwei Vorkühlerapparaten 12a, 12b, die vom Arbeitsgas in gleicher Richtung durchströmt werden. Der obere Vorkühlerapparat 12a ist

- 23 -

609852/0482

so bemessen, daß zwischen der Wandung des Vorkühlerapparates 12a und der Wandung der Ausnehmung ein Zwischenraum 30 vorhanden ist, durch den der im Vorkühlerapparat 12b vor- kühlende Teil des Arbeitsgases hindurchströmt. Der Vorkühler- apparat 12b weist zentral eine koaxial Gasleitung 30 auf, durch die das im Vorkühlerapparat 12a gekühlte Arbeitsgas in einem unterhalb der Vorkühler 12a und 12b vorgesehenen Gasraum 31 geleitet wird. Die beiden Vorkühlerapparate 12a und 12b sind so ausgelegt, daß beide Vorkühlerapparate etwa von der gleichen Arbeitsgasmenge durchströmt werden.

In der gleichen Weise wie der Vorkühler 12 nach Fig. 10 ist auch der in Fig. 11 dargestellte Zwischenkühler 10 ausgebildet. Der Zwischenkühler besteht aus zwei parallel geschalteten Zwischenkühlerapparaten 10a, 10b, die so hintereinander angeordnet sind, daß die Gasaustrittsseite des einen Apparates der Gaseintrittsseite des anderen Apparates gegenüberliegt, so daß beide Apparate vom Arbeitsgas in gleicher Richtung durchströmt werden. Es ist zweckmäßig, die Abmessungen der Zwischenkühlerapparate 10a und 10b so zu wählen, daß zwischen der Wandung der Zwischenkühlerapparate 10a und 10b und der Wandung der Ausnehmung im Spannbetonbehälter 14 ein Zwischenraum 32 gebildet wird, durch den das über die Gasführung 16 dem Zwischenkühler zugeführte Arbeitsgas zu den Eingangsseiten 33 der Zwischenkühlerapparate strömt. Die Zwischenkühlerapparate 10a und 10b werden vom Arbeitsgas von oben nach unten durch- setzt und über die Gasleitung 17 zum Mitteldruckverdichter 3b geleitet. Wie der in Fig. 11 dargestellte Zwischenkühler 10 sind bei den in den Ausführungsbeispielen wiedergegebenen erfindungsgemäßen Kernenergieanlagen auch die Zwischenkühler 11 und 28 ausgeführt.

Eine zweckmäßige Ausführungsform für die Anordnung der Gasleitungen und Gasführungen im Bereich der im Spannbetonbehälter untergebrachten Turbosätze zeigen Fig. 12 für den Turbosatz 4 mit Hochdruckverdichter 4a und Fig. 13 für den Turbosatz 2 mit Niederdruckverdichter 2a. Die Ausbildung des Turbosatzes 3 mit Mitteldruckverdichter 3a entspricht der Ausbildung des Turbosatzes 2 mit Niederdruckverdichter. Am Gasauslaß 34 des Hochdruckverdichters 4a ist eine Verzweigung der Gasleitungen 20 vorgesehen. Ein Drittel des Arbeitsgases strömt unmittelbar vom Gasauslaß 34 des Hochdruckverdichters in eine der Zuführungen 7, die als Steigleitungen zu den rekuperativen Wärmeübertragern 5 geführt sind. Die anderen Teilgasmengen werden durch horizontal verlaufende Gasleitungen 20a und 20b im Spannbetonbehälter 14 zunächst zu den Turbosätzen 2 und 3 geführt. Die hoch komprimierten Gase werden hier in vorteilhafter Weise zur Abdichtung des Turbineneinlasses 35 gegenüber dem Verdichterauslaß 36 ausgenutzt. Das den Gasleitungen 20a, beziehungsweise 20b entströmende hoch komprimierte Arbeitsgas wird in einen den Turbineneinlaß 35 umgebenden Raum 37 eingeführt und strömt von hier aus in die zu einem der rekuperativen Wärmeübertrager 5 führende Zuleitung 7. Als Dichtelement zwischen dem Raum 37 und einem den Verdichterauslaß 36 umgebenden Raum wird zweckmäßig eine auf der Welle 38 des Turbosatzes sitzende Labyrinthdichtung 39 verwendet. Auch bei Kernenergieanlagen, bei denen die Turbinensätze 2 bis 4 außerhalb des Spannbetonbehälters angeordnet sind, ist eine Abdichtung der Turbinensätze in der gleichen zweckmäßigen Weise zu erreichen. In diesen Fällen sind, wie in Fig. 8 gezeigt ist, Stichleitungen 40 von den das hoch komprimierte Arbeitsgas führenden Gasleitungen 20 zu den die Turbineneinlässe umgebenden Räumen geführt, die dann gegenüber den Verdichterauslässen ebenfalls mit Labyrinthdichtungen abgedichtet sind. In den Schächten der Zuführungen 7 sind die Gasführungen 9, die das heiße Arbeitsgas vom Kernreaktor zu den Turbinen leiten, verlegt.

Bei allen Ausführungsbeispielen gemäß der Erfindung wird durch Zusammenführen des Arbeitsgases nach Durchströmen der rekuperativen Wärmoübertrager und durch Ausnutzen der Turbosätze zur Verdichtung des Arbeitsgases in mehreren Schritten mit Zwischenkühlung gegenüber konventionellen Kernenergieanlagen eine erhebliche Steigerung der thermodynamischen Qualität unter Beibehaltung sonst gleicher Konzeptionen für den Anlagenbau, insbesondere für den Bau des Spannbetonbehälters erreicht. Es wird dafür Sorge getragen, daß die zur Realisierung der erfindungsgemäßen Schaltungen erforderlichen Gasleitungen und Gasführungen im Hinblick auf Leitungsführung und Länge der Leitungen optimal verlegt sind. Ein günstiges Anfahrverhalten und die Durchführung rascher Leistungsänderungen werden durch zweckmäßig angeordnete Bypässe und durch den Anschluß eines Frequenzregelspeichers erzielt. Bevorzugt bestehen die erfindungsgemäß einzusetzenden Zwischenkühler und Vorkühler, soweit sie große Arbeitsgasvolumen verarbeiten müssen, aus zwei vom Arbeitsgas gleichgerichtet durchströmten, parallel geschalteten Apparaten. Die beispielhaft ausgeführten Kernenergieanlagen gemäß der Erfindung weisen daher nicht nur Vorteile bezüglich der thermodynamischen Qualität, sondern auch bezüglich ihrer konstruktiven Ausbildung auf.

P a t e n t a n s p r ü c h e

1. Verfahren zum Betreiben einer Kernenergieanlage mit geschlossenem Arbeitsgaskreislauf, bei dem das von einem Kernreaktor erhitzte Arbeitsgas in drei parallel geführten Teilgasströmen drei jeweils gemeinsam mit einem Kompressor auf einer Welle angeordnete Turbinen, die Generatoren antreiben, durchströmt und zur Abgabe von Restwärme von den Kompressoren komprimiertes, dem Reaktor wieder zugeführtes Arbeitsgas durch drei rekuperative Wärmeübertrager hindurchgeleitet und nach weiterer Abkühlung den Kompressoren zugeführt wird, d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t, daß das in drei Teilgasströmen in den Turbinen entspannte Arbeitsgas nach Durchströmen der drei rekuperativen Wärmeübertrager und nach einer Vorkühlung als Gesamtstrom in einem der Kompressoren in einem ersten Schritt verdichtet und danach gekühlt wird, im Anschluß daran in einem weiteren der Kompressoren in einem zweiten Schritt verdichtet und danach gekühlt wird und im Anschluß daran im dritten Kompressor in einem dritten Schritt verdichtet und danach in drei parallelen Teilströmen in den Wärmeübertragern vorerhitzt wird.

