



(19)  
Bundesrepublik Deutschland  
Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 697 29 643 T2** 2005.07.14

(12)

## Übersetzung der europäischen Patentschrift

(97) **EP 0 929 779 B1**

(21) Deutsches Aktenzeichen: **697 29 643.1**

(86) PCT-Aktenzeichen: **PCT/US97/18054**

(96) Europäisches Aktenzeichen: **97 910 818.0**

(87) PCT-Veröffentlichungs-Nr.: **WO 98/017167**

(86) PCT-Anmeldetag: **07.10.1997**

(87) Veröffentlichungstag

der PCT-Anmeldung: **30.04.1998**

(97) Erstveröffentlichung durch das EPA: **21.07.1999**

(97) Veröffentlichungstag

der Patenterteilung beim EPA: **23.06.2004**

(47) Veröffentlichungstag im Patentblatt: **14.07.2005**

(51) Int Cl.<sup>7</sup>: **F25B 19/02**  
**F25D 3/00**

(30) Unionspriorität:

**726770                      07.10.1996              US**

(73) Patentinhaber:

**Cryogen, Inc., San Diego, Calif., US**

(74) Vertreter:

**Vossius & Partner, 81675 München**

(84) Benannte Vertragsstaaten:

**DE, FR, GB, IE, NL**

(72) Erfinder:

**DOBAK, D., John, Del Mar, US; BROWN, L., Terry, San Diego, US; GHAERZADEH, Kambiz, San Diego, US; YU, Xiaoyu, San Diego, US**

(54) Bezeichnung: **VORKÜHLANLAGE FÜR JOULE-THOMSON SONDE**

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach der Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents kann jedermann beim Europäischen Patentamt gegen das erteilte europäische Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch ist schriftlich einzureichen und zu begründen. Er gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist (Art. 99 (1) Europäisches Patentübereinkommen).

Die Übersetzung ist gemäß Artikel II § 3 Abs. 1 IntPatÜG 1991 vom Patentinhaber eingereicht worden. Sie wurde vom Deutschen Patent- und Markenamt inhaltlich nicht geprüft.

**Beschreibung****Hintergrund der Erfindung**

**[0001]** Die vorliegende Erfindung betrifft das Gebiet der Kühlung von kleinsten Objekten oder sehr kleinen Abschnitten von Objekten auf sehr niedrige Temperaturen. Die zu kühlenden Objekte können u. a. biologische Substanzen, elektronische Bauelemente oder andere sein.

**[0002]** Auf vielen verschiedenen Arbeitsgebieten ist es erwünscht, ein sehr kleines oder sogar mikroskopisch kleines Objekt auf eine sehr niedrige Temperatur selektiv abzukühlen, ohne die Temperatur der Umgebungsobjekte zu beeinträchtigen. Dies trifft auf das Gebiet der Elektronik zu, wo es erwünscht sein kann, ein Miniatur-Bauelement auf einer Leiterplatte zu kühlen, ohne benachbarte Bauelemente wesentlich zu kühlen. Es trifft auch auf das Gebiet der Medizin zu, wo es erwünscht sein kann, kleinste diskrete Abschnitte von biologischem Gewebe auf sehr niedrige Temperaturen bei der Durchführung von kryochirurgischen Operationen abkühlen zu können, ohne angrenzende Gewebe des Organs wesentlich zu kühlen. Der Einfachheit halber stellt diese Beschreibung die Erfüllung dieses Anliegens auf dem Gebiet der Medizin dar, wobei jedoch verständlich ist, daß die Anwendung der vorliegenden Erfindung auf anderen Gebieten, z. B. Elektronik, ebenfalls im Schutzbereich der vorliegenden Erfindung liegt.

**[0003]** Die Kryochirurgie ist zu einem wichtigen Verfahren auf medizinischem, stomatologischem und veterinärmedizinischem Gebiet geworden. Besondere Erfolge sind in den Spezialgebieten der Gynäkologie und der Dermatologie erreicht worden. Andere Spezialgebiete, z. B. die Neurochirurgie und die Urologie, könnten von der Implementierung kryochirurgischer Techniken ebenfalls profitieren, aber dies ist bisher nur in begrenztem Maß vorgekommen. Leider haben die gegenwärtig bekannten kryochirurgischen Instrumente verschiedene Beschränkungen, die ihre Anwendung auf bestimmten Gebieten schwierig oder unmöglich machen. Insbesondere sind die bekannten Systeme nicht so optimal ausgeführt, daß sie eine hinreichende Genauigkeit und Flexibilität haben, um ihre breite Anwendung auf endoskopischem und perkutanem Weg zu ermöglichen.

**[0004]** In der Kryochirurgie wird normalerweise ein kryochirurgisches Applikationssystem verwendet, das geeignet ist, das Zielgewebe entsprechend einzufrieren, wobei die kranken oder degenerierten Zellen im Gewebe zerstört werden. Die zu zerstörenden anormalen Zellen sind häufig von gesundem Gewebe umgeben, das ungeschädigt bleiben muß. Eine besondere Sonde oder ein anderer Applikator, der bei einer gegebenen Applikation verwendet wird, ist deshalb mit einer optimalen Form und Größe für die

Applikation ausgeführt, um dieses selektive Einfrieren des Gewebes zu erreichen. Wenn eine Sonde verwendet wird, muß der Rest des Kälteerzeugungssystems so ausgeführt sein, daß eine ausreichende Kühlung gewährleistet ist, was eine Absenkung des operativen Abschnitts der Sonde auf eine gewünschte Temperatur und eine ausreichende Leistung oder Kapazität voraussetzt, um die gewünschte Temperatur bei einer gegebenen Wärmelast zu halten. Das Gesamtsystem muß so ausgeführt sein, daß der operative Abschnitt der Sonde an der Stelle des einzufrierenden Gewebes plaziert wird, ohne daß ein unerwünschter Effekt an anderen Organen oder Systemen auftritt.

**[0005]** Gegenwärtig bekannte kryochirurgische Systeme verwenden normalerweise flüssigen Stickstoff oder Distickstoffoxid als Kühlfluide. Flüssiger Stickstoff wird gewöhnlich entweder auf das zu zerstörende Gewebe gesprüht, oder er wird umgewälzt, um eine Sonde zu kühlen, die an das Gewebe angelegt wird. Flüssiger Stickstoff hat eine extrem niedrige Temperatur von annähernd 77 K und eine hohe Kühlleistung, die ihn für diesen Zweck sehr begehrt machen. Flüssiger Stickstoff verdampft und entweicht jedoch normalerweise während der Verwendung in die Atmosphäre, was das ständige Nachfüllen der Speichertanks erforderlich macht. Da die Flüssigkeit so kalt ist, erfordern die Sonden und anderen Geräte, die für ihre Anwendung verwendet werden, ferner Vakuumummantelungen oder andere Arten von Isolation. Dadurch sind die Sonden relativ komplex, voluminös und starr und daher für endoskopische oder intravaskuläre Anwendung ungeeignet. Da relativ voluminöse Versorgungsschläuche und die fortlaufende Kühlung aller diesbezüglichen Komponenten notwendig sind, sind die Flüssigstickstoffinstrumente für den Arzt mehr als unbequem, und sie können unerwünschte Gewebeschäden hervorrufen.

**[0006]** Ein Distickstoffoxidsystem bewirkt normalerweise die Kühlung dadurch, daß das Gas unter Druck gesetzt wird und dann mittels eines Joule-Thomson-Expansionselements, z. B. ein Ventil, eine Blende oder eine andere Art von Durchflußbeschränkung, am Ende einer Sondenspitze expandiert wird. Jede solche Vorrichtung wird nachstehend einfach als Joule-Thomson-"Expansionselement" bezeichnet. Das normale Distickstoffoxidsystem setzt das Gas mit 700 bis 800 psia (psi (absolut)) unter Druck, um praktische Temperaturen von nicht weniger als etwa 190 bis 210 K zu erreichen. Distickstoffoxidsysteme sind nicht in der Lage, die Temperatur und Leistung zu erreichen, die von den Stickstoffsyste men erreicht werden. Der maximale Temperaturabfall, der in einem Distickstoffoxidsystem erreicht werden kann, ist 184 K, was dem Siedepunkt von Distickstoffoxid entspricht. Das Distickstoffoxidsystem hat bestimmte Vorteile, nämlich daß das eintretende Hochdruckgas im wesentlichen Raumtemperatur hat, bis es das

Joule-Thomson-Element an der Sondenspitze erreicht. Dadurch ist keine Isolation des Systems mehr notwendig, was die Miniaturisierung und die Flexibilität in gewissem Grad erleichtert. Wegen der relativ hohen Temperaturen und der geringen Leistung sind jedoch Gewebezestörung und andere Applikationen begrenzt. Für viele solche Applikationen sind Temperaturen unter 184 K erwünscht. Das Distickstoffoxid muß normalerweise, nachdem es das System durchlaufen hat, in die Atmosphäre abgelassen werden, da finanziell erschwingliche Verdichter, die zur Erreichung der erforderlichen hohen Drücke geeignet sind, nicht zuverlässig sind und nicht ohne weiteres im Handel erhältlich sind.

**[0007]** In den meisten Joule-Thomson-Systemen werden nichtideale Einzelgase unter Druck gesetzt und durch ein Drosselbauelement oder ein Expansionsselement expandiert, um eine isenthalpische Abkühlung hervorzurufen. Die Charakteristik des verwendeten Gases, z. B. der Siedepunkt, die Inversionstemperatur, die kritische Temperatur und der kritische Druck, bestimmen den Anfangsdruck, der notwendig ist, um die gewünschte Kühltemperatur zu erreichen. Joule-Thomson-Systeme verwenden normalerweise einen Wärmetauscher, um das ankommende Hochdruckgas mit dem abgehenden expandierten Gas zu kühlen, um einen höheren Temperaturabfall bei Expansion und eine größere Kühlleistung zu erreichen. Bei einem gegebenen Joule-Thomson-System bestimmt die gewünschte Kühlung die erforderliche Wärmetauscherkapazität. Rippenrohrwärmetauscher sind bisher verwendet worden, aber diese sind notwendigerweise voluminös, wenn sie die erforderliche Kühlung erreichen wollen, wodurch ihre Verwendung in Mikrominiatursystemen, z. B. Katheterinstrumenten, unmöglich wird. Kleinere Wärmetauscher sind ebenfalls bekannt, nämlich solche, die aus fotogeätzten Glasplatten bestehen. Diese Wärmetauschersysteme sind noch im Bereich von mehreren Quadratzentimetern Größe, was sie dennoch zu voluminös für eine echte Mikrominiaturanwendung macht, z. B. in Endoskopen, Kathetern und anderen Systemen. Diese Wärmetauscher sind ferner planar und schwer in röhrenartigen Strukturen, z. B. Katheter oder Endoskope, unterzubringen. In vielen dieser medizinischen Anwendungen müssen die Abmessungen der Komponenten schmaler sein als annähernd 3 mm, um die Einbeziehung in ein Katheter oder Endoskop zu ermöglichen, und vorzugsweise kürzer als 15 mm, um eine ausreichende Flexibilität zu ermöglichen.

**[0008]** Die Anforderungen an Wärmetauscher können durch Vorkühlung der Gase vor dem Sondenspitzen-Wärmetauscher etwas reduziert werden. Das Dokument US-A-4 829 785 zeigt ein Tieftemperatur-Kälteerzeugungssystem mit Vorkühlstufe. Dies kann durch Einbeziehung eines Peltier-Elements in den Strömungsweg vor dem Sondenspitzen-Wärme-

tauscher erreicht werden. Das Gas, das auf der Oberfläche der kalten Seite des Peltier-Elements durch einen Wärmetauscher strömt, würde vor Erreichung des Sondenspitzen-Wärmetauschers abgekühlt werden. Als Alternative könnte der eintretende Hochdruckstrom so aufgeteilt werden, daß ein Teil des Stroms umgelenkt und expandiert werden könnte, um den verbleibenden Teil des Einlaßstroms vor Erreichung des Sondenspitzen-Wärmetauschers zu kühlen.

**[0009]** Eine dramatische Verbesserung bei der Kühlung in Joule-Thomson-Systemen kann durch Verwendung eines Gemischs von Gasen anstelle eines Einzelgases realisiert werden. Beispielsweise kann der Zusatz von Kohlenwasserstoffen zum Stickstoff die Kühlleistung und den Temperaturabfall bei einem gegebenen Einlaßdruck erhöhen. Ferner ist es möglich, den Druck zu reduzieren und ein vergleichbares Betriebsverhalten mit dem Einzelgassystem bei hohem Druck zu erreichen. Wie bei Einzelgassystemen haben Mischgassysteme Wärmetauscheranforderungen und sind in ihrem Miniaturisierungspotential durch die Größe des Wärmetauschers beschränkt. Die Verbesserung des Kühlleistungsvermögens, die durch Mischgassysteme realisiert wird, ist für medizinische und andere Mikrominiatursysteme sehr erwünscht.

**[0010]** Bestimmte Mischgassysteme sind entwickelt worden, bei denen hoher Druck kein Hauptanliegen ist, sondern bei denen voluminöse, hocheffiziente Wärmetauscher verwendet werden können, wobei diese jedoch normalerweise in Verteidigungs- und Luftfahrtanwendungen verwendet werden. Die Glasplatten-Wärmetauscher, die oben erwähnt worden sind, werden in diesen bestimmten Systemen verwendet, und diese Systeme erfordern mitunter Drücke von 1200 psia. In vielen Anwendungen, z. B. in Lasersystemen, Supraleitern, Elektronik und Kryochirurgie, sind Drücke über annähernd 420 psia aus Sicherheitsgründen unerwünscht, da die Vorrichtungen eine ungenügende Lebensdauer, hohe Kosten und eine ungenügende Zuverlässigkeit haben. Ferner läßt eine endoskopische oder perkutane Verwendung die Implementation eines Wärmetauschers mit einer Breite von mehr als etwa 3 mm oder einer Länge von mehr als etwa 15 mm nicht zu.

**[0011]** Im einzelnen wäre es erwünscht, eine lange, schlanke, flexible Kryosonde zu entwickeln, z. B. einen transvaskulären Herzkatheder. Herzkatheder müssen sehr schlank sein, im Bereich von weniger als 5 mm, und sie müssen eine erhebliche Flexibilität aufweisen, um von einem Zugangspunkt an einem entfernten Blutgefäß in das Herz eingeführt zu werden. Ein kryochirurgischer Katheter, der in einer solchen Anwendung zu verwenden ist, muß aus Sicherheitsgründen auch einen relativ niedrigen Betriebsdruck haben. Er muß die Kühlleistung haben, die die

Umgebungswärmelast überwindet, die vom zirkulierenden Blut ausgeübt wird, muß jedoch in der Lage sein, eine ausreichend niedrige Temperatur zu erreichen, um das Zielgewebe zu zerstören. Schließlich muß das kalte Wärmeübertragungselement auf die Spitze oder den Endbereich des Katheters begrenzt sein, um zu verhindern, daß anderes Gewebe als das Zielgewebe beschädigt wird.

**[0012]** Es ist eine Aufgabe der Erfindung, ein Verfahren und eine Vorrichtung zur Vorkühlung eines Primärkreislauffluidgemischs mit einem Joule-Thomson-Kühlzyklus mit Sekundärkreislauf und zur anschließenden Verwendung des Primärkreislauffluidgemischs in einem Miniatur-Mischgaskälteerzeugungssystem bereitzustellen, das in der Lage ist, eine Kühltemperatur von 183 K oder weniger zu erreichen, wobei ein hoher Druck von nicht mehr als 420 psia genutzt wird, wobei Komponenten in eine handgeführte Kryosonde eingebaut sein können. Es ist eine weitere Aufgabe der Erfindung, ein Verfahren und eine Vorrichtung zum Vorkühlen eines Primärkreislauffluidgemischs und zur anschließenden Verwendung des Fluidgemischs in einem Miniatur-Kälteerzeugungssystem bereitzustellen, um ein ausreichend kühles Hochdruck-Gasgemisch für eine isenthalpische Expansion mittels eines Joule-Thomson-Expansionselements bereitzustellen, um eine Temperatur des expandierten Gases von mindestens nur 183 K zu erreichen, um eine so hohe Kühlleistung zu haben, daß diese Temperatur beibehalten wird, wenn eine Wärmelast wirkt, und um mit einem hohen Einlaßdruck von nicht mehr als 420 psia zu arbeiten.

#### Kurze Zusammenfassung der Erfindung

**[0013]** Die Erfindung betrifft ein Verfahren und eine Vorrichtung zum Betreiben eines Miniaturkälteerzeugungssystems nach den Ansprüchen 1 bis 21.

**[0014]** Die Kühlleistung ist ein wichtiger Konstruktionsparameter eines kryochirurgischen Instruments. Bei größerer Kühlleistung treten schnellere Temperaturabsenkungen auf, und es können während der Gefrierkühlung niedrigere Temperaturen an der Sonden Spitze beibehalten werden. Dies führt letztlich zu einer größeren Gewebeerstörung. Die Leistung einer mischgasbetriebenen kryochirurgischen J-T-(Joule-Thomson-)Vorrichtung ist eine Funktion der Enthalpiedifferenz des Gasgemischs und der Durchflußrate. Die Vorkühlung bestimmter Gasgemische erhöht die Enthalpiedifferenz, die für die Kühlleistung verfügbar ist. Außerdem erhöht die Vorkühlung die durchschnittliche Durchflußrate, indem das Gas dichter gemacht wird.

**[0015]** Die Vorkühlung hat zwei andere wichtige Auswirkungen. Erstens reduziert sie die Größe der Wärmetauscher, die in der Sonde verwendet werden. In den Miniaturumgebungen, die zur Verwendung

dieser Vorrichtung ins Auge gefaßt werden, lasten erhebliche Größenbeschränkungen auf den verwendeten Wärmetauschern, besonders auf dem Wärmetauscher in der kalten Spitze. Beispielweise ist ein Herzkatheter notwendigerweise im Durchmesser durch den Durchmesser der Blutgefäße, durch die der Katheter hindurchpassen muß, stark eingeschränkt. Ferner geben die Manövrierfähigkeitsanforderungen vor, daß der Katheter ziemlich flexibel sein muß, und der in der kalten Spitze befindliche Wärmetauscher ist wahrscheinlich ziemlich steif, wenn nicht starr. Daher ist die zulässige Länge des in der kalten Spitze befindlichen Wärmetauschers begrenzt. Durch die Begrenzung der Größe des in der kalten Spitze befindlichen Wärmetauschers wird die Wärmemenge, die im Wärmetauscher übertragen werden kann, naturgemäß begrenzt. Dadurch wird die Verwendung der Vorkühlung besonders vorteilhaft: Zweitens erfordern kryochirurgische J-T-Mischgasvorrichtungen Expansionselemente mit einer festen Größe, die teilweise oder ganz von Verunreinigungen, z. B. Wasser oder Öl, blockiert werden können. Dies begrenzt die Durchflußrate und verringert die Kühlleistung. Die Vorkühlung ermöglicht es, daß diese Verunreinigungen kaltgefiltert und vor Erreichung des Expansionselements aus dem Kreislauf entfernt werden.

**[0016]** Der Begriff "Gasgemisch" wird in der vorliegenden Anmeldung in einem gewissen Maß verwendet, soll jedoch so verstanden werden, daß dieser Begriff nicht auf Gemische ohne flüssige Komponenten beschränkt ist, angesichts der bekannten Tatsache, daß die meisten Verbindungen, die gemeinhin als Gase bezeichnet werden, tatsächlich bei bestimmten Temperaturen und Drücken einen bestimmten flüssigen Anteil haben. Das Kälteerzeugungssystem mit geschlossenem Primärkreislauf hat einen Primärkreislaufverdichter zum Verdichten eines Primär-gasgemischs auf einen Druck bis zu 420 psia. Das erfindungsgemäße Verfahren und die erfindungsgemäße Vorrichtung können gleichermaßen gut in einer starren, handgeführten Kryosonde oder in einem Katheter verwendet werden.

**[0017]** Das Hochdruck-Primärgasgemisch vom Primärverdichter wird in eine Hochdruckversorgungsrohr geleitet, z. B. in ein Innenrohr eines coaxialen Doppellumenrohrs, die zum Handgriff einer Kryosonde führt. Das Rohr mit dem dualen Lumen wiederum leitet das Hochdruck-Gasgemisch in eine Einlaßöffnung am proximalen Ende eines Miniatur-Gegenstromprimärwärmetauschers im Handgriff. Das Hochdruck-Primärgasgemisch strömt durch einen Hochdruckzuführungsdurchgang im Primärwärmetauscher und tritt durch eine Öffnung am distalen Ende des Primärwärmetauschers aus. Der Hochdruckdurchgang des Primärwärmetauschers ist mit dem Einlaß eines Hochdruck-Primärdurchgangs in einem Primär/Sekundär-Wärmetauscher verbunden,

der auch im Handgriff der Kryosonde angeordnet ist. Dieses Hochdruck-Primärgasgemisch strömt durch den Hochdruckdurchgang im Primär/Sekundär-Wärmetauscher und tritt durch eine Öffnung am distalen Ende des Primär/Sekundär-Wärmetauschers aus.

**[0018]** Der Primär/Sekundär-Wärmetauscher ist Teil des Joule-Thomson-Kälteerzeugungssystems mit geschlossenem Sekundärkreislauf, das zusätzlich zum Primär/Sekundär-Wärmetauscher einen Sekundärverdichter und ein sekundäres Joule-Thomson-Expansionselement hat. Der Sekundärverdichter verdichtet ein sekundäres Kältemittel, normalerweise ein aus einer einzelnen Komponente bestehendes Fluid, auf einen Druck, der relativ höher sein kann als der, der im Primärkreislauf verwendet wird. Da der Sekundärkreislauf nicht in die Sonde strömt, kann ein höherer Druck zuverlässig verwendet werden. Dann strömt das Hochdruck-Sekundärkältemittel durch den Hochdruck-Sekundärdurchgang im Primär/Sekundär-Wärmetauscher. Das Hochdruck-Sekundärkältemittel strömt dann durch das sekundäre Joule-Thomson-Expansionselement, indem sich das Sekundärkältemittel isenthalpisch zu einem niedrigeren Druck und einer niedrigeren Temperatur expandiert.

**[0019]** Das Niedrigdruck-Sekundärkältemittel strömt dann durch einen Niedrigdruck-Sekundärdurchgang im Primär/Sekundär-Wärmetauscher und kehrt zum Sekundärverdichter zurück. Der Primär/Sekundär-Wärmetauscher ist so aufgebaut, daß der Niedrigdruck-Sekundärdurchgang zwischen dem Hochdruck-Primärdurchgang und dem Hochdruck-Sekundärdurchgang angeordnet ist. Dadurch wird die Wärmeübertragung von beiden Hochdruckdurchgängen zum Niedrigdruckdurchgang sichergestellt.

**[0020]** Dieser Hochdruckdurchgang des Primär/Sekundär-Wärmetauschers kann dann mit dem Einlaß des Hochdruckdurchgangs in einem Mikrominiatur-Primärwärmetauscher verbunden sein, der in der Sonde nahe der kalten Spitze angeordnet ist. Das Hochdruck-Primärgasgemisch strömt durch den Hochdruckdurchgang im Mikrominiatur-Primärwärmetauscher und tritt durch eine Öffnung am distalen Ende des Wärmetauschers aus. Der Hochdruckdurchgang ist dann mit dem Einlaß des primären Joule-Thomson-Expansionselements verbunden, das in der kalten Spitze angeordnet ist, in der das Gasgemisch isenthalpisch zu einem niedrigeren Druck und einer Temperatur, die mindestens 183 K beträgt, expandiert wird. Das kann eine zweite Stufe haben, in der das Gasgemisch weiter temperaturkonstant expandiert wird, um zusätzliche Wärme aus der Umgebung zu absorbieren. Wenn der erste Primärwärmetauscher und der Primär/Sekundär-Wärmetauscher eine ausreichende Kapazität haben, ist es möglicherweise nicht notwendig, den Mikrominia-

tur-Wärmetauscher in das System einzubeziehen, und das Hochdruck-Primärgasgemisch kann direkt aus dem Hochdruckdurchgang des Primär/Sekundär-Wärmetauschers in das primäre Joule-Thomson-Expansionselement strömen.

**[0021]** Das Primärgasgemisch, das aus dem primären Joule-Thomson-Expansionselement austritt, ist der Innenfläche eines Wärmeübertragungselements ausgesetzt, das in der Wand eines Außenrohrs angeordnet ist, das coaxial mit dem Innenrohr ist. Das expandierte Primärgasgemisch kühlt das Wärmeübertragungselement auf eine Temperatur von mindestens 183 K ab und kehrt dann über den Niedrigdruck-Rücklaufdurchgang des Miniatur-Primärwärmetauschers in der kalten Spitze und über den Niedrigdruck-Rücklaufdurchgang des Miniatur-Primärwärmetauschers im Sondenhandgriff zurück. Dadurch wird das Hochdruck-Primärgas von seiner ursprünglichen Umgebungstemperatur auf eine niedrigere Temperatur abgekühlt. Aus dem Niedrigdruckauslaß des Miniatur-Primärwärmetauschers im Sondenhandgriff strömt das expandierte Niedrigdruck-Primärgasgemisch in das Lumen des äußeren Koaxialrohrs, außerhalb des inneren Hochdruckrohrs, um zum Primärverdichter zurückzukehren.

**[0022]** Sowohl der Miniatur-Primärwärmetauscher als auch der Primär/Sekundär-Wärmetauscher sind Schlangenrohrwärmetauscher. Der Miniatur-Primärwärmetauscher im Sondenhandgriff kann eine Koaxialrohrschlange sein, wobei das innere Lumen der Hochdruckdurchgang und das äußere Lumen der Niedrigdruckdurchgang ist. Die Sekundärdurchgänge des Primär/Sekundär-Wärmetauschers können Koaxialrohrschlangen sein, wobei das innere Lumen der Hochdruck-Sekundärdurchgang und das äußere Lumen der Niedersekundärdurchgang ist. An der Seite dieses äußeren Rohrs ist in einer parallelen Anordnung ein Rohr befestigt, das den Hochdruck-Primärdurchgang bildet. Das Hochdruck-Primärrohr kann mehrere Innenrohre haben, die zwecks eines verbesserten Wärmetauschs mit dem Außenrohr verschachtelt und in Kontakt mit ihm angeordnet sein können. Das Hochdruck-Primärgasgemisch strömt in alle verschachtelten Rohre und in die Zwischenräume zwischen den verschachtelten Rohren und dem Außenrohr. Das sekundäre Koaxialrohr und das Primärrohr können aus Metall bestehen und miteinander verlötet sein.

**[0023]** Der Mikrominiatur-Wärmetauscher in der kalten Spitze kann eine einzelne Rohrschlange sein, die von einem Niedrigdruck-Rücklaufdurchgang umgeben ist. Als Alternative kann er einen laminierten Aufbau unterschiedlichen Typs haben. In einem Beispiel des laminierten Typs besteht der Mikrominiatur-Wärmetauscher aus mehreren Platten und Distanzelementen, die alternierend entlang der axialen Abmessung des Wärmetauschers übereinander ge-

schichtet sind. Die Platten haben eine erste Vielzahl von Löchern, die den Hochdruckdurchgang des Wärmetauschers darstellen, und eine zweite Vielzahl von Löchern, die den Niederdruckdurchgang des Wärmetauschers darstellen. Die Hochdrucklöcher sind von den Niederdrucklöchern getrennt. Distanzelemente mit größeren Öffnungen sind zwischen die Platten geschichtet, um einen turbulenten Strom zu fördern und einen effektiven Wärmeaustausch sicherzustellen. Die Platten und Distanzelemente können in einem Prozeß, z. B. durch Diffusionsbonden, befestigt werden.

