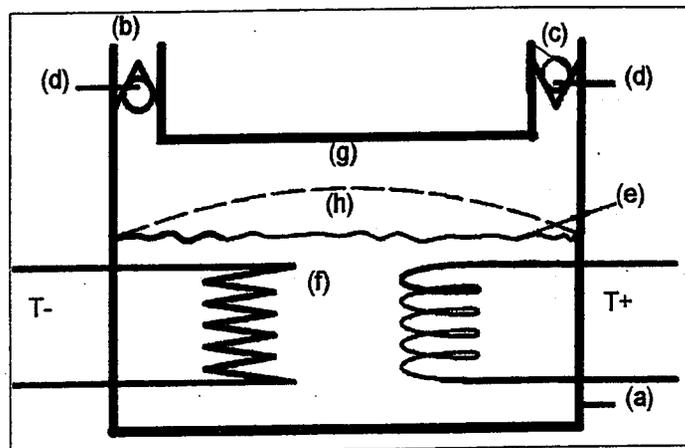


Die Thermopumpe: Ohne mechanischen Antrieb - Nur mit Wärme gegen Druck

Dipl.-Ing. R. L. M. Klopp, Co-Autoren: Prof. Dr. U. Keller, R. W. Schmutzler, A. Geiger, Dipl.-Ing. J. G. Sprakel*)

Abb. 1: Prinzip der Thermopumpe



1. STAND DER TECHNIK

Für den Bereich niedriger Prozeß- und Anlagendrücke (< 60 bar) wie auch für entsprechend niedrige Differenzdrücke im Hochdruckbereich stehen mit magnetisch oder mittels Spaltrohrmotor angetriebenen mehrstufigen Kreiselpumpen weitgehend anerkannte Lösungen für eine leakage- und kontaminationsfreie Fluidförderung zur Verfügung. Auch die Hersteller von Membranpumpen der unterschiedlichsten Bauarten erheben für ihre Erzeugnisse diesen Anspruch und sorgen für den Fall eines Membranbruchs mit technisch teilweise aufwendigen Maßnahmen vor.

Sonderanfertigungen magnetisch angetriebener Zahnradpumpen wie auch von Kolbenpumpen mit speziellen Rückführungen bieten ebenso für den Einzelfall bereits durchaus akzeptable Angebote zur Hochdruckförderung an, wenngleich eine wirklich

überzeugende Lösung der Dichtigkeitsfrage und jener nach absoluter Sicherheit vor wechselseitiger Kontamination zwischen Umwelt und Fördergut noch ausstehen scheint.

2. DAS KONZEPT DER THERMODYNAMISCHEN VERDRÄNGERPUMPE

Die Problematik der Dichtigkeit und Kontaminationssicherheit hat letztlich ihre Ursache in dem jahrtausendealten Verfahren zur Förderung von Flüssigkeiten und Gasen durch mechanisch generierte Energieerhöhung in einem begrenzten, teilweise auch geschlossenen Pumpenraum, in dem mechanische Elemente (Kolben, Plunger, Laufräder, Förderschnecken etc.) hineingeführt werden müssen, damit sie dort Arbeit verrichten können. Die Notwendigkeit der Abdichtung der hineinführenden oszillierenden oder rotierenden Antriebe dieser Elemente (Kolbenstangen,

Achsen und Wellen) ist eine logische Folge dieses Prinzips.

Eine überzeugendere Lösung der Dichtigkeitsfrage scheint daher auch im Bereich der Verdrängermaschinen nur möglich, wenn das problemverursachende Verfahren aufgegeben und eine grundsätzlich andere Vorgehensweise gewählt wird, nämlich in diesem Falle der Verzicht auf jegliche Mechanik (auch magnetisch angetriebene Kreis- oder Zahnradpumpen sind in dieser Hinsicht noch eine Hybridlösung siehe Abb.1).

Ein hermetisch abgeschlossener Pumpenraum (a) ist mit einer Anlage nur über eine Saug- oder Zulaufleitung (b) und eine Druck- oder Förderleitung (c) verbunden, die jeweils mit Ventilen (d) ausgerüstet sein können.

Der Pumpenraum wird von einer elastischen Membran (e) aufgeteilt in einen Bereich (f) des sogenannten Arbeitsfluides und in einen Bereich (g), in dem sich das eigentliche Fördergut befindet.

Entweder mittels elektrischer Heizung oder durch Zufuhr vorhandener Wärme aus einer Prozeßanlage wird nun dem Arbeitsfluid thermische Energie zugeführt. Hierdurch vergrößert sich dessen Volumen während einer Aufheizphase um den Betrag (h), dadurch ermöglicht, daß die Membran eine entsprechende Auslenkung zulässt, wodurch

*) Dipl.- Ing. R. L. M. Klopp
Beratender Ingenieur
KAMAT-Pumpen
58454 Witten

Co-Autoren:

Prof. Dr. J. U. Keller
Universität Siegen
57068 Siegen

R. W. Schmutzler
A. Geiger
Universität Dortmund
44227 Dortmund

Dipl.- Ing. J. G. Sprakel
Technischer Geschäftsführer
KAMAT-Pumpen
58454 Witten

wiederum der äquivalente Volumenbetrag des Fördergutes - auch gegen hohe Anlagendrücke - in die Förderleitung gedrückt wird.

Mit Beendigung der Aufheizung kommt die Ausdehnung des Arbeitsfluides zum Stillstand. Kühlt sich das Arbeitsfluid daraufhin ein wenig ab, so sinkt sein Druck unter den Wert des Förderdruckes und das Druckventil schließt sich. Bei weiterer Abkühlung verringert sich das Volumen des Arbeitsfluides weiter. Gleichzeitig sinkt sein Druck unter den Wert in der Zulaufleitung, wodurch sich das Einlaßventil öffnet und nachströmendes Fördergut in den Pumpenraum

einläßt. Dies erfolgt solange, bis das Arbeitsfluid durch Rückkühlung sein Ausgangsvolumen wieder erreicht hat und ein neuer Förderzyklus beginnen kann.

Damit tatsächlich eine Förderung auch gegen hohe Differenzdrücke zustande kommt, ist es von zentraler Bedeutung, daß als Arbeitsfluid Substanzen zum Einsatz gelangen, deren thermischer Ausdehnungskoeffizient auch bei hohen Drücken und Temperaturen noch ausreichend groß gegenüber der jeweiligen Kompressibilität dieser Stoffe ist, ansonsten würde das System nur als hydraulische Feder arbeiten und kein

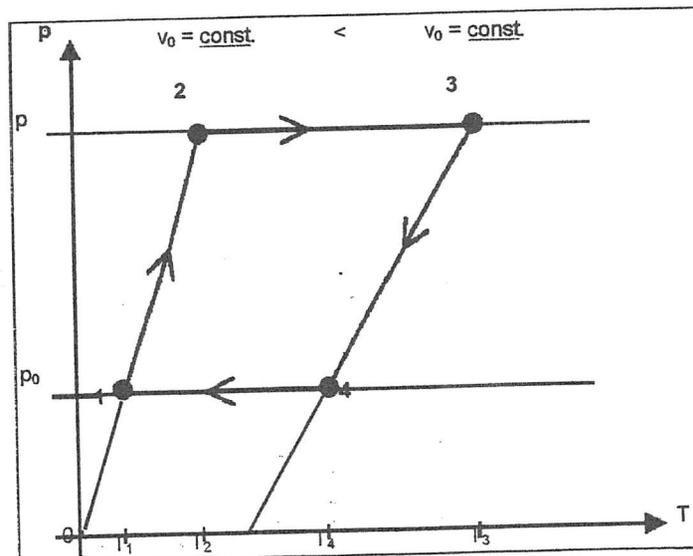
technisch nutzbares Differenzvolumen ausbilden.

Mit lediglich nur noch einer rein stofftrennend und niederfrequent arbeitenden Membran enthält die Pumpe (mit Ausnahme eventueller Ein- und Auslaßventile) keine beweglichen mechanischen Elemente und dürfte somit von ihrer Konzeption her in den Lebensdauerbereich des thermischen Anlagenbaues vorstoßen.

3. THERMODYNAMISCHER MODELLPROZESS

Die Thermopumpe, Abb. 1, ist ihrem Wesen nach eine Wärmekraftmaschine. In ihr durchläuft das Arbeitsfluid näherungsweise den in Abbildung 1 a dargestellten Kreisprozess.

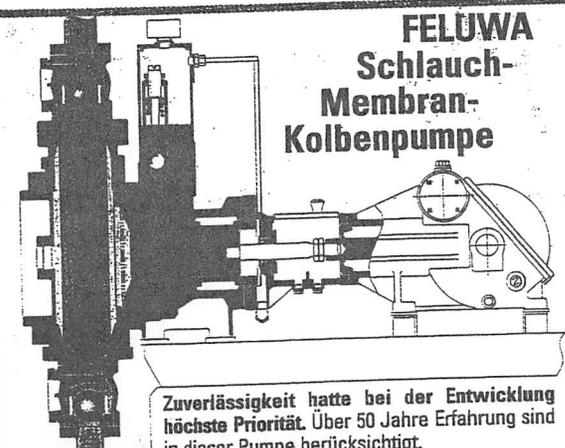
Abb. 1a: Thermodynamischer Modellprozess der Thermopumpe im Druck (p)-Temperatur (T)-Diagramm des Arbeitsfluids. Die Isochoren ($v_0 = \text{const.}$, $v^0 = \text{const.}$) sind näherungsweise Gerade.



Der Prozess besteht aus 4 Teilschritten:

- 1→2: Heizen, Isochore Druckerhöhung ($p_0 \rightarrow p$, $v_0 = \text{const.}$)
- 2→3: Heizen, isobare Expansion (Arbeitstakt, $p = \text{const.}$)
- 3→4: Kühlen, Isochore Druckabbau ($p \rightarrow p_0$, $v^0 = \text{const.}$)
- 4→1: Kühlen, isobare Kontraktion (Ansaugtakt, $p_0 = \text{const.}$)

Der thermische Wirkungsgrad als Verhältnis der pro Zyklus geleisteten Arbeit zur zugeführten Wärme ist.



FELUWA Schlauch- Membran- Kolbenpumpe

- Einzigartige Betriebssicherheit durch die Kombination einer Flachmembrane mit einer Schlauchmembrane. (Bei Defekt der Schlauchmembrane kann die Pumpe bis zum nächsten geplanten Betriebsstillstand weiterarbeiten.)
- Umweltfreundlich, leckfrei und geräuscharm.
- Glatter, geradliniger Durchfluss. - Leichte Reinigung.
- Prozessbauweise: Direkter Austausch von Verschleißteilen und spezifischen Pumpenteilen ohne vorherige Demontage von Nachbarelementen.
- Möglichkeit der prädiktiven Wartung.
- Geeignet für Drücke bis 320 bar.
- Modernste Diagnose-, Regel- und Steuermöglichkeiten.

Für mehr Informationen wenden Sie sich bitte an:
FELUWA Pumpen GmbH
D-54570 MÜRLLENBACH / Eifel
Beulertweg
Tel. 0 65 94 / 10-0 • Fax 0 65 94 / 16 40
Internet: www.feluwa.com



Ein Unternehmen der ARCO - Gruppe

Zuverlässigkeit hatte bei der Entwicklung höchste Priorität. Über 50 Jahre Erfahrung sind in dieser Pumpe berücksichtigt.

$$\eta = 1 - \frac{T_4 - T_1 + (1 - \sigma)(T_3 - T_4)}{T_3 - T_2 + (1 - \sigma)(T_2 - T_1)} < 1 \quad \text{mit} \quad \sigma = \frac{\beta^2 (T_1 + T_3)}{2\kappa_T c_p \cdot \rho}$$

Der Parameter σ ist eine stoff- und prozessabhängige Größe, deren Wert wesentlich durch den thermischen Expansionskoeffizienten $\beta = (\partial V / \partial T)_p / V$ des Arbeitsfluids und durch dessen isotherme Kompressibilität $\kappa_T = -(\partial V / \partial P)_T / V \geq 0$ bestimmt wird. Numerische Werte bei den Größen und der Dichte ρ des Arbeitsfluids sind für einen mittleren Druck $(p_0 + p)/2$ und eine Mitteltemperatur $(T_1 + T_3)/2$ zu verwenden.