2. Verfahren zum Betreiben einer Kernenergieanlage mit geschlossenem Arbeitsgaskreislauf, bei dem das von einem Kernreaktor erhitzte Arbeitsgas in drei parallel geführten Teilgasströmen drei jeweils gemeinsam mit einem Kompressor auf einer Welle angeordnete Turbinen, die

Generatoren antreiben, durchströmt und zur Abgabe von Restwärme an von den Kompressoren komprimiertes, dem Reaktor wieder zugeführtes Arbeitsgas durch drei rekuperative Wärmeübertrager hindurchgeleitet und nach weiterer Abkühlung den Kompressoren zugeführt wird, **d a - d u r c h g e k e n n z e i c h n e t**, daß das in drei Teilgasströmen in den Turbinen entspannte Arbeitsgas nach Durchströmen der drei rekuperativen Wärmeübertrager in zwei Teilgasströmen vorgekühlt und in zwei der Kompressoren in einem ersten Schritt verdichtet wird und danach als Gesamtstrom gekühlt und im dritten Kompressor in einem zweiten Schritt verdichtet und danach in drei parallelen Teilgasströmen in den Wärmeübertragern vorerhitzt wird.

3. Kernenergieanlage zur Durchführung des Verfahrens gemäß Patentanspruch 1, bestehend aus einem in einem Spannbetonbehälter angeordneten Kernreaktor, drei symmetrisch um den Kernreaktor herum in horizontaler Lage angeordneten, Generatoren antreibenden Turbosätzen, zumindest drei parallel geschalteten, vom entspannten und komprimierten Arbeitsgas durchströmten rekuperativen Wärmeübertragern und zumindest drei Kühlern für das Arbeitsgas, wobei die rekuperativen Wärmeübertrager und Kühler radial um die Kernreaktorachse verteilt, vertikal angeordnet sind und wobei die rekuperativen Wärmeübertrager für das entspannte Arbeitsgas eine mit einem der Auslässe der Turbinen verbundene Gasführung sowie einen Gasauslaß für das gekühlte, entspannte Arbeitsgas und für das komprimierte Arbeitsgas jeweils eine Gaszuführung zum Wärmeübertrager sowie eine Gasableitung zum Kernreaktor aufweisen, **d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t**, daß den rekupe-

- 28 -

rativen Wärmeübertragern (5) nach Vorkühlung des entspannten Arbeitsgases einer der Kompressoren, ein Niederdruckverdichter (2a) nachgeschaltet ist, daß an der Gasauslassseite des Niederdruckverdichters (2a) eine über einen ersten Zwischenkühler (10) zu einem weiteren der Kompressoren, einem Mitteldruckverdichter (3a) geführte Gasführung (16,17) angeschlossen ist, daß an der Gasauslassseite des Mitteldruckverdichters (3a) eine über einen zweiten Zwischenkühler (11) zu dem dritten Kompressor, einem Hochdruckverdichter (4a) geführte Gasleitung (18,19) angeschlossen ist, und daß an der Gasauslassseite des Hochdruckverdichters (4a) drei parallel geschaltete, mit den Gaszuführungen (7) der Wärmeübertrager (5) für das komprimierte Arbeitsgas verbundene Gasleitungen (20) angeordnet sind.

4. Kernenergieanlage nach Anspruch 3, d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t, daß im Umlaufsinn um den Kernreaktor (1) herum neben dem Turbosatz mit Hochdruckverdichter (4a) der Vorkühler (12) angeordnet ist und neben diesem ein rekuperativer Wärmeübertrager (5) eingesetzt ist, neben dem Turbosatz mit Niederdruckverdichter (2a) der erste Zwischenkühler (10) angeordnet ist und neben diesem ein zweiter rekuperativer Wärmeübertrager (5) eingesetzt ist und neben dem Turbosatz mit Mitteldruckverdichter (3a) der zweite Zwischenkühler (11) angeordnet ist und neben diesem der dritte Wärmeübertrager (5) eingesetzt ist.

- 29 -

609852/0482

COPY

- 29 -

5. Kernenergieanlage nach Anspruch 3, d a d u r c h g e -
k e n n z e i c h n e t, daß die das entspannte Arbeits-
gas von den rekuperativen Wärmeübertragern (5) zum Vorkühler (12) führenden Gasleitungen (13) oberhalb der Wärmeübertrager (5) und oberhalb des Vorkühlers (12) im Spannbetonbehälter (14) verlegt sind und Gasräume oberhalb der Wärmeübertrager (5) und des Vorkühlers (12) miteinander verbinden, wobei die Wärmeübertrager und Kühler im Umlaufsinn um den Kernreaktor herum so angeordnet sind, daß sich neben dem Turbosatz (4) mit Hochdruckverdichter (4a) der Vorkühler (12) und neben diesem einer der rekuperativen Wärmeübertrager (5) befindet und daß neben dem Turbosatz (2) mit Niederdruckverdichter (2a) der erste ^{Zwischenkühler} (10) und der zweite Zwischenkühler (11) eingesetzt sind und neben dem Turbosatz (3) mit Mitteldruckverdichter (3a) die übrigen zwei rekuperativen Wärmeübertrager (5) angeordnet sind.
6. Kernenergieanlage nach Anspruch 3, d a d u r c h g e -
k e n n z e i c h n e t, daß in jeder der einen der rekuperativen Wärmeübertrager (5) aufnehmenden Ausnehmung im Spannbetonbehälter ⁽¹⁴⁾ unterhalb der rekuperativen Wärmeübertrager ein Vorkühler (12', 12'', 12''') angeordnet ist.
7. Kernenergieanlage nach Anspruch 6, d a d u r c h g e -
k e n n z e i c h n e t, daß im Umlaufsinn um den Kernreaktor herum neben dem Turbosatz (4) mit Hochdruckverdichter (4a) zwei der rekuperativen Wärmeübertrager (5) mit Vorkühler (12', 12'') angeordnet sind und daß neben dem Turbosatz (2) mit Niederdruckverdichter (2a) der

- 30 -

609852/0482

COPY

erste Zwischenkühler (10) angeordnet ist und neben diesem ein weiterer Wärmeübertrager (5) mit Vorkühler (12''') eingesetzt ist und daß sich neben dem Turbosatz (3) mit Mitteldruckverdichter (3a) der zweite Zwischenkühler (11) befindet.

