



(12) Wirtschaftspatent

Erteilt gemäß § 17 Absatz 1 Patentgesetz

(19) **DD** (11) **239 461 A1**4(51) F 25 D 3/10
F 25 D 29/00

AMT FÜR ERFINDUNGS- UND PATENTWESEN

In der vom Anmelder eingereichten Fassung veröffentlicht

(21)	WP F 25 D / 278 583 4	(22)	15.07.85	(44)	24.09.86
------	-----------------------	------	----------	------	----------

(71)	Medizinische Akademie Magdeburg, 3090 Magdeburg, Leipziger Straße 44, DD
(72)	Küster, Uwe, Dr. sc. nat.; Kunert, Martin, Dr.-Ing.; Weber, Peter, Dr.-Ing., DD

(54) Vorrichtung und Verfahren zur Temperaturregulation in Kryostaten

(57) Ziel der Erfindung ist es, ein Verfahren und eine Vorrichtung zur Regulation der Temperatur in Kryostaten zu schaffen, die bei der Kälteerzeugung unter Verwendung kryogener Flüssigkeiten Anwendung finden und die sowohl bei sehr hohem als auch bei geringem Kältebedarf sowie bei schnellem Wechsel zwischen extremen Kältebedürfnissen anwendbar und geringe Regelabweichungen einzuhalten in der Lage ist. Das wird dadurch erzielt, daß der Strom der kryogenen Flüssigkeit mittels zweier vermaschter Regelkreise geregelt wird. Die Förderung der kryogenen Flüssigkeit erfolgt mittels Tauchheber aus einem entsprechenden unter Überdruck stehenden Vorratsbehälter. Die Anpassung des Stromes der kryogenen Flüssigkeit an den aktuellen Bedarf erfolgt mittels eines Ventils, das eine Ein/Aus-Charakteristik besitzt. Der maximale Förderstrom wird erfindungsgemäß über die Regulation des Druckes im Vorratsbehälter der kryogenen Flüssigkeit geregelt.

Erfindungsanspruch:

1. Vorrichtung und Verfahren zur Temperaturregulation in Kryostaten bestehend aus einer thermisch isolierten Kältekammer (1), in der ein Thermosensor (4), ein elektrisches Widerstandsheizelement (5) und eine Vorrichtung zur effektiven Durchmischung (6) des in der Kammer befindlichen Mediums angeordnet sind, aus einem Vorratsbehälter (2) für eine kryogene Flüssigkeit, wobei in diesem Behälter ein Tauchheber in die kryogene Flüssigkeit (12), in der sich ein Tauchheizkörper (7) zur Druckerzeugung im Vorratsbehälter (2) befindet, eintaucht, und der Tauchheber (8) über eine Rohrleitung (9) in die ein Tieftemperaturmagnetventil (10) mit einer Ein/Aus-Charakteristik eingeschaltet ist, mit der thermisch isolierten Kältekammer (1) verbunden ist, und aus einer programmierbaren Regeleinrichtung (3), **gekennzeichnet dadurch**, daß die Gasphase (11) der kryogenen Flüssigkeit (13) im Vorratsbehälter (2) über Rohrverbindungen sowohl mit einem Druckablaßmagnetventil (13) einem Sicherheitsventil (14) als auch mit einem Drucksensor (15) der den in der Gasphase (11) herrschenden Druck mißt und dessen Signal der programmierbaren Regeleinrichtung (3) das vom Thermosensor (4) erfaßte Temperatursignal aufnimmt und das elektrische Widerstandsheizelement (5) in der Kältekammer (1) des Kryostaten, das Tieftemperaturmagnetventil (10), das Druckablaßmagnetventil (11) und den Tauchheizkörper (7) im Vorratsbehälter (2) der kryogenen Flüssigkeit (12) schaltet.
2. Vorrichtung und Verfahren zur Temperaturregulation in Kryostaten nach Anspruch 1, **gekennzeichnet dadurch**, daß der Strom der kryogenen Flüssigkeit (12) in die Kältekammer (1) dem aktuellen Kältebedarf dadurch angepaßt wird, daß bei größerem Bedarf der Druck der Gasphase (11) der kryogenen Flüssigkeit (12) im Vorratsbehälter (2) durch Einschalten des Tauchheizkörpers (7) erhöht wird und bei kleinerem Bedarf der Druck durch Betätigung des Druckablaßmagnetventils (13) verringert wird und auf diese Weise die Förderergeschwindigkeit der kryogenen Flüssigkeit (12) in dem Bereich ist, daß sie mindestens den aktuellen Kältebedarf deckt bzw. diesen um den Faktor 10 übersteigt.
3. Vorrichtung und Verfahren nach Anspruch 1 und 2, **gekennzeichnet dadurch**, daß im Temperaturbereich oberhalb des Sollwerts plus zulässiger Regelabweichung die Regelung auf dem Sollwert durch Öffnen und Schließen des Tieftemperaturmagnetventils (10) und durch Erhöhung des Drucks in der Gasphase (11) der kryogenen Flüssigkeit (12), falls deren Fördergeschwindigkeit dem aktuellen Kältebedarf nicht genügt, erfolgt, im Temperaturbereich innerhalb der zulässigen Regelabweichung um den Sollwert herum die Regelung auf den Sollwert durch Öffnen und Schließen des Tieftemperaturmagnetventils (10) und durch Ein- und Ausschalten des elektrischen Widerstandsheizelements (5) vorgenommen wird, und im Temperaturbereich unterhalb des Sollwerts minus zulässiger Regelabweichung die Temperatur in der Kältekammer (1) durch Ein- und Ausschalten des elektrischen Widerstandsheizelements (5) und durch Verringerung des Drucks in der Gasphase (11) der kryogenen Flüssigkeit (12) erfolgt, falls deren Fördergeschwindigkeit den aktuellen Kältebedarf um mehr als das Zehnfache übersteigt.
4. Vorrichtung und Verfahren nach Anspruch 1-3, **gekennzeichnet dadurch**, daß die vom eingeschalteten elektrischen Widerstandsheizelement (5) abgegebene Wärme im zeitlichen Mittel proportional zur Sollwertabweichung der Temperatur ist.