Soll die Thermopumpe ausgehend von einem Druck p_0 bei einem Druck $p > p_0$ fördern, so muss das Arbeitsfluid mindestens bis zur Temperatur

$$T_2 = T_1 + (p/\beta)(1 - (p_0/p))$$

aufgeheizt werden. Zur Bestimmung numerischer Werte der thermischen Koeffizienten, Dichten und

Wärmekapazitäten einzelner Arbeitsfluide sei auf die Literatur thermophysikalischer Stoffdaten (Abschnitt g) verwiesen.

4. TECHNISCHE AUSFÜHRUNGEN

Die in Abb.1 gezeigte „Einkammer-Maschine“ kann nur eingeschränkt kontinuierlich fördern, nämlich solange, bis das aufgrund gegebener Temperatur- und Druckgradienten maximal erzielbare Differenzvolumen des Arbeitsfluides „aufgebraucht“ ist. Die Fördercharakteristik selbst ist dabei allerdings frei wählbar, da sie z.B. nicht von der Sinus-Amplitude eines Kurbeltriebs geprägt wird, sondern lediglich Intensität und zeitlicher Verlauf der Aufheizung des Arbeitsfluides und der notwendigen Wärmeübertragung hierfür bestimmend sind.

Für eine permanent kontinuierliche Förderung wird man jedoch gekoppelte Systeme wählen, von denen zwei grundsätzlich unterschiedliche Varianten in Ausbildung als Triplex-Anordnung hier vorgestellt werden:

4.1. Kombinierte Parallel- und Reihen-Schaltung von Einkammer-Maschinen

Wie Abb.2 zeigt, fördern drei identische Pumpen in eine gemeinsame Druckleitung und

werden ebenso aus einer gemeinsamen Zulaufleitung versorgt, während die thermische Ansteuerung und auch ggfs. die Rückkühlung der Arbeitsfluidvolumina sequentiell (aus gemeinsamen oder getrennten Wärme- bzw. Kältespeichern) erfolgt.

Wie Abb.3 zeigt, kann so mittels geeigneter zeitlicher Überschneidung der Ansteuerung der Einzelpumpen nahezu jeder beliebige Kennlinienverlauf ($V_i = f(t)$) erzielt werden, von absolut gleichförmiger Förderung bis hin zu gezielt einsetzbaren Peaks, wie man sie beispielsweise injektionshalber fördern wird.

4.2 Funktionstrennung von Hydraulik und Thermodynamik

Abbildung 4 zeigt wie Abb.2 wiederum eine Triplex-Anordnung, mit welcher drei Membranköpfe (1) aus einer gemeinsamen Zulaufleitung hydraulisch „versorgt“ werden und ebenso in eine gemeinsame Förderleitung einspeisen:

Nach dem Prinzip des „Bäumen wechselt die Dicht“ - Spieles arbeitet diese Anordnung in dreifacher Taktfolge ähnlich einer konventionellen, um 120 Grad Kurbelwinkel verschränkten Triplex-Kolbenpumpe. Jedem Membrankopf ist ein gleich großes Arbeitsfluidvolumen zugeordnet, das mittels eines zentralen Steuerblockes (5) und einer Steuereinheit (6) nacheinander dem Hochdruck-Wärmetauscher (2) zugeführt und anschließend in einem Niederdruck-Zwischenbehälter (4) vorgekühlt bzw. solange „geparkt“ wird, bis es im dritten Takt im Kühler (3) rückgekühlt wird.

Damit die zeitlich immer aufwendige Rückkühlung, während der das Arbeitsfluid drucklos ist, in einem kosten- und baugrößengünstigen Niederdruck-(z.B. Platten-)kühler (3) erfolgen kann, sind hier Aufheizung und Rück-

Abb. 2 Parallelschaltung dreier Thermodynamischer Pumpen zur Erzielung einer quasikontinuierlichen Förderung

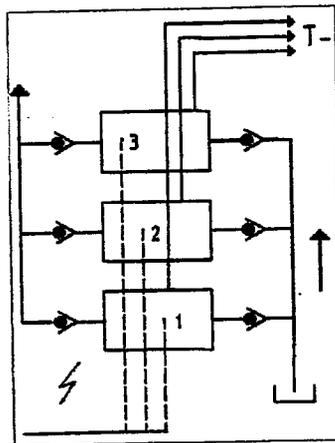


Abb. 3 Mögliche Fördercharakteristik der Einzelpumpen in der Parallelschaltung nach Abb.2

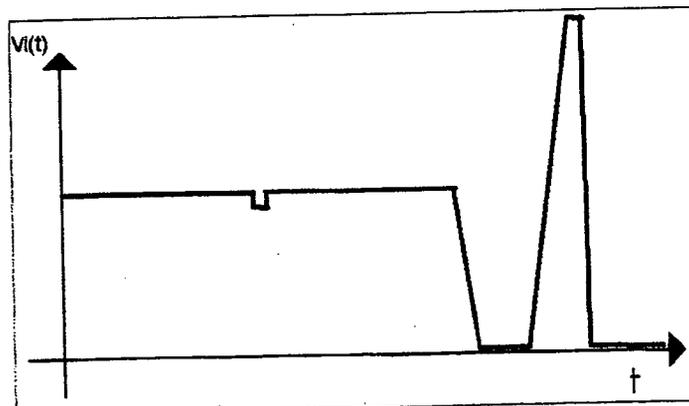
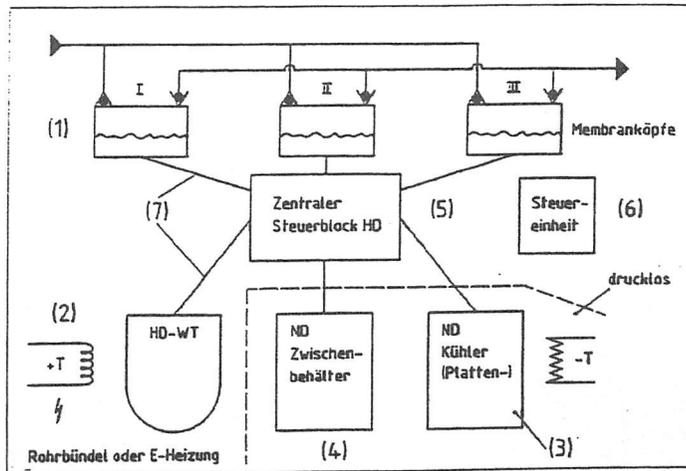


Abb. 4 Parallelschaltung dreier Thermodynamischer Pumpen (Triplex-Anordnung) mit zentralen thermischen Einheiten zum periodischen Heizen und Kühlen des Arbeitsfluides.



kühlung baulich voneinander und auch von den fördernden Membranköpfen getrennt, so daß nur die Komponenten in druckfester Bauweise ausgeführt werden müssen, die während der Aufheizung/Förderung einem hohen Innendruck ausgesetzt sind.

Ein weiterer Vorteil der baulichen Trennung wird darin gesehen, daß nur noch die Volumenänderung des Arbeitsfluides an die fördernden Membranköpfe weitergegeben wird, nicht jedoch die Temperaturänderung. Auch diese Anordnung kann vom

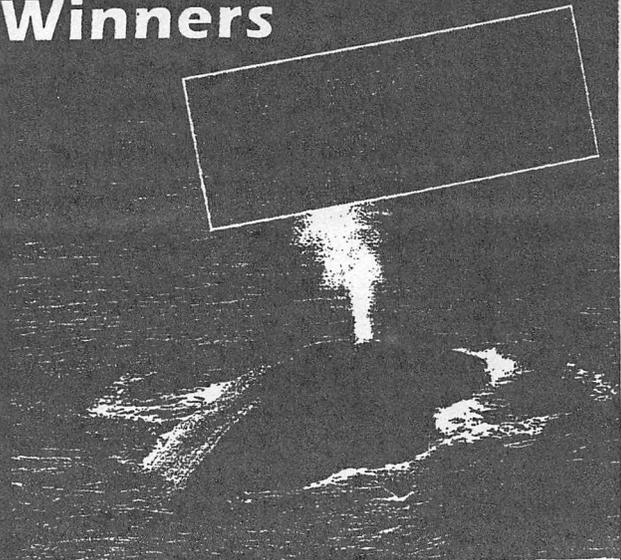
Planer beliebig ergänzt und rekombiniert werden.

5. FUNKTIONSMODELL/ PROTOTYP EINER EIN-KAMMERMASCHINE

Abbildung 5 zeigt das Aggregat mit einem etwa 15 Liter Arbeitsfluid fassenden Zentralblock aus Edelstahl und zwei seitlich angeflanschten Membranköpfen, deren Förderseiten hydraulisch verbunden sind und aus einem darüberliegenden Vorlauftank bzw. einer gemeinsamen Zulaufleitung mit dem Fördergut (Wasser) versorgt werden. Die Druckförderung erfolgt gegen ein Druckbegrenzungsventil mit nachfolgendem Auslaß ins Freie oder Rückführung in den Vorlauftank. Im unteren Bereich des Zentralblockes liegt eine

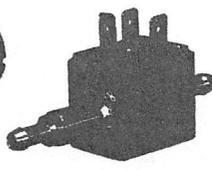
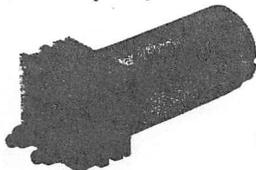
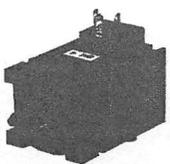
Liquid Technology for Winners

Wenn Flüssiges ganz Ihr Element ist, dann surfen Sie doch mal bei ASF THOMAS vorbei. Sie können nur gewinnen: Durch Flüssigkeitspumpen unterschiedlicher Förderprinzipien vom Spezialisten. Und durch Engineering vom Feinsten mit über drei Jahrzehnten Erfahrung. Wir entwickeln und bauen nicht nur ein breites Sortiment von Standardpumpen für Gase und Flüssigkeiten sondern auch Individuallösungen nach Lastenheft. Bei professionellen Fragen zum Fördern von Flüssigkeiten lohnt sich der Kontakt mit ASF THOMAS allemal. Einfach unsere anwendungstechnische Beratung anrufen unter +49 89 80900-232.