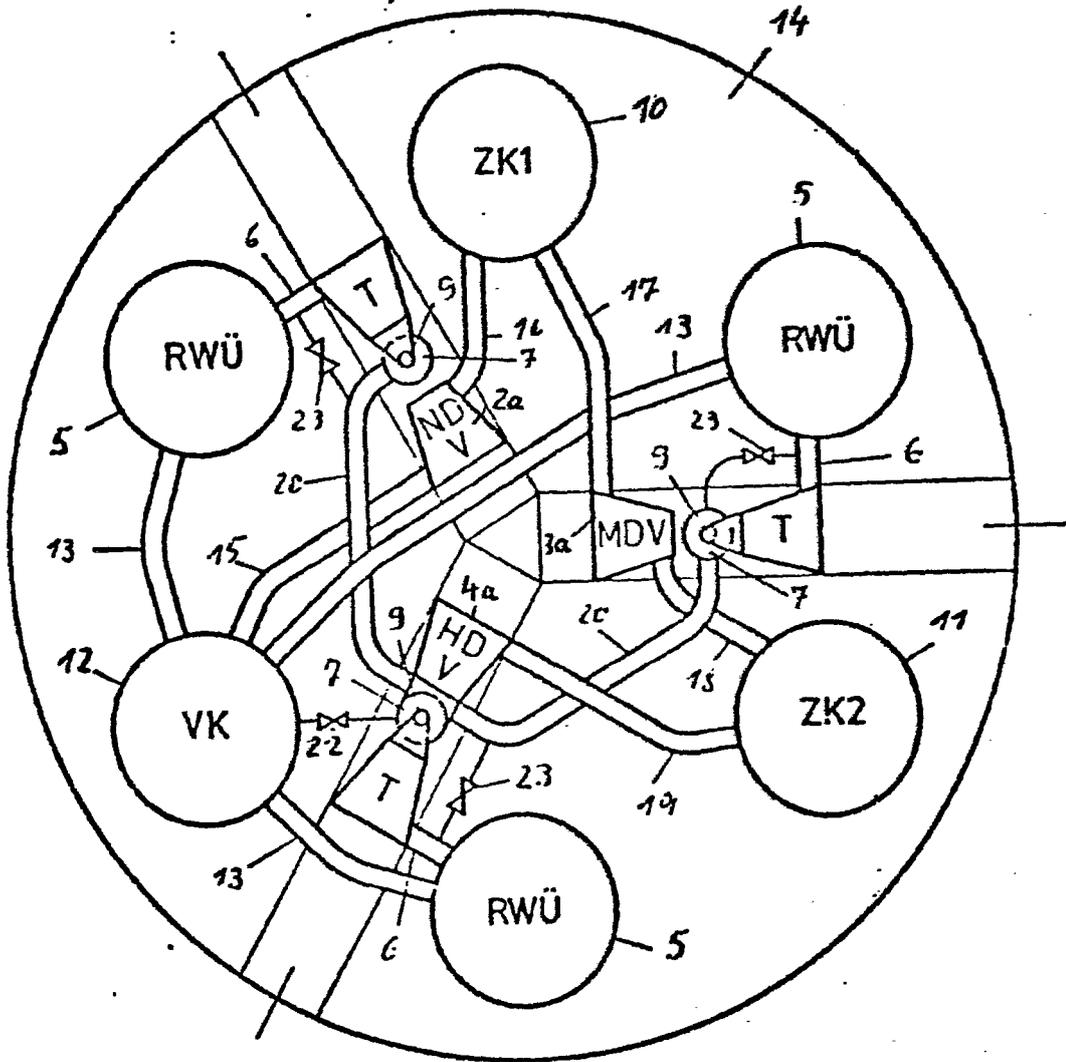
8. Kernenergieanlage zur Durchführung des Verfahrens gemäß Anspruch 2, bestehend aus einem in einem Spannbetonbehälter angeordneten Kernreaktor, drei symmetrisch um den Kernreaktor herum in horizontaler Lage angeordneten, Generatoren antreibenden Turbosätzen, zumindest drei parallel geschalteten, vom entspannten und komprimierten Arbeitsgas durchströmten Wärmeübertragern und zumindest drei Kühlern für das Arbeitsgas, wobei die rekuperativen Wärmeübertrager und Kühler radial um die Kernreaktorachse verteilt, vertikal angeordnet sind und wobei die rekuperativen Wärmeübertrager für das entspannte Arbeitsgas eine mit einem der Gasauslässe der Turbinen verbundene Gasführung sowie einen Gasauslaß für das gekühlte, entspannte Arbeitsgas und für das komprimierte Arbeitsgas jeweils eine Gaszuführung zum Wärmeübertrager sowie eine Gasableitung zum Kernreaktor aufweisen, d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t, daß den rekuperativen Wärmeübertragern (5) nach Vorkühlung des entspannten Arbeitsgases zwei der Kompressoren, zwei Niederdruckverdichter ($2a^I, 2a^{II}$) nachgeschaltet und an den Gasauslaßseiten der Niederdruckverdichter ($2a^I, 2a^{II}$) zu einem Zwischenkühler (28) geführte Gasleitungen (27) angeschlossen sind, wobei dem Zwischenkühler (28) der dritte Kompressor, ein Hochdruckverdichter (4a) nachgeschaltet ist, an dessen Gasauslaßseite drei parallel geführte, mit den Gaszuführungen (7) der rekuperativen Wärmeübertrager (5) verbundene Gasleitungen (20) angeschlossen sind.

9. Kernenergieanlage nach Anspruch 8, d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t, daß nur die Turbosätze mit Niederdruckverdichter ($2a^I$, $2a^{II}$) jeweils einen Generator (G_I , G_{II}) antreiben.
10. Kernenergieanlage nach Anspruch 8 oder 9, d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t, daß im Umlaufsinn um den Kernreaktor herum neben dem Turbosatz (4) mit Hochdruckverdichter (4a) der Zwischenkühler (28) und neben diesem ein rekuperativer Wärmeübertrager (5) eingesetzt ist und daß darauf folgend jeweils neben einem der Turbosätze mit Niederdruckverdichter ($2b^I$, $2b^{II}$) einer der Vorkühler (12^I , 12^{II}) und ein weiterer rekuperativer Wärmeübertrager (5) angeordnet sind.
11. Kernenergieanlage nach Anspruch 8 oder 9, d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t, daß in jeder der einen rekuperativen Wärmeübertrager (5) aufnehmenden Ausnehmung im Spannbetonbehälter unterhalb der rekuperativen Wärmeübertrager ein Vorkühler angeordnet ist.
12. Kernenergieanlage nach einem der vorhergehenden Ansprüche 3 bis 11, d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t, daß die Zwischenkühler (10,11) und Vorkühler (12) aus jeweils zwei parallel geschalteten Zwischenkühler- oder Vorkühlerapparaten (12a,12b) bestehen, die in der für die Zwischenkühler oder Vorkühler vorgesehenen Ausnehmung des Spannbetonbehälters (14) so hintereinander angeordnet sind, daß die Gasaustrittsseite des einen Apparates (12a) der Gaseintrittsseite des anderen Apparates (12b) gegenüberliegt.

13. Kernenergieanlage nach einem der vorhergehenden Ansprüche 3 bis 12, d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t, daß von den drei vom Hochdruckverdichter (4a) zu den rekuperativen Wärmeübertragern (5) geführten, parallel geschalteten Gasleitungen und Zuführungen (7,20) vom Gasauslaß des Hochdruckverdichters (4a) ausgehend eine Zuführung (7) vertikal nach oben verläuft, während die beiden übrigen Gasleitungen (20) zunächst horizontal zu den Turbosätzen mit Niederdruck- oder Mitteldruckverdichter (2,3) geführt sind und erst dann vertikal nach oben verlaufen.
14. Kernenergieanlage nach einem der vorhergehenden Ansprüche 3 bis 13, d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t, daß auf den Wellen (38) der Niederdruckverdichter (2a) oder Mitteldruckverdichter (3a) aufweisenden Turbosätze (2,3) zwischen einem den Turbineneinlaß (35) umgebenden Raum (37) und einem den Verdichterauslaß (36) umgebenden Raum eine Labyrinthdichtung (39) angeordnet ist, wobei der den Turbineneinlaß (35) umgebende Raum (37) mit einer der am Gasauslaß des Hochdruckverdichters (4a) angeschlossenen Gasleitungen (20) in Verbindung steht.
15. Kernenergieanlage nach einem der vorhergehenden Ansprüche 3 bis 14, d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t, daß Absperrorgane aufweisende Bypassleitungen (22,23,24) zur Abführung komprimierten Arbeitsgases in niedrigeren Druck aufweisende Gasleitungen oder Gasführungen vorgesehen sind.