Hierzu 3 Seiten Zeichnungen

Anwendungsgebiet der Erfindung

Die Erfindung betrifft eine Vorrichtung und ein Verfahren zur Regulation der Temperatur in Kryostaten, wobei die Kälte durch Verdampfung einer kryogenen Flüssigkeit erzeugt wird. Anwendungsgebiete der Erfindung sind die Kältetechnik, die Tieftemperaturtechnik, die Konservierungstechnik und die Kryokonservierung von biologischem Material.

Charakteristik der bekannten technischen Lösungen

Es sind Kryostate bekannt, die zur Kälteerzeugung eine kryogene Flüssigkeit, meist flüssigen Sauerstoff, nutzen. In einer bekannten Lösung (DE-PS 1501238) umfließt ein Gasstrom aus verdampftem Kältemittel die eigentliche Kältekammer in einem Kanalsystem. In einem Gefriergerät (DE-OS 2413085) bzw. in einer Kältekammer (DD-WP 50072) wird ebenfalls die Kühlung durch das verdampfte Kältemittel erreicht. Prinzipiell ähnliche Lösungen sind beschrieben in DD-WP 205979 und DD-WP 206203. Bei allen diesen Lösungen geht die Verdampfungsenthalpie der kryogenen Flüssigkeit für den Kühlprozeß verloren, da mindestens die der Verdampfungsenthalpie entsprechende Energie vorher zugeführt werden muß, um das Kühlgas aus verdampften Kältemitteln zu erzeugen. Dieser Nachteil hat seine Ursache in der Schwierigkeit, kryogene Flüssigkeiten mittels eines Ventils zu dosieren.

Den Nachteil des Verlusts der Verdampfungsenthalpie für den Kühlprozeß umgehen unter anderem die in den Patentschriften DE-2605272 und DE-2555578 beschriebenen Lösungen. Hier erfolgt die Verdampfung der kryogenen Flüssigkeit in Kühlschlangen innerhalb der Kältekammer. Die Temperaturregelung erfolgt hier über die Dosierung der kryogenen Flüssigkeit. Lösungen dieser Art haben den Nachteil, daß durch Zwischenschalten eines Verdampfers Wärmeleitprobleme entstehen, die die Genauigkeit der Temperaturregelung sowie das Regelzeitverhalten negativ beeinflussen.

Eine andere Art von Kryostaten nutzt die Wärmeleitung vom zu temperierenden Gut zur kryogenen Flüssigkeit und/oder die Konvektion in der Kältekammer aus, um durch die Vorgabe bestimmter geometrischer Verhältnisse den Temperaturverlauf im zu temperierenden Gut zu regeln.

Solche Kryostate sind vor allem für solche Anwendungen beschrieben, bei denen durch die Art der zeitlichen Änderung des Temperaturverlaufs ein Einfrierprozeß besonders von biologischem Material günstig gestaltet werden soll. Hierbei werden beispielsweise Wärmeleitstäbe zur Führung des Wärmestromes von der Kältekammer zur kryogenen Flüssigkeit zwischengeschaltet (DD-WP 208209, DD-WP 203125) und in der Kältekammer mittels einer Gegenheizung die Temperatur geregelt. Bei einer weiteren Lösung (DE-OS 3125345) wird der Abstand der Probe zur kryogenen Flüssigkeit und damit der Temperaturverlauf in der Probe geregelt. Eine verwandte Lösung ist beschrieben in DD-WP 137754, wobei sich hier die Probe in einem festen Abstand zur kryogenen Flüssigkeit befindet. Eine dritte Variante geht von plattenförmigen Proben, wie sie z. B. beim Einfrieren von Zellsuspensionen üblich sind, aus (DE-PS 3142521). Die Proben werden an ihren großen Flächen mit Isolationsschichten versehen und direkt in eine kryogene Flüssigkeit eingetaucht. Durch die Beeinflussung der Wärmeleitung wird der Temperaturverlauf in der Probe festgelegt. Nachteilig an den auf der Wärmeleitung basierenden Lösungen sind der eng eingegrenzte Bereich der Abkühlraten und/oder die erreichbaren Grenztemperaturen. Fortgeschrittene technische Lösungen führen die kryogene Flüssigkeit über ein Ventil direkt in die Kältekammer des Kryostaten, wobei entweder flüssiges CO₂ (US-PS 3361192) oder flüssiger Stickstoff (DE-OS 3220850, DE-PS 2557870, DE-OS 1947587) verwendet werden.