**[0024]** Das primäre und das sekundäre Joule-Thomson-Expansionselement können ein Sintermetallstopfen sein, der durch Sinterung einer Vielzahl von Metallperlen zu einem Metalltrichter umgeformt ist, um den erforderlichen Druckabfall zu ermöglichen. Als Alternative kann das Expansionselement eine entsprechend bemessene Blende oder eine bestimmte Art von Einengung sein. Die beiden verschiedenen Stufen des Sinterstopfen-Expansionselements können, wenn sie vorhanden sind, verschiedene Größen von Perlen, verschiedene Querschnitte und verschiedene Packungsdichten verwenden. Das Wärmeübertragungselement kann die optimale Form zur Anpassung an das zu kühlende Objekt oder Gewebe haben. Beispielweise kann ein Metallstopfen in der Spitze des äußeren Rohrs oder des Katheters installiert sein, um eine Abkühlung durch die äußerste distale Spitze des Katheters zu bewirken. Als Alternative kann ein relativ schmaler Metallstreifen in einer Seitenwand des Katheters nahe der distalen Spitze angeordnet sein, um an einem schmalen Streifen des Gewebes Kühlung zu bewirken.

**[0025]** Die verschiedenen Einschränkungen der Größe und der Kapazität des in der kalten Spitze befindlichen Wärmetauschers erfordern, daß das System durch die Wahl eines Gasgemischs optimiert wird, das die entsprechenden thermodynamischen Eigenschaften hat, um so gut wie möglich zu funktionieren. Das Ziel dieses Auswahlprozesses besteht darin, die Kühlleistung der Kombination aus Vorkühlungswärmetauscher, in der kalten Spitze befindlichem Wärmetauscher und primärem Joule-Thomson-Expansionselement zu maximieren. Bei einem gegebenen Gasgemisch, das zwischen gewählten Hoch- und Niederdruck und zwischen gewählter hoher und niedriger Temperatur arbeitet, besteht auch bei einem idealen Wärmetauscher eine Grenze für die Wärmemenge, die übertragen werden kann. Die beste Nutzung der erfindungsgemäßen Vorrichtung erfordert ein Verfahren, das dazu dient, aus einer Gruppe von in Betracht kommenden Gasgemischen ein Gemisch auszuwählen, das den Wirkungsgrad zwischen der Kühlleistung des Joule-Thomson-Expansionselements und der Wärmeübertragungskapazität eines idealen Wärmetauschers maximiert.

**[0026]** Das Verfahren setzt zunächst die Zusammenstellung einer Liste von Fluidkomponenten voraus, die in verschiedenen Gemischen kombiniert sind, um ein optimales Gemisch zu ergeben. Es ist notwendig, daß jedes Fluidgemisch einen Tripelpunkt unter der niedrigsten Temperatur hat, die auftreten kann, um sicherzustellen, daß das Fluidgemisch in der Vorrichtung möglichst nicht einfrieren kann. Verschiedene Verfahren könnten verwendet werden, um sicherzustellen, daß jedes Fluidgemisch diese Qualität aufweist. Ein Verfahren besteht darin, sicherzustellen, daß jede der Fluidkomponenten einen Tripelpunkt unter der niedrigsten Temperatur hat, die auftreten kann. Dies würde sicherstellen, daß jedes Gemisch aus diesen Fluiden dieses Kriterium erfüllen würde. Es ist jedoch normal, daß ein Fluidgemisch einen Tripelpunkt unterhalb der Tripelpunkte mehrerer seiner Komponenten hat. Deshalb wäre es möglich, mehrere Fluidkomponenten mit Tripelpunkten über der niedrigsten Temperatur, die auftreten kann, zu verwenden, solange der Tripelpunkt jedes Fluidgemischs nach Berechnungen unter der niedrigsten Temperatur liegt, die auftreten kann.

**[0027]** Es ist auch notwendig, daß das Fluidgemisch einen positiven Joule-Thomson-Koeffizienten aufweist, um sicherzustellen, daß ein Druckabfall von einem Temperaturabfall begleitet wird. Wie bei dem Tripelpunktkriterium kann dies dadurch erreicht werden, daß sichergestellt wird, daß jede Fluidkomponente einen positiven Joule-Thomson-Koeffizienten hat. Es ist jedoch auch möglich, daß ein Fluidgemisch einen positiven Joule-Thomson-Koeffizienten hat, obwohl mehrere seiner Fluidkomponenten negative Koeffizienten haben. Deshalb wäre es möglich, mehrere Fluidkomponente mit negativen Koeffizienten zu verwenden, solange der Koeffizient jedes Fluidgemischs nach Berechnungen einen positiven Wert hat.

**[0028]** Für jede der Fluidkomponenten in dieser Liste ist die molare Enthalpie an mehreren Datenpunkten in einem gewählten Bereich von Temperaturen und einem gewählten Bereich von Drücken bekannt, wobei diese Bereiche die Temperaturen und Drücke einschließen, mit denen das Fluidgemisch durch die Vorrichtung gepumpt wird. Dann werden verschiedene Gemische des Fluids gewählt, wobei jedes Gemisch eine gewählte maximale Anzahl von Fluidkomponenten hat. Auf der Grundlage der bekannten thermodynamischen Eigenschaften der Fluidkomponente wird dann die molare Enthalpie jedes Fluidgemischs an mehreren Datenpunkten in dem gewählten Bereich von Temperaturen und dem gewählten Bereich von Drücken berechnet.

**[0029]** Für jedes Fluidgemisch wird dann eine Serie von Berechnungen durchgeführt. Es kann angenommen werden, daß der Druckabfall im Wärmetauscher entweder auf der Hochdruckseite oder auf der Niederdruckseite vernachlässigbar ist. Als Alternative

kann ein Anfangsdruck gewählt werden, der den erwarteten Druckabfall im Wärmetauscher berücksichtigt. Für den niedrigen Druck im gewählten Druckbereich wird die molare Enthalpie des Fluidgemischs bei der niedrigen Temperatur im gewählten Temperaturbereich von der molaren Enthalpie bei der hohen Temperatur im Bereich subtrahiert, was eine Niederdruck-Enthalpiedifferenz zwischen den Fluidgemischzuständen bei den beiden Temperaturen ergibt. Ebenso wird für den hohen Druck im gewählten Druckbereich die molare Enthalpie bei der niedrigen Temperatur von der molaren Enthalpie bei der hohen Temperatur subtrahiert, was eine Hochdruck-Enthalpiedifferenz zwischen den Fluidgemischzuständen bei den beiden Temperaturen ergibt. Die kleinere dieser beiden Enthalpiedifferenzen ist die maximale molare Enthalpiedifferenz, die in einem idealen Gegenstromwärmetauscher erreicht werden könnte, der mit dem gewählten Fluidgemisch in dem gewählten Temperaturbereich und Druckbereich arbeitet. Die maximal mögliche Wärmeübertragungskapazität eines solchen Wärmetauschers mit dem gewählten Fluidgemisch ist das Produkt aus dem molaren Durchfluß des Fluidgemischs und dieser molaren Enthalpiedifferenz.

**[0030]** Für jedes gewählten Fluidgemisch wird dann bei mehreren gewählten Temperaturen im gewählten Temperaturbereich die molare Enthalpie des Fluidgemischs beim hohen Druck im gewählten Druckbereich von der molaren Enthalpie beim niedrigen Druck in dem Bereich subtrahiert, wobei sich eine molare Enthalpiedifferenz zwischen den Fluidgemischzuständen bei den beiden Drücken für jede der mehreren Temperaturen ergibt. Die mehreren Temperaturen, bei denen diese Berechnung durchgeführt wird, werden in gleichmäßigen Intervallen über den gewählten Temperaturbereich gewählt. Wenn beispielsweise der gewählte Temperaturbereich von 120 K bis 270 K reicht, könnten die Intervalle zwischen den gewählten mehreren Temperaturen in Inkrementen von fünf Grad bei einer Gesamtanzahl von 30 Intervallen und 31 gewählten Temperaturen festgelegt werden. Diese Berechnung wird dann mit jeder der 31 Temperaturen durchgeführt. Je höher die Anzahl der verwendeten gewählten Temperaturen ist, um so größer ist der Nutzen der berechneten Information. Die molare Enthalpiedifferenz, die bei jeder dieser gewählten Temperaturen berechnet wird, ist die Enthalpieerhöhung, die während der Expansion des gewählten Fluidgemischs vom hohen Druck zum niedrigen Druck auftreten würde, wenn die Temperatur konstant bliebe.

**[0031]** Bei der Joule-Thomson-Expansion besteht eine sehr geringe oder gar keine Möglichkeit, daß die Wärmeübertragung zum oder vom Fluid erfolgt, während es durch das Expansionselement strömt, keine Änderung der potentiellen Energie des Fluids, keine geleistete Arbeit und eine sehr geringe oder keine

Änderung der kinetischen Energie des Fluids. Daher sind die Enthalpiezustände des Fluids vor und nach der Expansion im wesentlichen gleich. Wenn der Druck stark abnimmt, nimmt die Temperatur des Fluids auch stark ab, wobei eine im wesentlichen konstante Enthalpie beibehalten wird. Dieses kältere Fluid kann dann verwendet werden, um die Umgebung zu kühlen. Die maximal mögliche Kühlleistung, die bei der Joule-Thomson-Expansion im gewählten Druckbereich bei dem gewählten Fluidgemisch möglich ist, ist das Produkt aus dem molaren Durchfluß des Fluidgemischs und der niedrigsten molaren Enthalpiedifferenz, die bei einer Temperatur im gewählten Temperaturbereich berechnet wird.

**[0032]** Daher weist jedes Fluidgemisch in der Gruppe eine maximal mögliche Kühlleistung und eine maximal mögliche Wärmeübertragungskapazität auf. Um den Betrieb der erfindungsgemäßen Vorrichtung zu optimieren, wird ein Fluidgemisch aus den in Betracht kommenden Fluidgemischen gewählt, die oben beschrieben sind, was zu den höchsten Wirkungsgraden zwischen der möglichen Kühlleistung und der möglichen Wärmeübertragung im Wärmetauscher führt. Dies ist das optimale Fluidgemisch im gewählten Temperatur- und Druckbereich. Man kann erkennen, daß, wenn der Wirkungsgrad gleich oder größer eins ist, was bedeutet, daß die mögliche Kühlleistung so groß ist wie die mögliche Wärmeübertragung, die maximal mögliche Kühlung im gewünschten Temperatur- und Druckbereich allein mittels der Joule-Thomson-Expansion erreicht werden kann und keine Wärmetauscher notwendig sind. Wenn der höchste Wirkungsgrad kleiner als eins ist, ist mindestens ein Wärmetauscher erforderlich.

**[0033]** Die neuartigen Merkmale der vorliegenden Erfindung sowie die Erfindung selbst ist am besten anhand der beigefügten Zeichnungen in Verbindung mit der nachfolgenden Beschreibung verständlich, wobei gleiche Bezugszeichen gleiche Teile bezeichnen und die Zeichnungen folgendes zeigen:

#### Kurzbeschreibung der Zeichnungen

**[0034]** [Fig. 1](#) ist ein Enthalpie-Temperatur-Diagramm für ein typisches Gasmisch, das erfindungsgemäß verwendet wird;

**[0035]** [Fig. 2](#) ist eine perspektivische Ansicht einer Ausführungsform des Primärabschnitts des Miniatur-Kälteerzeugungssystems;

**[0036]** [Fig. 3](#) ist eine Teilschnittansicht des distalen Endabschnitts des kryochirurgischen Sondenabschnitts des in [Fig. 2](#) gezeigten Kälteerzeugungssystems;

**[0037]** [Fig. 4](#) ist eine Seitenansicht einer bevorzugten Ausführungsform einer Konfiguration einer Wär-



metauscherplatte, die im Mikrominiatur-Wärmetauscher verwendet wird, der in der in [Fig. 3](#) gezeigten kryochirurgischen Sonde verwendet wird;

[0038] [Fig. 5](#) ist eine Seitenansicht einer zweiten Konfiguration einer Wärmetauscherplatte, die eine andere Winkelausrichtung der Löcher hat als die Ausrichtung, die in [Fig. 4](#) gezeigt ist;

[0039] [Fig. 6](#) ist eine Seitenansicht einer bevorzugten Ausführungsform eines Distanzelements, das im Mikrominiatur-Wärmetauscher verwendet wird, der in der in [Fig. 3](#) gezeigten Sonde verwendet wird;

[0040] [Fig. 7](#) ist eine Seitenansicht einer zweiten Ausführungsform eines Distanzelements, das in einer zweiten Ausführungsform des Mikrominiatur-Wärmetauschers verwendet wird;

[0041] [Fig. 8](#) ist eine Seitenansicht einer ersten Konfiguration einer Platte, die in der zweiten Ausführungsform des Mikrominiatur-Wärmetauschers verwendet wird;

[0042] [Fig. 9](#) ist eine Seitenansicht einer zweiten Konfiguration einer Platte, die in der zweiten Ausführungsform des Mikrominiatur-Wärmetauschers verwendet wird, und zeigt die verschiedene Ausrichtung der Hochdruck- und Niederdrucköffnungen;

[0043] [Fig. 10](#) ist eine Serie von Seitenansichten von Platten und Distanzelementen, die in der zweiten Ausführungsform des Mikrominiatur-Wärmetauschers verwendet wird, und zeigt den Strom des Zuführungs- und Rücklaufgasgemischs;

[0044] [Fig. 11](#) ist eine Schnittansicht mehrerer Platten und Distanzelemente, die in [Fig. 10](#) gezeigt sind, und zeigt den Strom des Zuführungs- und Rücklaufgasgemischs;

[0045] [Fig. 12](#) ist eine perspektivische Ansicht einer dritten Ausführungsform des Mikrominiatur-Wärmetauschers vor der Fertigformgebung;

[0046] [Fig. 13](#) ist eine perspektivische Ansicht des in [Fig. 12](#) gezeigten Wärmetauschers nach der Fertigformgebung;

[0047] [Fig. 14](#) ist eine Teilschnittansicht einer zweiten Ausführungsform des distalen Endabschnitts einer kryochirurgischen Sonde und zeigt ein schmales langgestrecktes Wärmeübertragungselement;

[0048] [Fig. 15](#) ist eine Schnittansicht der zweiten Ausführungsform, geschnitten entlang der Linie 15-15 in [Fig. 14](#);

[0049] [Fig. 16](#) bis [Fig. 32](#) zeigen Enthalpietabellen und Diagramme für 17 Fluidgemische als Beispiele;

[0050] [Fig. 33](#) ist eine schematische Darstellung des erfindungsgemäßen geschlossenen Primär- und Sekundärkreislaufs;

[0051] [Fig. 34](#) ist eine Schnittansicht des Abschnitts des erfindungsgemäßen geschlossenen Primärkreislaufs und des erfindungsgemäßen geschlossenen Sekundärkreislaufs, wie sie in einem Handgriff einer Kryosonde angeordnet sein könnten;

[0052] [Fig. 35](#) ist eine Schnittansicht einer erfindungsgemäßen handgeführten Kryosonde;

[0053] [Fig. 36](#) ist eine Querschnittansicht des koaxialen Doppellumenrohrs, das im Miniatur-Primärwärmetauscher verwendet wird, der im Handgriff der Kryosonde angeordnet ist; und

[0054] [Fig. 37](#) ist eine Querschnittansicht der Mehrlumenschlangenrohre, die im Primär/Sekundär-Wärmetauscher verwendet werden.

#### Ausführliche Beschreibung der Erfindung

[0055] Die Erfindung betrifft die zweckmäßige Verwendung eines Joule-Thomson-Kälteerzeugungssystems mit geschlossenem Sekundärkreislauf zur Vorkühlung des Hochdruck-Primärgasgemischs vor der Durchleitung des Primärgasgemischs durch das primäre Joule-Thomson-Expansionselement. Dabei soll die verfügbare Kühlleistung an der Spitze der kryochirurgischen Sonde maximiert werden.

[0056] Die Vorkühlung des Primärfluidgemischs vor der Einleitung in den Mikrominiatur-Wärmetauscher in der kalten Spitze ist der zentrale Gedanke der Erfindung. Diese Vorkühlung könnte vor der Einleitung des Primärfluidgemischs in den Katheter unter Verwendung eines herkömmlichen, relativ großen Wärmetauschers erfolgen. Zur Erleichterung der Handhabung und zur Erreichung einer maximalen Effizienz konzentriert sich die Erfindung jedoch auf die Bereitstellung der Vorkühlung nahe dem Behandlungsbereich, z. B. im Handgriff einer Kryosonde. Der Grund dafür ist, daß die Minimierung der Länge des Strömungswegs des vorgekühlten Fluids die Effizienz des Vorkühlsystems maximiert.

[0057] Ein wichtiger Parameter bei der Konstruktion einer kryochirurgischen Vorrichtung ist die Kühlleistung, die das Kälteerzeugungssystem erzeugen kann. Die Kühlleistung bestimmt die Kühlrate in Grad pro Sekunde und die Temperatur, die in der Sondenspitze während des Einfrierens des Gewebes gehalten werden kann. Die Gefriertrate ist bei der Erreichung des Zelltodes wichtig, da ein schnelleres Einfrieren zu einer besseren Ausbildung von interzellulären Eiskristallen führt, was zur Zellauflösung führt. Die Gefriertrate bestimmt auch die Länge der Zeit, die erforderlich ist, um einen gegebenen Eingriff am Pa-



tienten durchzuführen. Je schneller der Eingriff ist, um so weniger dramatisch ist der Eingriff für den Patienten.

**[0058]** Die Temperatur, die in der kalten Sondenspitze gehalten werden kann, bestimmt die Größe der Eiskugel, die in dem umgebenden Gewebe entsteht. Diese bestimmt natürlich das Gesamtvolumen des Gewebes, das jeweils an einer Stelle zerstört wird, und die Geschwindigkeit, mit der der Eingriff abgeschlossen werden kann. Wenn beispielsweise eine erste Kryosonde, die ein gegebenes Gasgemisch verwendet, 30 W Kühlleistung hat, wird angenommen, daß sie eine Temperatur der kalten Spitze von  $-100^{\circ}\text{C}$  halten kann, was in 15 min eine Eiskugel von bis zu 4,5 cm Durchmesser in einem Testgel entstehen läßt. Wegen des schnellen Temperaturabfalls würde ein erheblicher Prozentsatz des Zelltodes in einer ähnlich großen Kugel aus lebendem Gewebe auftreten. Im Gegensatz dazu sollte man eine zweite Kryosonde betrachten, die das gleiche Gasgemisch verwendet und nur 10 W Kühlleistung hat. Die zweite Kryosonde könnte nur eine Temperatur von  $-50^{\circ}\text{C}$  halten, was innerhalb von 15 min eine Eiskugel von nur 2,5 cm Durchmesser entstehen lassen würde. Deshalb würde der oben genannte hohe Zelltod-Prozentsatz nur in einer 2,5 cm großen Kugel aus lebendem Gewebe und nicht einer Kugel von 4,5 cm Durchmesser auftreten. Wenn die erforderliche Größe der Eiskugel nur 2,5 cm groß ist, könnte die erste Kryosonde im übrigen eine solche Eiskugel innerhalb von nur 5 min und nicht innerhalb von 15 min erzeugen. Nach beiden Standards erreicht die erste Kryosonde ein besseres Ergebnis und schneller als die zweite Kryosonde mit der geringeren Leistung.

**[0059]** In kryochirurgischen Joule-Thomson-Vorrichtungen expandiert ein Hochdruckfluid an einer Einengung einer bestimmten Art, z. B. an einer kleinen Blende oder an einem zusammengequetschten Rohr. Der plötzliche Druckabfall führt zu einem entsprechenden Temperaturabfall. Die Kühlleistung der Vorrichtung ist das Produkt aus dem Massestrom des Kryogens und der Enthalpiedifferenz bei verschiedenen Drücken und Temperaturen.

**[0060]** Die Durchflußrate ist eine Funktion der Blendengröße und der Temperatur und des Drucks des Kryogens. Bei einer gegebenen Blendengröße ist unter ungedrosselten Bedingungen die Dichte des Kryogens höher bei höheren Drücken und niedrigen Temperaturen, was zu einem höheren Massenstrom führt. Die maximale Durchflußrate findet sich an dem Punkt, wo das Kryogen eine Flüssigkeit ist. Die Enthalpiedifferenz ist eine Funktion des Drucks und der Temperatur, wobei die Enthalpiedifferenz zwischen zwei Zuständen bei höheren Drücken und niedrigeren Temperaturen höher ist. Bei einer gegebenen Temperatur und bei einem gegebenen Druck tritt die maximale Enthalpiedifferenz zwischen zwei Zustän-

den am Verflüssigungspunkt des Kryogens auf. Ein oder mehrere Vorkühlungswärmetauscher können in das Kälteerzeugungssystem nahe dem Expansionselement einbezogen werden, um die Kühlung oder Verflüssigung des warmen Hochdruckkryogens zu fördern, wodurch die Leistung des Systems erhöht wird.

**[0061]** Ein Distickstoffoxid ist das am meisten verbreitete Kryogen in kryochirurgischen Joule-Thomson-Systemen. Wenn der hohe Druck des Systems über 4,5 MPa liegt, verflüssigt sich das Distickstoffoxid bei Expansion ohne die Unterstützung eines Wärmetauschers und erreicht die maximale Kühlleistung. Ein Distickstoffoxid muß jedoch bei diesem hohen Druck arbeiten und die niedrigsten Temperaturen, die möglich sind, liegen zwischen  $-50$  und  $-70^{\circ}\text{C}$ , was für bestimmte kryochirurgische Anwendungen relativ warm ist. Deshalb ist die Sicherheit und die Effizienz eines Distickstoffoxidsystems für bestimmte Anwendungen mehr als nicht erwünscht, z. B. für Katheterablation von Herzgewebe und für Ablation von endometrialem Gewebe.

**[0062]** Die Fluidgemische oder Kryogene, die in dieser Anmeldung beschrieben sind, arbeiten bei niedrigeren Drücken, und sie können niedrigere Temperaturen erreichen, was sie sowohl sicherer als auch effektiver macht. Beispielsweise kann das Gemisch aus 66% Krypton, 14% R142b, 10% R22 und 10% R23 eine Temperatur von  $-120^{\circ}\text{C}$  aus einem Druck von 2,1 MPa erreichen. Mit einer Durchflußrate von 0,6 g/s wird eine Kühlleistung von annähernd 30 W erreicht. Dieses Gemisch verflüssigt sich jedoch nicht und erreicht seine maximale Kühlleistung ohne die Unterstützung eines Wärmetauschers.

**[0063]** Es tritt jedoch ein Problem auf, wenn dieser Typ von Gemisch verwendet werden soll. Da das Gemisch beim Anlaufen des Kälteerzeugungssystems im warmen, gasförmigen Zustand ist, ist die anfängliche Durchflußrate sehr niedrig, und die Leistung ist sehr niedrig. Wenn der verwendete Wärmetauscher nicht sehr effizient ist, wird die niedrige Durchflußrate durch die anfängliche Herunterkühlung nur sehr langsam überwunden. Ferner ist die kalte Spitze vor Beginn der Abkühlung normalerweise im Patienten angeordnet und in Kontakt mit dem Zielgewebe, was der Spitze eine erhebliche Wärmelast auferlegt. Dies bedeutet, daß die Abkühlung unakzeptabel langsam sein kann, und sie kann in bestimmten Fällen überhaupt nicht auftreten.

**[0064]** Ein weiteres Problem, das auftreten kann, ist die Verstopfung des Expansionselements durch Verunreinigungssubstanzen. Wasser und Öl, falls vorhanden, verflüssigen sich und gefrieren, wenn die Temperatur des Kryogens fällt. Wegen der kleinen Größe der Blende oder eines sonstigen Expansionselements kann dieses leicht verstopfen. In den klei-

nen medizinischen Systemen sind verstellbare Blenden jedoch zu groß und unhandlich, als daß sie verwendet werden könnten.

**[0065]** In bestimmten Joule-Thomson-Mischgassystemen kann ein geringer Grad an Vorkühlung mitunter eine deutliche Erhöhung der Kühlleistung hervorbringen. Die Wahl eines Fluidgemischs und die Verwendung eines Vorkühlers müssen daher koordiniert werden.

**[0066]** Um die Leistung von kryochirurgischen Mischgassystemen zu maximieren und die Probleme, die normalerweise bei langsamen Abkühlraten und geringer Kühlleistung auftreten, zu beseitigen, ist ein unabhängiges sekundäres Joule-Thomson-Kälteerzeugungssystem mit geschlossenem Kreislauf in die Erfindung einbezogen. Das Sekundärsystem verwendet ein einzelnes Kältemittel, z. B. R13b1, um das Primärgasgemisch im Handgriff der Kryosonde zu kühlen, und zwar vor dem Einströmen des Primärgasgemischs in die kalten Spitze. Das Sekundärsystem leistet diese Vorkühlung mittels eines Primär/Sekundär-Wärmetauschers, der so nah wie möglich an der Kühlspitze angeordnet ist, um eine übermäßige Erwärmung des gekühlten Primärgasgemischs zu vermeiden, bevor es die kalten Spitze erreicht.

**[0067]** Diese Vorkühlung bewirkt, daß die anfängliche Durchflußrate und die Kühlleistung des Systems höher sind, wodurch die anfängliche Abkühlrate sehr beschleunigt. Die Wahl des optimalen Fluidgemischs macht die Vorkühlung effektiver, wobei die Kühlleistung maximiert wird. Bei bestimmten Gemischen und bei Vorkühlung ist möglicherweise kein Wärmetauscher in der kalten Spitze in nächster Nähe zum Primärexpansionselement notwendig. Ein weiterer Vorteil besteht darin, daß der Vorkühler als Kältefilter wirken kann, um Verunreinigungssubstanzen, z. B. Öl und Wasser, die sonst das Expansionselement verstopfen können, wenn das System herunterkühlt, zu beseitigen. Zu diesem Zweck kann ein Filter so konstruiert sein, daß seine Öffnungen kleiner sind als das Expansionselement, aber sein Gesamtöffnungsquerschnitt viel größer, um die Entstehung eines erheblichen Druckabfalls zu vermeiden.

**[0068]** Die erfindungsgemäße Optimierung erfordert auch die Wahl eines optimalen Fluidgemischs, da keine bekannten Einzelgase in der Lage sind, die notwendige Kühlleistung bei den erforderlichen Temperaturen zu erreichen, wenn die Größenbeschränkungen und Druckbeschränkungen gegeben sind, die auf Systemen lasten, die für die gewählten Anwendungen verwendet werden sollen. Mehrere Gasgemische sind zur erfindungsgemäßen Verwendung ermittelt worden, und es wird erwartet, daß noch weitere ermittelt werden. Geeignete Gasgemische können verschiedene Formen haben, und sie können entweder auf Kohlenwasserstoffen oder auf Nicht-

kohlenwasserstoffen beruhen. Bestimmte Fluidgemische fungieren deutlich besser als andere Gemische, so daß es wichtig ist, daß man ein optimales Gemisch aus einer Gruppe von möglichen Gemischen erkennen und auswählen kann. Ein gegenwärtig für viele Anwendungen für geeignet befundenes Gemisch ist 30% Methan, 23% Stickstoff, 23% Isobutan, 19% Ethan und 5% Propan. Das Temperaturverhalten der isenthalpische Expansion solcher Gasgemische ist in [Fig. 1](#) dargestellt, die Enthalpiekurven für dieses Gasgemisch bei Drücken von 1 Bar (14,5 psia), 21 Bar (305 psia) und 41 Bar (595 psia) zeigt. Die isenthalpische Expansion von einem der höheren Drücke zu dem niedrigeren Druck verläuft im Diagramm horizontal nach links, begleitet von einem Temperaturabfall. Die niedrigste Temperatur, die erreicht werden kann, wäre an dem Punkt, wo sich die Kurven kreuzen, etwa unter 100 K. Je niedriger die Temperatur des Hochdruck-Gasgemischs ist, um so niedriger ist die Temperatur, die durch die isenthalpische Expansion mittels des Joule-Thomson-Expansionselements erreicht werden kann. Man kann auch aus dem Diagramm erkennen, daß eine geringe Differenz zwischen den Temperaturen besteht, die durch eine Expansion ausgehend von 41 Bar und eine Expansion ausgehend von 21 Bar erreichbar sind. Wir nehmen beispielweise an, daß der verwendete Wärmetauscher in der Lage ist, das Hochdruck-Gasgemisch auf eine Temperatur von 210 K abzukühlen, und zwar direkt vor dem Expansionselement. Wenn ein hoher Druck von 21 Bar verwendet wird, führt die isenthalpische Expansion zu einer Temperatur von 180 K. Wenn das Gasgemisch statt dessen auf 41 Bar gedrückt wird, ist die erreichbare Temperatur nach der isenthalpischen Expansion immer noch lediglich etwa 173 K. Ferner ist die Kühlleistung oder die Leistung gleich, die durch die Differenz zwischen der Hochdruckkurve und der Kurve von 1 Bar bei einer gegebenen Temperatur dargestellt ist, ganz gleich, ob der hohe Druck 21 oder 41 Bar beträgt. Daher führt die zusätzliche Sicherheit, die durch die Verringerung des Anfangsdrucks auf 21 Bar oder annähernd 300 psia erreicht wird, nur zu einem geringen Verlust an Leistungsfähigkeit. Offensichtlich ist bei einem gegebenen Gasgemisch das Wärmeaustauschsystem um so effizienter, je niedriger die Sondentemperatur ist, die letztlich erreicht werden kann, und um so größer ist die Kühlleistung.