16. Kernenergieanlage nach einem der vorhergehenden Ansprüche 3 bis 15, dadurch gekennzeichnet, daß ein Frequenzregelspeicher (25) eingesetzt ist, der über Absperrorgane (26) einerseits mit der am Gasauslaß des Hochdruckverdichters (4a) angeschlossenen Gasleitung (20) und andererseits mit der am Gaseinlaß des Hochdruckverdichters (4a) angeschlossenen Gasführung (19) verbunden ist.

34
Leerseite



Figur 4 X

609852/0482

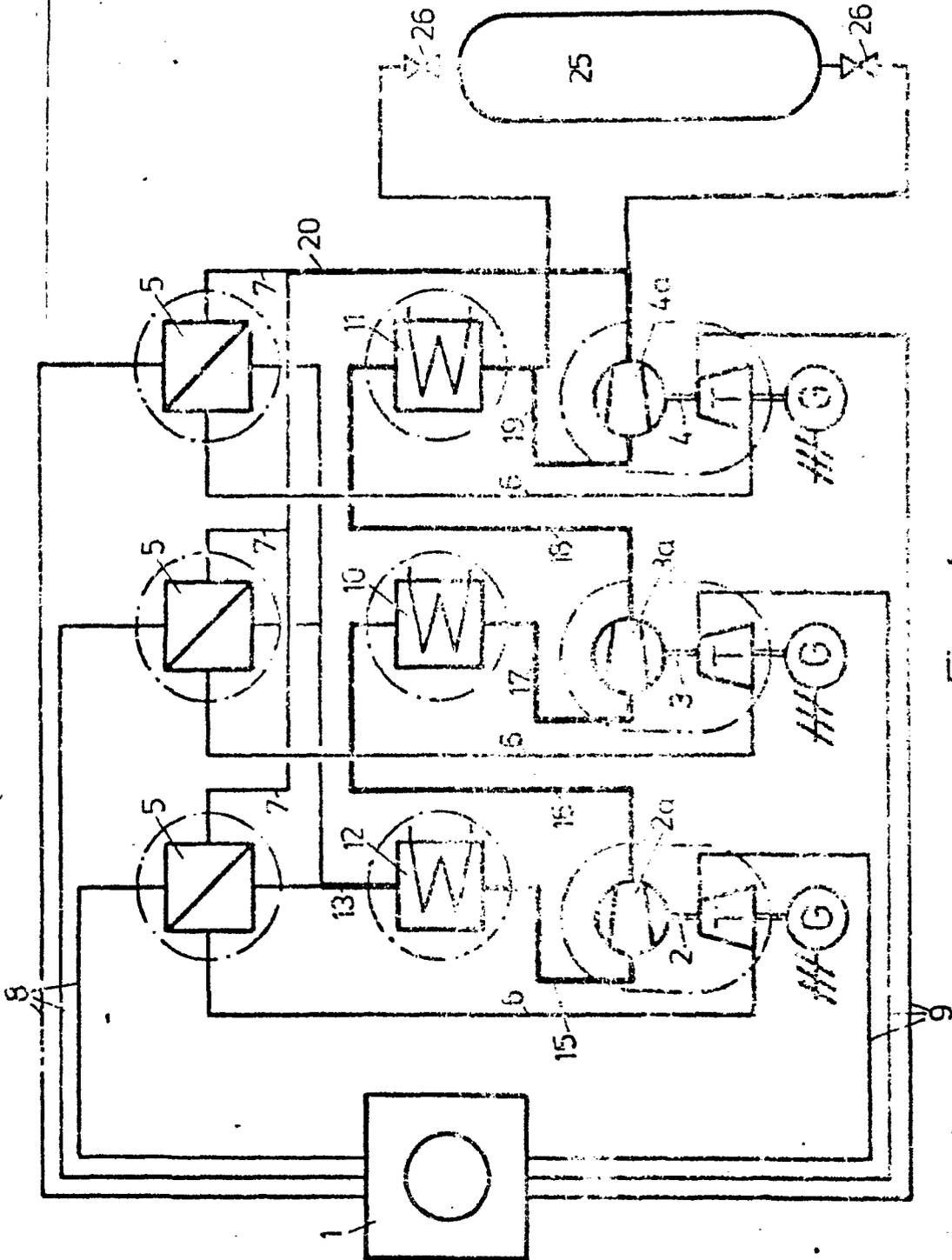
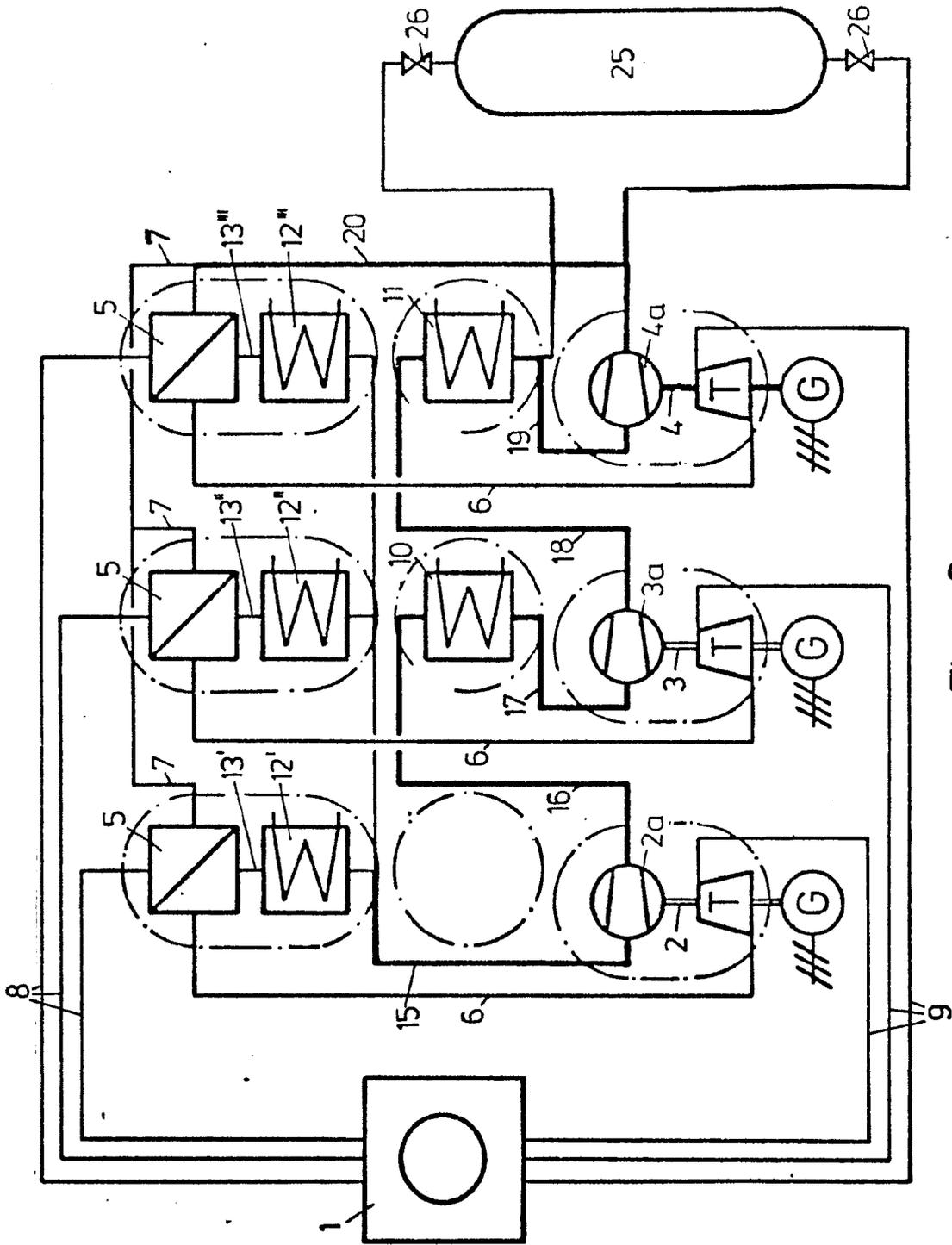