Der flüssige Stickstoff wird mittels Tauchheber in die Kältekammer gefördert. Hierzu wird der Vorratsbehälter unter Druck gesetzt, wobei entweder die Eigenverdampfung des flüssigen Stickstoffs in diesem Behälter der Druckerzeugung dient (DE-OS 3220850) oder der Druck mittels einer externen Druckgasflasche eingestellt wird (DE-PS 2557870). Übergroße Kältemittelzufuhren werden dadurch ausgeglichen, daß ein Heizelement zur Gegenheizung eingeschaltet wird. Bei häufigem Unterkühlen der Kammer tritt eine beachtliche Energiedissipation auf, die den Wirkungsgrad des Kryostaten negativ beeinflusst. Nachteilig an diesen Lösungen ist, daß die Zufuhr des Kältemittels nur über das Magnetventil geregelt wird. Hieraus folgt bei extrem hohem bzw. extrem niedrigem Kältemittelbedarf eine Einschränkung der Regelgenauigkeit der Temperatur in der Kältekammer.

Ziel der Erfindung

Ziel der Erfindung ist es, die Nachteile der oben genannten Lösungen zu beseitigen und eine Vorrichtung und ein Verfahren zur Temperaturregelung in Kryostaten zu schaffen, mit denen sowohl extrem hohe als auch extrem niedrige Abkühlraten unter Verwendung einer kryogenen Flüssigkeit möglich sind, wobei als untere Grenze des Temperaturbereichs mindestens 170K erreicht werden soll. Dieses Ziel soll bei hoher Genauigkeit der Temperatur in der Kältekammer erreicht werden. Die Erhöhung der Genauigkeit der Temperaturregelung soll erreicht werden bei gleichzeitiger Minimierung der Energiedissipation.

Darlegung des Wesens der Erfindung

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, die bekannten Vorrichtungen und Verfahren zur Temperaturregelung in Kryostaten derart zu verändern, daß bei hoher Temperaturgenauigkeit über einen weiteren Bereich der Temperatur sowohl extrem hohe als auch extrem niedrige Abkühlraten erreicht werden. Es besteht das Bedürfnis, die bekannten Lösungen zur Temperaturregelung so zu verändern, daß bei gesteigerter Temperaturgenauigkeit die Energiedissipation minimiert wird. Das technische Problem, das durch die Erfindung gelöst werden soll, besteht darin, den Druck im Vorratsbehälter der kryogenen Flüssigkeit derart zu regeln, daß die vom Druck abhängige maximal mögliche Fördergeschwindigkeit für die kryogene Flüssigkeit dem aktuellen Bedarf angepaßt wird. Die Feinregelung wird dann von einem Tieftemperaturmagnetventil übernommen.

Erfindungsgemäß wird die Aufgabe dadurch gelöst, daß der Kryostat aus einer Kältekammer (1), aus einem Vorratsbehälter (2) für eine kryogene Flüssigkeit und einer programmierbaren Regeleinrichtung (3) besteht. In der Kältekammer ist ein Thermosensor (4), ein elektrisches Widerstandsheizelement (5) und eine Vorrichtung zur effektiven Durchmischung (6) des in der Kammer befindlichen Mediums angeordnet. Im Vorratsbehälter (2) für die kryogene Flüssigkeit befindet sich ein Tauchheizkörper (7) und ein Tauchheber (8), der über eine Rohrleitung (9), in die ein Tieftemperaturmagnetventil (10) mit einer Ein-/Aus-Charakteristike eingeschaltet ist, zur Kältekammer (1) führt. Die Gasphase (11) oberhalb der kryogenen Flüssigkeit (12) im Vorratsbehälter (2) steht über Rohrleitungen mit einem Druckablaßmagnetventil (13), einem Sicherheitsventil (14) sowie einem Drucksensor (15) in Verbindung. Die programmierbare Regeleinrichtung (3) ist einerseits mit dem Temperatursensor (4) in der Kältekammer (1) und dem Drucksensor (15) des Vorratsbehälters (2) und andererseits mit dem Tieftemperaturmagnetventil (10), dem Druckablaßmagnetventil (13), dem elektrischen Widerstandsheizelement (5) und dem Tauchheizkörper (7) verbunden. Um die erfindungsgemäße Funktion des Kryostaten zu erzielen, wird der Tauchheizkörper (7) im Vorratsbehälter (2) durch die programmierbare Regeleinrichtung (3) eingeschaltet. Durch die Verdampfung der kryogenen Flüssigkeit (12) wird im Vorratsbehälter (2) ein Druck aufgebaut, der mittels Drucksensor (15) gemessen und dessen Signal der programmierbaren Regeleinrichtung (3) zugeführt wird. Abhängig von der aktuellen Temperatur, der Wärmekapazität des Kühlgutes und der gewünschten Abkühlrate wird der Druck so eingestellt, daß bei ständig geöffnetem Tieftemperaturmagnetventil (10) eine doppelt so hohe Abkühlrate in der Kältekammer (1) erzielt werden könnte, als die gewünschte. Hierdurch wird sichergestellt, daß die Feinregulation des Stromes der kryogenen Flüssigkeit mittels des Tieftemperaturmagnetventils (10) unter optimalen Bedingungen erfolgt.