**[0069]** [Fig. 2](#) zeigt einen Primärkreislaufabschnitt eines erfindungsgemäßen Kälteerzeugungssystems **10** für eine kryochirurgische Anwendung. Der Primärabschnitt des Systems **10** besteht aus einem handelsüblichen einstufigen Verdichter **12**, einem flexiblen Doppellumenschlauch **14**, der mit dem Einlaß und dem Auslaß des Verdichters **12** verbunden ist, einem Steuerhandgriff **16** und einer kryochirurgischen Sonde **18**. Der Verdichter **12** kann irgendeiner von verschiedenen verfügbaren Verdichtern sein, die häufig einen Nachkühler, einen Ölabscheider und ein Ad-

sorptionsfilter verwenden. Als Alternative könnte ein ölfreier Verdichter verwendet werden. Der Schlauch **14** kann jeder flexible Doppellumenschlauch sein, der für die Drücke und chemischen Belastungen, die auftreten, bei dem verwendeten Gasgemisch geeignet ist. In den Handgriff **16** kann ein Bedienungserweiterungselement installiert sein, damit der Arzt dieses beim Drosseln der Durchflußrate des Gasgemischs verwenden kann. Als Alternative könnte der Durchfluß auch mit einem Fußschalter gesteuert werden, der den Durchfluß am Verdichter regelt. Die Sonde **18** ist ein Koaxialkatheter mit einem Innenrohr zum Herausleiten des Hochdruck-Gasgemischs aus dem Auslaß des Verdichters **12** und zum Zurückleiten des expandierten Niederdruckgases in den Einlaß des Verdichters **12**. Die Sonde **18** hat einen distalen Endabschnitt oder -bereich **20**, in dem der Wärmetauscher, das Expansionselement und das Wärmeübertragungselement angeordnet sind. Die Sonde **18** hat einen geeigneten Durchmesser, geeignete Länge und Flexibilität, um in das zu kühlende Objekt, z. B. durch das vaskuläre System eines Patienten in das Herz, eingeführt zu werden.

**[0070]** **Fig. 3** zeigt eine Teilschnittansicht des distalen Endabschnitts **20** des koaxialen Katheters **18**. Der Katheter **18** besteht aus einem äußeren Rohr **22** und einem inneren Rohr **24**. Das äußere Rohr **22** kann mit dem Ende des Katheters **18** zusammenhängend sein, oder es kann eine Verlängerung **23** haben, die für alle praktischen Zwecke als integrierter Teil des äußeren Rohrs **22** gedacht sein sollte. Das äußere Rohr **22** wird nach bekannten Verfahren aus einem Drahtgeflecht-Polymer, z. B. Polyamid-Ether-Copolymer, hergestellt. Das innere Rohr **24** besteht aus einem Drahtgeflecht-Polyimid mit einer Druckbelastbarkeit, die für den maximal hohen Druck ausreicht, der bei der besonderen Anwendung erwartet wird. Das innere Rohr **24** ist mittels eines Einlaßpaßstücks **26** mit dem proximalen Ende eines Mikrominatur-Wärmetauschers **28** verbunden. Am distalen Ende des Wärmetauschers **28** ist ein primäres Joule-Thomson-Expansionselement **30** angeordnet. Das distale Ende des primären Expansionselements **30** öffnet sich in einen Hohlraum **31** am distalen Ende des äußeren Rohrs **22** oder einer Verlängerung **23**, das bzw. die durch ein Wärmeübertragungselement **32** verschlossen ist. Das expandierte Gasgemisch kühlt die Innenfläche **66** des Wärmeübertragungselements **32**, wodurch die Außenfläche **68** gekühlt wird. Die Außenfläche **68** wird an das vom Arzt zu kühlende Objekt angelegt.

**[0071]** Insbesondere ist das distale Ende des inneren Hochdruckrohrs **24** mittels des Einlaßpaßstücks **26** mit der Hochdruckeinlaßöffnung **34** am proximalen Ende des Wärmetauschers **28** verbunden. Diese Hochdruckeinlaßöffnung **34** führt zu einem Hochdruck-Zuführungsdurchgang **36** durch den Wärmetauscher, der als der axiale Mittelabschnitt des Wär-

metauschers **28** in dieser Ausführungsform gezeigt ist. Der Wärmetauscher **28** hat eine Niederdruck-Einlaßöffnung **38** an seinem distalen Ende, das sich in den Hohlraum **31** öffnet. Diese Niederdruck-Einlaßöffnung **38** führt zu einem Niederdruck-Rückleitungsdurchgang **40**, der als äußerer ringförmiger Abschnitt des Wärmetauschers gezeigt ist und den Hochdruckdurchgang **36** umgibt. Das Niederdruck-Gasgemisch mit niedriger Temperatur, das durch den Niederdruckdurchgang strömt, kühlt das Hochdruck-Gasgemisch mit höherer Temperatur, das durch den Hochdruckdurchgang strömt. Der Wärmetauscher **28** besteht aus alternierend gestapelten Kupferplatten **42** und nichtrostenden Stahldistanzelementen **44**, die durch Diffusionsbonden miteinander verbunden sind. Weitere Verfahren der Befestigung könnten verwendet werden. Der Wärmetauscher **28** ist der Einfachheit halber in dieser Figur so dargestellt, als habe er eine Außenhaut über den Platten **42** und Distanzelementen **44**, aber tatsächlich ist die Haut optimal durch einen Außenring **45** auf jedem Distanzelement **44** gegeben, das mit dem äußersten ringförmigen Außenabschnitt jeder Platte **42** verbunden ist, wie nachstehend noch deutlicher beschrieben wird. Der Mittelabschnitt jeder Platte **42** hat mehrere Löcher **46**, die zusammen mit mittigen Öffnungen in den Abstandselementen **44** den Hochdruckdurchgang **36** in Längsrichtung durch den Wärmetauscher **28** in der distalen Richtung darstellen. Ebenso hat der Außenabschnitt jeder Platte **42** mehrere Löcher **48**, die zusammen mit den äußeren Öffnungen in den Abstandselementen **44** den Niederdruckdurchgang **40** in Längsrichtung durch den Wärmetauscher **28** in der proximalen Richtung darstellen. Der Hochdruckdurchgang **36** ist vom Niederdruckdurchgang **40** durch einen Innenring **47** auf jedem Distanzelement **44** getrennt.

**[0072]** Das Hochdruck-Gasgemisch, das durch den Wärmetauscher **28** strömt, tritt aus dem Hochdruckdurchgang an einer Hochdruck-Auslaßöffnung **50** am mittleren distalen Abschnitt des Wärmetauschers aus, um in den Einlaß **52** des primären isenthalpischen Joule-Thomson-Expansionselements **30** einzutreten. Dieses primäre Expansionselement **30** hat eine erste Stufe **54** mit einem ersten Durchmesser, in der die isenthalpische Expansion zu einem zweiten größeren Durchmesser stattfindet, wobei die Temperatur des Gasgemischs auf die ausgelegte Temperatur abgesenkt wird. Das Gasgemisch strömt dann durch die zweite Stufe **56**, in der eine temperaturkonstante Expansion stattfindet, wobei das Gasgemisch auf der gewünschten Temperatur verbleibt, wobei jedoch im Prozeß Wärme aus der Umgebungsstruktur absorbiert wird. Die erste Stufe **54** entsteht dadurch, daß ein Metallzylinder **58** mit einer gewählten Größe von Metallperlen zu einer gewählten Packungsdichte gefüllt wird, um die gewünschte Expansionsrate des Gases zu erreichen. Die Perlen werden an Ort und Stelle im Zylinder **58** gesintert. Ebenso entsteht die

zweite Stufe **56** dadurch, daß ein zweiter Metallzylinder **60** mit einer gewählten Größe von Metallperlen zu einer gewählten Packungsdichte gefüllt wird, um die gewünschte Expansionsrate des Gases zu erreichen. Normalerweise haben die Perlen in der zweiten Stufe **56** eine größere Oberfläche, um die Wärmeübertragung zu verbessern.

**[0073]** Das expandierte Primärgasgemisch, das durch den Wärmetauscher **28** in der proximalen Richtung strömt, tritt aus dem ringförmigen Niedrigdruckdurchgang **40** an einer Niedrigdruck-Auslaßöffnung **62** am proximalen Ende des Wärmetauschers **28** aus. Dieses expandierte Gasgemisch tritt in das innere Lumen **64** des äußeren Rohrs **22** ein, das das innere Rohr **24** umgibt, um zum Primärverdichter **12** zurückzuströmen.

**[0074]** [Fig. 4](#) und [Fig. 5](#) zeigen die Struktur der Platten **42** und ihrer Winkelausrichtung innerhalb des Wärmetauschers **28** deutlicher. Jede Platte **42** hat eine erste Vielzahl von Hochdrucklöchern **46** in ihrem Mittelabschnitt und eine zweite Vielzahl von Niedrigdrucklöchern **48** in ihrem äußeren ringförmigen Abschnitt. Normalerweise sind der Durchmesser und der Abstand der Innenlöcher **46** kleiner als der Durchmesser und Abstand der Außenlöcher **48**. Die Wahl des Lochdurchmessers und des Abstands für die beiden verschiedenen Durchgänge ist auf eine Optimierung des minimalen Druckabfalls und der maximalen Wärmeübertragungsrate bei den beiden verschiedenen Drücken gerichtet, entsprechend den bekannten Konstruktionsprinzipien. [Fig. 4](#) und [Fig. 5](#) sollen auch die relative Winkelausrichtung zwischen benachbarten Platten **42** zeigen. Man kann erkennen, daß die beiden Figuren tatsächlich die gleiche Plattenkonfiguration darstellen, wobei die Platte **42** in [Fig. 5](#) in bezug auf die Platte **42** in [Fig. 4](#) einfach gedreht ist. Das in der Platte **42** verwendete Lochmuster kann variiert werden, wobei das Ziel darin besteht, den Wärmeübertragungskontakt zwischen dem Gasgemisch und der Platte **42** zu maximieren. Das Gas strömt nicht aus dem Hochdruckabschnitt der Platte in den Niedrigdruckabschnitt, da es durch den Kontakt zwischen der Platte **42** und dem Innenring **47** des dazwischen angeordneten Abstandselements **44** daran gehindert wird, wie bereits in [Fig. 3](#) gezeigt. Die relative Winkelausrichtung zwischen benachbarten Platten **42** kann auch entsprechend dem gewählten Lochmuster variiert werden, wobei das Ziel darin besteht, die Turbulenz des Gasgemischs zu maximieren, um die Wärmeübertragung zu fördern. Man kann aus [Fig. 3](#), [Fig. 4](#) und [Fig. 5](#) deutlich erkennen, daß das Gas, das in beiden Durchgängen **36**, **40** durch den Wärmetauscher **28**, einem ziemlich geschlängelten Weg folgt, wobei ein wesentlicher Abschnitt des Strömungswegs zu der Bewegung quer zur Achse des Wärmetauschers **28** beiträgt. In der gezeigten Ausführungsform ergibt sich die quer verlaufende Komponente des Stroms aus der relativen Win-

kelausrichtung zwischen benachbarten Platten **42**. Dieser geschlängelte Weg fördert die effiziente Wärmeübertragung, wodurch es möglich wird, daß der Mikrominiatur-Wärmetauscher **28** den erforderlichen Temperaturabfall erreicht, um die gewünschte isenthalpische Expansion mittels des Joule-Thomson-Einengungsexpansionselements **30** zu ermöglichen, wobei letztlich die ausgelegte Kühltemperatur erreicht wird. Der Wärmestrom in dieser Ausführungsform neigt dazu, im wesentlichen radial zu verlaufen.

**[0075]** [Fig. 6](#) zeigt die bevorzugte Ausführungsform des Distanzelements **44**, das zwischen die Platten **42** eingefügt ist. Das Distanzelement **44** hat einen Außenring **45** und einen Innenring **47**, der durch Speichen **70** in der gewünschten konzentrischen Beziehung gehalten wird. Eine Innenöffnung **72** im Innenring **47** dient als Abschnitt des Hochdruckdurchgangs **36** zwischen den Platten **42**. Mehrere äußere Öffnungen **74** zwischen dem Innenring **47** und dem Außenring **45** dienen als Abschnitt des Niedrigdruckdurchgangs **40** zwischen den Platten **42**. Der Innenring **47** dient als Teiler zwischen den Hochdruck- und den Niedrigdrucköffnungen **72**, **74**.

**[0076]** [Fig. 7](#) zeigt eine zweite Ausführungsform des Distanzelements **44'**, das mit einer zweiten Ausführungsform von Platten **42'** verwendet werden kann, die in [Fig. 8](#) und [Fig. 9](#) gezeigt sind. Das Distanzelement **44'** hat einen Außenring **45'** und einen Hochdruck/Niedrigdruckteiler **47'**. Der Teiler **47'** trennt die Hochdrucköffnung **72'** von der Niedrigdrucköffnung **74'**. Man kann erkennen, daß dieses Distanzelement **44'** aus der Ausrichtung, die in [Fig. 7](#) gezeigt ist, umgedreht werden kann, um die Ausrichtung des Teilers **47'** umzukehren, und zwar aus Gründen, die nachstehend deutlich werden. [Fig. 8](#) zeigt eine Platte **42'** mit einem relativ kleinen rechteckigen Hochdruckloch **46'** und einem relativ großen rechteckigen Niedrigdruckloch **48'**, wobei die langen Abmessungen der rechteckigen Löcher **46'**, **48'** vertikal ausgerichtet sind. [Fig. 9](#) zeigt den gleichen Typ von Platte **42'**, wobei die rechteckigen Löcher **46'**, **48'** horizontal ausgerichtet sind. Diese beiden Lochmuster und die beiden Distanzelementausrichtungen, die bei dem Distanzelement **44'** möglich sind, werden verwendet, um eine Serie von benachbarten Platten **42'** und Distanzelementen **44'** zu erzeugen, wie in [Fig. 10](#) gezeigt.

**[0077]** [Fig. 10](#) zeigt diese Serie, die von links nach rechts angeordnet ist, wie sie vom proximalen Ende des Wärmetauschers zum Niedrigdruckende in einer aufeinanderfolgenden Serie ausgerichtet wäre. Die Pfeile HP (Hochdruck) zeigen den Strömungsweg des Hochdruck-Gasgemischs in die Ebene des Blattes hinein, während die Pfeile LP (Niedrigdruck) den Weg des Niedrigdruck-Gasgemischs aus der Ebene des Blattes heraus zeigen.



[0078] [Fig. 11](#) stellt diesen Strömungsweg dar, indem ein vertikaler Schnitt durch die gestapelten Platten **42'** und Distanzelemente **44'** gezeigt wird. Gestrichelte Linien werden verwendet, um die Stellen der verborgenen Hochdruck- und Niederdrucklöcher zu zeigen. Hier kann man wiederum erkennen, daß das Gasgemisch einem geschlängelten Weg sowohl durch den Hochdruck- als auch durch den Niederdruckdurchgang **36**, **40** folgt, aber in dieser Ausführungsform sind die Querstromkomponenten viel deutlicher als in der ersten Ausführungsform, und der Wärmestrom neigt dazu, mehr axial als radial zu verlaufen.

[0079] [Fig. 12](#) und [Fig. 13](#) zeigen noch eine weitere Ausführungsform des Mikrominiatur-Wärmetauschers, der aus gerollten Bahnen und nicht aus gestapelten Platten und Distanzelementen besteht. Das innere Rohr **24** des Katheters **18** ist mit einem labyrinthartigen Hochdruckdurchgang **36'** verbunden dargestellt, der in eine erste Bahn **76** eingeztzt ist. Eine Einengung ist auch in den Auslaß des Hochdruckdurchgangs **36'** eingeztzt, um ein Joule-Thomson-Expansionselement **30'** zu bilden. Eine zweite Bahn **80** hat einen eingeztzten Niederdruckdurchgang **40'** mit einem Einlaß **38'** und einem Auslaß **62'**. Zwischen der ersten Bahn **76** und der zweiten Bahn **80** sind Distanzelementbahnen **78** positioniert, um den Hochdruck- und den Niederdruckdurchgang **36'**, **40'** zu trennen. Die Bahnen **76**, **78**, **80** können in der gezeigten Ausrichtung laminiert und durch Diffusionsbonden miteinander verbunden sein oder in einem bestimmten anderen geeigneten Prozeß zusammengefügt sein. Die Anordnung wird dann gerollt, wie in [Fig. 13](#) gezeigt, um einen zylindrischen Wärmetauscher **28'** herzustellen.

[0080] [Fig. 14](#) und [Fig. 15](#) zeigen eine zweite Ausführungsform des distalen Endabschnitts des Katheters **18'** mit einem schlanken, langgestreckten Wärmeübertragungselement **32'**. Diese Ausführungsform zeigt, daß der Endabschnitt des Katheters ein Fluidrohr **27**, das am Expansionselement **30** befestigt ist, eine Fluidkammer **29** und eine Isolierung **25** zwischen der Fluidkammer **29** und dem Verlängerungsrohr **23** haben kann. Dieser Aufbau stellt sicher, daß die Kühlleistung in erster Linie durch das Wärmeübertragungselement **32'** erbracht wird.

[0081] Die Größe und Eigenwärmeübertragungskapazität des Wärmetauschers sind unabhängig von der verwendeten Konstruktion begrenzt. Bei den angestrebten Miniaturumgebungen für die Verwendung dieser Vorrichtung ist der Raumbedarf das wichtigste. Ob in einem Herzkatheder oder auf einer gedruckten Leiterplatte verwendet, lasten daher schwerwiegende Größenbeschränkungen auf den Wärmetauscher. Beispielsweise muß ein Herzkatheder in ein Blutgefäß bis zu einem Zielgebiet für eine Kühlungsanwendung eingeführt und dort manövriert werden.

Daher wird der Durchmesser eines Herzkatheters notwendigerweise stark vom Durchmesser der Blutgefäße begrenzt, durch die der Katheter hindurchpassen muß. Ferner muß der Katheter äußerst manövrierbar sein, damit er unter der Steuerung durch den Arzt durch das vaskuläre System hindurchgeführt werden kann. Diese Manövrierbarkeitsanforderungen erfordern, daß der Katheter ziemlich flexibel ist, besonders nahe seiner Spitze, wo der in der kalten Spitze befindliche Wärmetauscher angeordnet ist. Leider sind die meisten Ausführungen des in einer kalten Spitze befindlichen Wärmetauschers wahrscheinlich etwas zu steif, wenn nicht zu starr. Deshalb muß die Länge des Wärmetauschers stark begrenzt werden, um den Katheter in diesem Bereich ziemlich flexibel werden zu lassen. Die Begrenzung der Größe des Wärmetauschers führt natürlich zu einer entsprechenden Begrenzung der Wärmemenge, die im Wärmetauscher übertragen werden kann. Dieser Art von starker Begrenzung der Größe und der Kapazität des in einer kalten Spitze befindlichen Wärmetauschers führt zu dem Schluß, daß das gesamte Kälteerzeugungssystem durch die Verwendung eines sekundären Joule-Thomson-Kälteerzeugungssystems mit geschlossenem Kreislauf auf einem höchstmöglichen Niveau der Leistungsfähigkeit gehalten werden muß. Wenn eine entsprechende Vorkühlung mit dem optimalen Gas- oder Fluidgemisch kombiniert wird, führt das System die Kühlung so gut wie möglich durch, trotz der Größenbegrenzungen. Das Ziel dieses Vorkühlsystems in Kombination mit dem entsprechenden Fluidgemischauswahlprozeß besteht darin, die Kühlleistung der Kombination aus Vorkühlungswärmetauschern und Joule-Thomson-Expansionselementen zu maximieren.

[0082] Bei einem bestimmten Gasgemisch und bei einem gewählten Druck- und Temperaturbereich besteht eine theoretische Grenze für die Wärmemenge, die auch bei einem idealen Wärmetauscher übertragen werden kann. Diese Grenze ist durch die folgende Gleichung gegeben:

$$Q_{hx} = n[h(P, T_h) - h(P, T_c)]_{\min}$$

wobei  $n$  der molare Durchfluß ist,  $h$  die molare Enthalpie,  $T_h$  die Temperatur am warmen Ende eines Wärmetauschers,  $T_c$  die Temperatur am kalten Ende des Wärmetauschers und  $P$  der Druck, wobei der Wert  $Q_{hx}$  sowohl bei hohem Druck als auch bei niedrigem Druck berechnet wird. Der Index  $\min$  bezeichnet die Tatsache, daß der verwendete Wert  $Q_{hx}$  kleiner ist als die Werte, die bei den beiden Drücken berechnet werden.

[0083] Bei diesem bestimmten Fluidgemisch und bei diesem bestimmten Druck- und Temperaturbereich gibt es ebenso eine theoretische Grenze für die Kühlleistung, die selbst mit einem idealen Joule-Thomson-Expansionselement erreicht werden

kann. Diese Grenze ist durch folgende Gleichung gegeben:

$$Q_r = n[h(P_1, T) - h(P_h, T)]_{\min}$$

wobei  $P_1$  der niedrige Druck ist,  $P_h$  der hohe Druck und  $T$  die Temperatur, wobei der Wert von  $Q_r$  bei mehreren gewählten Temperaturen zwischen der niedrigen und der hohen Temperatur mit den Extremen des gewählten Temperaturbereichs berechnet wird. Der Index min bezeichnet die Tatsache, daß der verwendete Wert von  $Q_r$  der niedrigste der Werte ist, die bei den mehreren gewählten Temperaturen berechnet werden.

**[0084]** Das Verhältnis zwischen der theoretischen Kühlleistung und der theoretischen Wärmeübertragungskapazität oder  $Q_r/Q_{hx}$  kann als ein Wirkungsgrad angesehen werden, der für das bestimmte Fluidgemisch in diesem bestimmten Druck- und Temperaturbereich charakteristisch ist. Die Erfindung schließt ein Verfahren zur Auswahl eines Fluidgemischs aus einer Gruppe von in Betracht kommenden Gemischen ein, das den höchsten Wirkungsgrad aller Fluidgemische in der in Betracht kommenden Gruppe hat.

**[0085]** Zuerst wird eine Liste von reinen Fluidkomponenten zusammengestellt, aus denen die in Betracht kommenden Fluidgemische formuliert werden. Jede Fluidkomponente könnte ein elementares Fluid sein, oder es könnte eine Verbindung aus mehreren Elementen sein. Jede Fluidkomponente könnte entweder organisch oder anorganisch sein. Eine Anforderung besteht darin, daß das Fluidgemisch einen Tripelpunkt unter der niedrigsten Temperatur im gewählten Temperaturbereich haben muß, um das Einfrieren des Fluidgemischs in der Vorrichtung zu verhindern. Diese Anforderung kann dadurch erfüllt werden, daß sichergestellt wird, daß jede Fluidkomponente in der Liste einen Tripelpunkt unter der niedrigsten Temperatur hat, die auftreten kann. Als Alternative können einige der Fluidkomponenten Tripelpunkte innerhalb des erwarteten Temperaturbereichs haben, solange der Tripelpunkt jedes der formulierten Fluidgemische einen Tripelpunkt unter dem erwarteten Temperaturbereich hat. Eine zweite Anforderung besteht darin, daß jedes Fluidgemisch einen positiven Joule-Thomson-Koeffizient haben muß; das heißt, ein Druckabfall im Fluidgemisch muß von einem Temperaturabfall begleitet sein. Eine Möglichkeit, dies sicherzustellen, besteht darin, sicherzustellen, daß jedes Fluidkomponente auf der Liste einen positiven Koeffizienten hat. Als Alternative könnten bestimmte Fluidkomponente negative Koeffizienten haben, solange der Koeffizient jedes Fluidgemischs einen positiven Koeffizienten hat.

**[0086]** Bei jeder der Fluidkomponenten in dieser Liste muß die molare Enthalpie bei einer Vielzahl von

Datenpunkten über den gewählten Temperaturbereich und den gewählten Druckbereich bekannt sein, wobei diese gewählten Bereiche die Temperatur- und Druckbereiche sind, in denen das Fluidgemisch durch die Kühlvorrichtung gepumpt wird.

**[0087]** Dann werden mehrere Gemische von Fluidkomponenten gewählt, wobei jedes Fluidgemisch eine Anzahl von Fluidkomponenten hat und wobei jede Fluidkomponenten in einem bestimmten Molenbruch vorhanden ist. In einem Fluidgemisch könnte theoretisch jede Anzahl von Fluidkomponenten vorhanden sein. In der tatsächlichen Praxis erfordern natürlich die Berechnungsmöglichkeiten, daß eine bestimmte Grenze bei der höchstmöglichen Anzahl von Fluidkomponenten, die in einem Fluidgemisch enthalten sind, gesetzt wird. Zwei Fluidgemische, die die gleichen Fluidkomponenten haben, aber bei denen die Fluidkomponenten in verschiedenen Molenbrüchen vorhanden sind, würden als zwei verschiedene Fluidgemische gelten. Nur zwei in Betracht kommende Fluidgemische könnten im einfachsten Fall zum Vergleich gewählt werden. Jede Anzahl von Gemischen könnte jedoch formuliert werden, und zwar bis zur maximalen Anzahl, die unter dem Gesichtspunkt der Fluidkomponenten formuliert werden kann. Auf der Grundlage der bekannten thermodynamischen Eigenschaften jeder der Fluidkomponenten wird dann die molare Enthalpie jedes formulierten Fluidgemischs bei einer Vielzahl von Datenpunkten über den gewählten Temperaturbereich und den gewählten Druckbereich berechnet.

**[0088]** Ein bekanntes Verfahren zur Berechnung der molaren Enthalpie jedes Fluidgemischs an mehreren Datenpunkten über den gewählten Temperatur- und Druckbereich ist das Verfahren der erweiterten übereinstimmenden Zustände, wie es in dem Programm der Gemischeigenschaften-Datenbank (DD-MIX) und im Programm der thermophysikalischen Eigenschaften von Kohlenwasserstoffgemischen (SUPERTRAPP), die beide im National Institute of Standards and Technology (NIST) erhältlich sind. Enthalpie-Werte und andere thermophysikalische Eigenschaften der in Betracht kommenden Fluidgemische können geschätzt werden mit Hilfe dieser Programme unter Verwendung angenäherter Formfaktoren auf der Grundlage von Sättigungsgrenzanpassung. Ein Referenzfluid wird normalerweise gewählt, wobei die thermophysikalischen Eigenschaften der anderen Fluide in Relation zu den Eigenschaften gegeben sind, die das Referenzfluid aufweist. Es ist festgestellt worden, daß das Kältemittel R134 als geeignetes Referenzfluid für diese Berechnungen dient, wobei jedoch auch andere Fluide dazu dienen könnten.