Figure 1



Figur 2

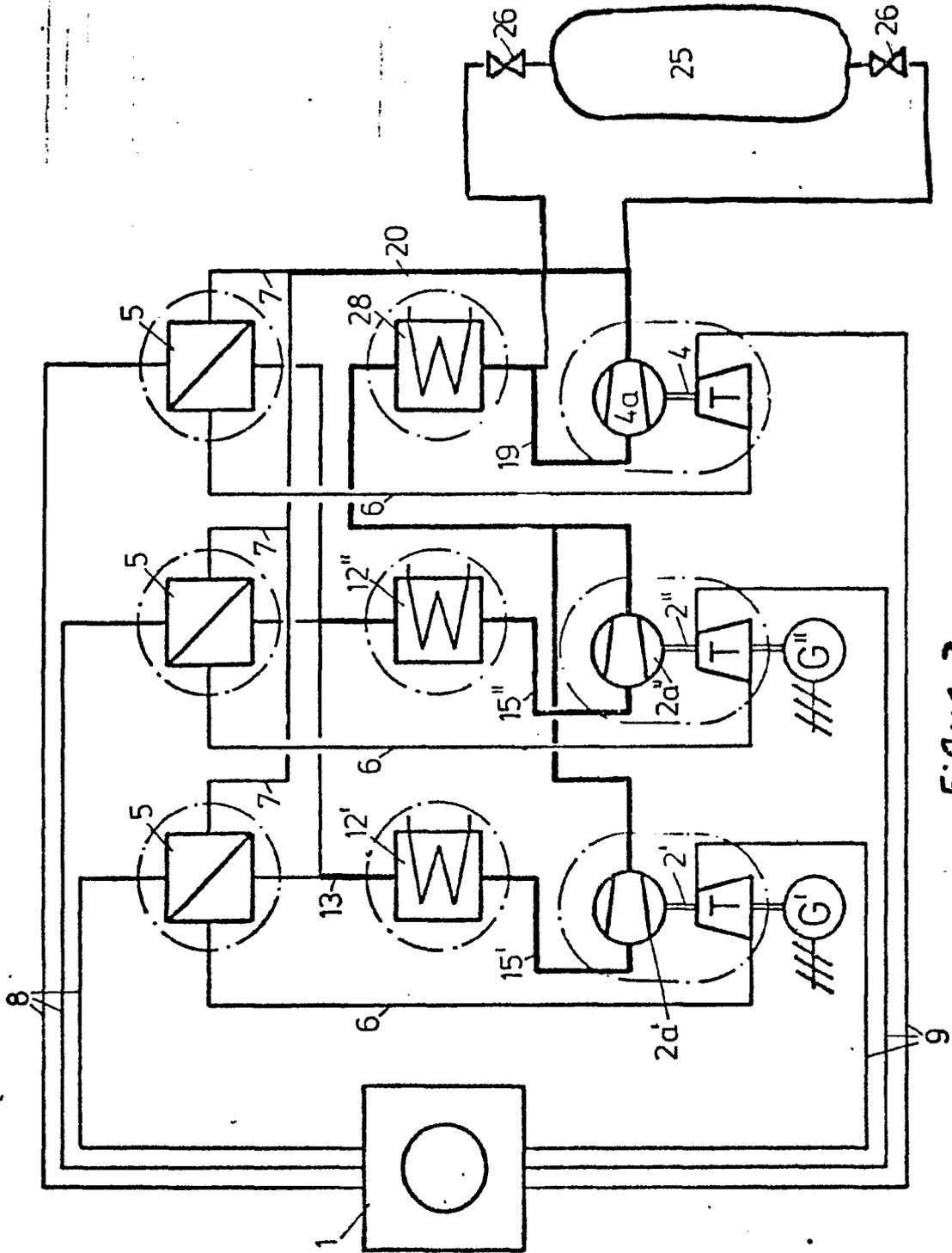
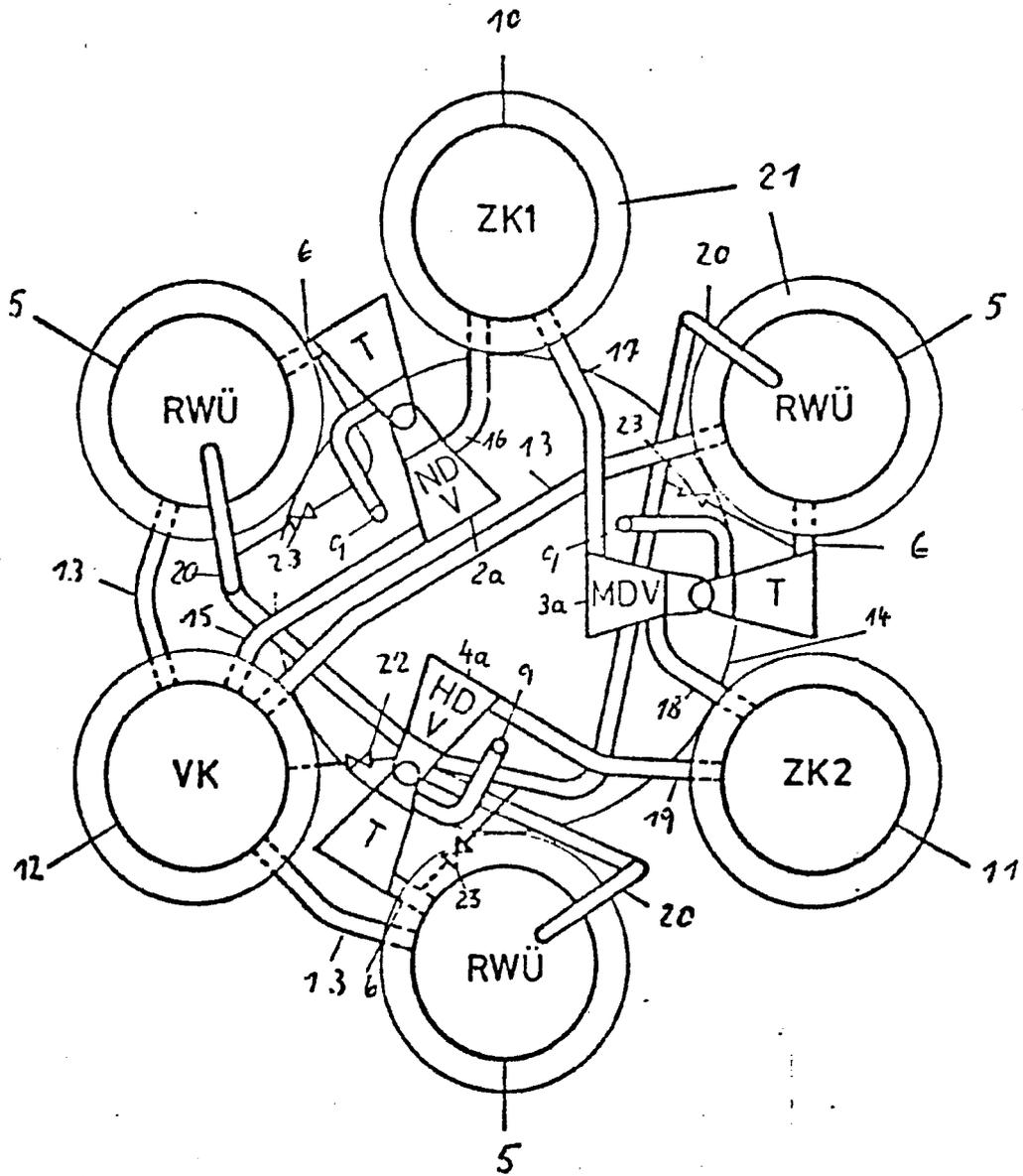
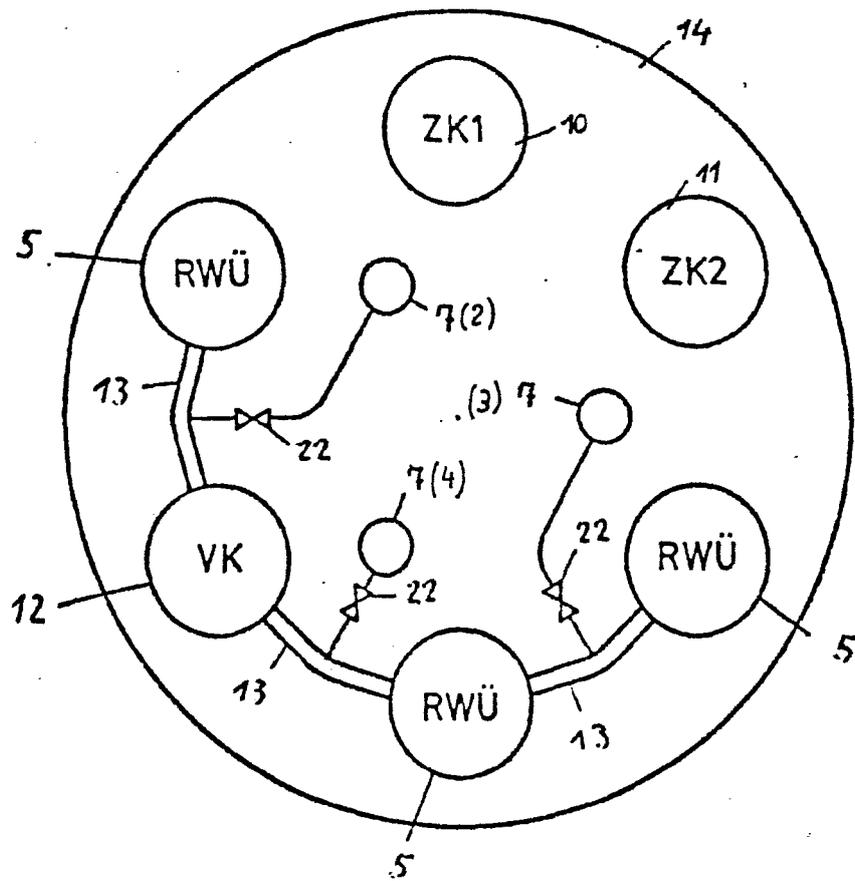