Liquid Pumps by
THOMAS

- Schwingmembranpumpen
- Drehschieberpumpen
- Schwingkolbenpumpen
- Schlauchpumpen



ASF THOMAS®
PUMPEN UND KOMPRESSOREN
First Name in Innovation

ASF THOMAS Industries GmbH · Siemensstr. 4 · D-82178 Puchheim · Telefon +49/89/80900-0 · Fax +49, 89, 808368

Abb. 5 Prototyp der Thermodynamischen Pumpe in einem Labor der Fa. KAMAT, Witten, 1999

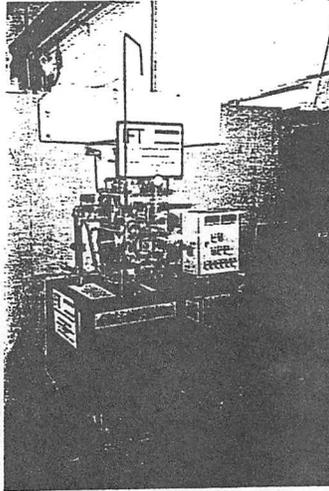


Abb. 5 Prototyp der Thermodynamischen Pumpe

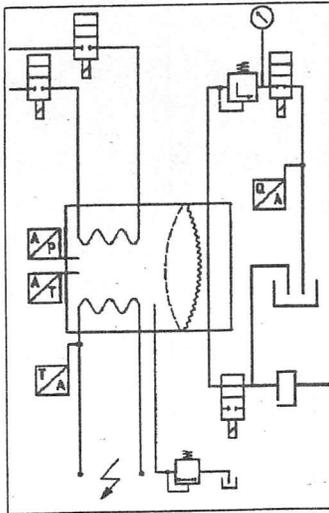
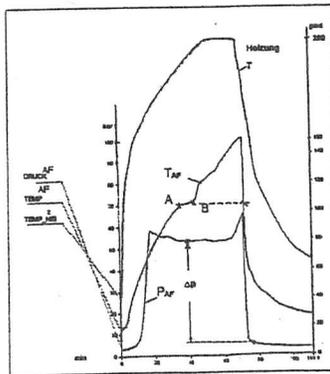
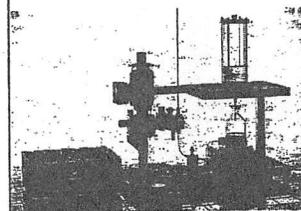
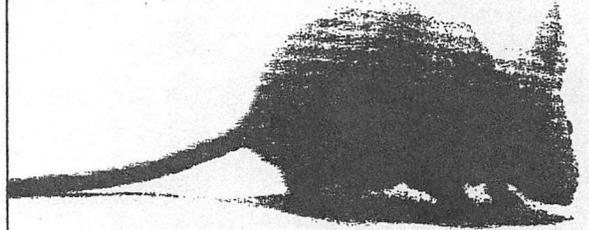


Abb. 6 Temperatur- und Druckverlauf im Arbeitsfluid (AF) während eines Förderzyklus im Prototyp 1 (Abb.5) der Thermodynamischen Pumpe

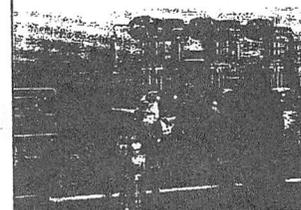


horizontal eingebaute Elektrowendelheizung, darüber gleichfalls horizontal ein Rippenrohr-Kühlwasser-Wärmetauscher so, daß sich eine ausreichende natürliche Konvektion ergibt. Die Absperung der Förderseite wie auch des Kühlwassers erfolgt mittels Magnetventilen, die gleichzeitig zusammen mit der Heizung

Oder brauchen Sie einen Elefanten?



LEWA bietet von der Kleinstmengen-dosierung...



...bis zu großen Förderströmen die für Sie passende Lösung.

Macht auch nichts, zumindest wenn es um das Dosieren oder Fördern von Flüssigkeiten geht.

Unser Leistungsspektrum reicht von 0,001 bis 180.000 l/h bei Drücken bis zu 1200 bar. In dieser Bandbreite, die Ihnen nur LEWA bieten kann, haben wir auch Ihre Pumpenlösung parat.

Von ziemlich klein bis riesengroß bieten wir Ihnen die passende, auf Ihre Anforderungen exakt zugeschnittene Lösung.

Fordern Sie uns. Wir informieren Sie gerne.

LEWA

Ein Unternehmen der
HERBERT OTT - GRUPPE

LEWA Herbert Ott GmbH + Co, Telefon +49 (71 52) 14-0, Telefax 14-13 03
E-Mail: lewa@lewa.de, Internet: www.lewa.de

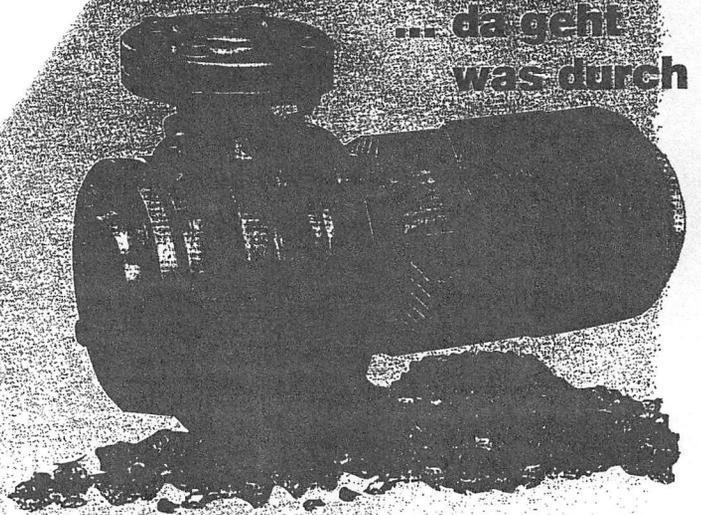
und Kühlung den Pumpvorgang einleiten und steuern. Mit 3 kW Heizleistung und 2 x 0,5 Litern nutzbarem Membrankopfvolumen liefert das Aggregat ca 1 Liter Fördergut pro Takt (Hub), wobei sich Leistung und Wirkungsgrad durch den einstellbaren Gegendruck bestimmen, der hier aus Festigkeitsgründen des Kühlwasser-Wärmetauschers auf etwa 55 bar limitiert ist, ansonsten jedoch ohne weiteres einige Hundert bar betragen könnte.

6. VERSUCHSERPROBUNG

Abbildung 6 zeigt auf der Grundlage eines Meßschiebes den Temperatur- und Druckverlauf im Arbeitsfluid als Funktion der Zeit während eines vollständigen

Förderzyklus. Wenige Minuten nach Einschaltung der Heizung (max. Heizstabtemp. = 280°C) beginnt sich das Arbeitsfluid (AF) schnell zu erwärmen, was zu einem steilen Druckanstieg im Arbeitsfluidraum führt, der erst mit Ansprechen des in diesem Falle auf 60 bar voreingestellten Druckbegrenzungsventiles und mit gleichzeitig einsetzender Förderung endet. Etwa bei 100 °C AF-Temperatur kommt es zu einem Phasenübergang derart,

Produktionsprogramm:
 Normalsaugende Kreiselpumpen
 Selbstsaugende Kreiselpumpen
 Pumpen für Sonderanwendungen
 Druckerhöhungs- und Vakuumanlagen



... da geht was durch

Freistrompumpen zur Flüssigkeits-Feststoff-Förderung

EDUR

EDUR-Pumpenfabrik
 Eduard Redlien GmbH & Co. KG
 Postfach 19 49 · D-24018 Kiel
 Telefon (04 31) 68 98-68
 Telefax (04 31) 68 98-800
<http://www.edur-pumpen.de>
 E-Mail: info@edur-pumpen.de

Produktionsprogramm:
 Normalsaugende Kreiselpumpen
 Selbstsaugende Kreiselpumpen
 Pumpen für Sonderanwendungen
 Druckerhöhungs- und Vakuumanlagen

Anwendungen:
 Abwasser-Verunreinigte Waschlösungen
 spannbelastete Kahlüberzüge
 Kalkmilch-Produktförderung u. a.

Tabelle 1:

Tab.1	Temp.-Diff. ° C	Druck.-Diff. bar	Resultierend nutzbare Volumenänderung in %
	100	100	+ 8
	300	100	+ 28
	300	500	+ 20

daß die AF-Temperatur trotz weiter zugeführter Wärme zeitweilig nicht ansteigt. Das Ende der etwa 60 minütigen Förderphase kündigt sich mit einem neuerlichen Druckanstieg im Arbeitsfluid an, dadurch bedingt, daß die Membranen der Förderköpfe an deren äußerer Wand zur Anlage kommen und damit kein weiteres Expansionsvolumen zur Verfügung steht. Nunmehr erfolgt Zwangsabschaltung der Heizung und Einleitung der Kühlphase, was mit einem schnellen Druckabfall einhergeht, während die Temperaturen sich langsam wieder ihren Anfangswerten nähern.

Als Arbeitsfluid wird in diesem Falle ein polymeres Methyilsiloxan mit einer RT-Viskosität von 6.000 cSt eingesetzt, Fördergut ist Leitungswasser. Die Membranen bestehen aus PTFE.

Tabelle 1 zeigt beispielhaft unter Zugrundelegung der bekannten Stoffwerte des Arbeitsfluides dessen resultierende Volumenänderung bei bestimmten Temperaturdifferenzen und Gegendrücken. (Tab.1)

7. AUSBLICK AUF MARKT UND ENTWICKLUNG

Wegen ihres - isoliert betrachtet - sehr niedrigen Wirkungsgrades von nur wenigen Prozent wird die Thermodynamische Pumpe ihre Chancen bevorzugt in verfahrenstechnisch besonders anspruchsvollen Nischen (Biotechnologie, Elektroindustrie, Chemie, Pharmazie) oder dort finden, wo nahezu unbegrenzt verfügbare und ansonsten überschüssige Wärmeenergie für Aufgaben der fluidischen Hochdruckförderung genutzt werden kann. Es hat sich jedoch auch schon gezeigt,

dass andere Eigenschaften der rein thermodynamischen Förderung, wie die nahezu völlige Geräusch- und Vibrationsfreiheit (bedingt durch fehlende rotierende und oszillierende, mechanische Massen), eine weitgehende Miniaturisierbarkeit (gleichfalls gegeben durch die fehlende Mechanik) sowie die mögliche direkte elektro-thermische Ansteuerung ohne zwischengeschaltete Mechanik in neue Anwendungsgebiete führen, z. B. in der fluidischen Förderung in Satelliten und Weltraumstationen oder in der Labor- und Prozessanalytik (Titration und Chromatographie) bis hin zur Mikrosystemtechnik und des „Lab on Chip“.

Die weitere Entwicklung der thermodynamischen Pumpe wird sich daher aus heutiger Sicht anwenderorientiert auf drei Schwerpunkte konzentrieren:

- I. Identifikation und Entwicklung langzeitstabiler, gegenüber dem jeweiligen Fördergut unproblematischer Arbeitsfluide mit der Fähigkeit zur Ausbildung zweistelliger Differenzvolumina auch unter sehr hohen Drücken. Die Forschungsseite will diese Arbeiten durch molekulardynamische Simulationen auf Rechnern hoher Leistung unterstützen.
- II. Weiterentwicklung der Membrantechnologie in Richtung langfristig zuverlässiger, hochelastischer Stofftrennung mit minimaler wechselseitiger Diffusion (im Gegensatz zu mechano-fluidisch angetriebenen Membranpumpen ist die Membrane der thermodynamischen Pumpe mechanisch wenig und nur niederfrequent beansprucht).

III. Ausbildung spezifischer Technologien schneller Wärmeübertragung und hocheffizienten Wärmeüberganges mit neuen Werkstoffen und langzeitstabilen Oberflächen. Nach 70 Jahren Forschungs- und Entwicklungsarbeit wird derzeit die erste Sonde mit Ionenantrieb (NASA Deep Space One) im weiteren Sonnensystem von einem Xenonstrahl mit 30 km/sec angetrieben und erreicht so die bisher höchsten Geschwindigkeiten im Weltraum - bei nur minimalem Wirkungsgrad auf der Erde.

Wenngleich eine gewisse Analogie zur thermodynamischen Pumpe mit ihrem Verhältnis zur mechanischen Pumpentechnik durchaus gegeben ist, wird doch die Erwartung geteilt, dass es mit ihrer Weiterentwicklung ein klein wenig schneller geht.

8. LITERATUR

DE 196 45 500
Hermetisch dichte thermodynamische Verdrängerpumpe

DE 199 60 685
Triplex-Pumpe Process 03/99
Wärmepumpe einmal anders

CAV 02/99
Ohne mechanischen Antrieb

R.C. Reid, J.M. Prausnitz,
T.K.Sherwood
The Properties of Gases and Liquids

4th ed., Mc Graw-Hill,
New York 1987

Dieser Bericht ist die gekürzte und überarbeitete Fassung eines gemeinschaftlich mit Herrn Prof. Dr. U. Keller, Universität Siegen und Herrn J. G. Sprakel, KAMAT Pumpen auf dem Internationalen Pumpen-Anwenderforum in Karlsruhe im Oktober 2000 gehaltenen Vortrages.