**[0089]** Die gewählten Fluidkomponenten müssen einen Tripelpunkt unter dem unteren Ende des gewählten Temperaturbereichs haben, um die Möglichkeit der Feststoffbildung auszuschließen. Die Daten-

bank der Fluidkomponenten kann Kältemittel, leichte Kohlenwasserstoffe, einschließlich Alkane und Alkene, und Edelgase, einschließlich Neon, Argon und Krypton, enthalten. Der Phasenteilstrom und der Enthalpie-Anteil jedes gewählten, in Betracht kommenden Fluids werden als Funktion der Temperatur und des Drucks berechnet.

**[0090]** Für jedes in Betracht kommende Fluidgemisch wird dann eine Serie von Berechnungen durchgeführt. Es kann mitunter angenommen werden, daß der Druckabfall im Wärmetauscher sowohl auf der Hochdruck- als auch auf der Niederdruckseite vernachlässigbar ist. Wenn ein beträchtlicher Druckabfall erwartet wird, kann als Alternative ein Anfangsdruck gewählt werden, der den Druckabfall im Wärmetauscher berücksichtigt. Beim niedrigen Druck in dem gewählten Druckbereich wird die molare Enthalpie des Fluidgemischs bei der niedrigen Temperatur im gewählten Temperaturbereich von der molaren Enthalpie bei der hohen Temperatur im Bereich subtrahiert, wodurch sich eine Niederdruck-Enthalpiedifferenz zwischen den Fluidgemischzuständen bei den beiden Temperaturen ergibt. Ebenso wird für den hohen Druck im gewählten Temperaturbereich die molare Enthalpie bei der niedrigen Temperatur von der molaren Enthalpie bei der hohen Temperatur subtrahiert, wodurch sich eine Hochdruck-Enthalpiedifferenz zwischen den Fluidgemischzuständen bei den beiden Temperaturen ergibt. Die kleinere dieser beiden Enthalpiedifferenzen ist die theoretische molare Enthalpiedifferenz, die in einem idealen Gegenstromwärmetauscher erreicht werden könnte, der mit dem gewählten Fluidgemisch in dem gewählten Temperatur- und Druckbereich arbeitet. Die theoretische Wärmeübertragungskapazität eines solchen Wärmetauschers mit dem gewählten Fluidgemisch in dem gewählten Temperatur- und Druckbereich ist das Produkt aus dem molaren Durchfluß des Fluidgemischs und dieser theoretischen molaren Enthalpiedifferenz. Die theoretische Wärmeübertragungskapazität wird für jedes in Betracht kommende Fluidgemisch berechnet.

**[0091]** Dann werden mehrere Temperaturen in gleichmäßigen Inkrementen über den gewählten Temperaturbereich gewählt. Die Anzahl und Größe der Temperaturinkremente kann variieren. Ein Temperaturinkrement von 5° ist häufig ausreichend. Wenn beispielsweise der gewählte Temperaturbereich von 120 bis 270 K reicht und wenn die Größe des Inkrements auf 5° festgelegt ist, führt dies zu einer Gesamtmenge von 30 Inkrementen und 31 gewählten Temperaturen. Für jedes in Betracht kommende Fluidgemisch wird die molare Enthalpie des Fluidgemischs am oberen Ende des gewählten Druckbereichs von der molaren Enthalpie am unteren Ende des Druckbereichs subtrahiert, was eine molare Enthalpiedifferenz zwischen den Fluidgemischzuständen bei den beiden Drücken ergibt. Diese Berech-

nung wird mit jeder der 31 gewählten Temperaturen durchgeführt. Je höher die Anzahl der gewählten verwendeten Temperaturen ist und je kleiner die Größe der Inkremente ist, um so größer ist der Nutzen der berechneten Information. Die molare Enthalpiedifferenz, die bei jeder dieser gewählten Temperaturen berechnet wird, ist die theoretische Enthalpieerhöhung, die während der Expansion des in Betracht kommenden Fluidgemischs vom Hochdruck zum Niederdruck bei dieser Temperatur auftreten würde, wenn die Temperatur konstant bliebe.

**[0092]** Bei der Joule-Thomson-Expansion gibt es jedoch sehr wenig oder keine Gelegenheit für die Wärmeübertragung zum oder vom Fluid, wenn es durch das Expansionselement strömt, keine Änderung der potentiellen Energie des Fluids, keine geleistete Arbeit und sehr wenig oder keine Änderung der kinetischen Energie des Fluids. Deshalb sind die Enthalpiezustände des Fluids vor und nach der Expansion im wesentlichen gleich. Da der Druck während der Expansion stark abfällt, fällt die Temperatur des Fluids auch stark ab, wobei eine im wesentlichen konstante Enthalpie erhalten bleibt. Dieses kältere Fluid kann dann verwendet werden, um die Umgebung zu kühlen. Tatsächlich bleibt die Temperatur während der Expansion dann nicht konstant, und die theoretische Kühlleistung, die durch die Joule-Thomson-Expansion des in Betracht kommenden Fluidgemischs im gewählten Temperaturbereich möglich ist, ist eine Funktion der geringsten theoretischen Enthalpiedifferenz bei jeder der gewählten Temperaturen. Insbesondere ist die theoretische Kühlleistung, die durch die Joule-Thomson-Expansion des in Betracht kommenden Fluidgemischs erreichbar ist, das Produkt aus dem molaren Durchfluß des Fluidgemischs und der niedrigsten theoretischen molaren Enthalpiedifferenz, die bei jeder Temperatur in dem gewählten Bereich berechnet wird. Die theoretische Kühlleistung wird für jedes in Betracht kommende Fluid berechnet.

**[0093]** Deshalb hat jedes in Betracht kommende Fluidgemisch in der Gruppe eine theoretische Kühlleistung und eine theoretische Wärmeübertragungskapazität über den gewählten Temperatur- und Druckbereich. Das Verhältnis zwischen der theoretischen Kühlleistung und der theoretischen Wärmeübertragungskapazität kann als ein Wirkungsgrad bezeichnet werden, der für dieses bestimmte Fluidgemisch in diesem Temperatur- und Druckbereich charakteristisch ist. Um den Betrieb der erfindungsgemäßen Vorrichtung zu optimieren, wird ein Fluidgemisch aus den in Betracht kommenden Gemischen gewählt, das zu dem höchsten Wirkungsgrad führt. Dies ist das optimale Fluidgemisch in dieser Gruppe von in Betracht kommenden Gemischen im gewählten Temperatur- und Druckbereich. Man kann erkennen, daß dann, wenn der Wirkungsgrad gleich oder größer als eins ist, was bedeutet, daß die theoretische Kühlleistung so groß ist wie die theoretische Wärmeübertra-



gungskapazität, die maximal mögliche Kühlung über den gewünschten Temperatur- und Druckbereich mittels der Joule-Thomson-Expansion allein erreicht werden kann und kein Wärmetauscher benötigt wird. Wenn der höchste Wirkungsgrad in der Gruppe kleiner als eins ist, ist zumindest ein Wärmetauscher erforderlich.

**[0094]** Fig. 16 bis Fig. 32 zeigen die Tabellen A bis Q der Enthalpiewerte verschiedener Fluidgemische, die nach dem Verfahren der erweiterten übereinstimmenden Zustände abgeleitet sind. Die Fluidkomponenten, die bei der Formulierung der in Betracht kommenden Fluidgemische verwendet werden, waren Ar, CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>3</sub>H<sub>4</sub>, Kr, N<sub>2</sub>, NF<sub>3</sub>, 1-Penten, Isobutan, Isopentan, Propylen, R14, R22, R23, R32, R124 und R142b. Es ist festgestellt worden, daß verschiedene Gemische dieser Fluidkomponenten für den Betrieb von Miniatur-Mischgaskälteerzeugungssystemen geeignet sein können. Die Enthalpiewerte in jeder Tabelle sind bei einem niedrigen Druck von 1,0 Bar in der mit Low H bezeichneten Spalte und bei einem hohen Druck von 21,0 Bar in der mit High H bezeichneten Spalte dargestellt. Auf der Grundlage dieser Enthalpiewerte werden Berechnungen durchgeführt, um die berechneten Werte von Delta H\* bei jedem Temperaturinkrement zu erreichen. Dann werden entsprechend einem nachstehend beschriebenen Verfahren auf der Grundlage des gewählten Temperaturbereichs Werte von Delta H\* bei jedem Temperaturinkrement berechnet. Zusätzlich zu der Tabelle der Enthalpie und den dazugehörigen Werten zeigt jede Figur außerdem ein Diagramm von Delta H\* gegen Temperatur und ein Diagramm von Low H und High H gegen Temperatur. Die Tabellen A bis H zeigen Enthalpiewerte und Delta H\* zwischen 150 und 300 K, wobei der gewählte Temperaturbereich, der von Interesse ist, von 150 bis 270 K reicht. Die Tabellen I bis M zeigen Enthalpiewerte und Delta H\* zwischen 120 und 270 K, wobei der gewählte Temperaturbereich, der von Interesse ist, zwischen 120 bis 270 K liegt. Die Tabellen N bis Q zeigen Enthalpiewerte und Delta H\* zwischen 100 und 280 K, wobei der gewählte Temperaturbereich, der von Interesse ist, von 100 bis 260 K reicht.

**[0095]** Die in den Tabellen dargestellten Temperaturbereiche wurden willkürlich gewählt, um zu demonstrieren, daß die Enthalpie-Werte für ein Gemisch in jedem gewünschten Temperaturbereich gegeben sein können, wobei die Werte für Delta H\* in einer gegebenen Tabelle auf der Grundlage des betreffenden, gewählten Temperaturbereichs berechnet werden. Vergleiche zwischen Fluidgemischen können nur aus Tabellen entnommen werden, die Delta-H\*-Werte haben, die auf dem gleichen gewählten Temperaturbereich beruhen. Beispielweise weisen alle Tabellen Enthalpiewerte im Bereich von 150 bis 270 K auf. Aber nur die Tabellen A bis H können zum Vergleich von berechneten Werten von Delta H\* auf

der Grundlage eines gewählten Temperaturbereichs von 150 bis 270 K verwendet werden, da die Werte von Delta H\* in den anderen Tabellen auf der Grundlage eines anderen gewählten Temperaturbereichs berechnet wurden.

**[0096]** Analog dazu zeigen die Tabellen 1 bis Q Enthalpiewerte im Bereich von 120 bis 270 K, aber nur die Tabellen I bis M können zum Vergleich der berechneten Werte von Delta H\* auf der Grundlage dieses gewählten Temperaturbereichs verwendet werden. Der Grund dafür ist, daß die berechneten Werte von Delta H\* in den Tabellen N bis Q auf der Grundlage eines gewählten Temperaturbereichs von 100 bis 260 K berechnet wurden. Die aufgeführten Werte von Delta H\*, die außerhalb des gewählten Temperaturbereichs für eine gegebene Tabelle liegen, sind nach dem erfindungsgemäßen Verfahren berechnet und in der Tabelle dargestellt, aber sie gelten nicht für die Auswahl eines Fluidgemischs zur Verwendung innerhalb des gewählten Temperaturbereichs.

**[0097]** In der nachstehenden Beschreibung sind gewählte Temperaturbereiche angegeben, für die die betreffenden Tabellen gelten. In allen Fällen betragen die Temperaturinkremente 5 K. H ist die molare Enthalpie. Die Werte der thermophysikalischen Eigenschaften sind auf die Werte für R134a bezogen. Jede Tabelle führt die molaren Enthalpiewerte des in Betracht kommenden Fluidgemischs mit Inkrementen von 5° bei einem niedrigen Druck von 1,0 Bar und bei einem hohen Druck von 21,0 Bar auf. Ferner ist für jedes Temperaturinkrement über den Bereich ein Delta H gegeben, wobei Delta H die Differenz zwischen den Enthalpiewerten bei niedrigem Druck und bei hohem Druck bei dieser Temperatur ist.

**[0098]** Beim niedrigen Druck kann man in einer gegebenen Tabelle erkennen, daß der Enthalpiewert bei der niedrigen Temperatur im gewählten Bereich vom Enthalpiewert bei der hohen Temperatur im gewählten Bereich subtrahiert werden kann, um eine Niedrigdruck-Enthalpiedifferenz zu ergeben. Dies ist der y-Wert, der nahe der unteren linken Ecke der Tabelle gezeigt ist. Eine ähnliche Berechnung kann für den hohen Druck durchgeführt werden, wobei sich eine Hochdruck-Enthalpiedifferenz ergibt. Dies ist der x-Wert, der nahe der unteren linken Ecke gezeigt ist. Der kleinere Wert der Niedrigdruck-Enthalpiedifferenz und der Hochdruck-Enthalpiedifferenz ist die theoretische Enthalpiedifferenz, die im gewählten Temperaturbereich möglich ist. Dies ist der nh-Wert, der nahe der unteren linken Ecke gezeigt ist. Die molare Gibbssche freie Energie ist auch dargestellt.

**[0099]** Für jedes Temperaturinkrement ist, wenn der Wert, der in der Spalte Delta H gezeigt ist, durch die theoretische Enthalpiedifferenz nh dividiert wird, das Ergebnis in der Spalte gezeigt, die mit Delta H\* bezeichnet ist. Da die theoretische Enthalpiedifferenz

nh auf einem gewählten Temperaturbereich beruht, beruhen die berechneten Werte von  $\Delta H^*$  auch auf diesem Bereich. Der niedrigste Wert von  $\Delta H^*$  im gewählten Temperaturbereich ist bei jeder gegebenen Tabelle der gleiche wie die theoretische Kühlleistung, geteilt durch die theoretische Wärmeübertragungskapazität, da der molare Durchfluß unter beiden Bedingungen der gleiche ist. Dieser Wert,  $\Delta H^*_{\min}$  ist der Wirkungsgrad für dieses Fluidgemisch über den gewählten Temperaturbereich.

**[0100]** Man wähle beispielsweise einen Temperaturbereich von 120 bis 270 K und ein Druckbereich von 1, 0 bis 21, 0 Bar. Die Tabellen I bis M enthalten  $\Delta H^*$ -Werte für fünf Fluidgemische in diesem gewählten Temperaturbereich. In diesem gewählten Temperaturbereich wird das Fluidgemisch mit dem höchsten Wert von  $\Delta H^*_{\min}$  in der Tabelle J behandelt, und der Wert von  $\Delta H^*_{\min}$  für dieses Fluidgemisch beträgt 0,2180. Dies bedeutet, daß von den in den Tabellen behandelten Fluidgemischen, die berechnete  $\Delta H^*$ -Werte zeigen, die auf dem gewählten Temperaturbereich von 120 bis 270 K beruhen, das optimale Fluidgemisch über diesen gewählten Temperatur- und Druckbereich folgendes ist: 43% Argon, 13% Krypton, 11% R14, 2% R22, 14% R23, 4% R124 und 13% Isopentan. In den Tabellen I bis M haben die Werte der molaren Zusammensetzung von 50% oder mehr einen möglichen Fehler von  $\pm 10\%$ , Werte von 20 bis 49% einen möglichen Fehler von  $\pm 7,5\%$  und Werte unter 20% einen möglichen Fehler von  $\pm 5\%$ .

**[0101]** Man wähle als weiteres Beispiel einen Temperaturbereich von 150 bis 270 K. Die Tabellen A bis H enthalten  $\Delta h^*$ -Werte, die für sieben Fluidgemische auf der Grundlage dieses Bereichs berechnet sind. Für die Fluidgemische, die in den Tabellen behandelt werden, die berechnete  $\Delta H^*$ -Werte über diesen Bereich zeigen, wird das Fluidgemisch mit dem höchsten Wert von  $\Delta H^*_{\min}$  in der Tabelle E behandelt, und der Werte von  $\Delta H^*_{\min}$  für dieses Fluidgemisch beträgt 0,3756. Dies bedeutet, daß von den in diesen Tabellen behandelten Fluidgemischen über diesen gewählten Temperatur- und Druckbereich das optimale Fluidgemisch folgendes ist: 7% R22, 7% R23, 20% R142b, 55% Krypton und 11%  $\text{NF}_3$ . In den Tabellen A bis H haben die Werte der molaren Zusammensetzung einen möglichen Fehler von  $\pm 10\%$ .

**[0102]** Der Nutzen dieser Tabellen zeigt sich weiterhin dadurch, daß ein Mittel zur Beseitigung der Toxizität oder der Entflammbarkeit im gewählten Gasgemisch gezeigt wird. Wenn man bedenkt, daß  $\text{NF}_3$  für Menschen potentiell toxisch ist, kann beispielsweise das Fluidgemisch, das im letzten Beispiel verwendet wird, für die Verwendung in einem Mischgaskälteerzeugungssystem, das in einem Herzkatheder verwendet wird, nicht erwünscht sein. Ein Fluidgemisch,

das ähnlich ist, aber das diese Fluidkomponente nicht enthält, wird in Tabelle C behandelt. Man kann erkennen, daß der Wert von  $\Delta H^*_{\min}$  für dieses Fluidgemisch über den gleichen gewählten Temperaturbereich 0,3580 ist. Dies bedeutet, daß von den in diesen Tabellen behandelten Fluidgemischen über diesen gewählten Temperatur- und Druckbereich das optimale nichttoxische Fluidgemisch folgendes ist: 7,5% R22, 7,5% R23, 20% R142b und 65% Krypton. Die Toxizität oder Entflammbarkeit kann daher durch eine geringe Änderung des gewählten Gasgemischs beseitigt werden.

**[0103]** Man kann erkennen, daß bei bestimmten, in den Tabellen behandelten primären Fluidgemischen, der Minimalwert von  $\Delta H^*$  im oberen Teil des gewählten Temperaturbereichs auftritt. Für ein solches Fluidgemisch kann die Vorkühlung des primären Fluidgemischs mit einem sekundären Kälteerzeugungssystem das obere Ende des Temperaturbereichs auf ein Niveau herabsetzen, das zu einem höheren Wert von  $\Delta H^*_{\min}$  führt, wenn das Primärgemisch durch das primäre Expansionselement strömt.

**[0104]** Man beachte beispielweise die Möglichkeit der Verwendung eines Vorkühlers, um die Temperatur des Fluidgemischs vor der Einleitung des Gemischs in den Katheter von 270 auf 260 K herabzusetzen. Das in Tabelle B behandelten Gemisch zeigt eine proportionale Erhöhung des  $\Delta H^*_{\min}$  von über 40%, was fast das Doppelte der proportionalen Erhöhung von über 20% ist, die sich bei dem Gemisch ergeben würde, das in Tabelle D behandelt wird. Daher könnte in Systemen, wo es möglich ist, das Fluidgemisch vor Einleitung in den Mikrominiatur-Wärmetauscher vorzukühlen und wo es erwünscht ist, diese Vorkühlung zu verwenden, um die Leistungsfähigkeit des Systems zu steuern, das Gemisch in Tabelle B vorteilhafter sein.

**[0105]** Man beachte, daß Gase mit gleichen Siedepunkten in einem gewählten Fluidgemisch miteinander austauschbar sind. Beispielsweise kann R124 anstelle von R142b oder Isobutan verwendet werden, und Stickstoff kann anstelle von Argon verwendet werden. Der Ersatz kann bei einem gleichen oder geringfügig anderen Prozentsatz mit nur geringen Änderungen von  $\Delta H^*_{\min}$  erfolgen. Ein gutes Beispiel dafür ergibt sich, wenn man die Tabellen C und H betrachtet. Das Gemisch in Tabelle C ist 7,5% R22, 7,5% R23, 20% R142b und 65% Krypton mit einem  $\Delta H^*_{\min}$  von 0,3580. In dem in Tabelle H behandelten Gemisch ist R32 anstelle von R22 und R124 anstelle von R142b verwendet worden, um ein umweltfreundlicheres Gemisch herzustellen, aber  $\Delta H^*_{\min}$  ist auf 0,3491 gesunken, ein Abfall von nur 2%.

**[0106]** [Fig. 33](#) ist eine schematische Darstellung des erfindungsgemäßen Kälteerzeugungssystems mit zwei geschlossenen Kreisläufen **10**, das das Vor-

kühlkonzept einbezieht. Der Primärkreislauf **100** gleicht unter bestimmten Aspekten dem oben beschriebenen Primärkreislauf in dem System ohne Vorkühlung. Der Sekundärkreislauf **200** ist zum Zwecke der Maximierung des Vorkühleffekts hinzugefügt worden. Der Primärkreislauf **100** besteht aus einem Hochdruckdurchgang **110** und einem Niederdruckdurchgang **120**. Der Primärkreislaufverdichter **130** verdichtet das Primärgasgemisch auf einen gewählten Druck und eine gewählte Temperatur, z. B. 420 psia und 300 K. Das Hochdruck-Primärgasgemisch strömt dann aus dem Auslaß **132** des Primärverdichters **130** durch einen ersten Primärwärmetauscher **140**, der ein im Handgriff einer Kryosonde angeordneter Miniatur-Wärmetauscher sein kann. Insbesondere strömt das Hochdruck-Primärgasgemisch durch den Hochdruckdurchgang **142** des ersten Primärwärmetauschers **140**, wo es auf eine niedrigere Temperatur, z. B. 280 K, abgekühlt wird. In Abhängigkeit von den erforderlichen Temperaturen und der erforderlichen Kühlleistung erfordern bestimmte Anwendungen den ersten Primärwärmetauscher **140** möglicherweise nicht.

[0107] Das Hochdruck-Gasgemisch strömt dann durch den Primär/Sekundär-Wärmetauscher **240**, insbesondere durch den Hochdruck-Primärdurchgang **170** des Primär/Sekundär-Wärmetauschers **240**, wo es weiter auf eine niedrigere Temperatur, z. B. 220 K, abgekühlt wird. Das Hochdruck-Primärgasgemisch strömt dann durch einen zweiten Primärwärmetauscher **160**, insbesondere durch den Hochdruckdurchgang **162**, wo es noch weiter auf beispielsweise 160 K abgekühlt wird. Dieser zweite Primärwärmetauscher kann verglichen werden mit den laminieren Wärmetauschern, die oben in Verbindung mit den Systemen ohne Vorkühlung beschrieben sind. In Abhängigkeit von den erforderlichen Temperaturen und von der erforderlichen Kühlleistung erfordern bestimmte Anwendungen den zweiten Primärwärmetauscher **160** möglicherweise nicht.

[0108] Das Gasgemisch strömt dann in das primäre Joule-Thomson-Expansionselement **150**. Nach einer isenthalpischen Expansion im Primärexpansionselement **150** zu einer Temperatur, z. B. 130 K, kühlt das expandierte Niederdruck-Gasgemisch das Zielgewebe T.

[0109] Dann strömt das Niederdruck-Primärgasgemisch zurück durch den Niederdruckdurchgang **164** im zweiten Primärwärmetauscher **160**, wo es auf 220 K erwärmt wird, und durch den Niederdruckdurchgang **144** im ersten Primärwärmetauscher **140**, wo es auf 300 K erwärmt wird. Das Niederdruck-Gasgemisch strömt dann in den Einlaß **134** des Primärverdichters **130** zurück.

[0110] Der Sekundärkreislauf **200** besteht aus einem Hochdruckdurchgang **210** und einem Nieder-

druckdurchgang **220**. Der Sekundärkreislaufverdichter **230** verdichtet das Sekundärkältemittel auf einen Druck, der relativ höher sein kann als der Druck, der im Primärsystem vorliegt, das das Sekundärsystem nicht in die Kanüle der Sonde reicht. Das Hochdruck-Sekundärkältemittel strömt dann aus dem Auslaß **232** des Sekundärverdichters **230** durch den Primär/Sekundär-Wärmetauscher **240**, der auch ein im Handgriff der Kryosonde angeordneter Miniatur-Wärmetauscher sein kann. Insbesondere strömt das Hochdruck-Sekundärkältemittel durch den sekundären Hochdruckdurchgang **242** des Primär/Sekundär-Wärmetauschers **240**, wo es auf eine niedrigere Temperatur abgekühlt wird.

[0111] Das Hochdruck-Sekundärkältemittel strömt dann durch ein sekundäres Joule-Thomson-Expansionselement **250**. Nach einer isenthalpischen Expansion im Sekundärexpansionselement **250** strömt das expandierte Niederdruck-Sekundärkältemittel zurück durch den Niederdruckdurchgang **244** im Primär/Sekundär-Wärmetauscher **240**. Der Niederdruckdurchgang **244** ist so angeordnet, daß er den Hochdruck-Primärdurchgang **170** gegen den Hochdruck-Sekundärdurchgang **242** isoliert. Dadurch wird sichergestellt, daß die Wärme von den Hochdruckdurchgängen zum Niederdruckdurchgang fließt. Das Niederdruck-Sekundärkältemittel strömt dann in den Einlaß **234** des Sekundärverdichters **230** zurück.

[0112] [Fig. 34](#) zeigt einen Abschnitt eines Kälteerzeugungssystems mit zwei Kreisläufen, der im Handgriff einer Kryosonde angeordnet sein kann. Der Primärkreislauf **100** tritt in den Handgriff als koaxiales Doppellumenrohr ein, wobei der Hochdruckweg **110** im inneren Lumen und der Niederdruckweg **120** im äußeren Lumen ist. Der erste Primärwärmetauscher **140** ist auch als Koaxialrohrschlange aufgebaut, wobei der Hochdruckdurchgang **142** im inneren Lumen und der Niederdruckdurchgang **144** im äußeren Lumen ist. Die Einzelheiten zum koaxialen Doppellumenrohr sind in [Fig. 36](#) dargestellt. Sowohl der Hochdruck- als auch der Niederdruckweg **110**, **120** führen in ein erstes Teilungs-T-Stück **180**. Im Teilungs-T-Stück **180** wird der Hochdruckweg **110** vom Niederdruckweg **120** getrennt. Vom ersten T-Stück **180** verläuft der Hochdruckweg **110** zum Hochdruck-Primärdurchgang **170** im Primär/Sekundär-Wärmetauscher **240**.

[0113] Der Primär/Sekundär-Wärmetauscher **240** ist als Mehrfachlumenrohrschlange aufgebaut, wie in [Fig. 37](#) gezeigt. Der Hochdruck- und der Niederdruckweg **210**, **220** führen durch ein koaxiales Doppellumenrohr. Der Hochdruck-Sekundärweg **210** führt durch das Innenlumen, der Hochdruck-Sekundärdurchgang **242** und der Niederdruck-Sekundärdurchgang **220** führen durch den Niederdruck-Sekundärdurchgang **244** im Außenlumen. Mit der Außenseite des Niederdruck-Sekundärdurchgangs **244**

ist der Hochdruck-Primärdurchgang **142** verlötet. Der Hochdruck-Primärdurchgang **142** kann mehrere Innenlumen **143** haben, wobei das Hochdruck-Primärgasgemisch durch alle Innenlumen **143** und durch die Zwischenräume zwischen den Innenlumen **143** und um diese herum strömt. Diese Anordnung fördert eine verbesserte Wärmeübertragung zur Lötnaht und zum Niederdruck-Sekundärdurchgang **244**.

[0114] Nach dem Verlassen des Primär/Sekundär-Wärmetauschers **240** führt der Hochdruck-Primärweg **110** durch einen Hochdruck-Primärverbinder **192**, der mit einer Kanüle der Kryosonde und mit dem Primärexpansionselement **150** in der kalten Spitze verbunden werden kann. Nach der Expansion im Expansionselement **150** strömt das Niederdruck-Gasgemisch zurück durch einen Niederdruck-Primärverbinder **194** in das T-Stück **180**. Im T-Stück **180** vereinigt sich der Niederdruck-Primärdurchgang **144** mit dem Hochdruck-Primärdurchgang **142** koaxial, um zum Primärverdichter **130** zurückzuströmen.

[0115] Der Sekundärkreislauf **200** tritt vom Sekundärverdichter **230** kommend auch in den Kryosondenhandgriff ein, und zwar als koaxiales Doppellumenrohr, wobei der Hochdruckweg **210** im Innenlumen und der Niederdruckweg **220** im Außenlumen ist. Der Hochdruck- und der Niederdruckweg **210**, **220** führen durch den Primär/Sekundär-Wärmetauscher **240**, wie oben beschrieben, und sind mit einem zweiten Teilungs-T-Stück **280** verbunden. Im zweiten T-Stück **280** trennt sich der Hochdruck-Sekundärweg **210** vom Niederdruck-Sekundärweg **220** und führt durch das Sekundärexpansionselement **250**. Nach der Expansion im Sekundärexpansionselement **250** strömt das Niederdruck-Sekundärkältemittel in den Niederdruck-Sekundärweg **220**, der sich mit dem Hochdruck-Sekundärweg **210** im zweiten T-Stück **280** vereint.