Figure 3

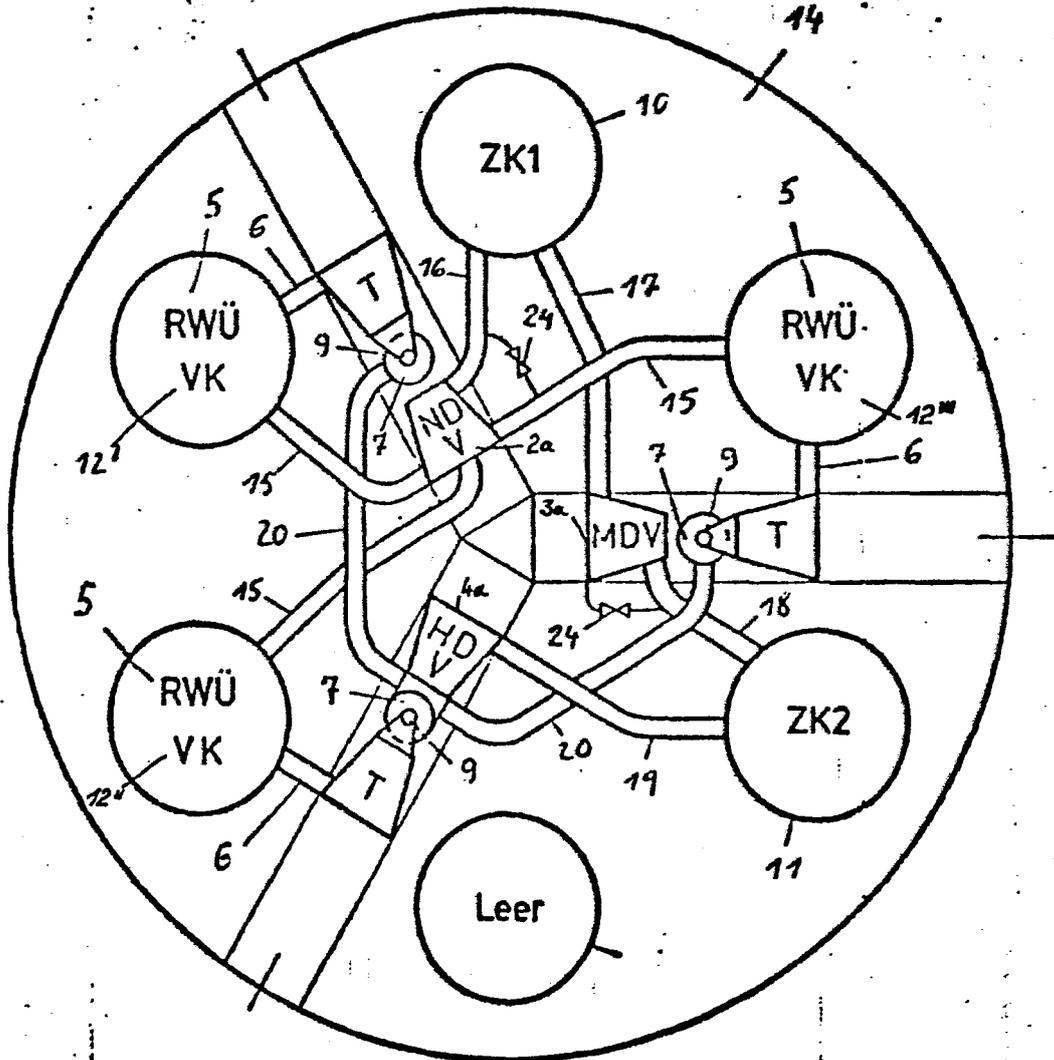


Figur 5

609852/0482

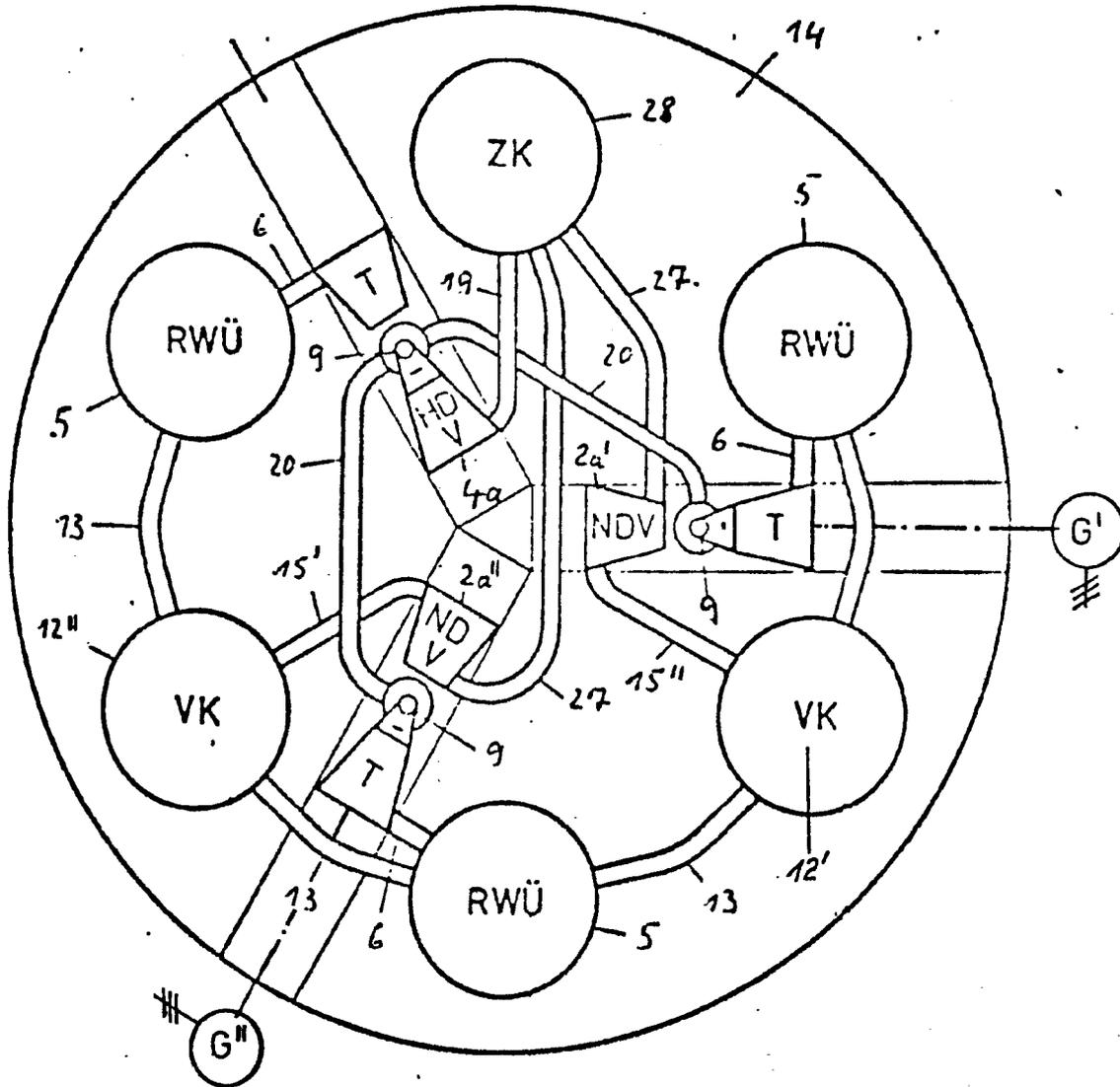


Figur 6



Figur 7