Key No. 43568

INTERNATIONALES PUMPENANWENDERFORUM 2000

KARLSRUHE 10.- 12. OKTOBER 2000

FACHBEITRAG 94 - SEKTION 10

R.L.M.Klopp(1), J.U.Keller(2), R.W.Schmutzler/A.Geiger(3), J.G.Sprakel(4)

DIE THERMOPUMPE :

OHNE MECHANISCHEN ANTRIEB - NUR MIT WÄRME GEGEN DRUCK

Eine hermetisch dichte, rein thermodynamisch arbeitende oszillierende
Verdrängerpumpe fördert auch kritische Fluide gegen hohe Anlagendrucke

ZUSAMMENFASSUNG

Ein mittelständischer Pumpenhersteller und zwei Hochschulinstitute begründen eine Arbeitsgemeinschaft und stellen mit einer rein thermodynamisch arbeitenden Verdrängerpumpe ein neuartiges technisches Konzept zur hermetisch dichten fluidischen Hochdruckförderung vor.

Der thermodynamische Modellprozeß wird zusammen mit zwei technischen Ausführungsvarianten vorgestellt. Details des ersten gebauten Prototypen werden gezeigt und anhand eines aufgezeichneten Versuchslaufes erläutert.

Abschließend wird ein Ausblick auf technische Möglichkeiten und Erfolg versprechende Anwendungen in Industrie und Forschung gegeben.

ABSTRACTS

A privately owned Pump Manufacturer and two University Institutes present in collaboration a new technical concept of hermetically sealed high pressure pumping by means of a purely thermodynamically operating oscillating displacer.

The thermodynamic model process is described as well as two proposals for engineering realisation are given. A first prototype already built is presented and details of the design are explained via description of an original operating record.

Finally the authors provide an outlook on technical opportunities and interesting potential applications both for industrial and research purposes.

1. EINLEITUNG

Steigendes Umweltbewusstsein und eine sich verschärfende Klimadiskussion sind primäre Faktoren des permanenten Druckes auf die verarbeitende Industrie, Prozesse möglichst umweltneutral und mit geringstem Primärenergieeinsatz zu planen.

Leckage- und Kontaminationssicherheit sowie Geräuscharmheit und minimaler Energieverlust ergeben sich hieraus als konkrete technische Forderungen.

Dieser Trend wird sich fortsetzen und bietet dem Anbieter innovativer Lösungen globale Chancen, denn in Zeiten weltumspannend freier Information und Kommunikation werden zwangsläufig auch die Erwartungen der Anwender selbst in Entwicklungsgebieten vom Wissen um das technisch mögliche geprägt.

Im Sommer 1999 begründeten daher die mittelständische KAMAT - Pumpen GmbH & Co KG in Witten/Ruhr, ein Hersteller von Triplex-Verdrängerpumpen, die Lehrstühle für Thermodynamik der Universität Siegen und für Physikalische Chemie der Universität Dortmund sowie als Initiator der Mönchengladbacher Ingenieur Klopp eine Arbeitsgemeinschaft mit dem Ziel, neue Vorschläge für eine hermetisch dichte, rein thermodynamisch arbeitende fluidische Hochdruckförderung im Rahmen eines Entwicklungsprojektes detailliert zu untersuchen und anschließend über geeignete Anwendungen industriell einzuführen.

2. STAND DER TECHNIK

Für den Bereich niedriger Prozeß- und Anlagendrucke (< 30 bar) wie auch für entsprechend niedrige Differenzdrücke im Hochdruckbereich stehen mit magnetisch oder mittels Spaltrohrmotor angetriebenen Kreiselpumpen weitgehend anerkannte Lösungen für eine leakage- und kontaminationsfreie Fluidförderung zur Verfügung. Auch die Hersteller von Membranpumpen der unterschiedlichsten Bauarten erheben für ihre Erzeugnisse diesen Anspruch und bieten für den Fall eines Membranbruches technisch teilweise sehr aufwendige Maßnahmen an, deren Komplexität sicher neue Fragen aufwirft, die hier jedoch nicht diskutiert werden sollen.

Sonderanfertigungen von magnetisch angetriebenen Zahnradpumpen wie auch von Kolbenpumpen mit speziellen Rückführungen bieten für den Einzelfall bereits durchaus akzeptable Angebote zur Hochdruckförderung an, wenngleich eine wirklich überzeugende Lösung der Dichtigkeitsfrage und jener nach absoluter Sicherheit vor wechselseitiger Kontamination zwischen Umwelt und Fördergut noch auszustehen scheint.

3. DAS KONZEPT DER THERMODYNAMISCHEN VERDRÄNGERPUMPE

Die Problematik der Dichtigkeit und Kontaminationssicherheit hat letztlich ihre Ursache in dem jahrtausendealten Verfahren zur Förderung von Flüssigkeiten und Gasen durch mechanisch generierte Energieerhöhung in einem begrenzten, teilweise auch geschlossenen Pumpenraum, in den mechanische Elemente (Kolben, Plunger, Laufräder, Förderschnecken etc.) hineingeführt werden müssen, damit sie dort Arbeit

verrichten können. Die Notwendigkeit der Abdichtung der hineinführenden Antriebe/Verbindungen dieser Elemente (Kolbenstangen, Achsen und Wellen) ist damit die logische Folge dieses Prinzips.

Eine wirklich überzeugende Lösung der Dichtigkeitsfrage scheint daher auch im Bereich der Verdrängermaschinen nur möglich, wenn das problemverursachende Verfahren aufgegeben und eine grundsätzlich andere Vorgehensweise gewählt wird, nämlich in diesem Falle der Verzicht auf jegliche Mechanik (auch die magnetisch angetriebene Kreiselpumpe ist in dieser Hinsicht noch eine Hybridlösung).

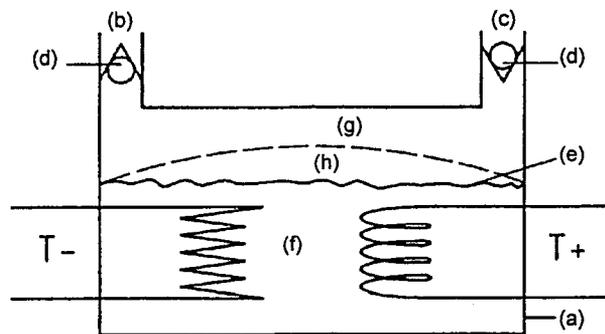


Abb. 1: Prinzip der Thermopumpe

Ein hermetisch abgeschlossener Pumpenraum (a) ist mit einer Anlage nur über eine Saug- oder Zulaufleitung (b) und eine Druck- oder Förderleitung (c) verbunden, die jeweils mit Ventilen (d) ausgerüstet sein können.

Der Pumpenraum wird von einer elastischen Membran (e) aufgeteilt in einen Bereich (f) des sogenannten Arbeitsfluides und in einen Bereich (g), in dem sich das eigentliche Fördergut befindet.

Entweder mittels elektrischer Heizung oder durch Zufuhr vorhandener Wärme aus einer Prozeßanlage wird nun dem Arbeitsfluid thermische Energie zugeführt. Hierdurch vergrößert sich dessen Volumen nach einer Aufheizphase um den Betrag (h), dadurch ermöglicht, daß die Membran eine entsprechende Auslenkung zulässt, wodurch wiederum der äquivalente Volumenbetrag des Fördergutes - auch gegen hohe Anlagendrücke - in die Förderleitung gedrückt wird.

Mit Beendigung der Aufheizung kommt die Ausdehnung des Arbeitsfluides zum Stillstand. Kühlt sich das Arbeitsfluid daraufhin ein wenig ab, so sinkt sein Druck unter den Wert des Förderdruckes und das Druckventil schließt sich. Bei weiterer Abkühlung verringert sich das Volumen des Arbeitsfluides weiter. Gleichzeitig sinkt sein Druck unter den Wert in der Zulaufleitung, wodurch sich das Einlaßventil öffnet und nachströmendes Fördergut in den Pumpenraum einlässt. Dies erfolgt solange, bis das Arbeitsfluid sein Ausgangsvolumen wieder erreicht hat und ein neuer Förderzyklus beginnen kann.

Damit tatsächlich eine Förderung auch gegen hohe Differenzdrücke zustande kommt, ist es von zentraler Bedeutung, daß als Arbeitsfluid Substanzen zum Einsatz gelangen, deren thermischer Ausdehnungskoeffizient auch bei hohen Drücken und Temperaturen noch ausreichend groß gegenüber der jeweiligen Kompressibilität dieser Stoffe ist, ansonsten würde das System nur als hydraulische Feder arbeiten und keinen nutzbaren Volumenstrom liefern.

4. THERMODYNAMISCHER MODELLPROZESS

Die Thermopumpe, Abb. 1, ist ihrem Wesen nach eine Wärmekraftmaschine. In ihr durchläuft das Arbeitsfluid näherungsweise den in Abbildung 1 a dargestellten Kreisprozess.

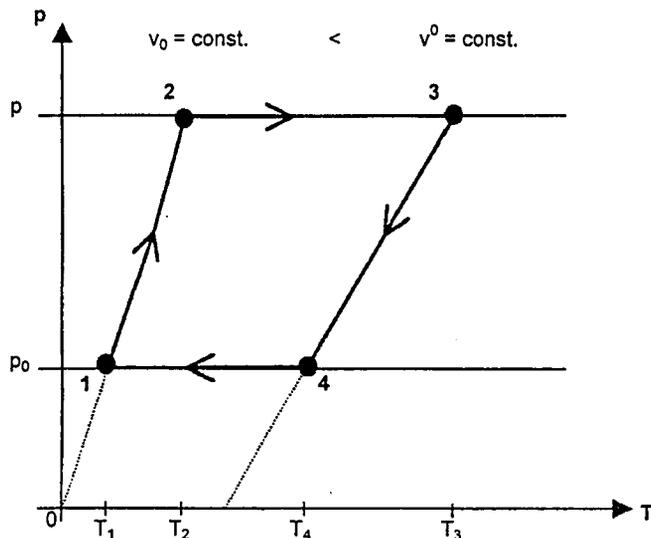


Abb. 1a: Thermodynamischer Modellprozess der Thermopumpe im Druck (p)- Temperatur (T)- Diagramm des Arbeitsfluids. Die Isochoren ($v_0 = \text{const.}$, $v^0 = \text{const.}$) sind näherungsweise Gerade.

Der Prozess besteht aus 4 Teilschritten:

- 1 → 2: Heizen, Isochore Druckerhöhung ($p_0 \rightarrow p$, $v_0 = \text{const}$)
- 2 → 3: Heizen, Isobare Expansion (Arbeitstakt, $p = \text{const}$)
- 3 → 4: Kühlen, Isochorer Druckabbau ($p \rightarrow p_0$, $v^0 = \text{const}$)
- 4 → 1: Kühlen, Isobare Kontraktion (Ansaugtakt, $p_0 = \text{const}$)

Der thermische Wirkungsgrad als Verhältnis der pro Zyklus geleisteten Arbeit zur zugeführten Wärme ist

$$\eta = 1 - \frac{T_4 - T_1 + (1 - \sigma)(T_3 - T_4)}{T_3 - T_2 + (1 - \sigma)(T_2 - T_1)} < 1 \quad \text{mit} \quad \sigma = \frac{\beta^2 (T_1 + T_3)}{2\kappa_T c_p \cdot \rho}$$

Der Parameter σ ist eine stoff- und prozessabhängige Größe, deren Wert wesentlich durch den thermischen Expansionskoeffizienten $\beta = (\partial V / \partial T)_p / V \geq 0$ des Arbeitsfluids und durch dessen isotherme Kompressibilität $\kappa_r = -(\partial V / \partial P)_T / V \geq 0$ bestimmt wird. Numerische Werte bei den Größen und der Dichte ρ des Arbeitsfluids sind für einen mittleren Druck $(p_0 + p)/2$ und eine Mitteltemperatur $(T_1 + T_3)/2$ zu verwenden. Numerische Werte des Wirkungsgrades η liegen etwa im Bereich 5 % - 15 %, vgl. Prozess Abschn. 7.