[0116] [Fig. 35](#) zeigt, wie die erfindungsgemäße Vorrichtung in einer starren Kryosonde P mit einem Handgriff H angeordnet sein könnte. Das primäre und das sekundäre geschlossene Kreislaufsystem **100**, **200** treten in das Ende des Handgriffs H ein. Das Primärgasgemisch strömt durch den ersten Primärwärmetauscher **140**, während der erste Primärwärmetauscher **140** vom Sekundärkältemittel umgangen wird. Sowohl das Primärgasgemisch als auch das Sekundärkältemittel strömen durch den Primär/Sekundär-Wärmetauscher **240**, wie bereits beschrieben. Das Sekundärkältemittel wird dann im zweiten Expansionselement **250** isenthalpisch expandiert und strömt durch den Primär/Sekundär-Wärmetauscher **240** zurück. Das Sekundärkältemittel tritt dann aus dem Handgriff H aus, um in den Sekundärverdichter **230** zurückzuströmen. Das Primärgasgemisch strömt durch die Verbinder **192**, **194** zur kalten Spitze CT. In der kalten Spitze CT strömt das Hochdruck-Primärgasgemisch durch den Mikrominia-

tur-Primärwärmetauscher **160** und dann durch das Primärexpansionselement **150**. Der Mikrominiatur-Wärmetauscher **160** ist als Hochdruckrohrschlange dargestellt, wobei das Niederdruck-Primärgasgemisch durch die Rohrschlange zurückströmt. Nach Expansion und Abkühlung strömt das Niederdruck-Primärgasgemisch zurück durch den Mikrominiatur-Primärwärmetauscher **160** und den ersten Primärwärmetauscher **140** zurück, bevor es den Handgriff H verläßt, um in den Primärverdichter **130** zurückzuströmen.

[0117] Obwohl die vorliegende Erfindung, die hier ausführlich dargestellt und offenbart ist, vollkommen in der Lage ist, die oben ausgeführten Aufgaben zu erfüllen, versteht es sich, daß diese Offenbarung in bezug auf die gegenwärtig bevorzugten Ausführungsformen der Erfindung lediglich darstellenden Charakter hat und daß keine Einschränkungen beabsichtigt sind, außer diejenigen, die in den beigefügten Ansprüchen beschrieben sind.

### Patentansprüche

1. Miniatur-Mischgaskälterzeugungssystem, aufweisend:  
einen geschlossenen Primärkreislauf (**100**) zum Umwälzen einer Gasmischung, mit einem primären Hochdruckströmungspfad (**110**) und einem primären Niederdruckströmungspfad (**120**), wobei der Primärkreislauf einen primären Verdichter (**130**) und ein primäres Expansionselement (**150**) zum isenthalpischen Expandieren der Gasmischung von dem primären Hochdruckströmungspfad (**110**) in den primären Niederdruckströmungspfad (**120**) aufweist, und einen geschlossenen Sekundärkreislauf (**200**) zum Umwälzen eines Kältemittels, mit einem sekundären Hochdruckströmungspfad (**210**) und einem sekundären Niederdruckströmungspfad (**220**), wobei der Sekundärkreislauf einen sekundären Verdichter (**230**), einen Primär/Sekundär-Wärmetauscher (**240**) und ein sekundäres Expansionselement (**250**) zum isenthalpischen Expandieren des Kältemittels von dem sekundären Hochdruckströmungspfad (**210**) in Strömungsrichtung hinter dem Primär/Sekundär-Wärmetauscher (**240**) in den sekundären Niederdruckströmungspfad (**220**) in Strömungsrichtung vor dem Primär/Sekundär-Wärmetauscher (**240**) aufweist, wobei der primäre Hochdruckströmungspfad (**110**), der sekundäre Hochdruckströmungspfad (**210**) und der sekundäre Niederdruckströmungspfad (**220**) in Wärmetauschbeziehung durch den Primär/Sekundär-Wärmetauscher (**240**) verlaufen, und wobei der primäre Niederdruckströmungspfad (**120**) den Primär/Sekundär-Wärmetauscher (**240**) umgeht.

2. Miniatur-Mischgaskälterzeugungssystem nach Anspruch 1, ferner aufweisend einen primären Wärmetauscher (**140**) mit primären Hochdruck- und Niederdruckströmungspfaden zwischen dem primä-



ren Verdichter (**130**) und dem Primär/Sekundär-Wärmetauscher (**240**).

3. Miniatur-Mischgaskälterzeugungssystem nach Anspruch 2, wobei der primäre Wärmetauscher (**140**) eine koaxiale Doppellumenrohrschlange umfaßt, wobei der primäre Hochdruckströmungspfad mit dem inneren Lumen verbunden ist und wobei der primäre Niederdruckströmungspfad mit dem äußeren Lumen verbunden ist.

4. Miniatur-Mischgaskälterzeugungssystem nach Anspruch 1, ferner aufweisend einen primären Wärmetauscher (**160**) mit primären Hochdruck- und Niederdruckströmungspfaden zwischen dem Primär/Sekundär-Wärmetauscher (**240**) und dem primären Expansionselement (**150**).

5. Miniatur-Mischgaskälterzeugungssystem nach Anspruch 1, wobei der primäre Hochdruckströmungspfad in dem Primär/Sekundär-Wärmetauscher (**240**) von dem sekundären Hochdruckströmungspfad (**210**) durch den sekundären Niederdruckströmungspfad (**220**) isoliert ist.

6. Miniatur-Mischgaskälterzeugungssystem nach Anspruch 5, wobei die sekundären Hochdruck- und Niederdruckströmungspfade (**210**, **220**) in dem Primär/Sekundär-Wärmetauscher (**240**) als erstes Rohr mit zwei koaxialen Lumina ausgebildet sind, wobei das innere Lumen den sekundären Hochdruckströmungspfad (**210**) bildet und das äußere Lumen den sekundären Niederdruckströmungspfad (**220**) bildet, und der primäre Hochdruckströmungspfad (**110**) in dem Primär/Sekundär-Wärmetauscher (**240**) ein zweites Rohr umfaßt, das an einer Außenwand des ersten Rohrs in paralleler Anordnung angebracht ist.

7. Miniatur-Mischgaskälterzeugungssystem nach Anspruch 1, ferner aufweisend einen primären Wärmetauscher mit primären Hochdruck- und Niederdruckströmungspfaden, wobei der primäre Wärmetauscher so angeschlossen ist, daß das primäre Expansionselement die Gasmischung von dem primären Hochdruckströmungspfad in Strömungsrichtung hinter dem primären Wärmetauscher in den primären Niederdruckströmungspfad in Strömungsrichtung vor dem primären Wärmetauscher expandiert.

8. Miniatur-Mischgaskälterzeugungssystem nach Anspruch 7, ferner aufweisend einen zweiten primären Wärmetauscher mit primären Hochdruck- und Niederdruckströmungspfaden, wobei der primäre Wärmetauscher zwischen den ersten primären Wärmetauscher und dem primären Expansionselement angeschlossen ist.

9. Miniatur-Mischgaskälterzeugungssystem nach Anspruch 7, ferner aufweisend:

eine Sonde (**18**) mit einem proximalen Handgriff und einer distalen kalten Spitze, und einen Wärmeübertragungskörper in der kalten Spitze, wobei der Wärmeübertragungskörper eine innere Oberfläche, die der expandierten Gasmischung ausgesetzt ist, und eine äußere Oberfläche aufweist, die der Umgebung ausgesetzt ist, um Wärme von der Umgebung in die Gasmischung zu übertragen; wobei der primäre und der sekundäre Verdichter (**130**, **230**) mit der Sonde (**18**) verbunden sind; das sekundäre Expansionselement (**250**) in dem Handgriff installiert ist; das primäre Expansionselement (**150**) miniaturisiert und angrenzend an die kalte Spitze installiert ist; der primäre Wärmetauscher (**140**) und der Primär/Sekundär-Wärmetauscher (**240**) in dem Handgriff installiert sind; und der primäre Niederdruckströmungspfad den Primär/Sekundär-Wärmetauscher umgeht.

10. Miniatur-Mischgaskälterzeugungssystem nach Anspruch 9, wobei der primäre Wärmetauscher ein Doppellumenrohr aufweist, wobei der Hochdruckströmungspfad das erste Lumen aufweist und der Niederdruckströmungspfad das zweite Lumen aufweist.

11. Miniatur-Mischgaskälterzeugungssystem nach Anspruch 10, wobei das erste und das zweite Lumen koaxial sind.

12. Miniatur-Mischgaskälterzeugungssystem nach Anspruch 11, wobei das koaxiale Doppellumenrohr eine Spirale bildet.

13. Miniatur-Mischgaskälterzeugungssystem nach Anspruch 9, wobei ein Hochdruckabschnitt des Primärkreislaufs ein Rohr mit mehreren Hochdrucklumina aufweist.

14. Miniatur-Mischgaskälterzeugungssystem nach Anspruch 13, wobei das Rohr aufweist: ein äußeres Lumen; und mehrere innere Lumina innerhalb des äußeren Lumens, wobei jedes der Lumina eine Wand hat, die in Kontakt mit einer Wand zumindest eines anderen Lumens ist.

15. Miniatur-Mischgaskälterzeugungssystem nach Anspruch 14, wobei jedes innere Lumen eine Wand hat, die im Kontakt mit einer Wand zumindest eines anderen inneren Lumens steht, und eine Wand hat, die in Kontakt mit einer Wand des äußeren Lumens steht.

16. Miniatur-Mischgaskälterzeugungssystem nach Anspruch 7, ferner aufweisend: ein Doppellumen-Primärkreislaufrohr, wobei das Primärkreislaufrohr ein Hochdrucklumen, das mit einem Auslaß des primären Verdichters verbunden ist, und

ein Niederdrucklumen aufweist, das mit einem Einlaß des primären Verdichters verbunden ist, ein Doppellumen-Sekundärkreislaufrohr, wobei das Sekundärkreislaufrohr ein Hochdrucklumen, das mit einem Auslaß des sekundären Verdichters verbunden ist, und ein Niederdrucklumen aufweist, das mit einem Einlaß des sekundären Verdichters verbunden ist, wobei

der Primärwärmetauscher-Hochdruckströmungspfad mit dem Hochdrucklumen des Primärkreislaufrohres verbunden ist und der Primärwärmetauscher-Niederdruckströmungspfad mit dem Niederdrucklumen des Primärkreislaufrohres verbunden ist; der Primär/Sekundär-Wärmetauscher-Sekundärhochdruckströmungspfad mit dem Hochdrucklumen des Sekundärkreislaufrohres verbunden ist und der Primär/Sekundär-Wärmetauscher-Sekundärniederdruckströmungspfad mit dem Niederdrucklumen des Sekundärkreislaufrohres verbunden ist; der primäre Verdichter geeignet ist, eine Gasmischung auf einen Druck von annähernd 420 psia zu verdichten; und das primäre Expansionselement geeignet ist, die Gasmischung auf eine Temperatur von nicht mehr als 183 K zu expandieren.

17. Verfahren zum Kühlen einer distalen kalten Spitze einer Sonde, mit den Schritten:  
Bereitstellen eines geschlossenen Primärkreislaufs zum Umwälzen einer Gasmischung, wobei der Primärkreislauf (100) zumindest einen primären Wärmetauscher und ein primäres Expansionselement (150) distal von dem primären Wärmetauscher aufweist;  
Bereitstellen eines geschlossenen Sekundärkreislaufs (200), wobei der Sekundärkreislauf einen Primär/Sekundär-Wärmetauscher (240) und ein sekundäres Expansionselement (250) distal von dem Primär/Sekundär-Wärmetauscher (240) umfaßt;  
Verdichten eines Kältemittels in dem Sekundärkreislauf;  
Abkühlen des Kältemittels in dem Primär/Sekundär-Wärmetauscher;  
isenthalpisches Expandieren des Kältemittels auf eine niedrigere Temperatur mit dem sekundären Expansionselement;  
Erwärmen des expandierten Kältemittels in dem Primär/Sekundär-Wärmetauscher;  
Verdichten einer Gasmischung in dem Primärkreislauf;  
Abkühlen der verdichteten Gasmischung in dem primären Wärmetauscher;  
Abkühlen der verdichteten Gasmischung in dem Primär/Sekundär-Wärmetauscher;  
isenthalpisches Expandieren der Gasmischung mit dem primären Expansionselement, um die Gasmischung noch weiter abzukühlen, und  
Zuführen der expandierten Gasmischung zu der kalten Spitze, um die Temperatur der kalten Spitze abzusenkten.

18. Verfahren nach Anspruch 17, ferner mit dem Schritt: Verfestigen flüssiger Fremdstoffe der Gasmischung in dem Primär/Sekundär-Wärmetauscher, wodurch die Fremdstoffe aus der Gasmischung entfernt werden, bevor die Gasmischung durch das primäre Expansionselement hindurchtritt.

19. Verfahren nach Anspruch 17, wobei das verdichtete Kältemittel in einer sekundären Hochdruckseite des Primär/Sekundär-Wärmetauschers abgekühlt wird; das expandierte Kältemittel in einer sekundären Niederdruckseite des Primär/Sekundär-Wärmetauschers erhitzt wird; die verdichtete Gasmischung in einer Hochdruckseite des primären Wärmetauschers abgekühlt wird; die verdichtete Gasmischung in einer primären Hochdruckseite des Primär/Sekundär-Wärmetauschers abgekühlt wird; und ferner mit dem Schritt: Erwärmen der expandierten Gasmischung in einer Niederdruckseite des primären Wärmetauschers.

20. Verfahren nach Anspruch 17, ferner mit den Schritten:  
Bereitstellen eines distalen primären Wärmetauschers zwischen dem Primär/Sekundär-Wärmetauscher und dem primären Expansionselement, noch weiteres Abkühlen der verdichteten Gasmischung in einer Hochdruckseite des distalen primären Wärmetauschers und  
Erwärmen der expandierten Gasmischung in einer Niederdruckseite des distalen primären Wärmetauschers, bevor die expandierte Gasmischung durch die Niederdruckseite des ersten primären Wärmetauschers hindurchtritt.

21. Verfahren nach Anspruch 17, ferner mit den Schritten:  
Bereitstellen einer Gasmischung, die auf eine Temperatur unterhalb von 183 K ausgehend von einem Druck von nicht mehr als 420 psia isenthalpisch expandierbar ist;  
Bereitstellen eines metallischen Wärmeübertragungselements in der kalten Spitze;  
Anordnen des Wärmeübertragungselements in Kontakt mit einem abzukühlenden, entfernt angeordneten Körper;  
Verdichten der Gasmischung auf nicht mehr als 420 psia;  
isenthalpisches Expandieren der Gasmischung auf unter 183 K;  
Absorbieren von Wärme von dem Wärmeübertragungselement durch Kontakt mit der expandierten Gasmischung, um das Wärmeübertragungselement auf eine Temperatur unter 180 K abzukühlen; und  
Absorbieren von Wärme von dem abzukühlenden Körper durch Kontakt mit dem Wärmeübertragungselement.

Es folgen 27 Blatt Zeichnungen

## Anhängende Zeichnungen

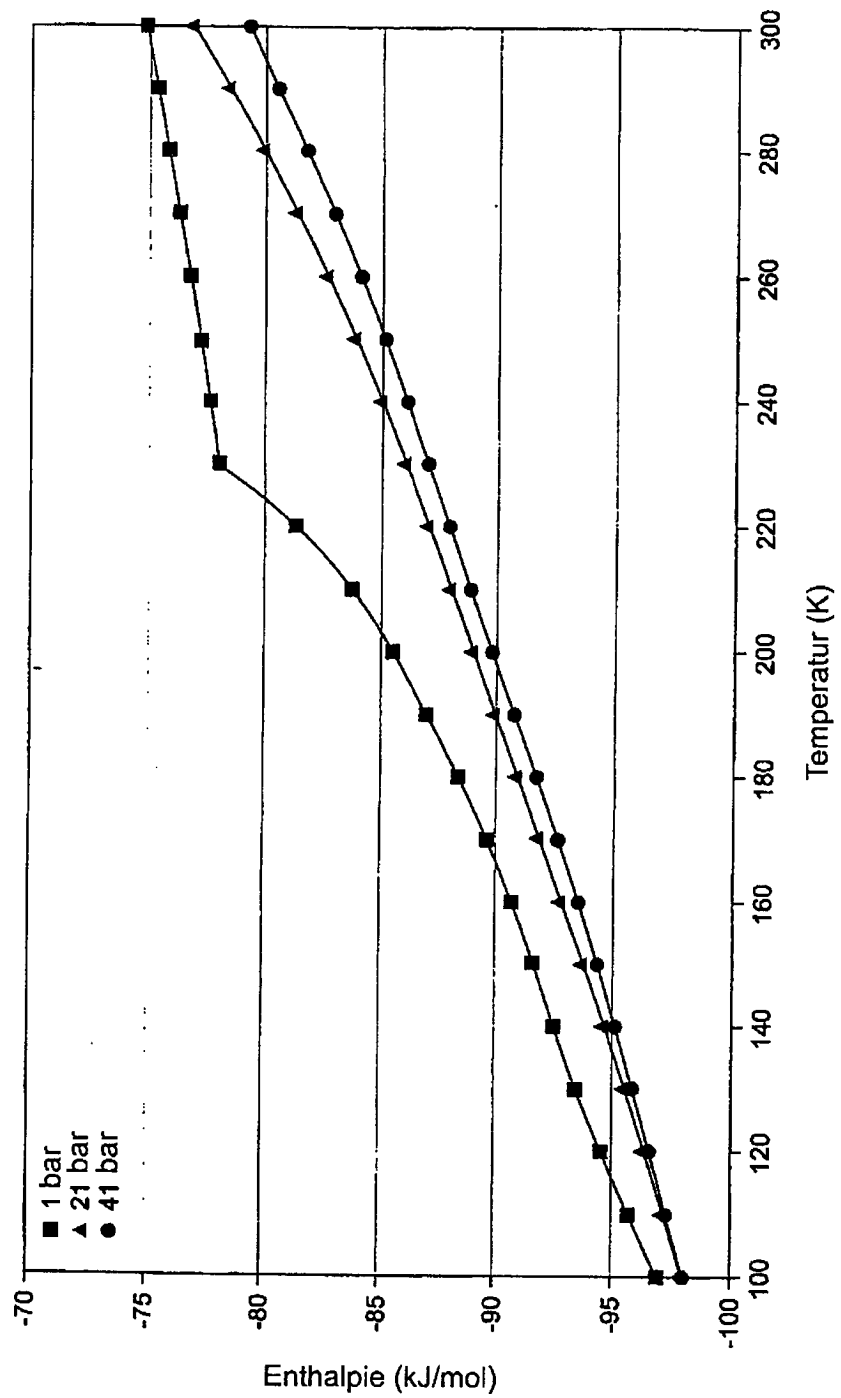


Fig. 1



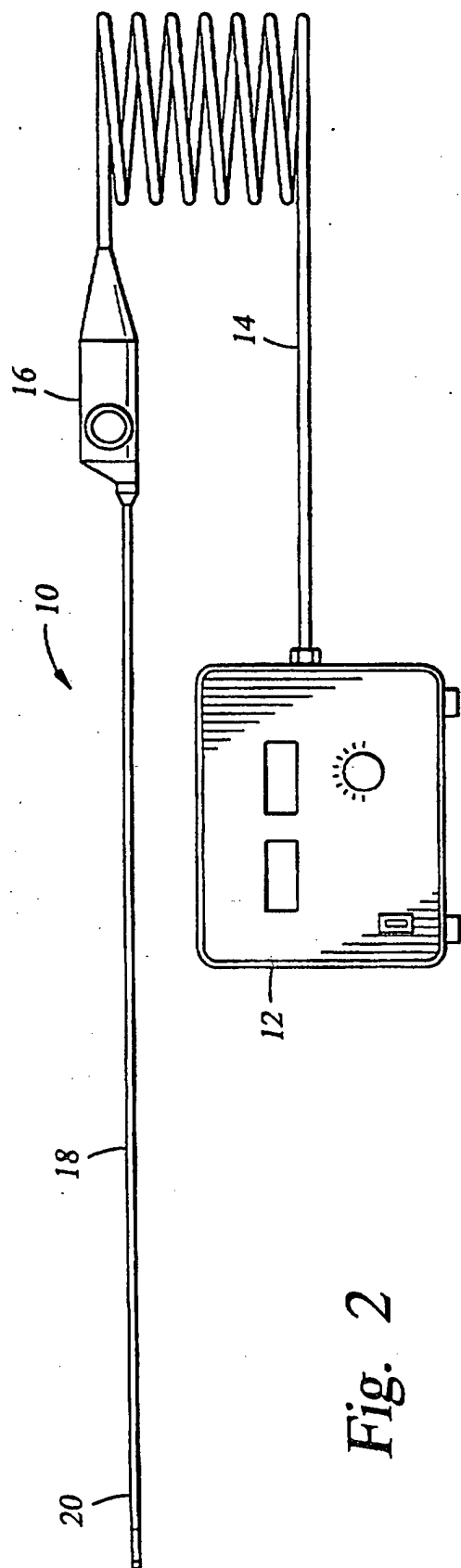


Fig. 2

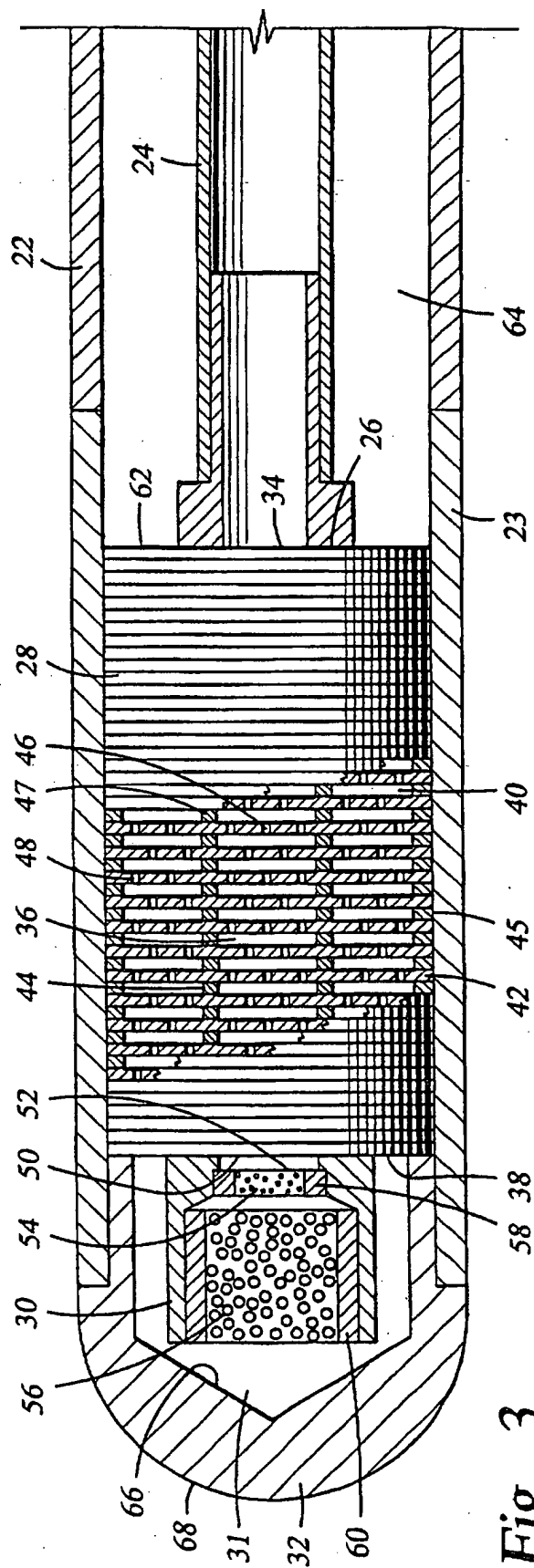


Fig. 3

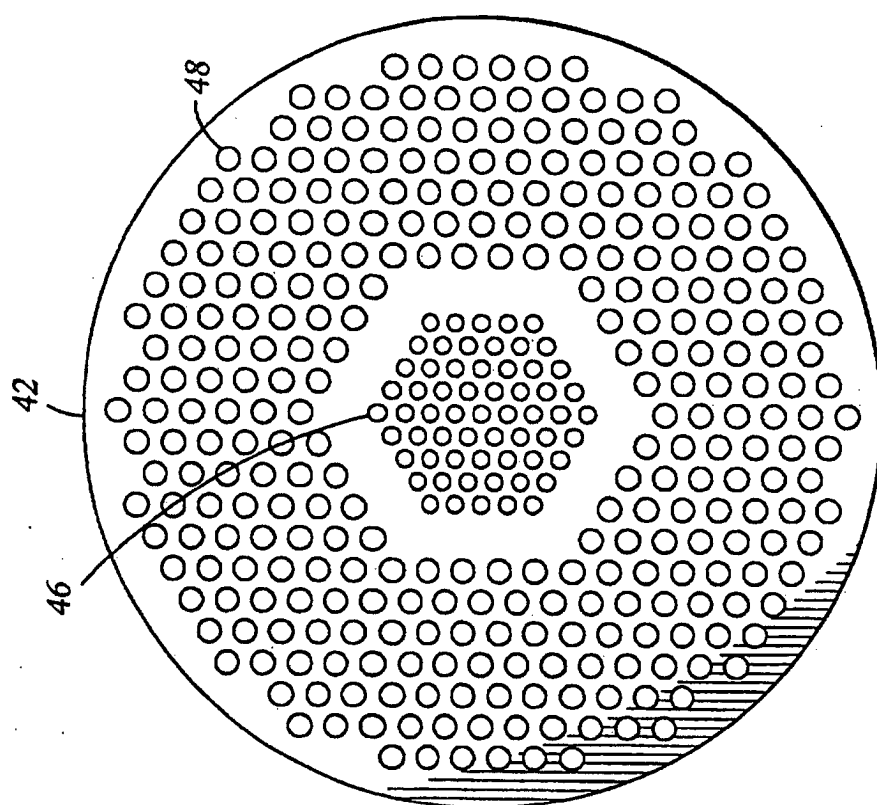


Fig. 5

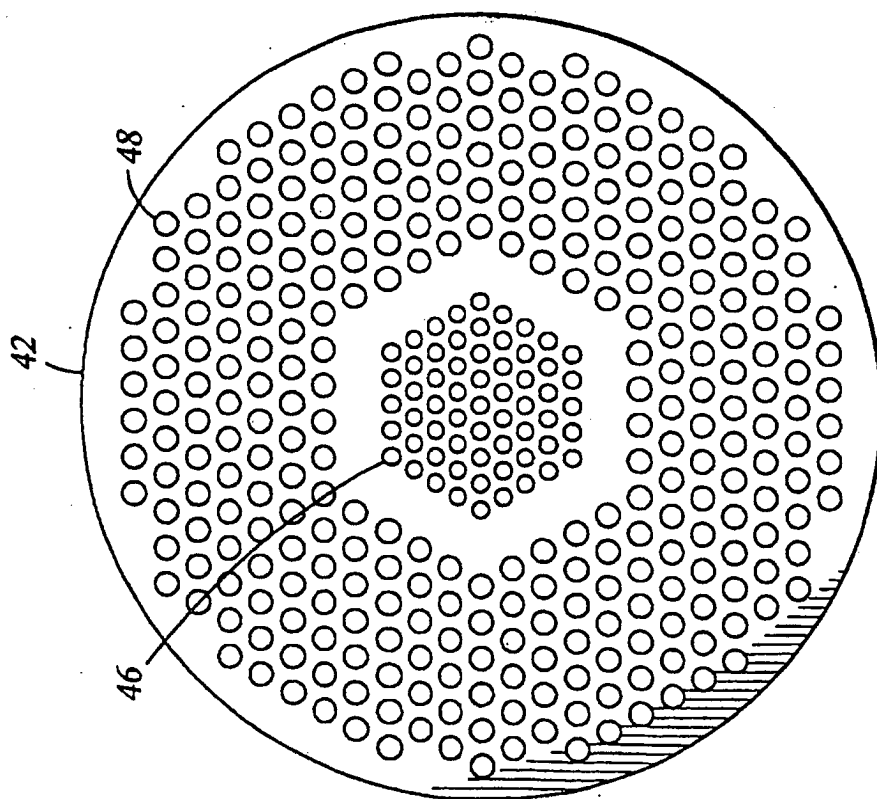


Fig. 4

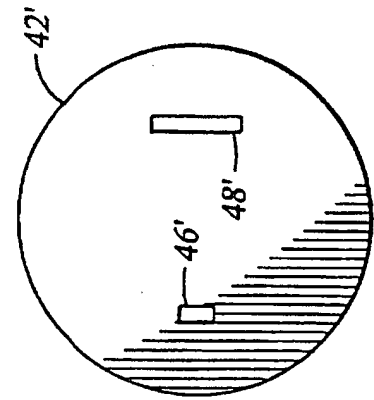


Fig. 9

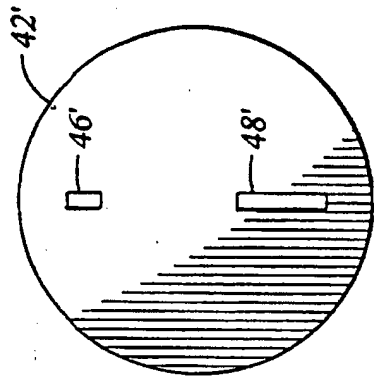


Fig. 8

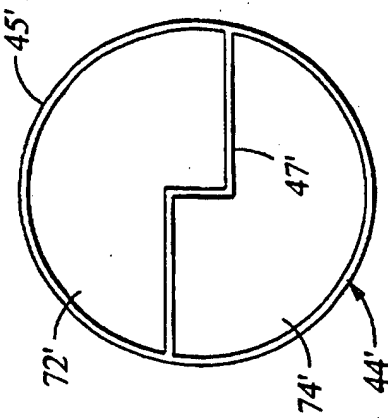


Fig. 7

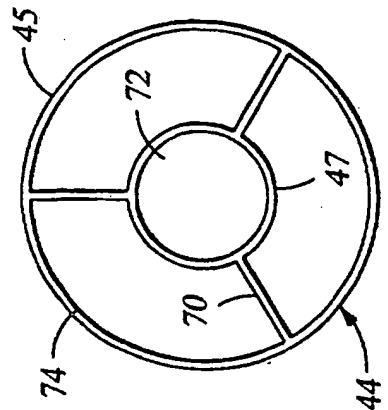


Fig. 6

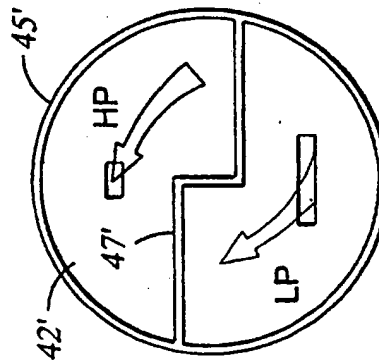
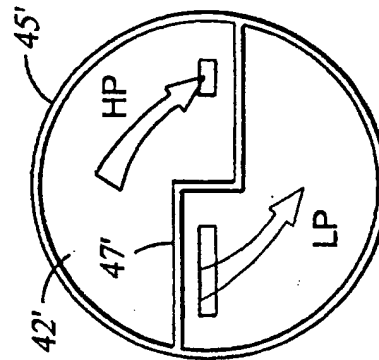
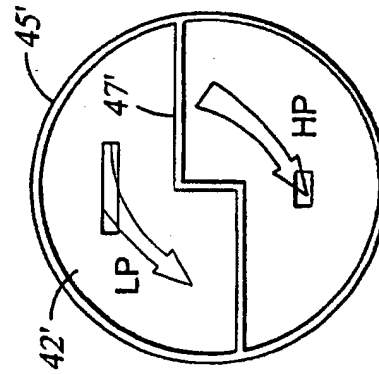