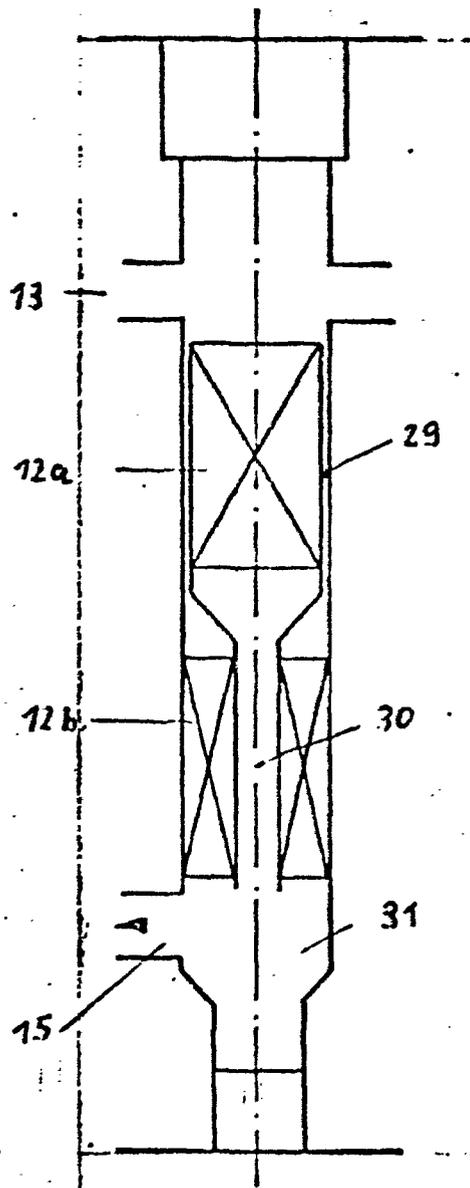
609852/0482



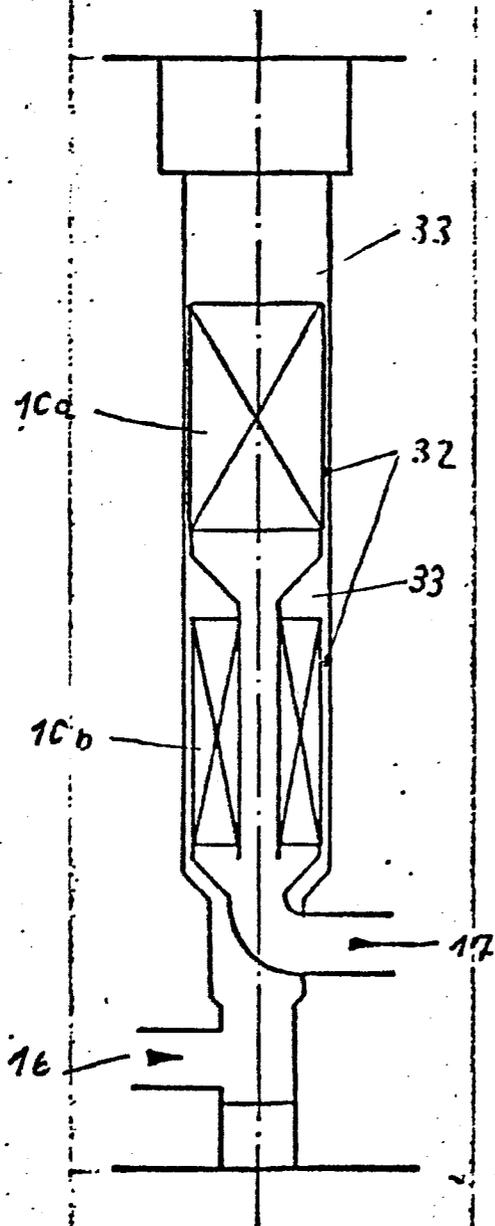
Figur 9

609852/0482

43-

