Wärmebetriebene ORC-Wärmepumpe mit einer Schraubenmaschine

Dipl.-Ing. **J. Westermann,** Roskilde/Dänemark

Zusammenfassung

Eine wärmebetriebene Rankine/Rankine Wärmepumpe mit einer integrierten Schraubenmaschine mit R 114 als Arbeitsmedium werden beschrieben.

Vorteile und Nachteile beim Konzept nebst den teoretischen und praktischen Ausgeführten Versuchsarbeiten werden beschrieben. Außerdem die Bauweise der einzelnen Komponenten sowie das Regelungs- und Meßsystem werden beschrieben.

Die erreichten Meßresultate von den ersten hundert Betriebsstunden werden dargestellt.

1. Einleitung

1.1 Algemein

Das Projekt, das hier noch näher beschrieben wird, wird mit finanzieller Unterstützung des dänischen Energieministeriums durchgeführt. Die einleitenten Untersuchungen und Modellberechnungen, darunter Analysen im Hinblick auf einer Festlegung einer Versuchsanlage haben 1981 angefangen.

Im Jahre 1983 sind eine Reihe von Betriebsversuchen mit dazugehörigen Messungen durchgeführt worden, der eigentliche Hintergrund der Versuchsergebnisse, die näher im Punkt 5 beschrieben sind.

Das zur Zeit laufende Projekt mit dem unter Punkt 1.2 spezifizierten Inhalt wird Mitte des Jahres 1985 rapportiert und beendet.

Das Projekt wird von Risö in Zusammenarbeit mit der Firma Thomas Ths. Sabroe sowie der Dänischen Technischen Hochschule durchgeführt.

Die Grundlage ist das Verhältnis, daß die meisten Öl- und Gasfeuer ungen nur 80% der Energie vom zugeführten Brennstoff ausnützen und daß man auf die Eigenschaft verzichtet, einen Teil dieser Energie zur mechanischer Arbeit konvertieren zu können. Hiermit erreicht man in Wirklichkeit eine sehr schlechte Ausnützung von der nach und nach teuereren Primärenergie und sieht von den Möglichkeiten ab, neue Systeme zu entwickeln die sich zu Heizzwecken besser eignen.

Das Ziel dieses Projektes ist eine kleine wärmebetriebene Rankine/Rankine Wärmepumpeanlage zu entwickeln sowie eine näher festgelegten Demonstrationsbetrieb durchzuführen. Die Anlage arbeitet mit einer Leistungszahl grösser als 1 im Verhältnis zu der angewendeten Primärenergie d.h. es produziert mehr Wärmeenergie als es verbraucht an Betriebsenergie.

Das grundsätzliche Prinzip der Anlage ist kurz erwähnt, daß ein Schraubenexpander durch einen thermodynamischen Arbeitsprozess ein Teil der zugeführten hochtemperierten Wärmeenergie in mechanische Energie umwandelt. Diese treibt eine Wärmepumpe, die durch den Wärmepumpenprozess dem System niedertemperierte Wärmeenergie von außen zuführt.

Der Aufbau der Versuchsanlage ist im Bild 1 und 4 dargestellt.