Fig. 10

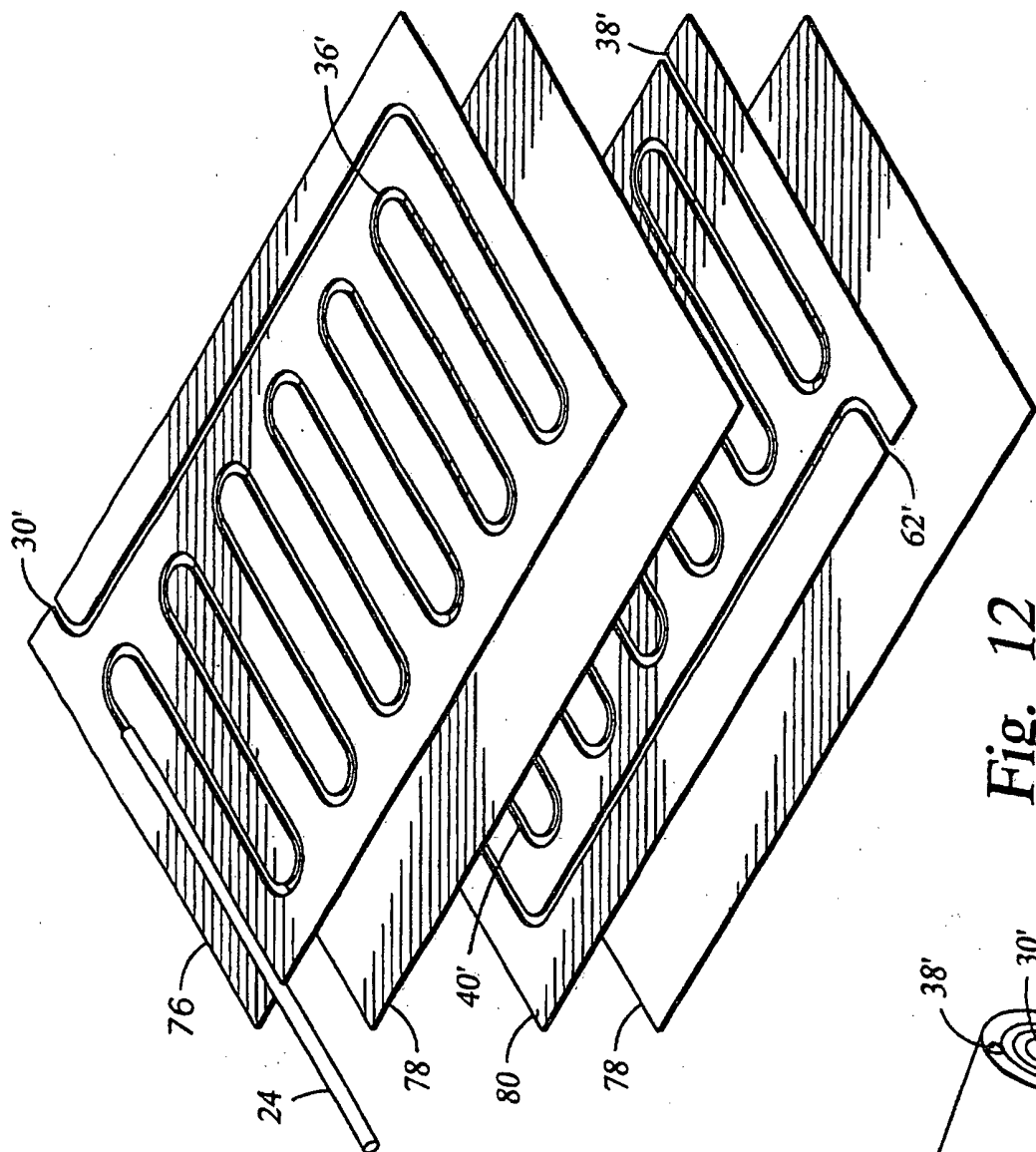


Fig. 12

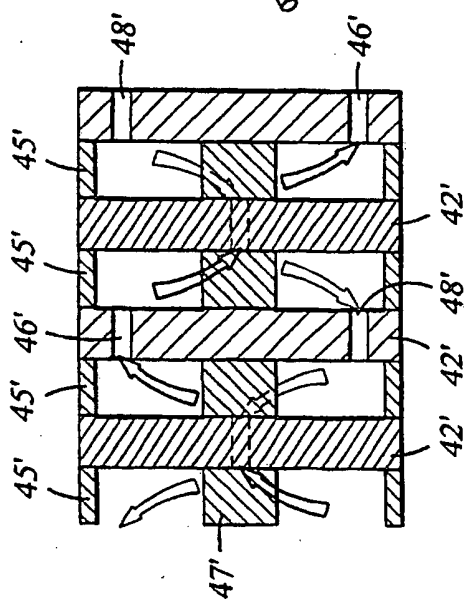


Fig. 11

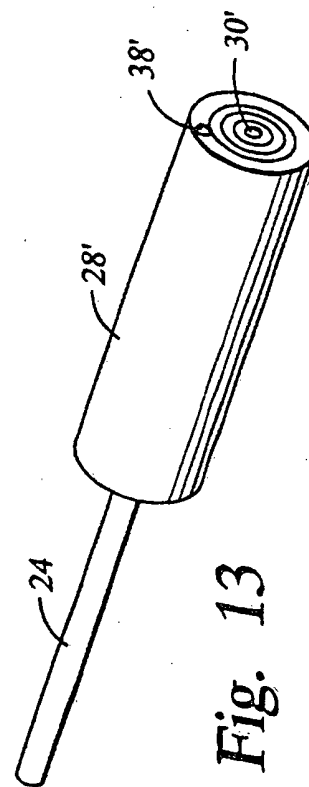


Fig. 13

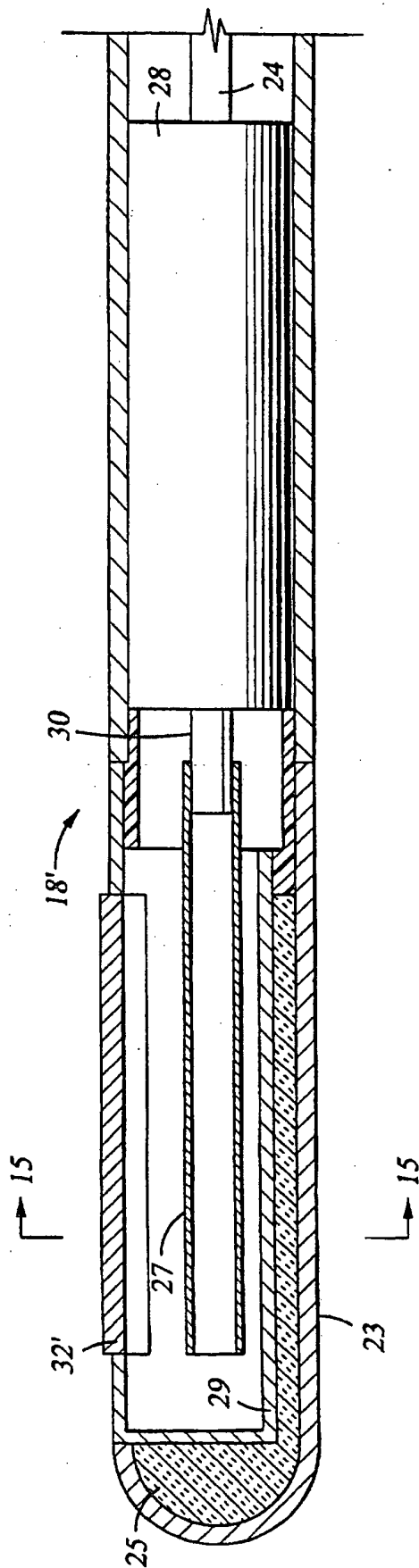


Fig. 14

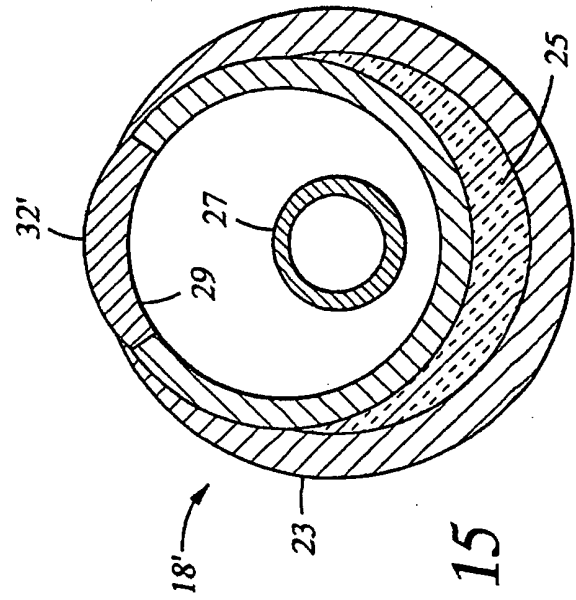


Fig. 15

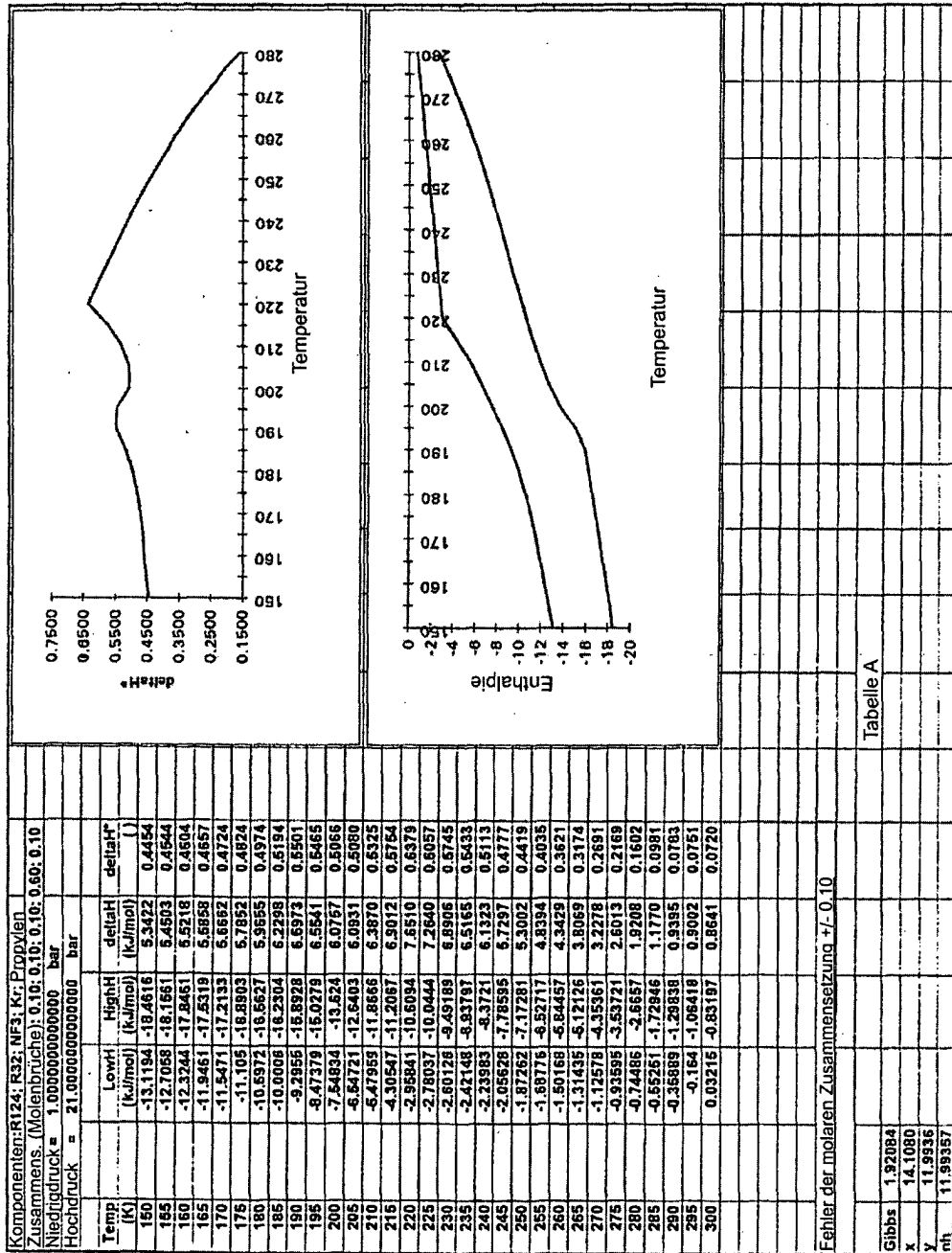


Fig. 16

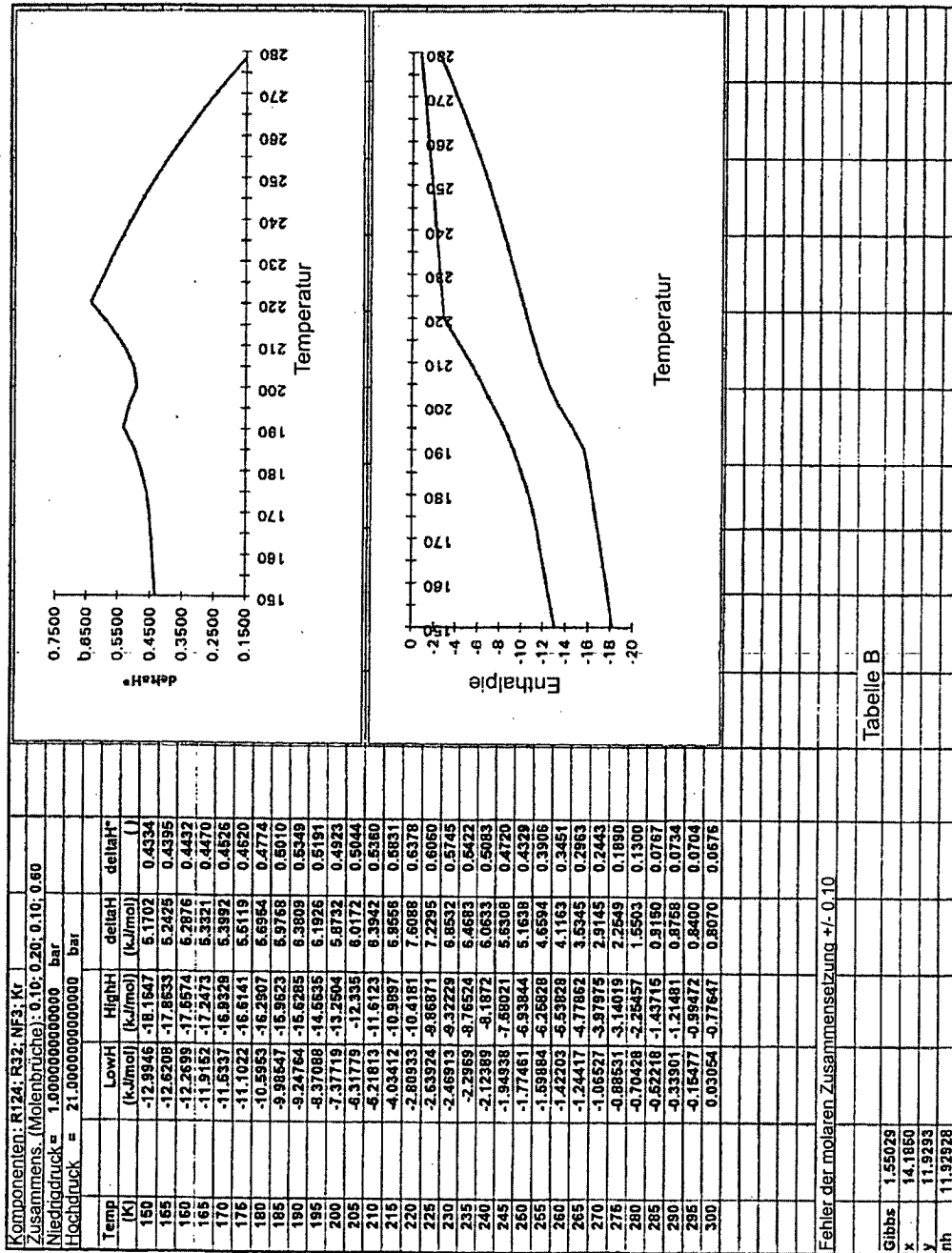


Fig. 17



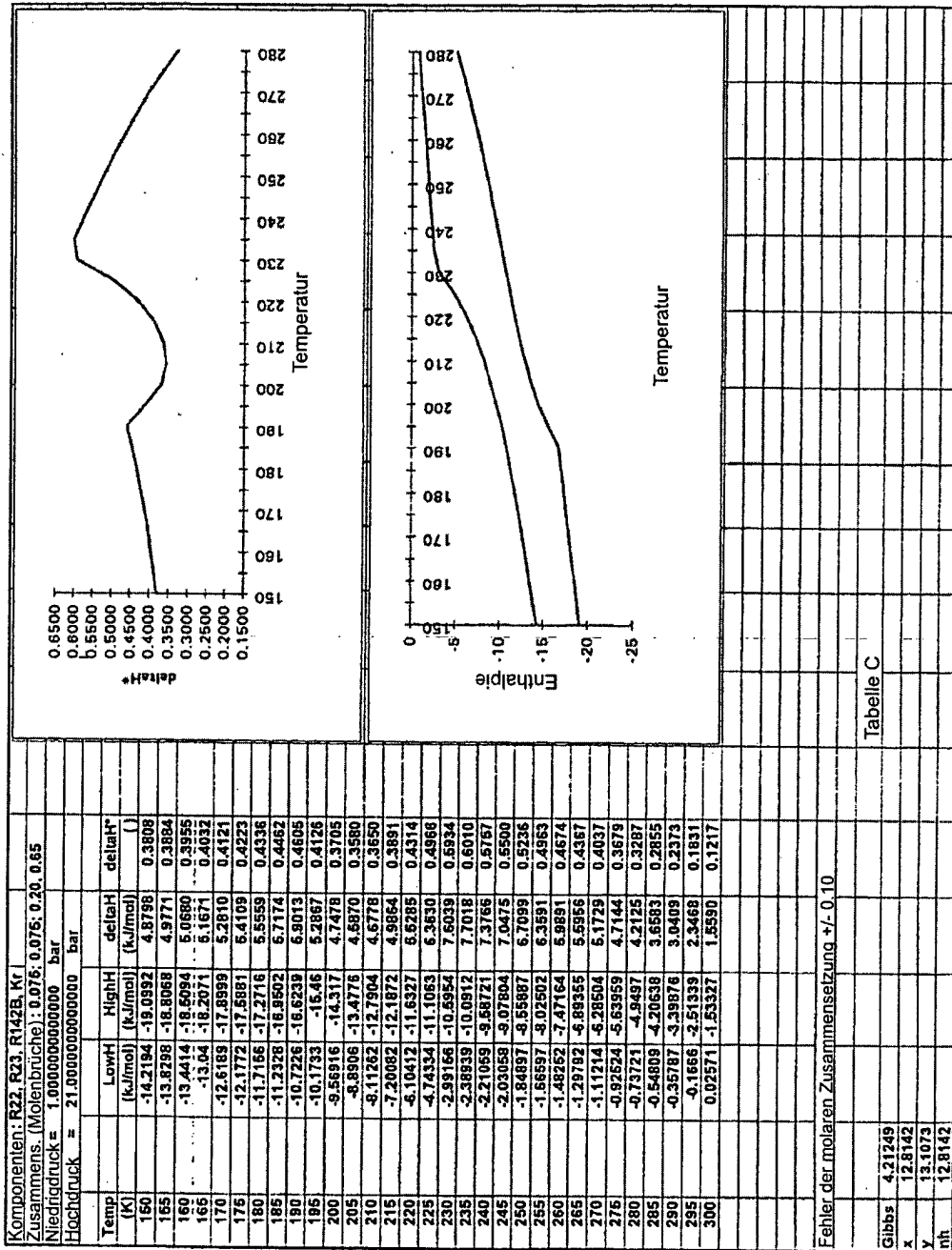


Fig. 18

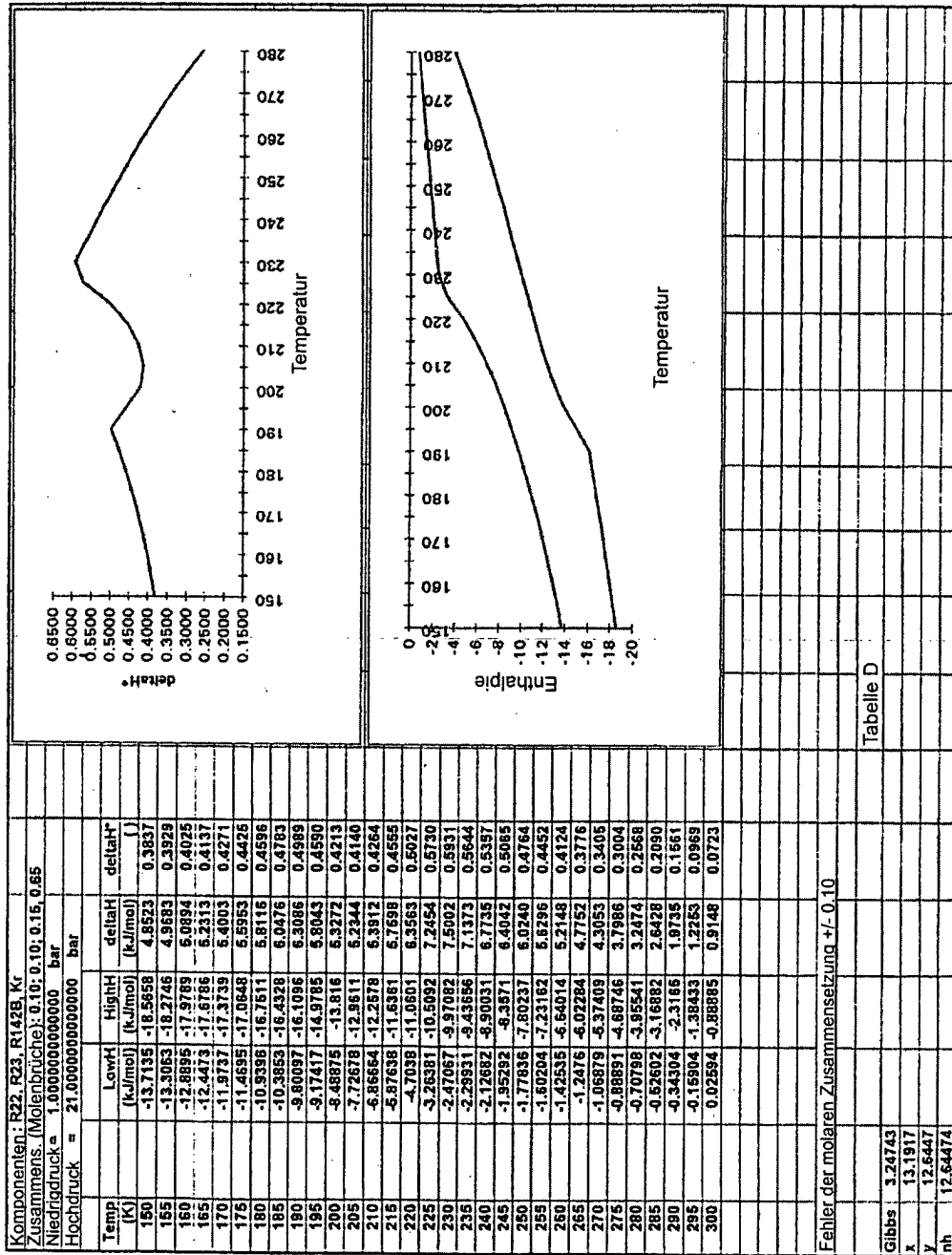