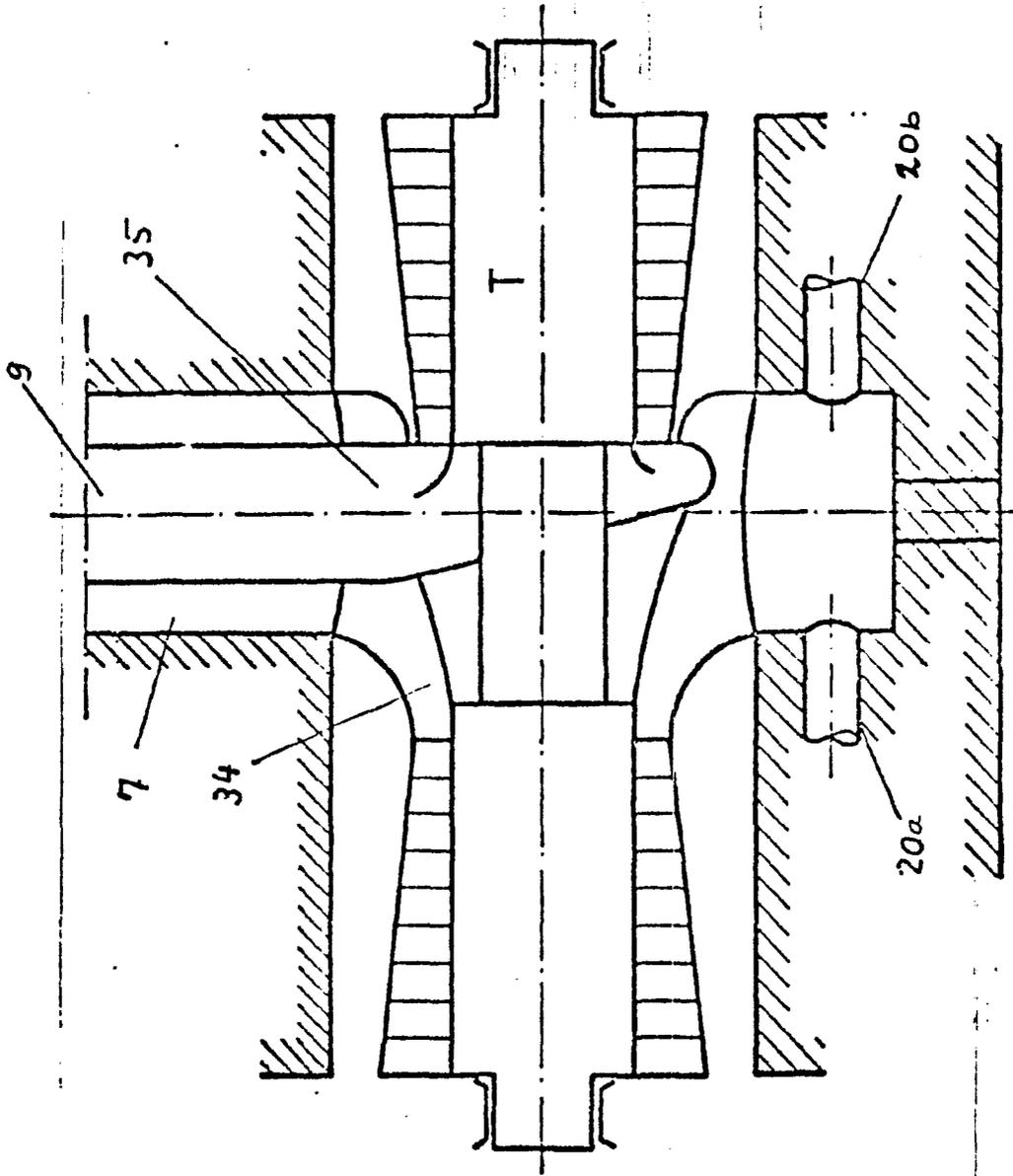


Figur 10

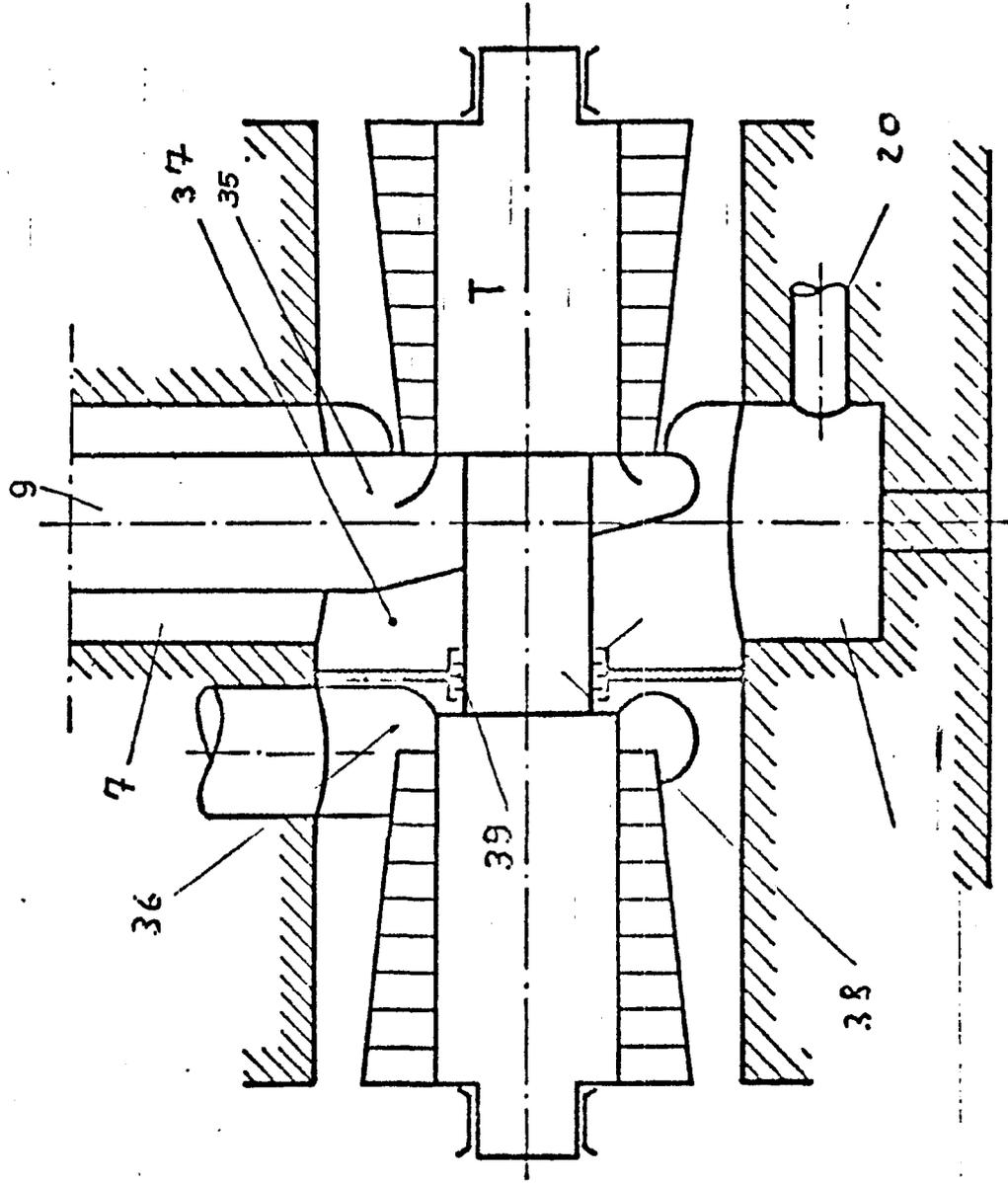


Figur 11

609852/0482



Figur 12



Figur 13