Mit dieser Verfahrensweise ist es möglich, die begrenzten Regelmöglichkeiten eines Tieftemperaturmagnetventils mit Ein-/Aus-Charakteristik optimal zu nutzen, die Regelgenauigkeit der Temperatur in der Kältekammer zu verbessern und den Kältemittelbedarf den Bedürfnissen so anzupassen, daß eine geringe Energiedissipation durch Gegenheizen mit einem elektrischen Widerstandsheizelement möglich wird.

Ausführungsbeispiel

Die Erfindung soll nachstehend an einem Ausführungsbeispiel erläutert werden. Die zugehörigen Zeichnungen zeigen:

Fig. 1: Prinzipielle Anordnung zur Regelung der Temperatur in Kryostaten

Fig. 2: Prinzipielle Anordnung der Elemente eines Kryostaten zur Gefrierkonservierung von biologischem Material

Fig. 3 A: Sollwertkurve der Temperatur während eines hypothetischen Einfrierprozesses

B: Öffnungsverhältnis des Tieftemperaturmagnetventils bei Realisierung der in Fig. 3 A dargestellten Sollwertkurve

C: Druckverlauf im Vorratsbehälter für flüssigen Stickstoff bei Realisierung der in Fig. 3 A dargestellten Sollwertkurve

Die in Fig. 1 dargestellte prinzipielle Anordnung zur Regelung der Temperatur in Kryostaten enthält die Kältekammer (1), den Vorratsbehälter (2) für eine kryogene Flüssigkeit (12) und eine programmierbare Regeleinrichtung (3). Die programmierbare Regeleinrichtung (3) nimmt die Signale des Temperatursensors (4) und des Drucksensors (15) ständig auf und steuert nach Vergleich der Temperatur in der Kammer mit der in der programmierbaren Regeleinrichtung (3) gespeicherten Sollwertkurve das Tieftemperaturmagnetventil (10), das elektrische Widerstandsheizelement (5), das Druckablaßmagnetventil (13) und den Tauchheizkörper (7). Unter der Wirkung der programmierbaren Regeleinrichtung (3) wird somit die Temperatur in der Kältekammer (1) entsprechend dem Sollwert geregelt.

Bei Abkühlung wird die kryogene Flüssigkeit (12) unter Wirkung des Drucks in der Dampfphase (11) mittels des Tauchhebers (8) über die Rohrleitung (9) und das Tieftemperaturmagnetventil (10) in die Kältekammer (1) geleitet. Die in der Kältekammer (1) einsetzende Verdampfung der kryogenen Flüssigkeit (12) führt zur Abkühlung. Einem zu tiefen Abkühlen wirkt ein Einschalten des elektrischen Widerstandsheizelements (5) durch die programmierbare Regeleinrichtung (3) entgegen. Im Temperaturbereich oberhalb des Sollwerts plus zulässiger Regelabweichung erfolgt die Regelung auf dem Sollwert durch Öffnen und Schließen des Tieftemperaturmagnetventils (10). Wenn das Öffnungsverhältnis des Tieftemperaturmagnetventils (17) (das ist der Quotient aus der Zeit, in der das Tieftemperaturmagnetventil (10) geöffnet ist, zu der Zeit, in der das Tieftemperaturmagnetventil (10) geschlossen ist) zwischen 10 und 100 ist, dann kann der Strom der kryogenen Flüssigkeit (12) gerade noch ausreichend den aktuellen Kältebedarf decken. Zur besseren Anpassung der Fördergeschwindigkeit der kryogenen Flüssigkeit (12) an den Bedarf wird über die programmierbare Regeleinrichtung (3) der Tauchheizkörper (7) eingeschaltet. Durch Verdampfung eines Teils der kryogenen Flüssigkeit (12) erhöht sich der Druck in der Gasphase (11) und die Fördergeschwindigkeit der kryogenen Flüssigkeit (12) steigt. In der Folge sinkt dann das Öffnungsverhältnis des Tieftemperaturmagnetventils (10). Im Falle, daß das Öffnungsverhältnis kleiner als 0,1 ist, übersteigt die Fördergeschwindigkeit den Kältebedarf drastisch. Zur Verringerung der Fördergeschwindigkeit wird über die programmierbare Regeleinrichtung (3) das Druckablaßmagnetventil (13) geöffnet und der Druck in der Gasphase (11) sinkt.