Soll die Thermopumpe ausgehend von einem Druck p_0 bei einem Druck $p > p_0$ fördern, so muss das Arbeitsfluid mindestens bis zur Temperatur $T_2 = T_1 + (p\kappa/\beta)(1 - (p_0/p))$ aufgeheizt werden. Zur Bestimmung numerischer Werte der thermischen Koeffizienten, Dichten und Wärmekapazitäten einzelner Arbeitsfluide sei auf die Literatur thermophysikalischer Stoffdaten, siehe Abschnitt 9, verwiesen.

5. TECHNISCHE AUSFÜHRUNGEN

Die in Abb.1 gezeigte "Einkammer-Maschine" kann nur eingeschränkt kontinuierlich fördern, nämlich solange, bis das aufgrund gegebener Temperatur- und Druckgradienten maximal erzielbare Differenzvolumen des Arbeitsfluides "aufgebraucht" ist. Die Fördercharakteristik selbst ist dabei allerdings frei wählbar, da sie z.B. nicht von der Sinus-Amplitude eines Kurbeltriebes geprägt wird, sondern lediglich Intensität und zeitlicher Verlauf der Aufheizung des Arbeitsfluides und der dafür notwendigen Wärmeübertragung hierfür bestimmend sind.

Für eine permanent kontinuierliche Förderung wird man jedoch gekoppelte Systeme wählen, von denen zwei grundsätzlich unterschiedliche Varianten in Ausbildung als Triplex-Anordnung hier vorgestellt werden sollen:

5.1. Kombinierte Parallel- und Reihen-Schaltung von Einkammer-Maschinen

Wie Abb.2 zeigt, fördern drei identische Pumpen in eine gemeinsame Druckleitung und werden ebenso aus einer gemeinsamen Zulaufleitung versorgt, während die thermische Ansteuerung und auch ggfs. die Rückkühlung der Arbeitsfluidvolumina sequentiell (aus gemeinsamen oder getrennten Wärme- bzw. Kältespeichern) erfolgt.

Wie Abb.3 zeigt, kann so mittels geeigneter zeitlicher Überschneidung der Ansteuerung der Einzelpumpen nahezu jeder beliebige Kennlinienverlauf ($V_i = f(t)$) erzielt werden, von absolut gleichförmiger Förderung bis hin zu gezielt einsetzbaren Peaks, wie man sie beispielsweise injektionshalber fordern wird.

Grundsätzlich gestattet die Unabhängigkeit der Thermodynamischen Pumpe von mechanischen Antrieben jedoch beliebig viele Kombinationsmöglichkeiten ihrer Verkettung, und zwar nicht nur auf der hydraulischen Seite, sondern insbesondere auch von der Ansteuerung her. Dem Systemplaner bieten sich von daher heute im einzelnen noch nicht eingrenzbar neue Möglichkeiten!

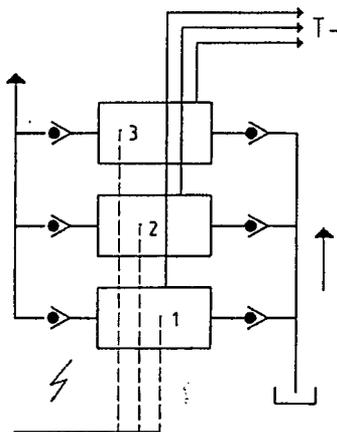


Abb.2: Parallelschaltung dreier Thermodynamischer Pumpen zur Erzielung einer quasikontinuierlichen Förderung

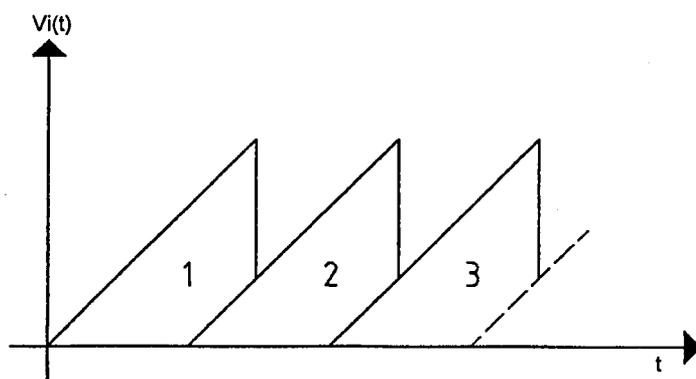


Abb.3: Mögliche Fördercharakteristik der Einzelpumpen in der Parallelschaltung nach Abb.2

5.2 Funktionstrennung von Hydraulik und Thermodynamik

Abbildung 4 zeigt wie Abb.2 wiederum eine Triplex-Anordnung, mit welcher drei Membranköpfe (1) aus einer gemeinsamen Zulaufleitung hydraulisch "versorgt" werden und ebenso in eine gemeinsame Förderleitung einspeisen:

Nach dem Prinzip des "Bäumchen wechsele Dich" - Spieles arbeitet diese Anordnung in dreifacher Taktfolge ähnlich einer konventionellen, um 120 Grad Kurbelwinkel verschränkten Triplex-Kolbenpumpe. Jedem Membrankopf ist ein gleich großes Arbeitsfluidvolumen zugeordnet, das mittels eines zentralen Steuerblockes (5) und einer Steuereinheit (6) nacheinander dem Hochdruck-Wärmetauscher (2) zugeführt und anschließend in einem Niederdruck-Zwischenbehälter (4) vorgekühlt bzw. solange "geparkt" wird, bis es im dritten Takt dem Kühler (3) zugeführt wird.

Damit die zeitlich immer aufwendige Rückkühlung, während der das Arbeitsfluid drucklos ist, in einem kosten- und baugrößengünstigen Niederdruck-(z.B. Platten-)kühler (3) erfolgen kann, sind hier Aufheizung und Rückkühlung baulich voneinander und auch von den fördernden Membranköpfen getrennt, so daß nur die Komponenten in druckfester Bauweise ausgeführt werden müssen, die während der Aufheizung/Förderung einem hohen Innendruck ausgesetzt sind.

Ein weiterer Vorteil der baulichen Trennung wird darin gesehen, daß nur noch die Volumenänderung des Arbeitsfluides an die fördernden Membranköpfe weitergegeben wird, nicht jedoch die Temperaturänderung. Auch diese Anordnung kann vom Planer beliebig ergänzt und rekombiniert werden.

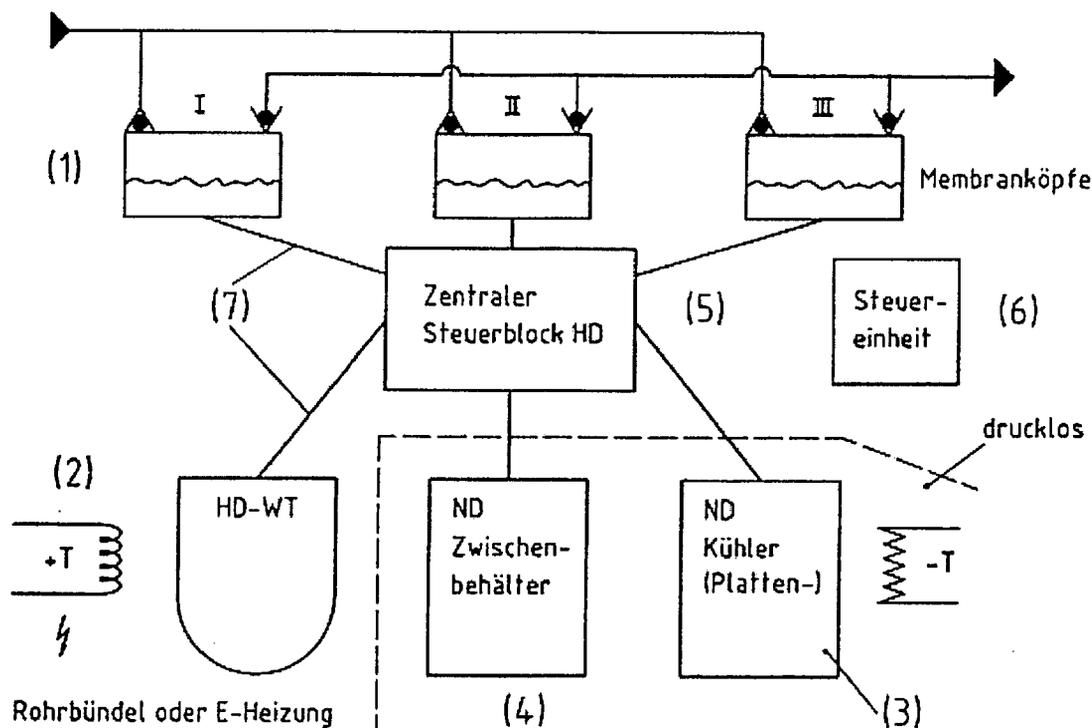


Abb.4: Parallelschaltung dreier Thermodynamischer Pumpen (Triplex-Anordnung) mit zentralen thermischen Einheiten zum periodischen Heizen und Kühlen des Arbeitsfluides.

6. FUNKTIONSMODELL/PROTOTYP EINER EINKAMMERMASCHINE

Abbildung 5 zeigt das im Herbst 1999 von KAMAT gebaute Aggregat mit einem etwa 15 Liter Arbeitsfluid fassenden Zentralblock aus Stahl und zwei seitlich angeflanschten Membranköpfen, deren Förderseiten hydraulisch verbunden sind und aus einem darüberliegenden Vorlauftank bzw. einer gemeinsamen Zulaufleitung mit dem Fördergut (Wasser) versorgt werden. Die Druckförderung erfolgt gegen ein Druckbegrenzungsventil mit nachfolgendem Auslaß ins Freie oder Rückführung in den Tank.

Im unteren Bereich des Zentralblockes liegt eine horizontal eingebaute Elektrowendelheizung, darüber gleichfalls horizontal ein Rippenrohr-Kühlwasser-Wärmetauscher so, daß sich eine ausreichende natürliche Konvektion ergibt. Die Absperrung der Förderseite wie auch des Kühlwassers erfolgt mittels Magnetventilen, die gleichzeitig zusammen mit der Heizung und Kühlung den Pumpvorgang einleiten und steuern.

Mit 3 kW Heizleistung und 2 x 0,5 Litern nutzbarem Membrankopfvolumen liefert das Aggregat ca 1 Liter Fördergut pro Takt(Hub), wobei sich Leistung und Wirkungsgrad durch den einstellbaren Gegendruck bestimmen, der hier aus Festigkeitsgründen des Kühlwasser-Wärmetauschers auf etwa 50 bar limitiert ist, ansonsten jedoch ohne weiteres einige Hundert bar betragen könnte.