Fig. 19

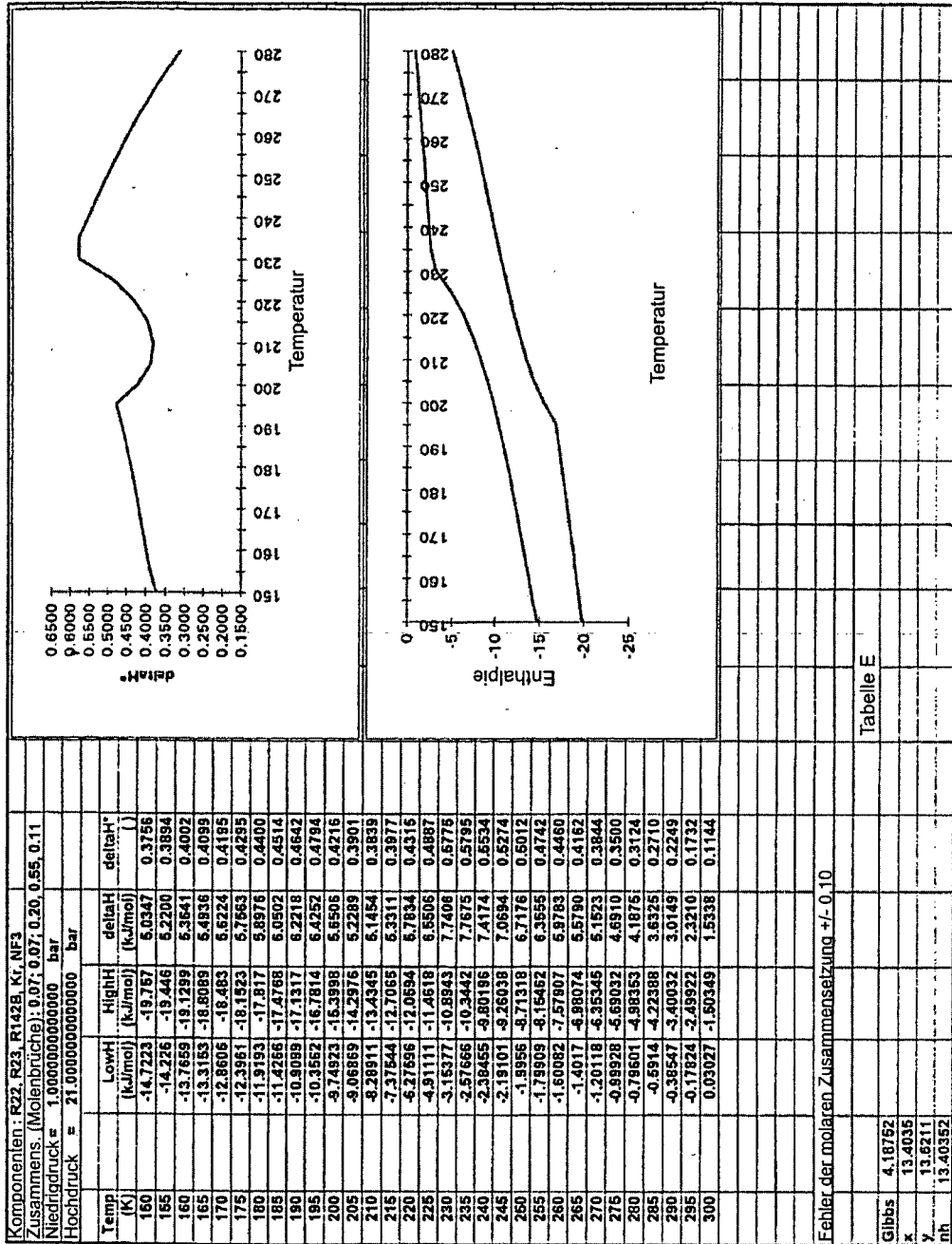


Fig. 20

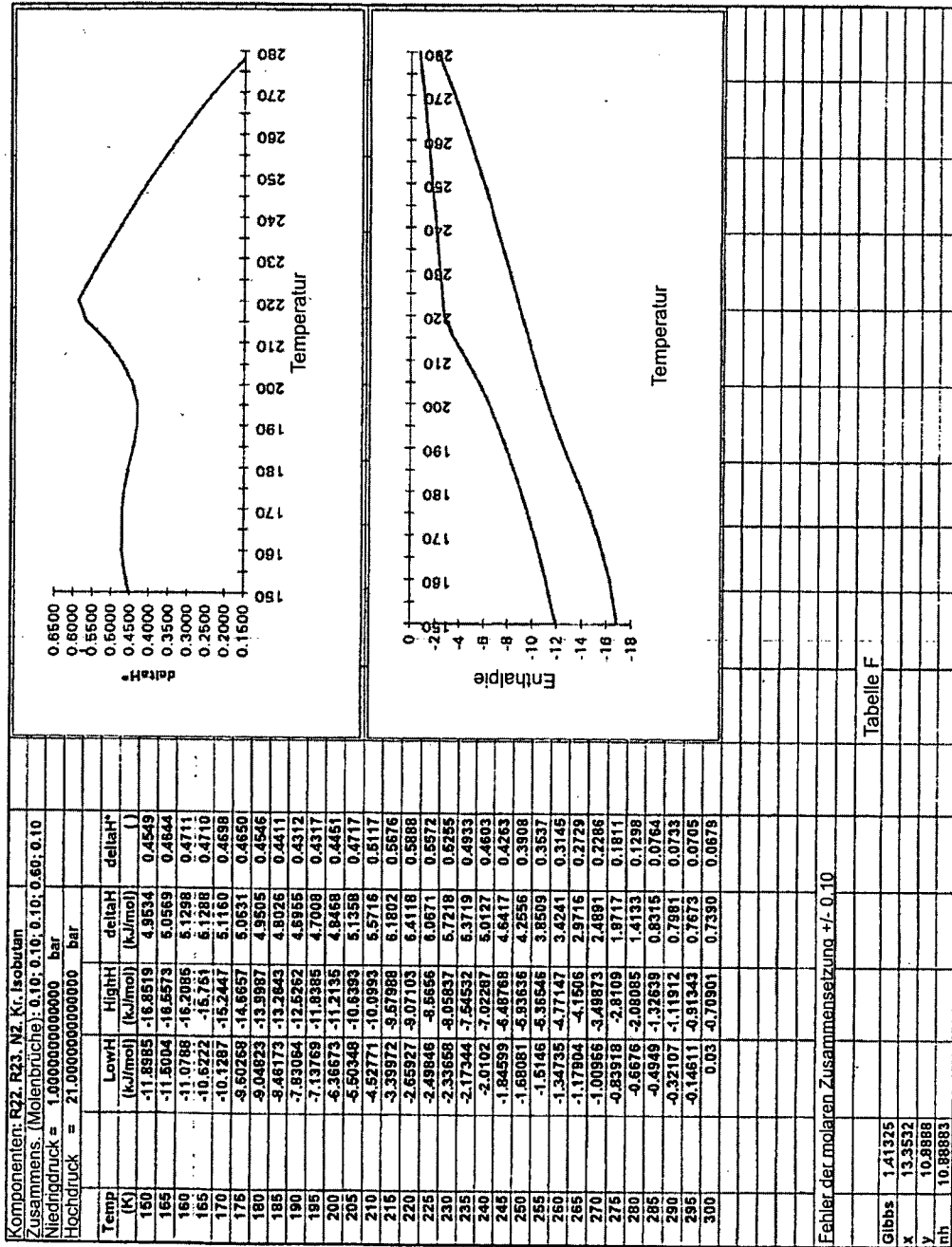


Fig. 21

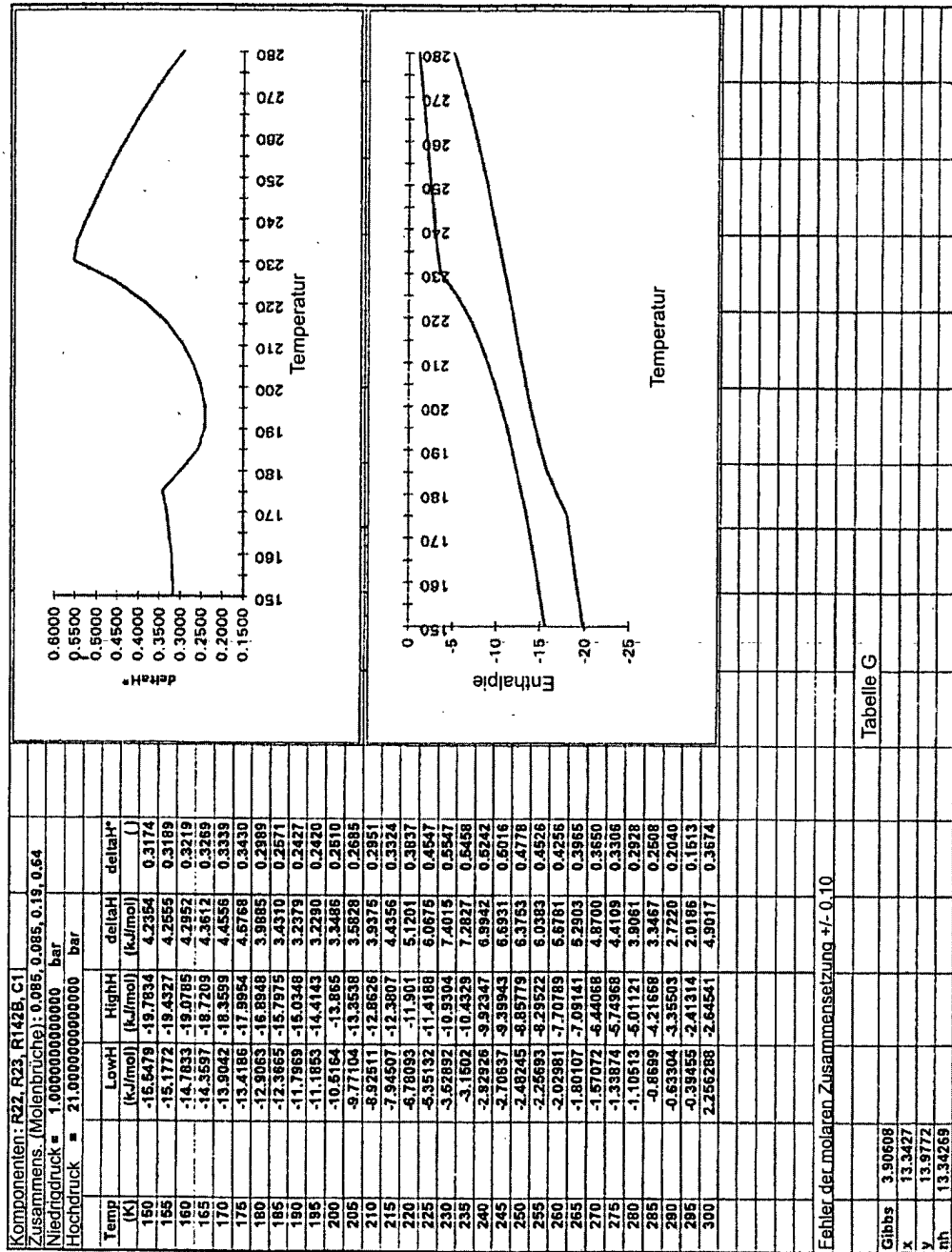


Fig. 22

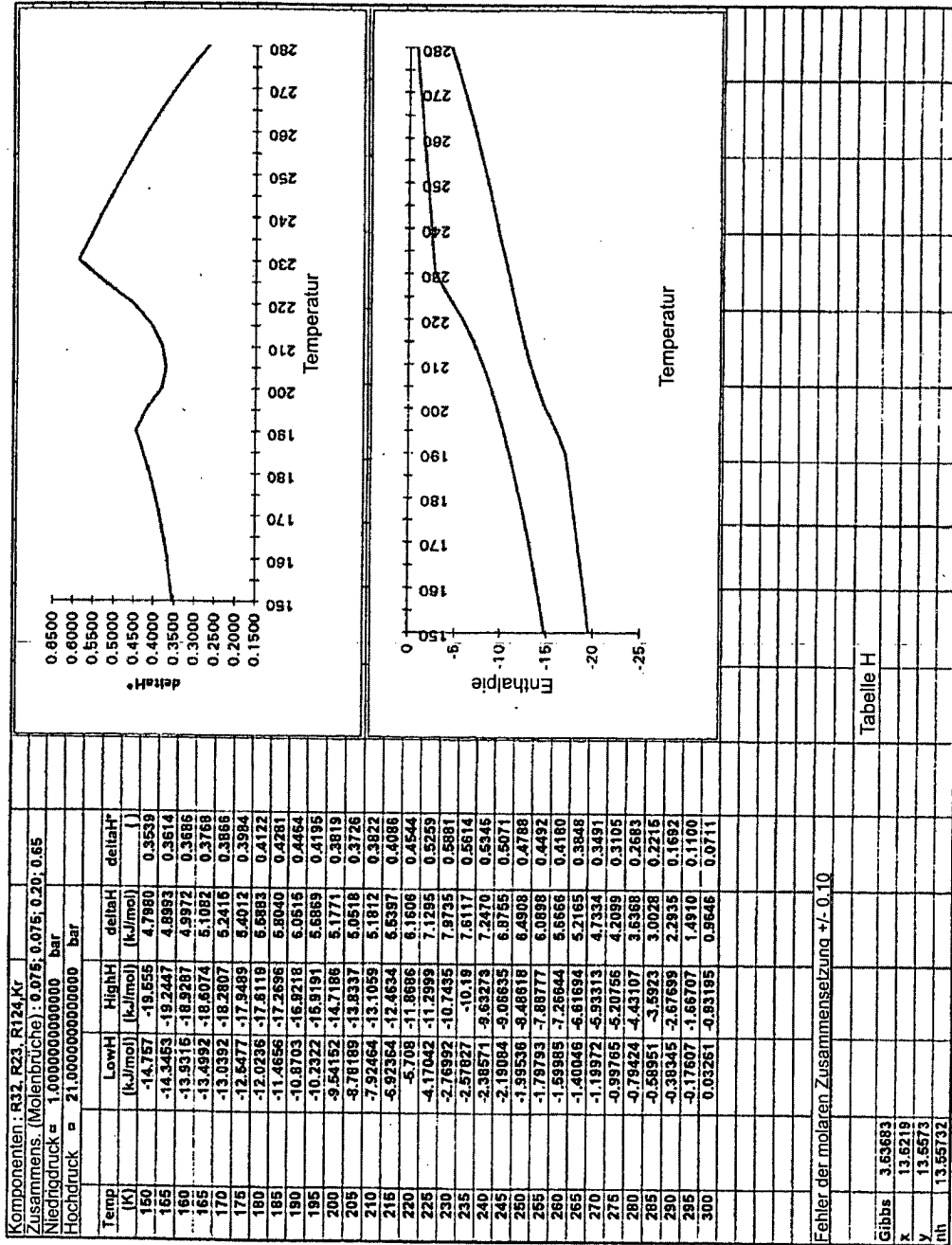


Fig. 23

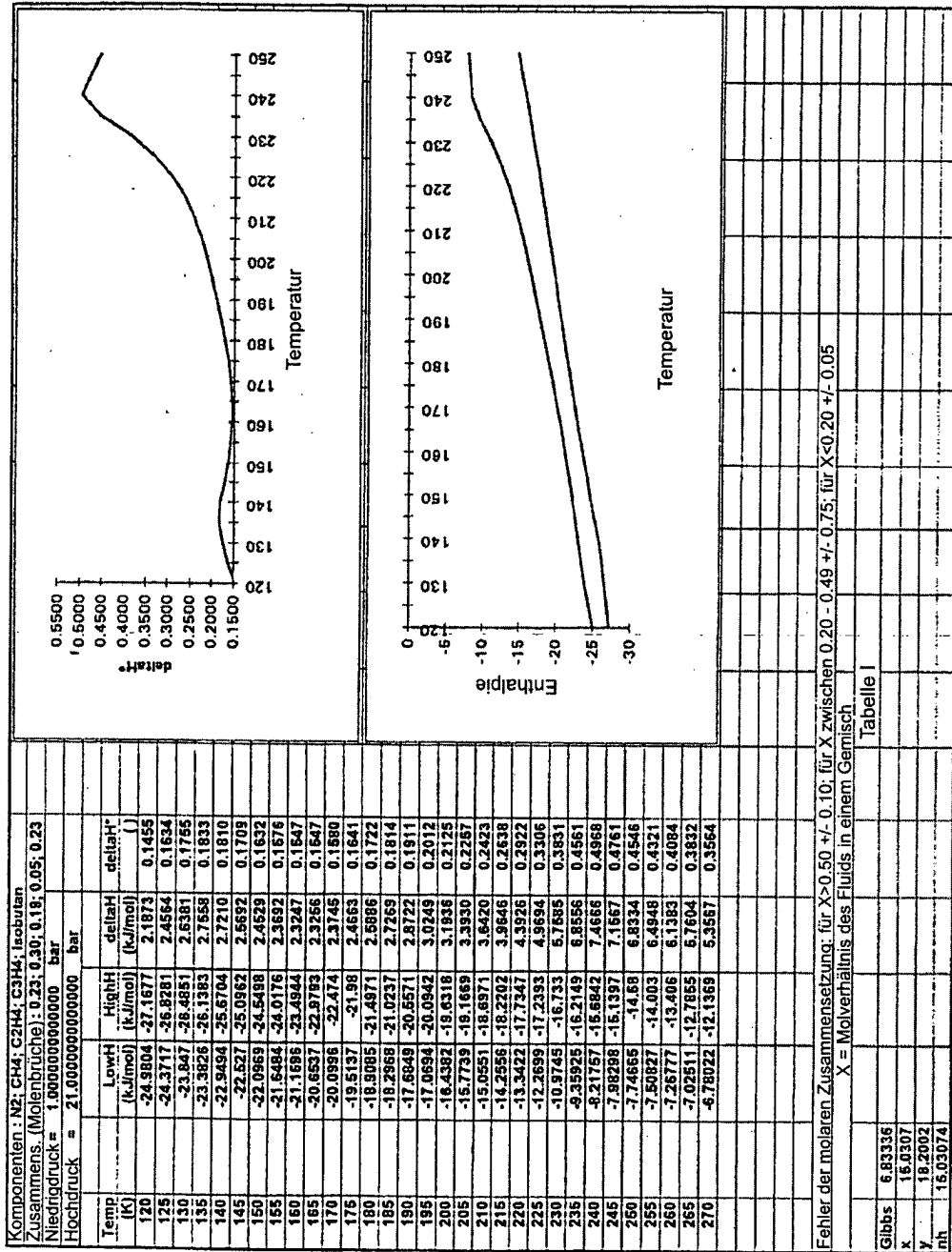


Fig. 24



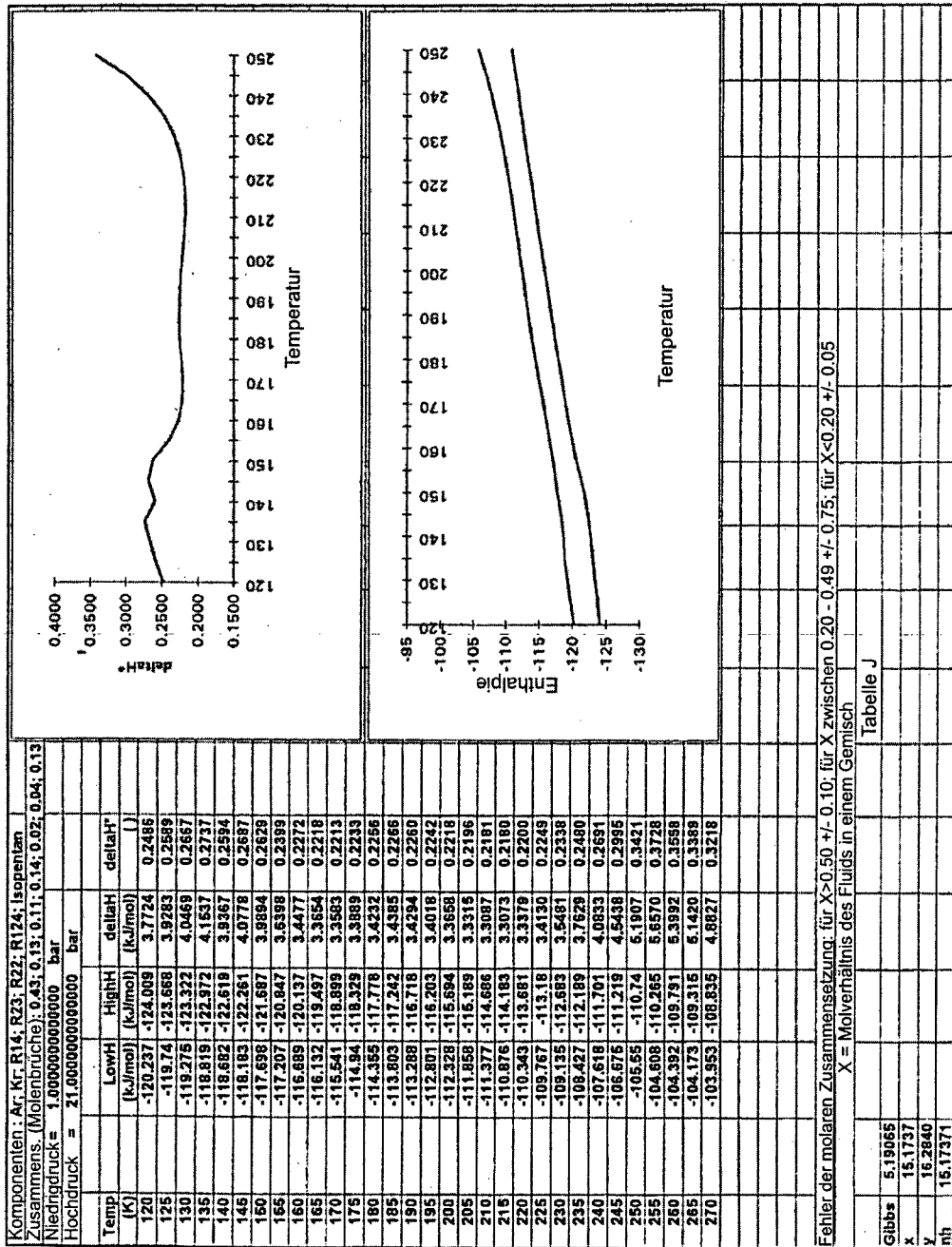


Fig. 25

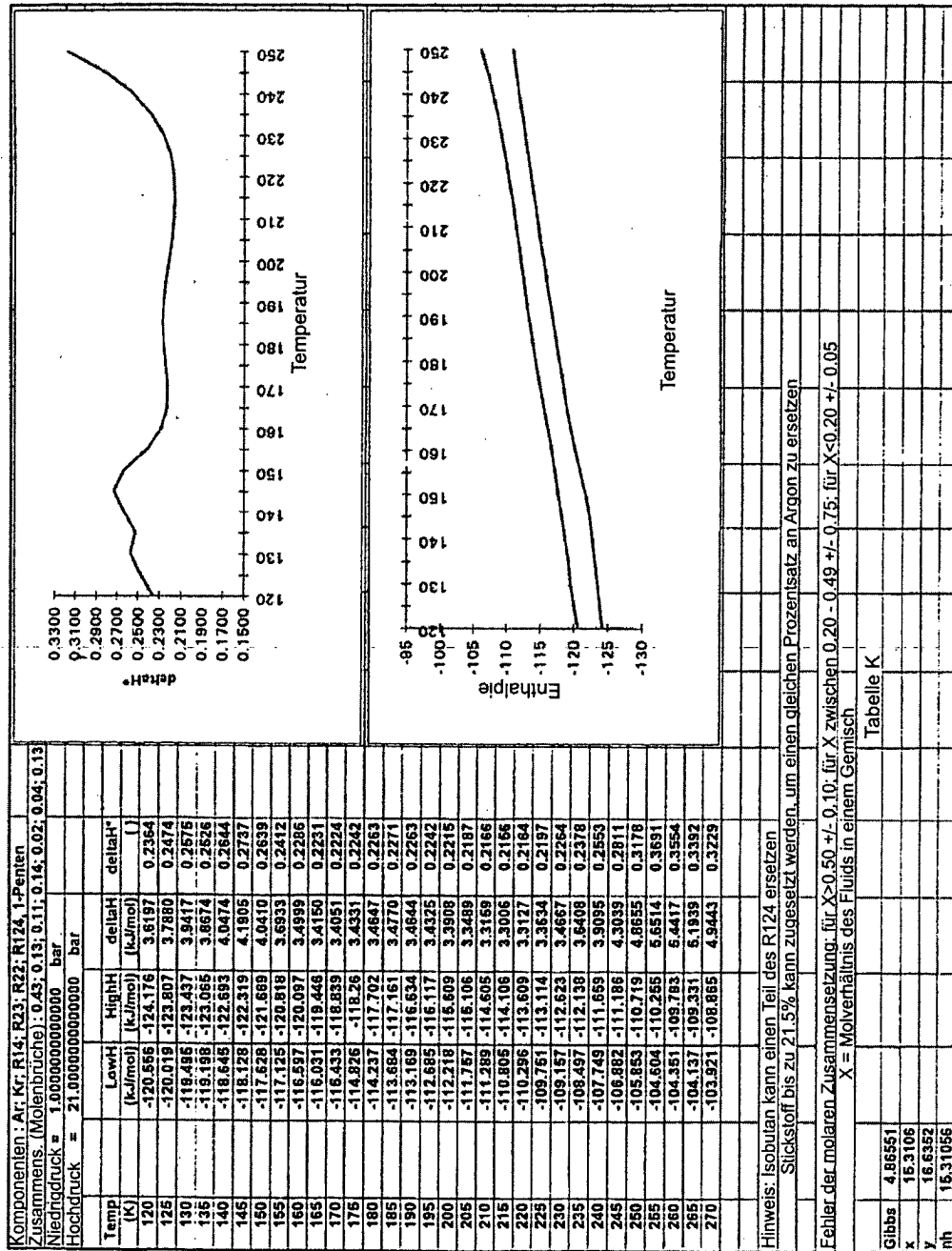


Fig. 26

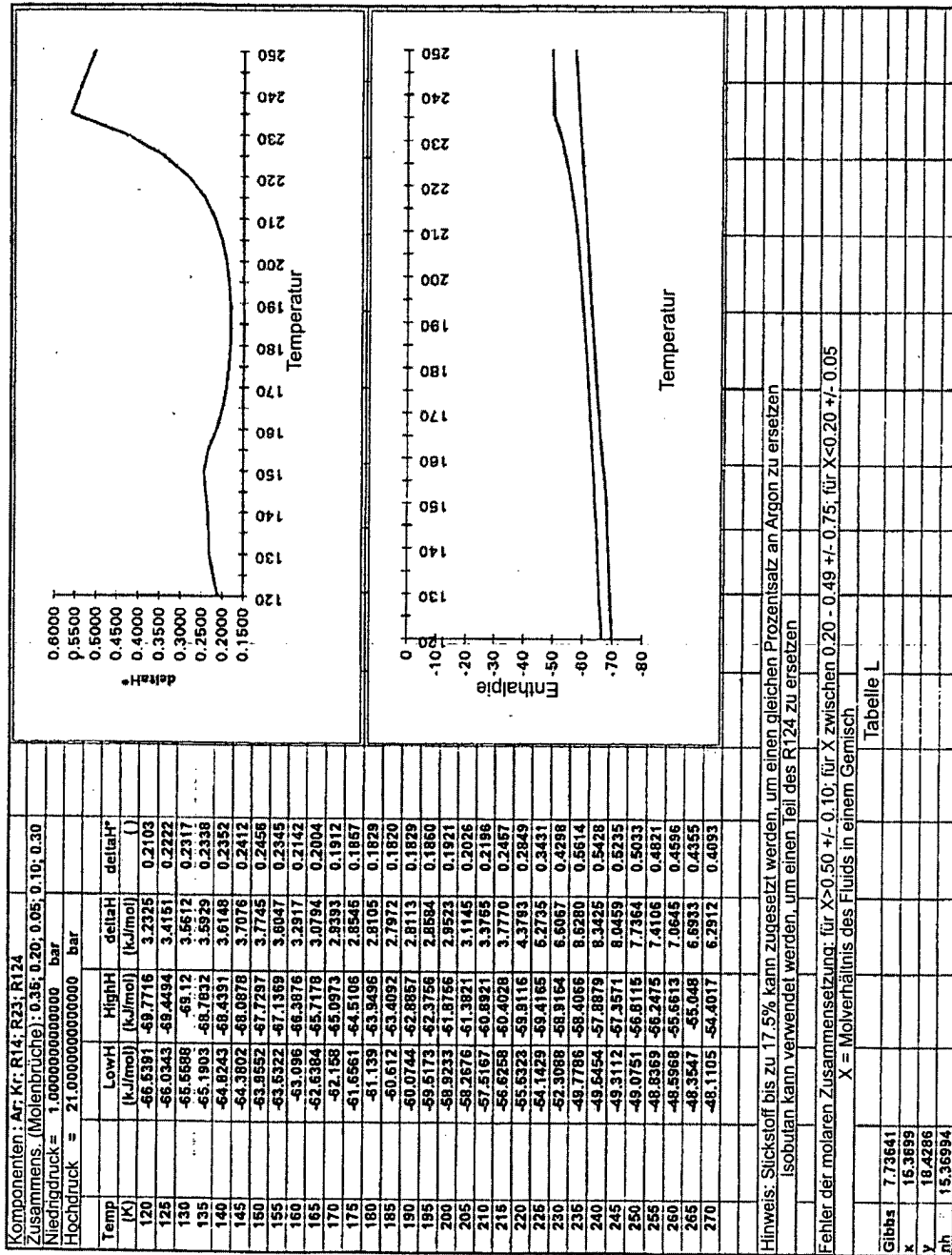


Fig. 27