Im Temperaturbereich innerhalb der zulässigen Regelabweichung um den Sollwert herum wird die Regelung auf den Sollwert durch Öffnen und Schließen des Tieftemperaturmagnetventils (10) und durch Ein- und Ausschalten des elektrischen Widerstandsheizelements (5) vorgenommen. Letztlich erfolgt im Temperaturbereich unterhalb des Sollwerts minus zulässiger Regelabweichung die Regelung der Temperatur durch Ein- und Ausschalten des elektrischen Widerstandsheizelements (5). Vorzugsweise ist die vom elektrischen Widerstandsheizelement (5) abgegebene Wärmeleistung proportional der Temperaturabweichung vom Sollwert.

In Fig. 2 ist die prinzipielle Anordnung der Elemente eines Kryostaten zur Tieftemperaturkonservierung von biologischem Material dargestellt. Die Apparatur besteht aus einem Vorratsbehälter für flüssigen Stickstoff (2), aus einem Mikrorechnersystem (16) und aus einer Kältekammer (1) mit einer Isolierung (17) und einem Nutzinhalt von etwa 30 l.

Am Boden der Kammer (1) befindet sich mittig angeordnet ein Zentrifugalgebläse (18), das mehr als 150 l Luft pro s in der Kältekammer (1) umwälzt. Rotationssymmetrisch um das Zentrifugalgebläse (18) herum ist isoliert vom Boden das elektrische Widerstandsheizelement (5) in Form einer Heizspirale befestigt. Zur Führung der Luft in der Kältekammer (1), ist in diese ein zweiter, dünnwandiger Behälter (19) in geringem Abstand eingesetzt. Der Boden dieses zweiten als Luftleiteinrichtung fungierenden Behälters (19) ist mit einem Durchbruch versehen, der mit der Ansaugöffnung des Zentrifugalgebläses (18) übereinstimmt.

Die Oberkanten der Seitenwände des zweiten Behälters (19) sind nach außen abgewinkelt und dicht mit der äußeren isolierten Kältekammer (1) verbunden. Die vier Seitenwände des inneren Behälters (19) sind mit Durchbrüchen versehen. Aus diese Weise wird eine Luftzirkulation erzwungen, die durch die Pfeile in Fig. 2 angedeutet ist. Nach oben ist die Kältekammer (1) mit einem thermisch isolierten Deckel (20) abgeschlossen. Der Thermosensor (4) kann flexibel in der Kältekammer (1) befestigt werden. Er kann z. B. direkt in das Kühlgut eingebracht werden oder an dessen Behälter oder an einem beliebigen Ort in der Kältekammer (1) befestigt werden. Das Signal des Thermosensors (4) wird einem Mikrorechnersystem (16) zugeführt. Als Kältemittel wird flüssiger Stickstoff genutzt, der mittels einer Rohrleitung (21) der Kältekammer (1) zugeführt und direkt in die Ansaugöffnung des Zentrifugalgebläses (18) gespritzt wird. Zur Kühlung der Kältekammer (1) tragen die Verdampfungsenthalpie des flüssigen Stickstoffs und das kalte Stickstoffgas bei. Die Dosierung des flüssigen Stickstoffs erfolgt durch Betätigung des Tieftemperaturmagnetventils (10), das in die Rohrleitung (21) zum Vorratsbehälter für flüssigen Stickstoff (2) eingeschaltet ist und vom Mikrorechner (16) gesteuert wird. Der Tauchheber (8) besteht in seinem oberen Teil aus einem doppelwandigen Rohr (22), das dicht auf die Öffnung des Vorratsbehälters (2) aufgebracht wird. Das innere Rohr des Tauchhebers (8) reicht bis auf den Boden des Vorratsbehälters (2) herunter und dient als Steigrohr zur Förderung des flüssigen Stickstoffs (23). Das äußere Rohr (24) verbindet die Dampfphase (25) des flüssigen Stickstoffs (23) mit einem Sicherheitsventil (14), einem vom Mikrorechner (16) aktivierbaren Druckablaßmagnetventil (13) und einem Drucksensor (15), dessen Signal dem Mikrorechner (16) zugeführt wird. Am Fuß des inneren Rohres des Tauchhebers (8) ist ein Tauchheizkörper (7) angebracht, der vom Mikrorechner (16) geschaltet wird. Der Mikrorechner (16) reagiert auf die gemessene Temperatur in der Kältekammer (1) und den gemessenen Druck in der Dampfphase (25) des Vorratsbehälters (2) in Abhängigkeit vom programmierten Zeitverlauf der Temperatur in der Kältekammer (1).