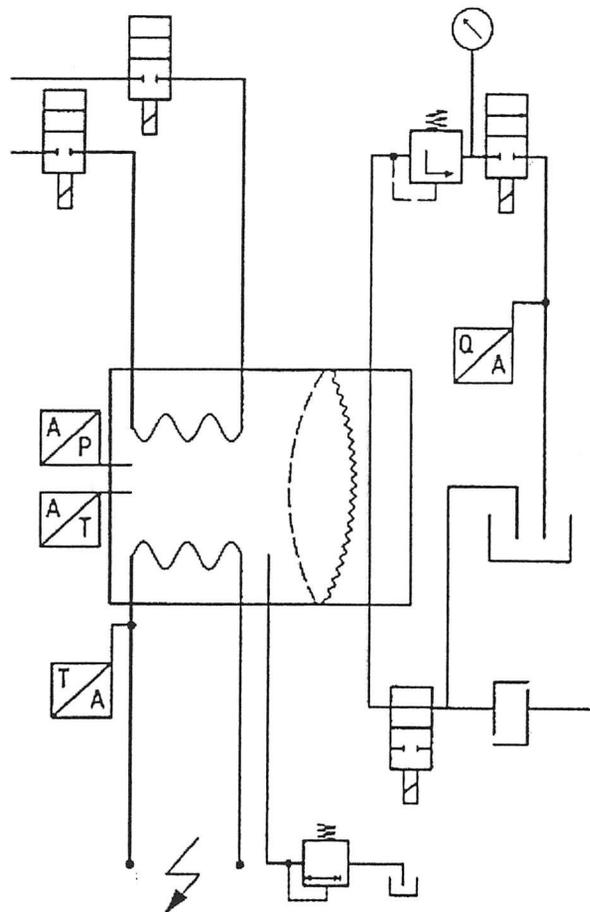
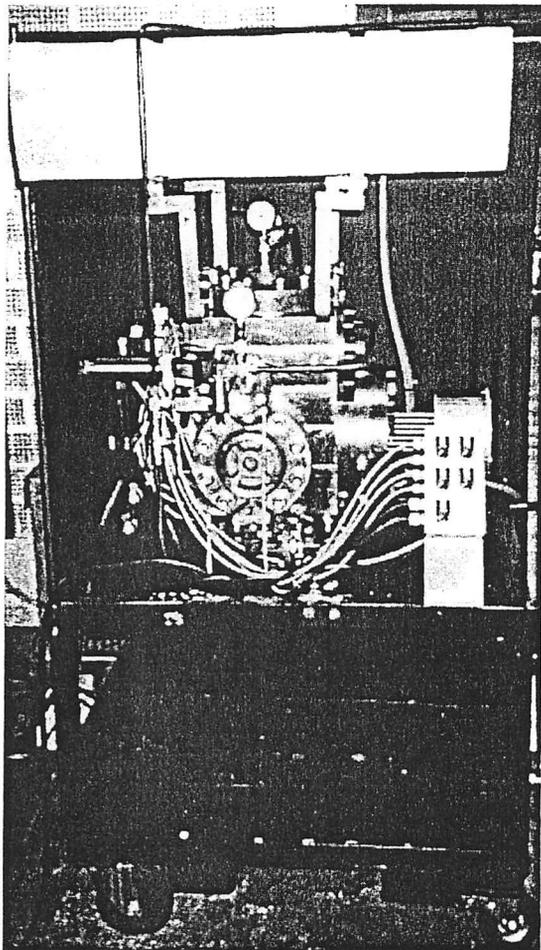


Abb.5: Prototyp der Thermodynamischen Pumpe in einem Labor der Fa. KAMAT, Witten, 1999

7. VERSUCHSERPROBUNG

Abbildung 6 zeigt auf der Grundlage eines Meßschiebes den Temperatur- und Druckverlauf im Arbeitsfluid als Funktion der Zeit während eines vollständigen Förderzyklus. Wenige Minuten nach Einschaltung der Heizung (max. Heizstabtemp. = 280°C) beginnt sich das Arbeitsfluid (AF) schnell zu erwärmen, was zu einem steilen Druckanstieg im Arbeitsfluidraum führt, der erst mit Ansprechen des in diesem Falle auf 60 bar voreingestellten Druckbegrenzungsventiles und mit gleichzeitig einsetzender Förderung endet. Etwa bei 100 °C AF-Temperatur kommt es zu einem Phasenübergang derart, daß die AF-Temperatur trotz weiter zugeführter Wärme zeitweilig nicht ansteigt. Das Ende der etwa 60 minütigen Förderphase kündigt sich mit einem neuerlichen Druckanstieg im Arbeitsfluid an, dadurch bedingt, daß die Membranen der Förderköpfe an deren äußerer Wand zur Anlage kommen und damit kein weiteres Expansionsvolumen zur Verfügung steht. Nunmehr erfolgt Zwangsabschaltung der Heizung und Einleitung der Kühlphase, was mit einem schlagartigen Druckabfall auf den Ausgangswert einhergeht, während die Temperaturen sich langsam wieder ihren Anfangswerten nähern.

Als Arbeitsfluid wurde in diesem Falle ein polymeres Methylsiloxan (Bayer AG) mit einer RT-Viskosität von 6.000 cSt eingesetzt, Fördergut war Leitungswasser. Die Membranen bestanden aus PTFE. Tabelle 1 zeigt beispielhaft unter Zugrundelegung der bekannten Stoffwerte des Arbeitsfluides dessen resultierende Volumenänderung bei bestimmten Temperaturdifferenzen und Gegendrücken.

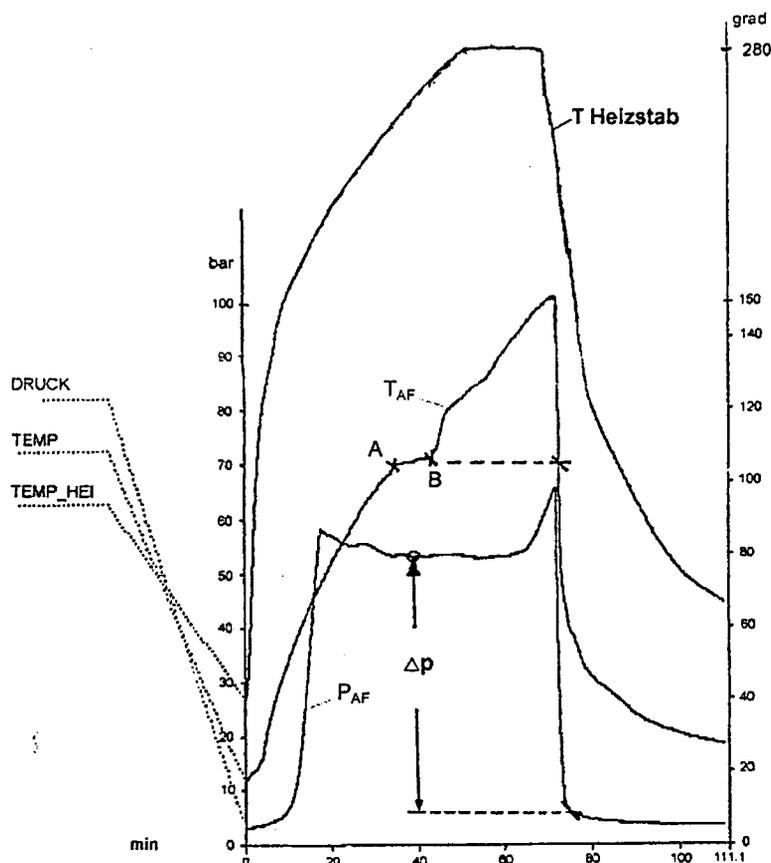


Abb.6: Temperatur- und Druckverlauf im Arbeitsfluid (AF) während eines Förderzyklus im Prototyp 1 (Abb.5) der Thermodynamischen Pumpe

Tab.1	Temp.-Diff. ° C	Druck.-Diff. bar	Resultierend nutzbare Volumenänderung in %
	100	100	+ 8
	300	100	+ 28
	300	500	+ 20

8. AUSBLICK ENTWICKLUNG UND MARKT

Wegen ihres - isoliert betrachtet - niedrigen Gesamtwirkungsgrades wird die Thermodynamische Pumpe ihre Chancen nicht in der Breitenanwendung, sondern in technisch besonders anspruchsvollen Nischen (Biotechnologie, Elektronikindustrie, Chemie, Pharmazie) oder dort finden, wo ansonsten überschüssige Prozeßwärme jetzt für Aufgaben der Hochdruckförderung genutzt werden kann.

Die Autoren werden die Plattform der Achema 2000 nutzen (Halle1.2, Stand D1), hierzu weitere Erkenntnisse zu sammeln und diese dann im Rahmen dieses Berichtes bekannt geben.

Ebenso werden weitere Erkenntnisse zu geeigneten Arbeitsfluiden mit einem Programm molekulardynamischer Untersuchungen zur Entwicklung neuartiger Designer-Arbeitsfluide vorgestellt, die bei Drucklegung dieses Preprints noch nicht vorlagen.

9. LITERATUR

DE 196 45 500	Hermetisch dichte thermodynamische Verdrängerpumpe
DE 199 60 685	Triplex-Pumpe
Process 03/99	Wärmepumpe einmal anders
CAV 02/99	Ohne mechanischen Antrieb

R.C. Reid, J.M. Prausnitz, T.K. Sherwood
4th ed., Mc Graw-Hill, New York 1987.

The Properties of Gases and Liquids

10. AUTHOREN

1. Dipl.-Ing. Rainer L.M. Klopp
KAMAT-Pumpen GmbH & Co KG
Salinger Feld 10
D-58454 Witten
Kamatrkl@aol.com

2. Prof.Dr.Jürgen.U.Keller
Institut für Fluid- und Thermodynamik
Universität Siegen
D-57068 Siegen
keller@ift.maschinenbau.uni-siegen.de

3. Prof.Dr.R.W.Schmutzler
Prof.Dr.A.Geiger
Institut für Physikalische Chemie
D-44227 Dortmund
nch055@pop.uni-dortmund.de

4. Dipl.-Ing.Jan G.Sprakel
KAMAT-Pumpen GmbH & Co KG
Salinger Feld 10
D-58454 Witten
Kamatrkl@aol.com

PUMP USERS INTERNATIONAL FORUM - PUMP CONGRESS 2000

10.-12. OCTOBER 2000 KARLSRUHE GERMANY

PAPER 94 - SECTION 10

R.L.M.Klopp(1), J.U.Keller(2), R.W.Schmutzler/A.Geiger(3), J.G.Sprakel(4):

THE THERMOPUMP :

WITHOUT MECHANICAL DRIVE - AGAINST PRESSURE ONLY BY HEAT

A hermetically sealed, purely thermodynamically operating oscillating displacer is delivering even critical fluids into high pressure systems

ABSTRACTS

A privately owned Pump Manufacturer and two University Institutes are presenting in collaboration a new technical concept of hermetically sealed high pressure pumping by means of a purely thermodynamically operating oscillating displacer.

The thermodynamic model process is described as well as two proposals for engineering realisation are given. A first prototype already built is presented and details of the design are explained via description of an original operating record.

Finally the authors provide an outlook on technical opportunities and interesting potential applications for both industrial and research purposes.

ZUSAMMENFASSUNG

Ein mittelständischer Pumpenhersteller und zwei Hochschulinstitute begründen eine Arbeitsgemeinschaft und stellen mit einer rein thermodynamisch arbeitenden Verdrängerpumpe ein neuartiges technisches Konzept zur hermetisch dichten fluidischen Hochdruckförderung vor.

Der thermodynamische Modellprozeß wird zusammen mit zwei technischen Ausführungsvarianten vorgestellt. Details des ersten gebauten Prototypen werden gezeigt und anhand eines aufgezeichneten Versuchslaufes erläutert.

Abschließend wird ein Ausblick auf technische Möglichkeiten und Erfolg versprechende Anwendungen in Industrie und Forschung gegeben.

1. INTRODUCTION

Increasing concern on environmental matters and intensified discussions about climatic variation are primary factors of the permanent pressure onto the manufacturing industries to design processes as protective as possible for the environment and to run them with minimum consumption of resources of primary energy.

So far safety for leakages and contamination as well as low noise levels and minimum energy consumption are definite resulting demands from the above.

This trend will continue and it offers global chances for the providers of innovative solutions as today's free access to information and communication is shaping the expectations of the users on technical matters even within the third world.