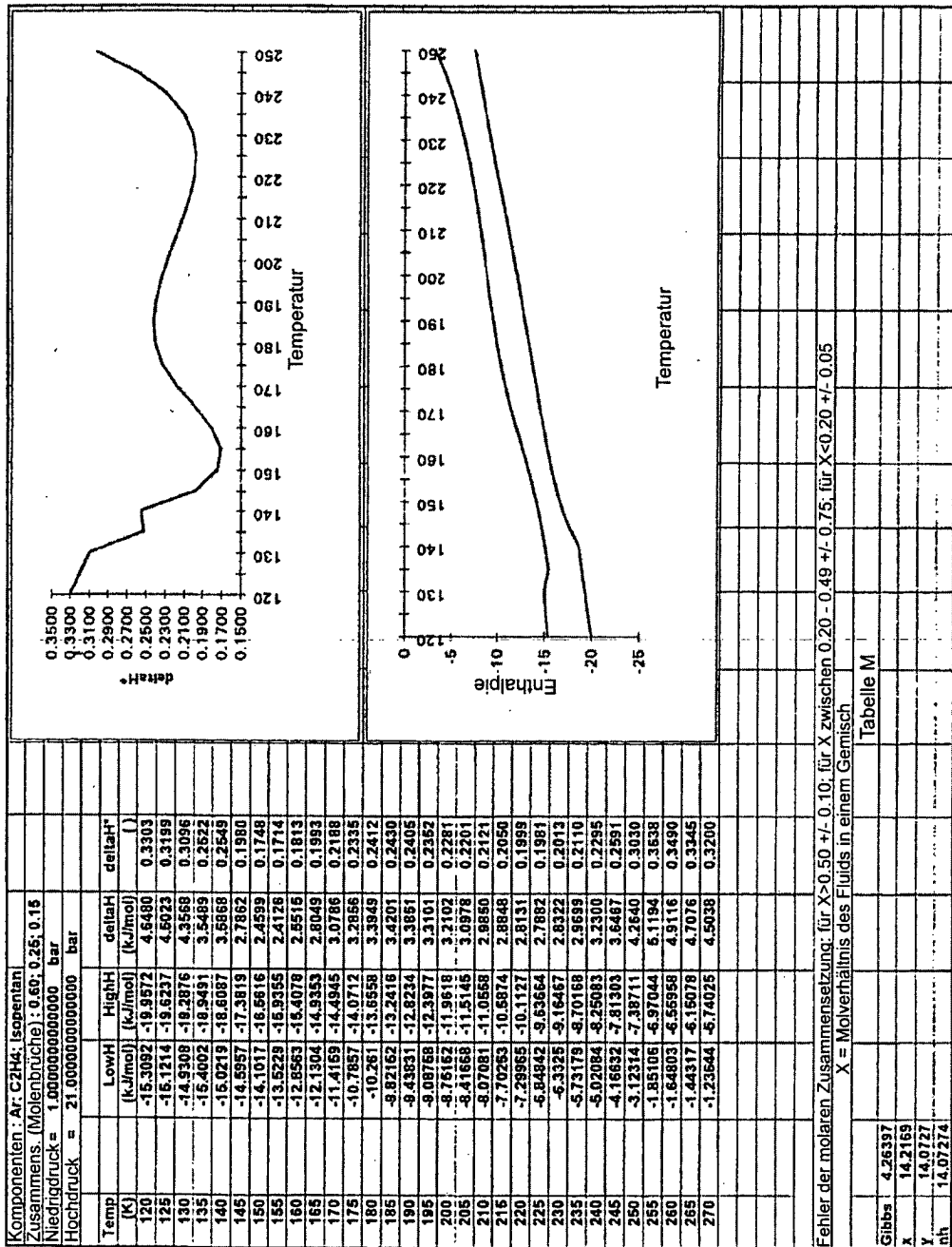


Fig. 28

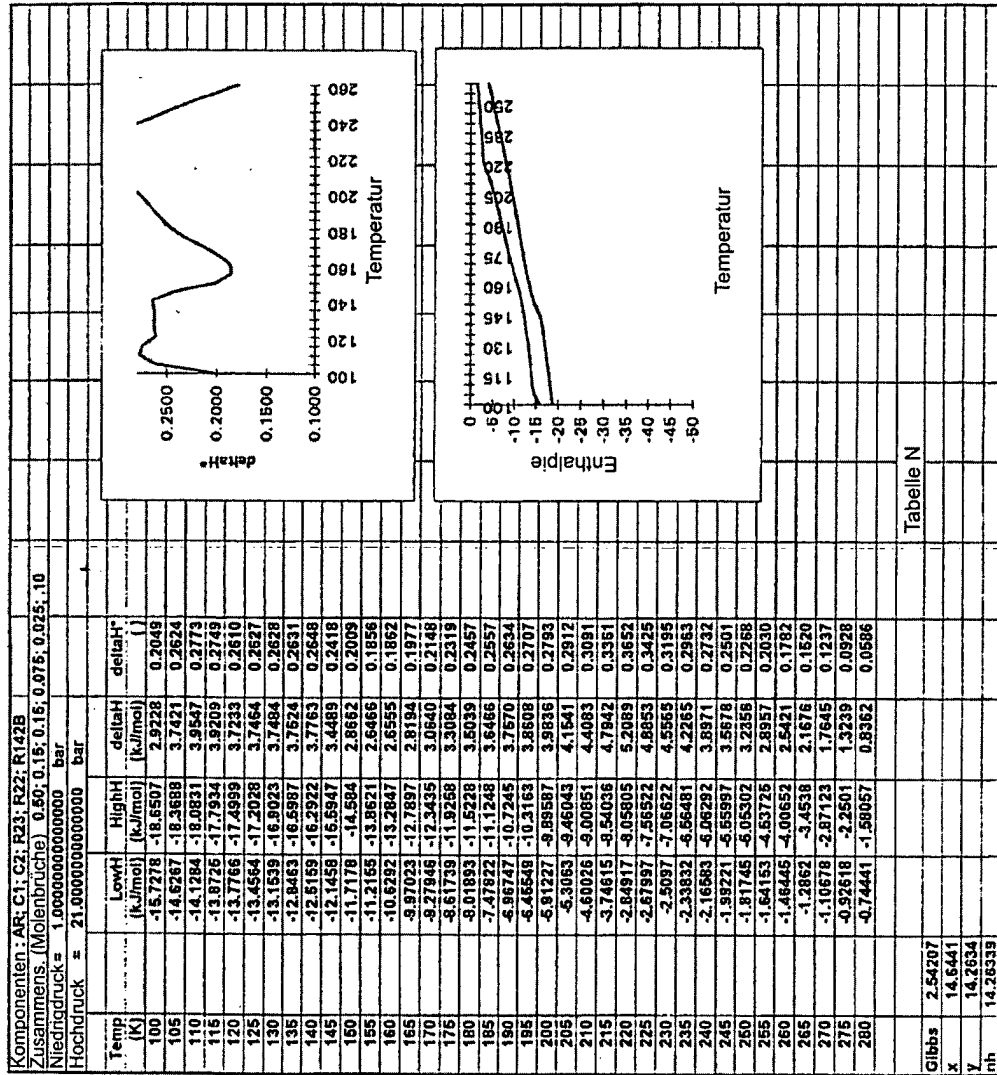


Fig. 29

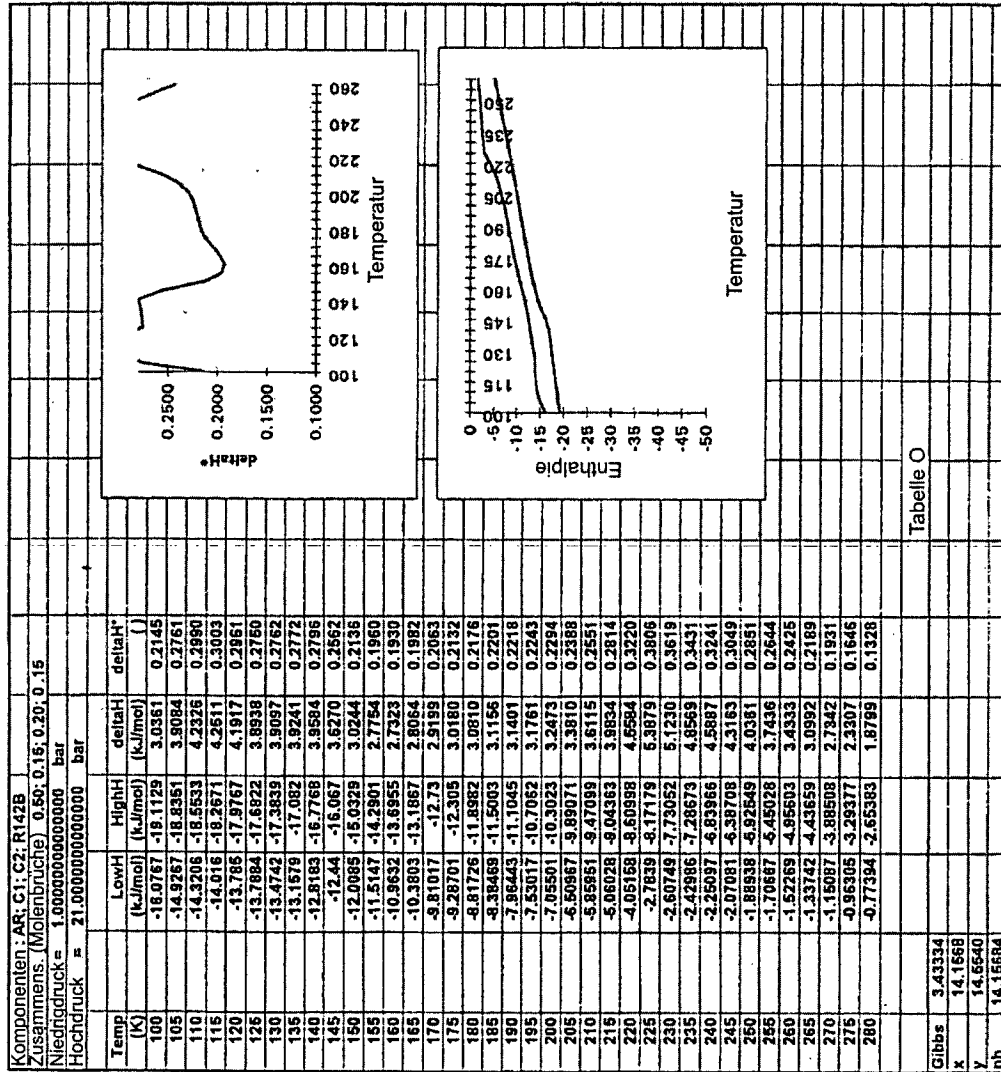


Fig. 30

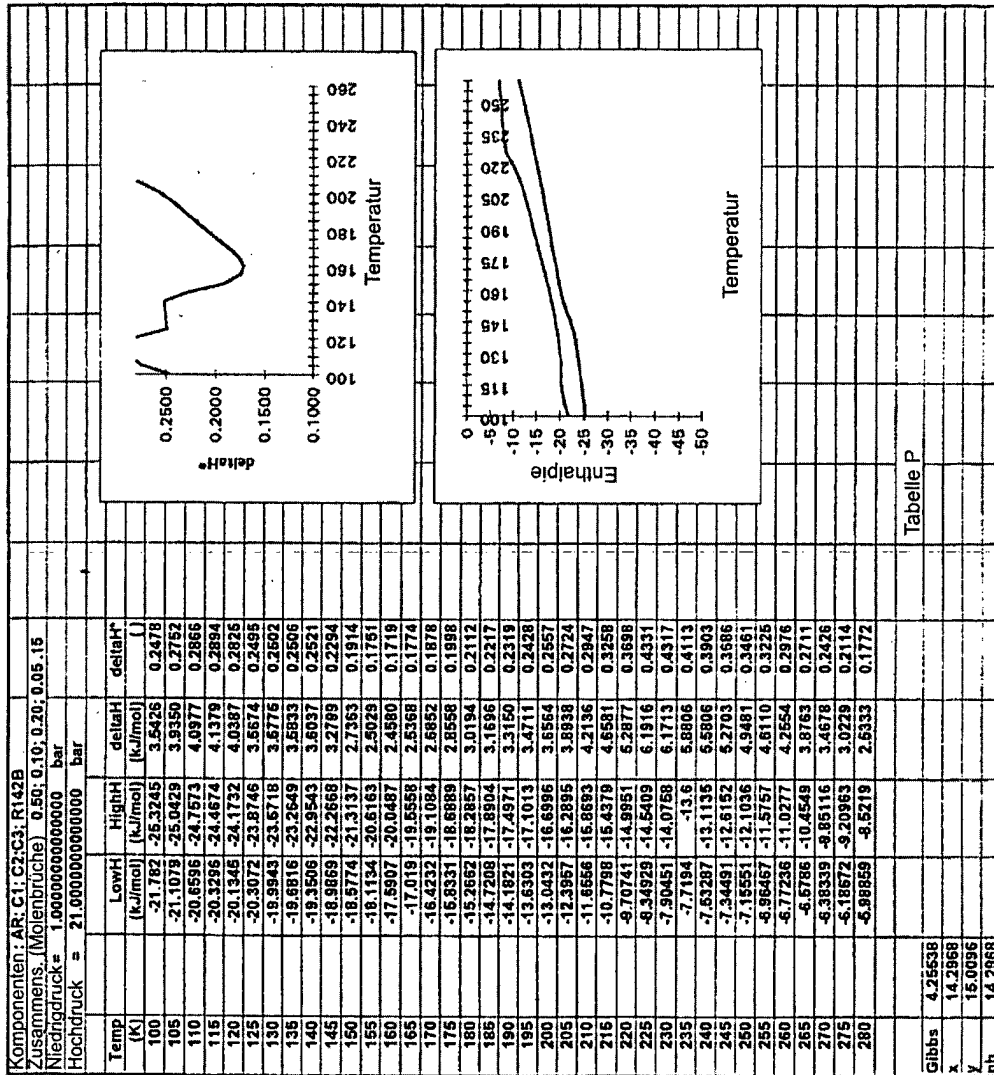


Fig. 31

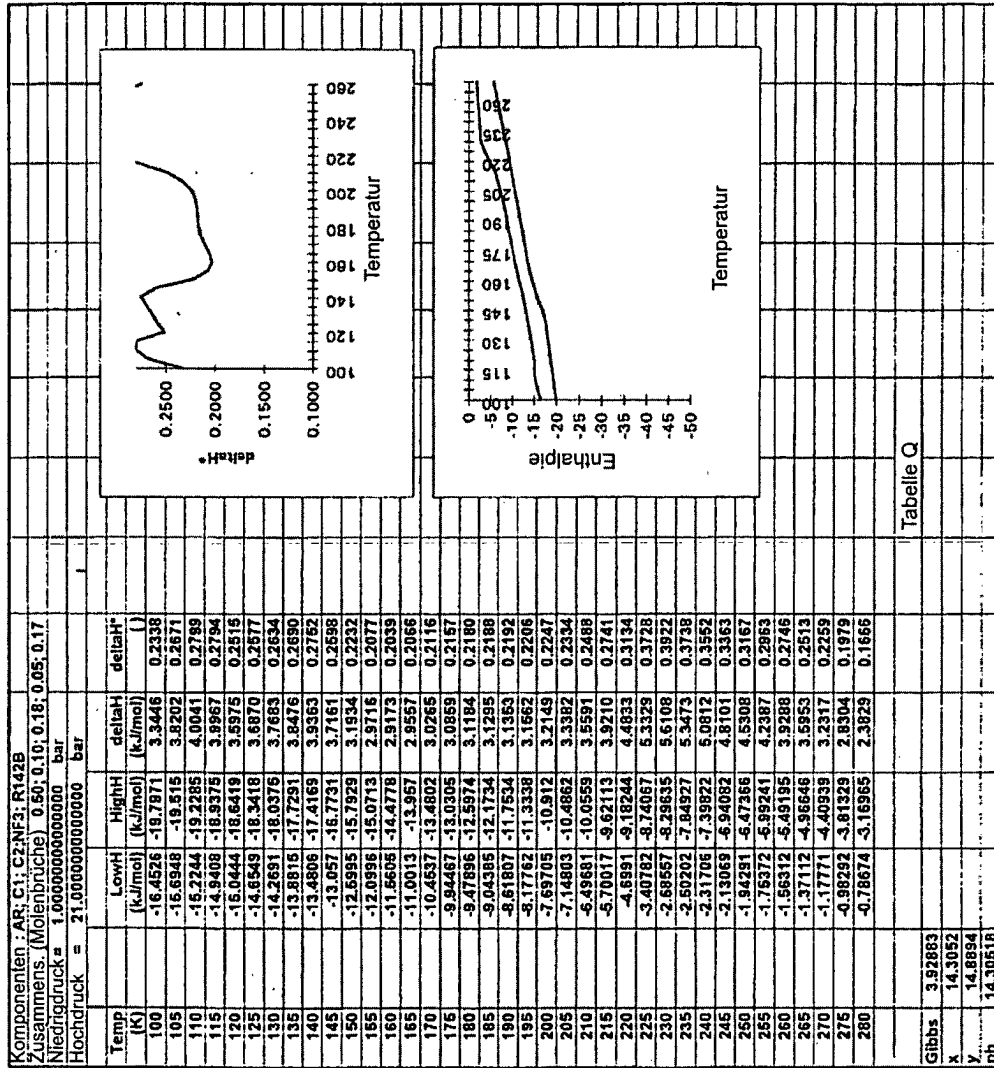


Fig. 32



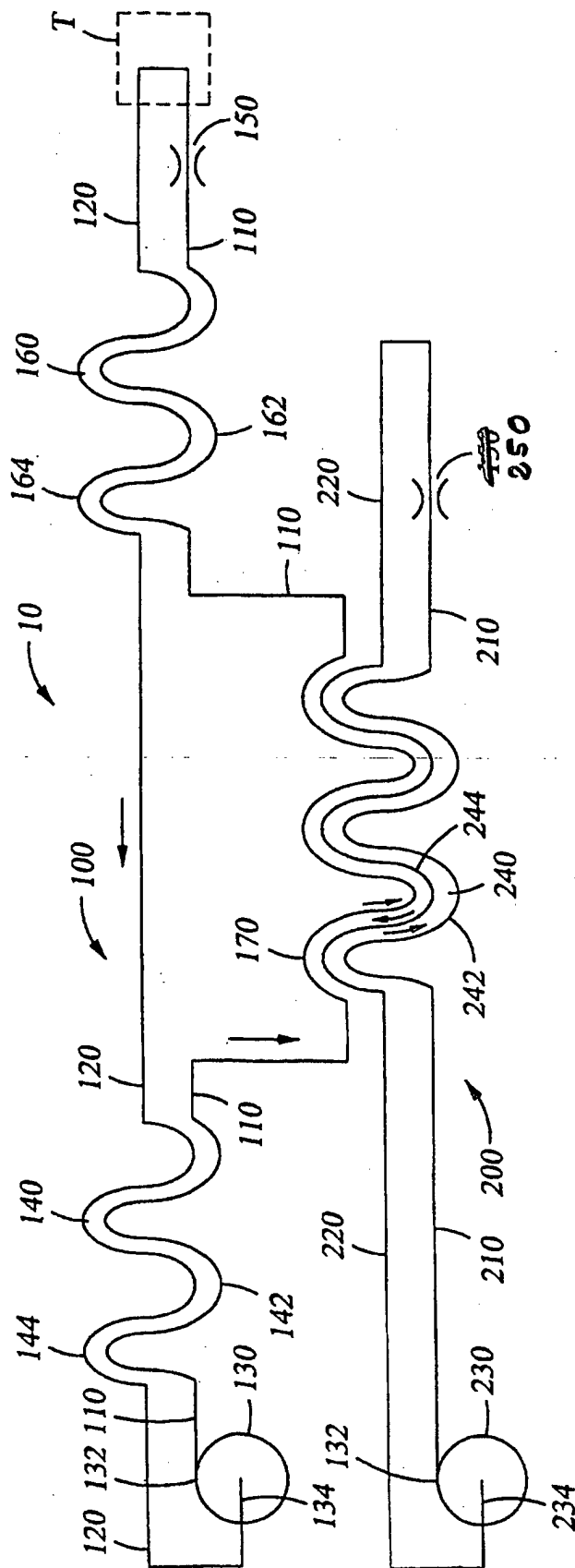


Fig. 33

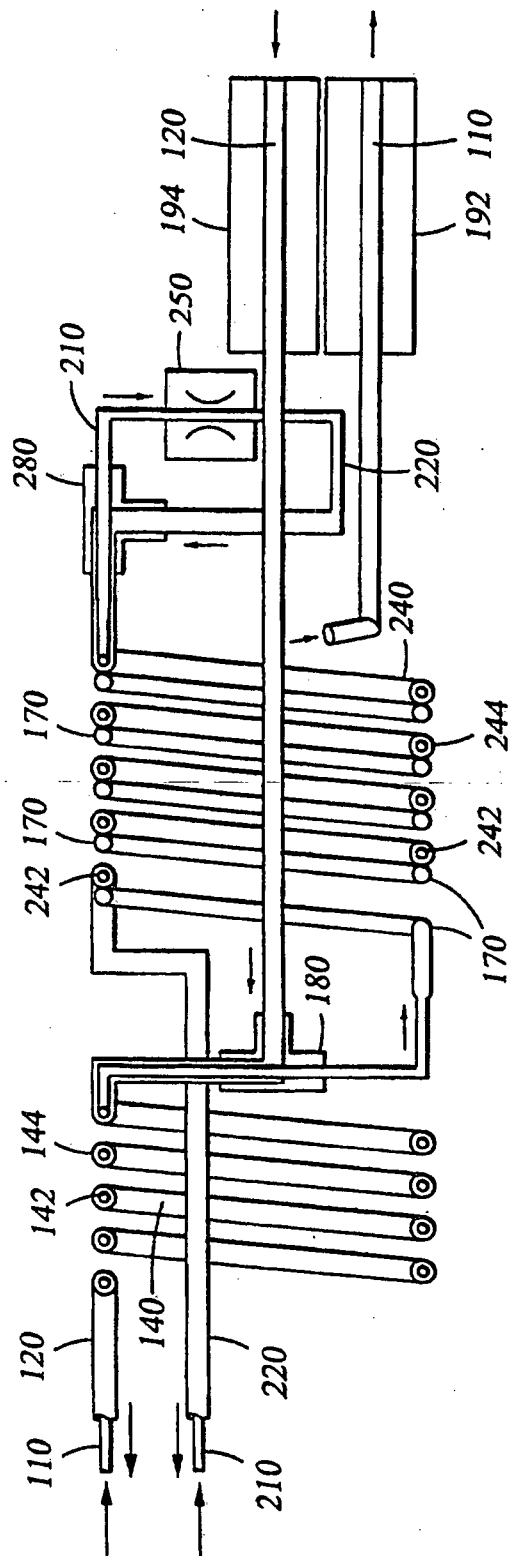


Fig. 34

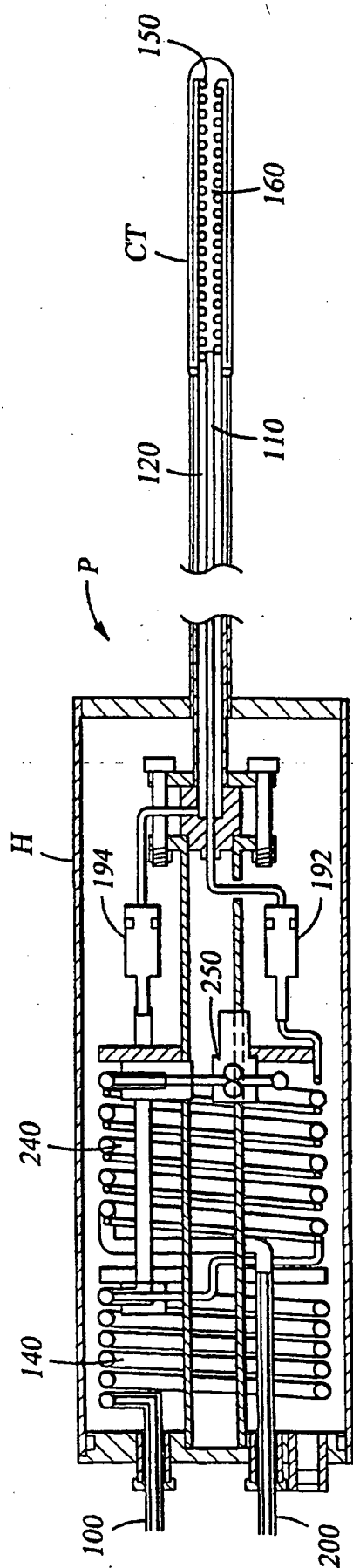


Fig. 35

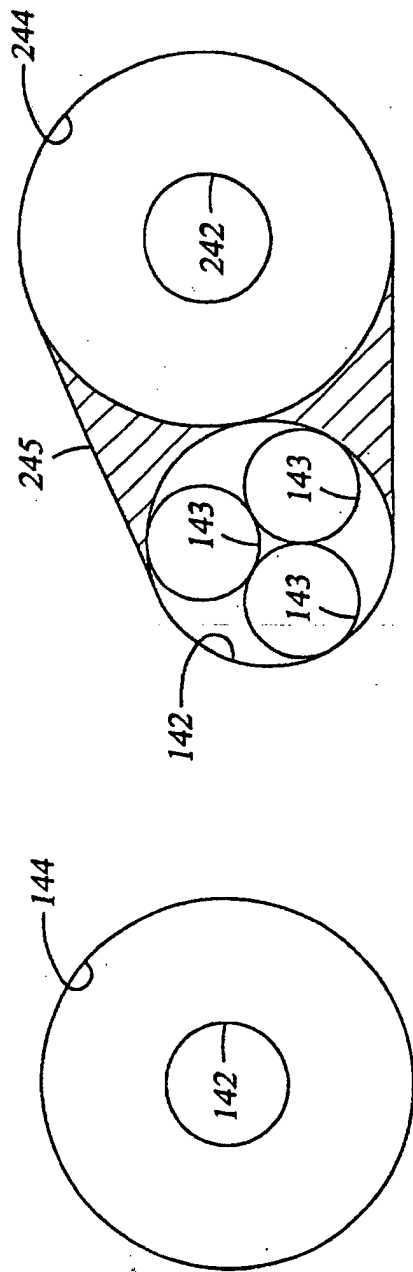


Fig. 36

Fig. 37