Die Funktion des Kryostaten zur Gefrierkonservierung von biologischem Material (Fig. 2) soll am Beispiel eines angenommenen Temperaturverlaufs des Sollwerts, wie im Teil A der Fig. 3 dargestellt, erläutert werden. Zu Beginn des Zyklus ist eine Temperatur in der Nähe oder dicht unterhalb der Raumtemperatur konstant zu halten. Der Kältemittelbedarf ist hier sehr gering. Der Druck im Vorratsbehälter wird demnach auf einen niedrigen Wert eingestellt (siehe Teil C der Fig. 3). Dies geschieht durch Einschalten des Tauchheizkörpers (7) am Fuße des Tauchhebers (8). Wenn die Temperatur im Vergleich zum Sollwert zu hoch ist

wird vom Mikrorechner (16) aus das Tieftemperaturmagnetventil (10) kurzzeitig geöffnet. Wird hierbei der Sollwert unterschritten, so wird das elektrische Widerstandsheizelement (5) proportional zur Abweichung vom Sollwert durch den Mikrorechner (16) eingeschaltet. Nach der Zeit t_1 (siehe Teil A der Fig. 3) beginnt der Abkühlungsprozeß mit einer mittleren Abkühlungsgeschwindigkeit. Zur Deckung des gestiegenen Kältemittelbedarfes wird der Druck im Vorratsbehälter (2) erhöht. Hierzu wird der Tauchheizkörper (7) durch den Mikrorechner (16) solange eingeschaltet, bis durch Verdampfung von flüssigem Stickstoff (23) der Druck in der Gasphase (25) des Vorratsbehälters (2) das erforderliche Niveau erreicht hat. Transitorisch weicht das Schaltverhältnis des Tieftemperaturmagnetventils (10) $t_{\text{ein}}/t_{\text{aus}}$ vom optimalen Verhältnis nach oben ab, (siehe Teil B der Fig. 3). Nach Erreichen des neuen, dem Kältemittelbedarf angepaßten Drucks nähert sich das Schaltverhältnis wieder dem Wert 1. Ebenso wie oben beschrieben erfolgt im wesentlichen durch Öffnen und Schließen des Tieftemperaturmagnetventils (10) die Regelung der Temperatur entsprechend dem Sollwert. Mögliche Abweichungen nach unten werden wieder durch das proportionale Gegenheizen ausgeglichen. Wenn beginnend mit dem Zeitpunkt t_2 (siehe Teil A der Fig. 3) eine geringere Abkühlungsgeschwindigkeit gefordert wird, so wird transitorisch das Schaltverhältnis des Tieftemperaturmagnetventils (10) vom optimalen Verhältnis nach unten abweichen.

In dieser Übergangszeit wird der Druck im Vorratsbehälter (2) gesenkt, indem der Mikrorechner (16) das Druckablaßmagnetventil (13) ansteuert und öffnet. Ist der Druck im Vorratsbehälter (2) entsprechend reduziert worden, so wird das Druckablaßmagnetventil (13) wieder geschlossen. Analog ist die Funktionsweise des Kryostaten bei Änderung der Abkühlraten zu den Zeitpunkten t_3 und t_4 (siehe Teil A in Fig. 3).

Der Vorteil dieser Anordnung und dieses Verfahrens liegt darin begründet, daß durch Einbeziehung des Drucks im Vorratsbehälter (2) in den Regelprozeß der Strom des flüssigen Stickstoffs gleichmäßiger erfolgt. Extrem lange oder kurze Öffnungszeiten des Tieftemperaturmagnetventils (10) werden damit vermieden und damit wird die Regulation der Temperatur in der Kältekammer (1) entscheidend verbessert. Der Kryostat ist bei feststehender Anordnung für extrem hohe als auch für sehr niedrige Abkühlraten einsetzbar.