Therefore during summer 1999 the privately owned company KAMAT at Witten/Ruhr, Germany, a manufacturer of triplex reciprocating pumps, the Institute of Thermodynamics of the University Siegen, the Institute of Physical Chemistry of the University Dortmund and R.L.M. Klopp, Research Engineer from Mönchengladbach, Germany as initiator started a cooperation with the goal of investigating new proposals for hermetically sealed, purely thermodynamically operating high pressure pumping and to transplant them into the industries thereafter via suitable applications.

2. STATE OF THE ART

For the low pressure range (< 30 bar) in process plants and even for similarly low differential pressures within the high pressure area centrifugal pumps with magnetic drive or with canned motors offer extensively accepted solutions with respect to hermetically sealed pumping without any risk of contamination. Also the manufacturers of diaphragm pumps of various different designs claim to fulfil those demands for their products. To protect the users for the consequences of failures of diaphragms they offer partly very costly solutions, the complexity of which raises new questions which however will not be discussed here.

Special designs of magnetically driven gear pumps as well as those of piston pumps with special drain returns provide acceptable technical offers available in special cases of high pressure pumping, although a really convincing solution for tightness and safety for contamination between environment and pumping media seems to be still missing.

3. THE CONCEPT OF THE THERMODYNAMIC DISPLACEMENT PUMP

The difficulty of sealing and safety for contamination is finally caused by the millenium years old practice of mechanically induced increase of energy of the conveyer-fluid within a limited, partly even closed pumping chamber by means of introducing mechanical elements (pistons, plungers, impellers, conveyor spirals etc.) in order to let them work therein. So far the necessity of sealing the connecting drives/rods is the logic consequence of this practice.

Also within the range of positive displacement machines, a really convincing solution of the problem of tightness however, only seems to be possible by giving up the problem-causing principle and choosing a basically different way of making things happen. In this case, that is the relinquishment of any mechanics. (The magnetically driven centrifugal pump is also a hybrid-solution so far). The basic idea of the thermodynamic pump is sketched in Fig.1.

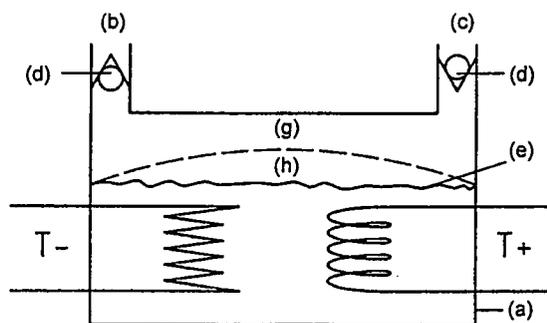


Fig.1: Thermodynamic Pump

A hermetically sealed pump chamber (a) is connected to a process installation only by a suction (b) and a discharge line (c), both of which can incorporate valves (d).

The pump chamber is divided by an elastic diaphragm (e), separating the so-called working-fluid area (f), whereas the remaining space (g) is filled with the liquid to be pumped (conveyer-fluid).

The heat is induced into the working fluid area, either by means of an electric heater or by using the waste heat of a process plant. The set up in Fig.1 allows the working fluid to expand even against the pressure in the discharge line and consequently the amount of expanded volume (h) is fed into the discharge line.

If heating is stopped, so the expansion process of the working fluid. This causes a pressure drop inside the working fluid that consequently leads the discharge valve to get closed. By starting cooling at the same time, the working fluid volume diminishes up to the starting level causing opening of the suction valve and refilling of the pump chamber until a new heating/pumping sequence will follow.

To really achieve pumping against high differential pressures it is important that working fluids are used whose thermal expansion coefficients at high pressures and at high temperatures are high enough versus their equivalent compressibility rates. Otherwise the system only would work as a hydraulic spring and never generate a usable discharge volume.

4. THERMODYNAMIC PROCESS

The Thermopump, Figure 1, basically is a heat power engine in which the working fluid performs a cyclic process as sketched in Figure 1a.

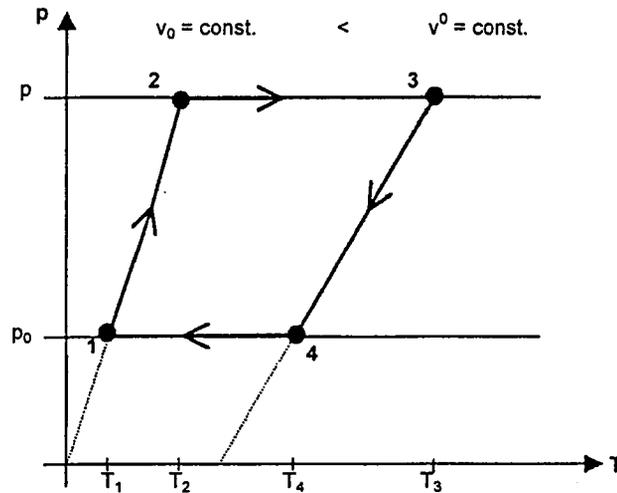


Fig. 1a: Thermodynamic cycle process of the working fluid of a Thermopump. The isochores ($v_0 = \text{const}$, $v^0 = \text{const}$) are approximately straight lines.

The cycle process consists of 4 steps:

- 1 → 2: Heating: Isochoric increase of pressure ($p_0 \rightarrow p$, $v_0 = \text{const}$)
- 2 → 3: Heating: Isobaric expansion ($v_0 \rightarrow v_0$, $p = \text{const}$)
- 3 → 4: Cooling: Isochoric depressurization ($p \rightarrow p_0$, $v^0 = \text{const}$)
- 4 → 1: Cooling: Isobaric contraction ($v_0 \rightarrow v_0$, $p_0 = \text{const}$)

The energetic coefficient of performance (COP), i. e. the ratio of the mechanical work delivered by the process to the heat supplied to it is

$$\eta = 1 - \frac{T_4 - T_1 + (1 - \sigma)(T_3 - T_4)}{T_3 - T_2 + (1 - \sigma)(T_2 - T_1)} < 1 \text{ with } \sigma = \frac{\beta^2 (T_1 + T_3)}{2\kappa_T c_p \cdot \rho}$$

The parameter σ depends on thermophysical properties of the working fluid as well as on process temperatures. Indeed, its numerical value strongly depends on the thermal expansion coefficient of the working fluid $\beta = (\partial V / \partial T)_p / V \geq 0$ and the isothermal compressibility $\kappa_T = -(\partial V / \partial P)_T / V \geq 0$, as well as on the isobaric specific heat capacity c_p and the fluids density ρ . Numerical values of these quantities always should be taken at mediate pressures $(p_0 + p)/2$ and temperatures $(T_1 + T_3)/2$ of the process. Numerical values of η are in the range of 5 % - 15 %, cp. Section 7.

If the Thermopump, starting from a state of low pressure p_0 and temperature T_1 , is to operate at a given higher pressure $p > p_0$, the working fluid has to be heated up to at least the temperature $T_2 = T_1 + (p\kappa/\beta)(1 - (p_0/p))$.

Numerical values of all the thermophysical quantities used should be chosen carefully and calculated only by methods recommended in literature, cp. Sect. 9.

5. TECHNICAL VARIANTS

The "one-chamber-machine" sketched in Fig.1 is able to deliver a continuous pressure flow only for a short time, i.e. until the maximum value of the differential volume of the working fluid is reached, achievable due to given temperature- und pressure gradients. It should be realized that the characteristic of the discharge flow can be controlled and very flexibly can be changed by intensity and duration of the heat supply (and the related heat transfer process) to the working fluid. This is in contrast to crank driven pumps which are bound to sinus-sequence motions and flows.

To achieve permanent continuous flow conditions coupled systems will be chosen exhibiting basically different design. Triplex-versions of both variants are presented below.

5.1 Parallel and series coupling of one-chamber-machines

As shown in Figure 2 three identical pumps are delivering fluid into a common discharge line and are fed by a common suction line as well. The thermal drive and control and also - eventually - the recooling of the working fluid are performed sequentially (out of common or separated heat or refrigeration reservoirs respectively).

As shown in Figure 3 nearly every arbitrary discharge characteristic ($V_i = f(t)$) can be met by choosing a suitable overlap of the thermal drive of the single pumps. The pattern achievable herewith ranges from nearly constant flows up to specifically usable peaks as, for example, may be needed for injections.

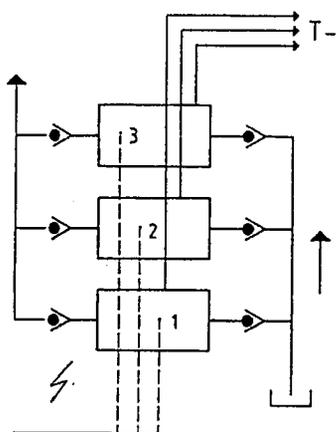


Fig.2: Arrangement of 3 Thermopumps in parallel to achieve nearly constant conveyer-fluid flow.

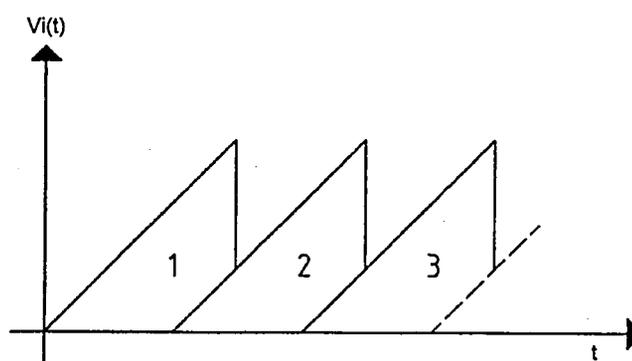


Fig.3: Potential volume flow of conveyer-fluid in the individual Thermopumps (1,2,3) arranged in parallel according to Fig.2.

5.2. Separation of hydraulics and thermodynamics

In Figure 4, similarly to Fig. 2, another triplex-array is sketched. Here three diaphragm heads (1) are fed through a common suction line and are discharging into a common delivery line as well.

The installation operates clockwise within a triple sequence similar to a conventional triplex reciprocating machine with 120 degree crank split. To each head an identical mass of working fluid is attributed that is switched via a central valve block (5) and control unit (6) one after another. First, the working fluid is supplied to the heat exchanger (2) for expansion, then to the low pressure container (4) for pre-cooling and "parking" and after this within the third sequence to the cooler (3).

Heating and cooling of the working fluid are separated from each other and also from the delivering diaphragm heads. This is done, to realize the cooling process, which often is time-consuming, at low pressure which would allow to use low cost and small size plate cooling equipment. This also ensures that only those components need to be designed in a pressure-resistant manner which are subjected to high pressure during the phase of heating resp. delivery.

A further advantage of the separation between heads and heat exchangers is seen by the fact that only the volume increase of the working fluid is transmitted to the delivery heads but not its increase of temperature. The arrangement sketched in Fig.4 also may be added on or changed arbitrary by the design engineer.