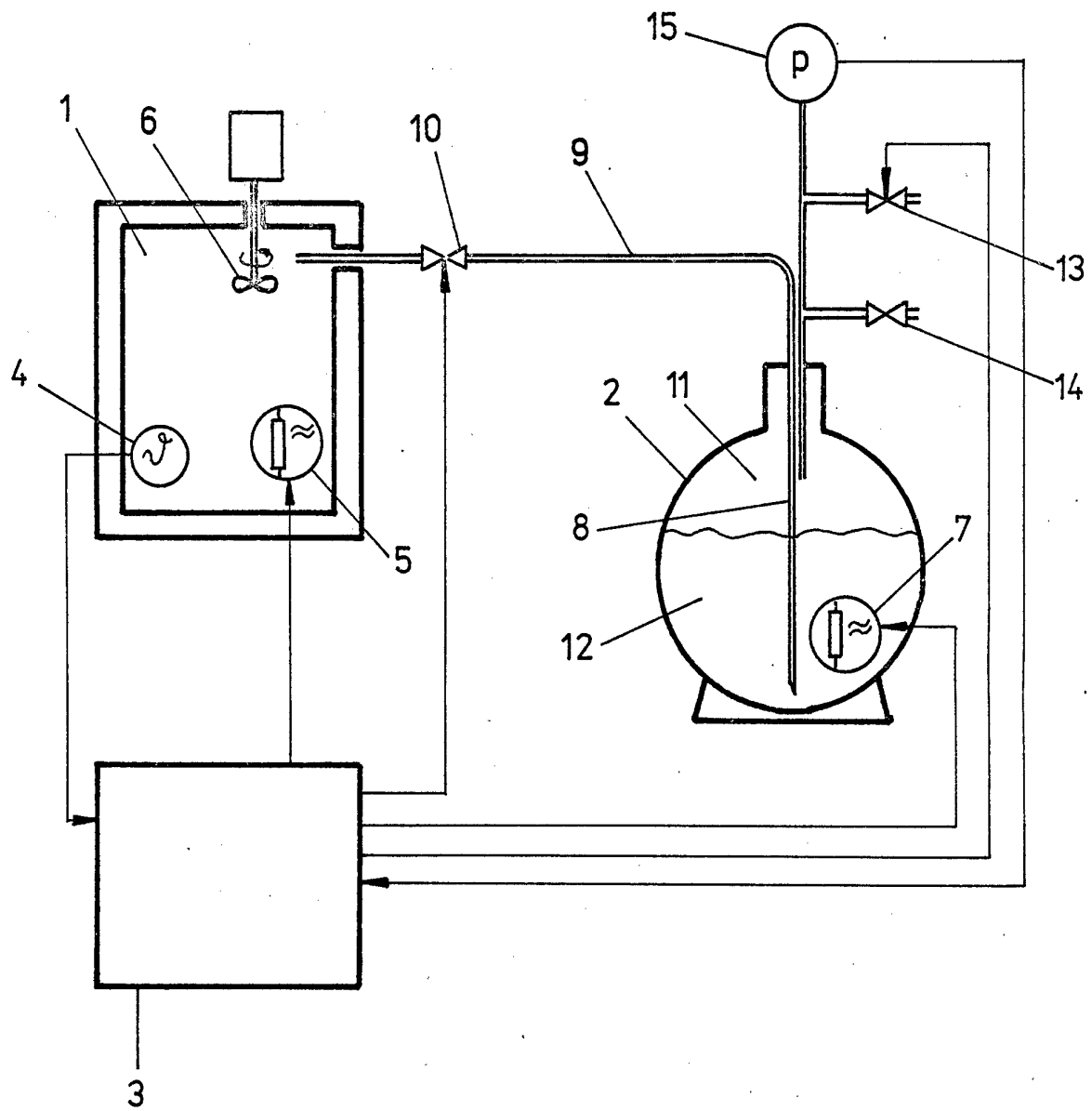


Fig. 1

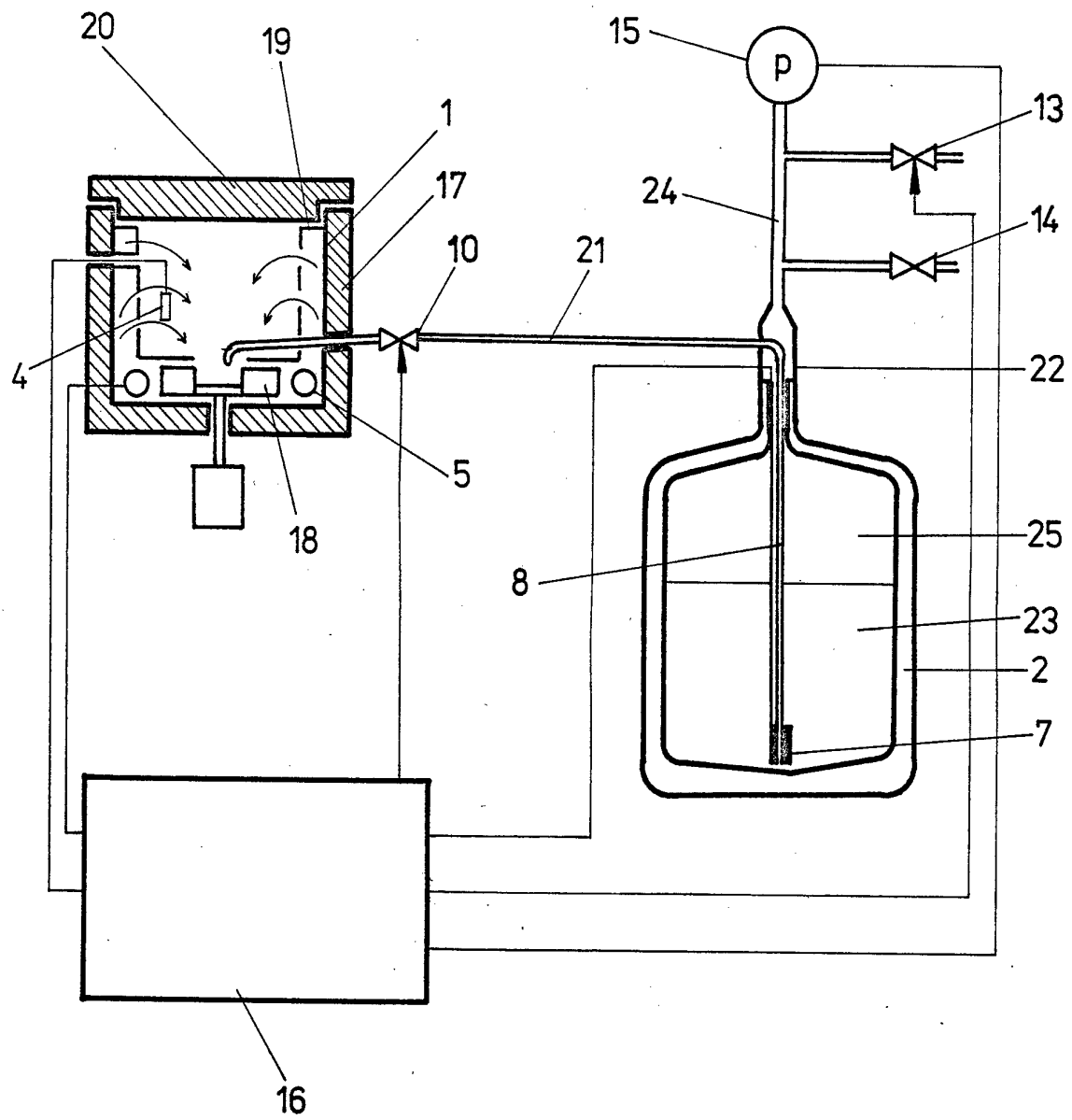