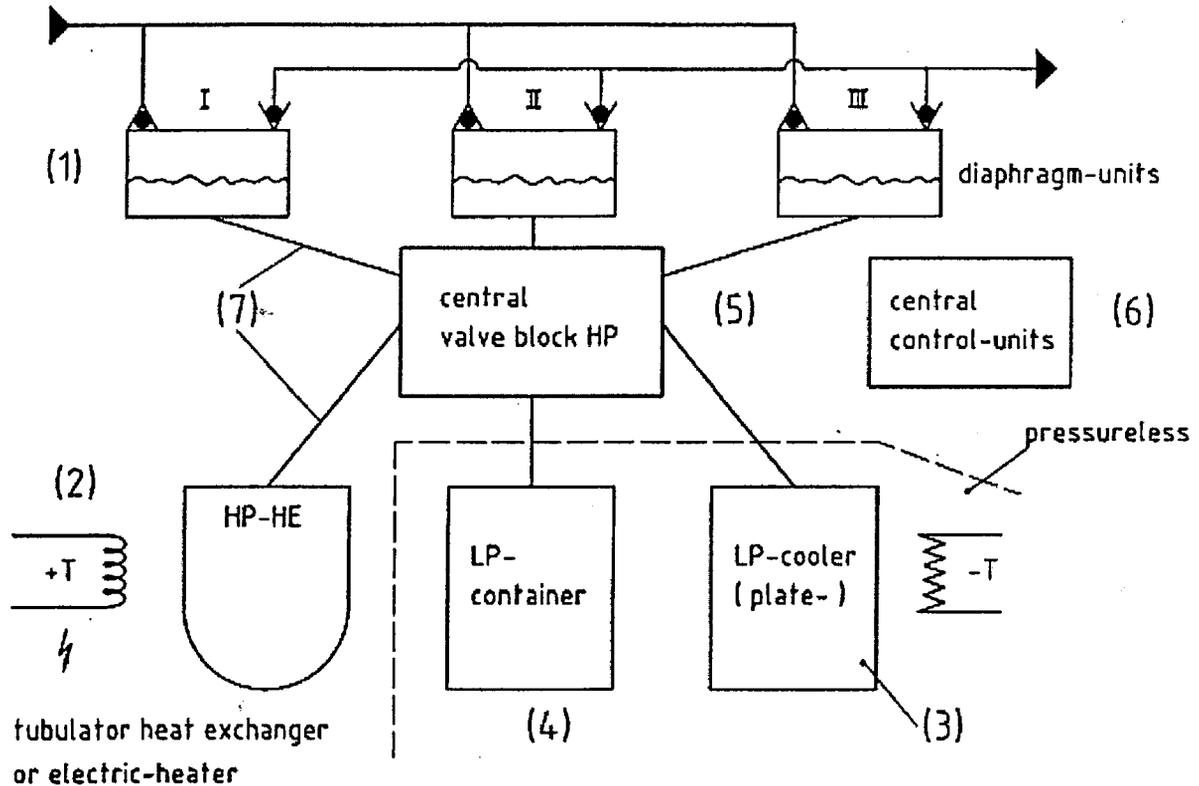


Fig.4: Parallel arrangement of three thermodynamic pumps (Triplex-array) with central thermal units for heating and cooling of the working fluid.

6. FIRST PROTOTYPE OF A ONE - CHAMBER - MACHINE

Figure. 5 shows the apparatus built by Kamat in autumn 1999. It consists of a central unit that carries approximately 15 Liters of working fluid inside. At the vertical planes two diaphragm heads are attached, hydraulically connected at their discharge outlets and fed by a header tank on top resp. through a common feeding line. The discharging is performed via a pressure limiting valve with subsequent outlet into the open or return to the tank.

Inside the central block we installed at the bottom an electrical spiral heater and on top of it a cooling heat exchanger in a way that ensures sufficient natural convection. Closing of the pumping lines and of the cooling lines is done by solenoid valves which introduce and control the pumping sequence together with heating and cooling.

With 3 kW heating power and $2 \times 0,5$ Liters usable diaphragm-volume the apparatus delivers approximately one liter pumped fluid per sequence. Performance and efficiency are given by the set pressure which actually is limited to approximately 50 bars due to the material of the cooler, otherwise it could be some hundred bars without any problems.

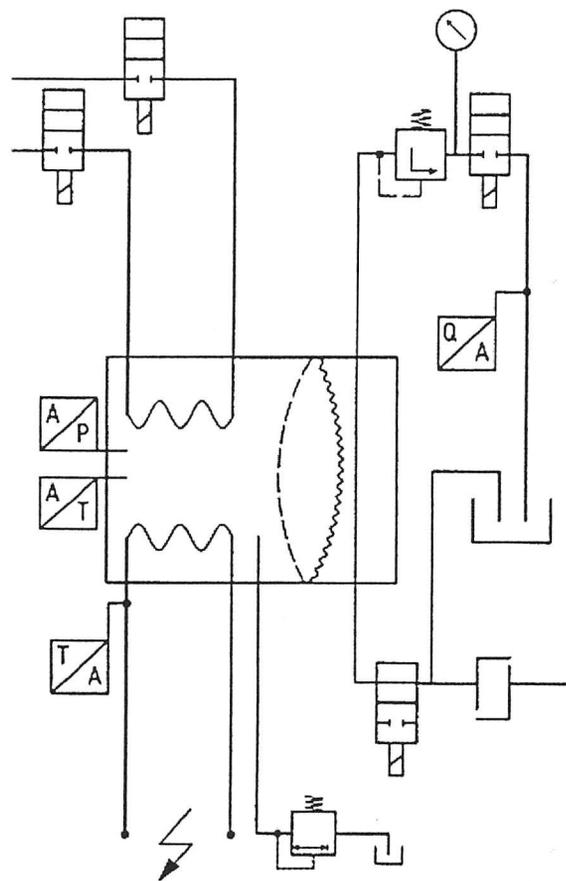
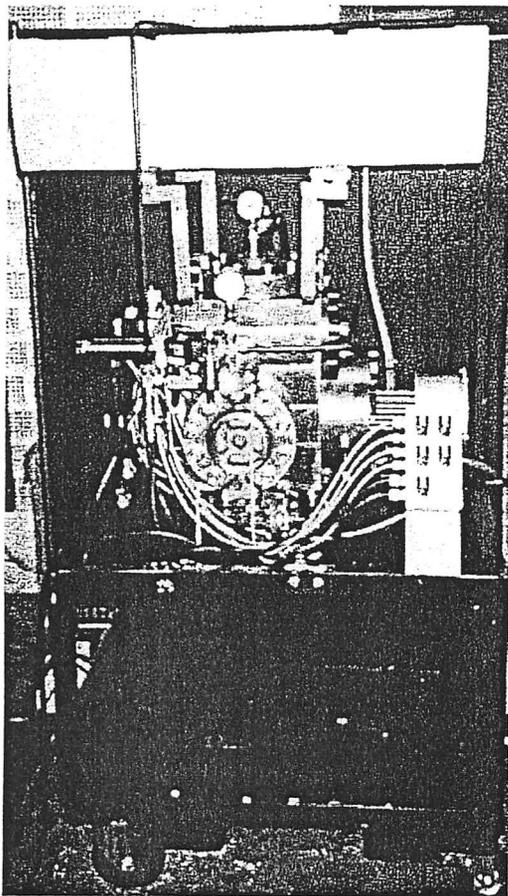


Fig.5: The Prototype of the thermodynamic pump in one of the laboratories at KAMAT, Witten, 1999.

7. Tests

Based on a test record the run of temperature and pressure inside the working fluid during a complete pumping sequence are shown in Figure 6. Within few minutes after start of heating (max. heater temperature = 280 °C) the working fluid is warming up very fast. This causes a sharp incline of pressure inside the working fluid which stops when the pressure limiting valve opens and the pumping procedure starts.

At approximately 100 centigrades a phase-transition inside the working fluid was recorded, proven by the fact that temperature did not increase for a certain period of time although heating continued.

After approximately 60 minutes the end of the pumping sequence is announced by a further pressure increase inside the working fluid given by the diaphragms touching the inner walls of the heads and consequently closing their inlet and outlet ports to limit the expansion volume for the working fluid. At this moment heating was stopped und cooling was started which caused a sharp pressure drop as well and consequently the temperature slowly approaches its initial value again.

As working fluid we used polymer methylsiloxan (Bayer AG) with an ambient viscosity of 6.000 centiStokes. Pumping media was pure water. The diaphragms were made of PTFE. For example, table 1 shows the expected change of volume of the working fluid used based on its known characteristics and calculated for certain differences in temperatures and pressures.

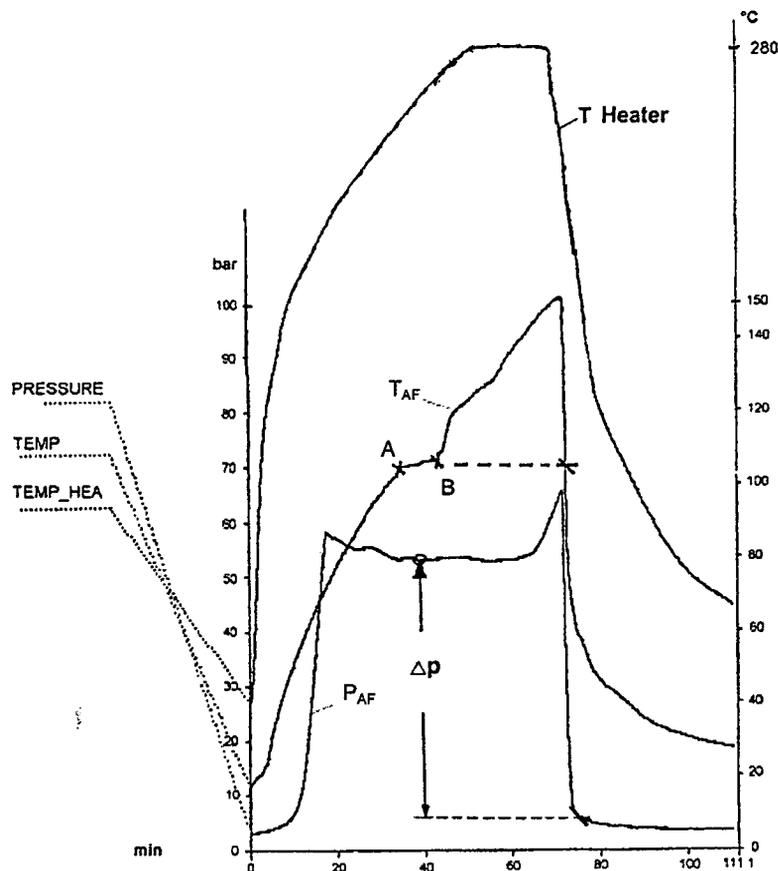


Fig.6: Run of temperatures and pressure inside the working fluid during a pumping sequence

Tab. 1	Temp.-Difference °C	Pressure Diff. bar	Expectd.resulting usable change of volume %
	100	100	+ 8
	300	100	+ 28
	300	500	+ 20

8. OUTLOOK ONTO DEVELOPMENT AND MARKETS

Because of its low overall efficiency the thermodynamical pump is expected to raise its chances not in broad field applications but in technically challenging niche-applications (Biotechnology, Manufacturing of Semiconductors, Chemical and Phramaceutical Industries) and in plants where surplus process heat can now be used for purposes of high pressure pumping.

The authors intent to use the platform of Achema 2000 to collect further information and will provide it within this report.

Also further information will be provided with regard to suitable working fluids by showing a program for molecular-dynamic research to develop new designer working fluids which is not yet available at this time of issuing the pre-print.

9. LITERATURE

DE 196 45 500	Hermetically sealed thermodynamical reciprocating pump
DE 199 60 685	Triplex-Pump
Process 03/99	Heat Pump by another way
CAV 02/99	Without mechanical drive

R.C. Reid, J.M. Prausnitz, T.K. Sherwood
4th ed., Mc Graw-Hill, New York 1987

The Properties of Gases and Liquids

10. THE AUTHORS

1. Dipl.-Ing.Rainer L.M. Klopp
KAMAT-Pumpen GmbH & Co KG
Salinger Feld 10
D-58454 Witten
Kamatrkl@aol.com

2. Prof.Dr.Jürgen U.Keller
Institute Fluid- and Thermodynamics
University of Siegen
D-57068 Siegen
keller@ift.maschinenbau.uni-siegen.de

3. Prof Dr.R.W.Schmutzler
Prof.Dr.A.Geiger
Institute of Physical Chemistry
D-44227 Dortmund
nch055@pop.uni-dortmund.de

4. Dipl.-Ing.Jan G.Sprakel
KAMAT-Pumpen GmbH & Co KG
Salinger Feld 10
D-58454 Witten
Kamatrkl@aol.com