Fig. 2

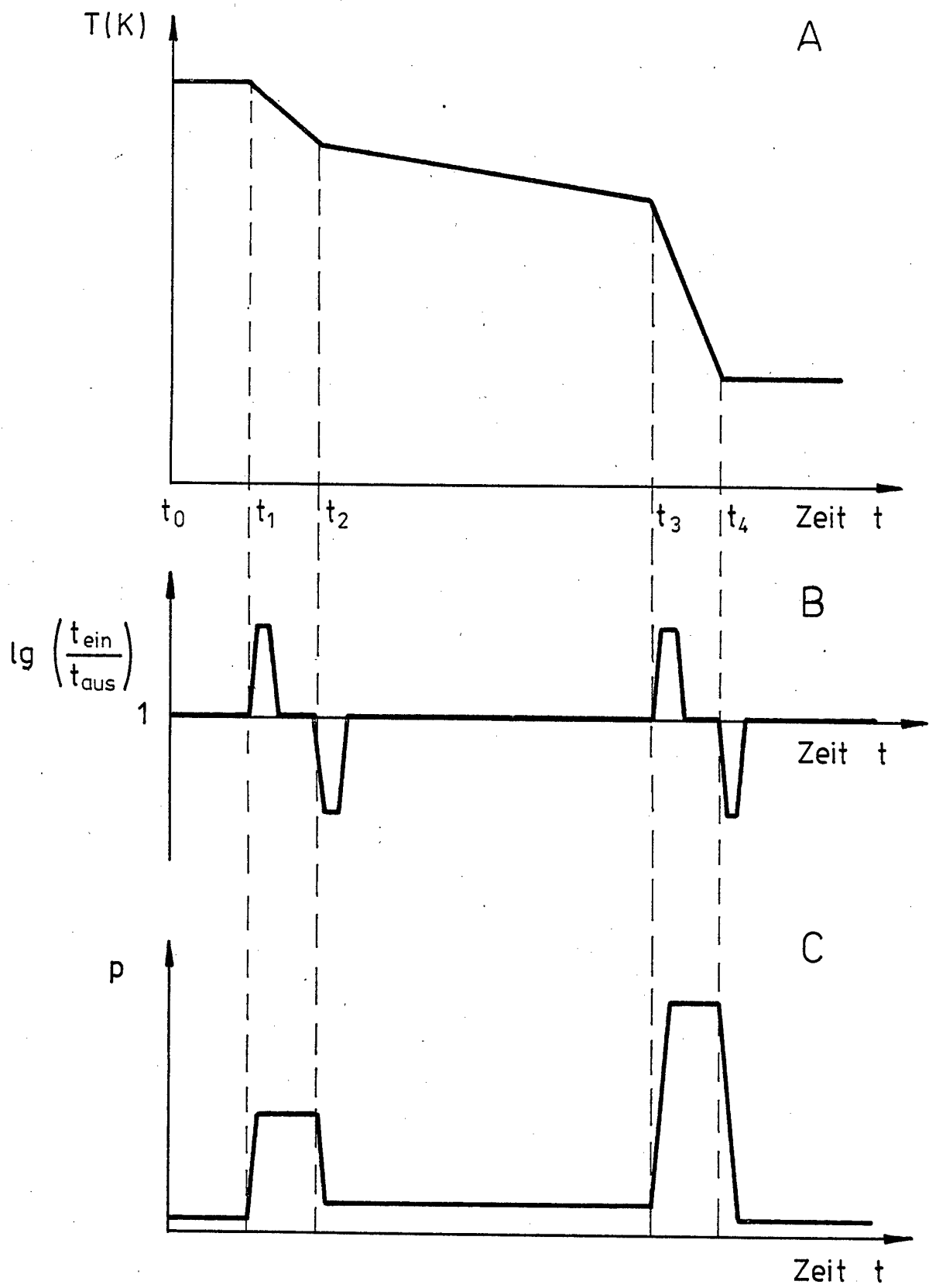


Fig. 3