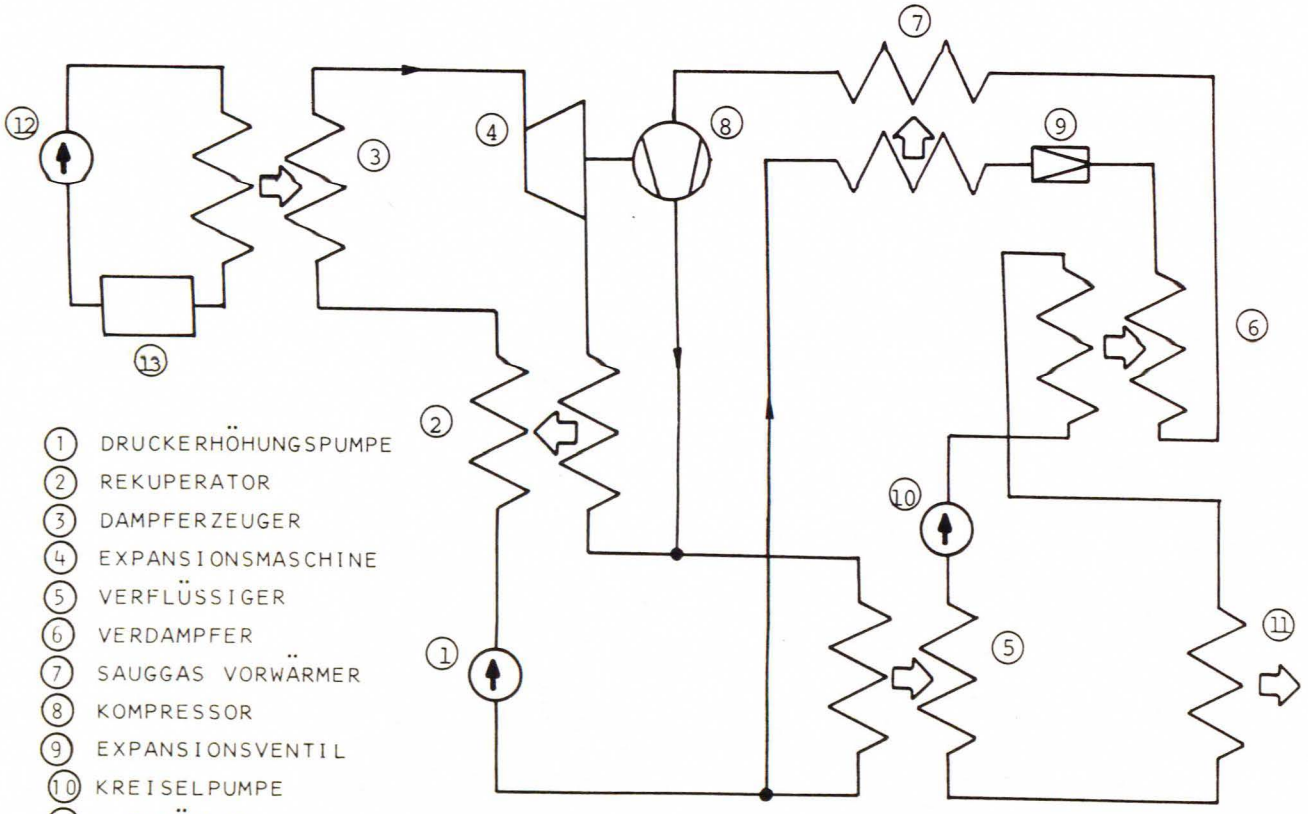


BILD 1. ANLAGENSCHEMA DER WÄRMEBETRIEBENE WÄRMEPUMPE

1.2 Zielsetzung

Die Absicht mit diesem Projekt ist:

- Spezifikation, Entwicklung und Aufbau einer Rankine/Rankine wärmebetriebener Wärmepumpe, hinsichtlich Primärenergie für Heizungszwecke sparen zu können. Das Projekt, das jetzt Aktualität hat auf Grund einer Umlegung auf Erdgas, zielt auf eine Entwicklung von einem System mit großer Betriebssicherheit, niedrigen Wartungs- und Unterhaltungskosten sowie einer langen Lebensdauer. Das System sollte eine Wärmeproduktion von 50-200 KW verfügen.
- Untersuchen, sowie ein detailliertes Wissen zu erwerben ist über ein Wärmepumpenkonzept basiert auf zwei kombinierten Rankine Prozessen mit einem Fluorkohlenwasserstof als Arbeitsmedium.
- Analysen, über mögliche organische Arbeitsmedien, sowie Untersuchungen mit extremen Temperaturen unter dynamischen Bedingungen.
- Regulier ungstechnische Untersuchungen, Entwicklung von Regulier ungssystemen und Komponenten.
- Untersuchungen über Energieeinsparungen.
- Investition und Wirtschaftlichkeitsanalysen.

Schätzt man die Resultate der ersten Phase des Projektes positiv, ist das auf längerer Sicht die Absicht, die einzelnen Komponenten dieses Systems weiter zu entwickeln um das System zu optimieren, beispielsweise ein direkt gefeuerter Dampfgenerator und eine effektive Schraubenmaschine.

1.3 Vor- und Nachteile

Eine spezielle interessante Lösung von vielen Problemen die normalerweise auftreten mit einer direkt gefeuerten Wärmepumpe, ist ein geschlossenes System, wo die Funktionen im Rankine Prinzip zu Grunde liegen. Die Vorteile bei einer Rankine/Rankine Wärmepumpe mit einer kombinierten Schraubenmaschine kann in folgenden summiert werden:

- Grosse Betriebssicherheit, niedrige Unterhaltungskosten und lange Lebensdauer.
- Keine Vibrationen.
- Geschlossenes System.
- Freie Brennstoffwahl nachdem der Dampfgenerator extern gefeuert wird.
- Relativ hoher Wirkungsgrad Bild 8 und damit große Energieeinsparungspotentiale.
- Klein in der Größe, 50 - 200 KW. Nach oben hin in der Praxis keine Begrenzungen.
- Einfache Achseldichtung zwischen Wärmepumpe- und Arbeitskreislauf, indem die gleichen Arbeitsmedien in beiden Prozessen angewendet werden.
- Hoher Wirkungsgrad unter Voll- und Teillastbedingungen.
- Bivalent-System.

Die größten und unmittelbaren Nachteile bei diesem System sind:

- Begrenzte Temperatur und Druck im Arbeitsprozess und hiermit Wirkungsgrad.
- Optimierung von dem totalem System unter Voll- und Teillastbedingungen verlangt bedeutsame Analysen, Untersuchungen und Experimenten.
- Kompliziertes Reguliersystem
- Totale Anlage und Erstehungskosten sind relativ hoch.

1.4 Ausgeführte Arbeit

In der ersten Phase dieses Projektes bis heute, wo die ersten Betriebsversuche abgeschlossen sind, sind folgende Arbeiten ausgeführt worden.

- Spezifikation und Wahl eines geeigneten Arbeitsmediums.
- Detaillierte thermodynamische Untersuchungen vom Arbeitsprozess und Wärmepumpenprozess.

- Ein Computerprogramm ist geschrieben worden, teils zur Berechung des totalen Wirkungsgrad, teils zu Parameteruntersuchungen. Das Programm, das Rücksicht nimmt auf die Öl- und Kühlmittelmischung ist entwickelt worden im Hinblick auf die zukünftige konstruktive und systemmäßige Entwicklungsarbeit.
- Spezifikation und Aufbau eine Versuchsanlage.
- Durchführung eines festgelegten Meßprogramm.

1.5 Auslegungsdaten

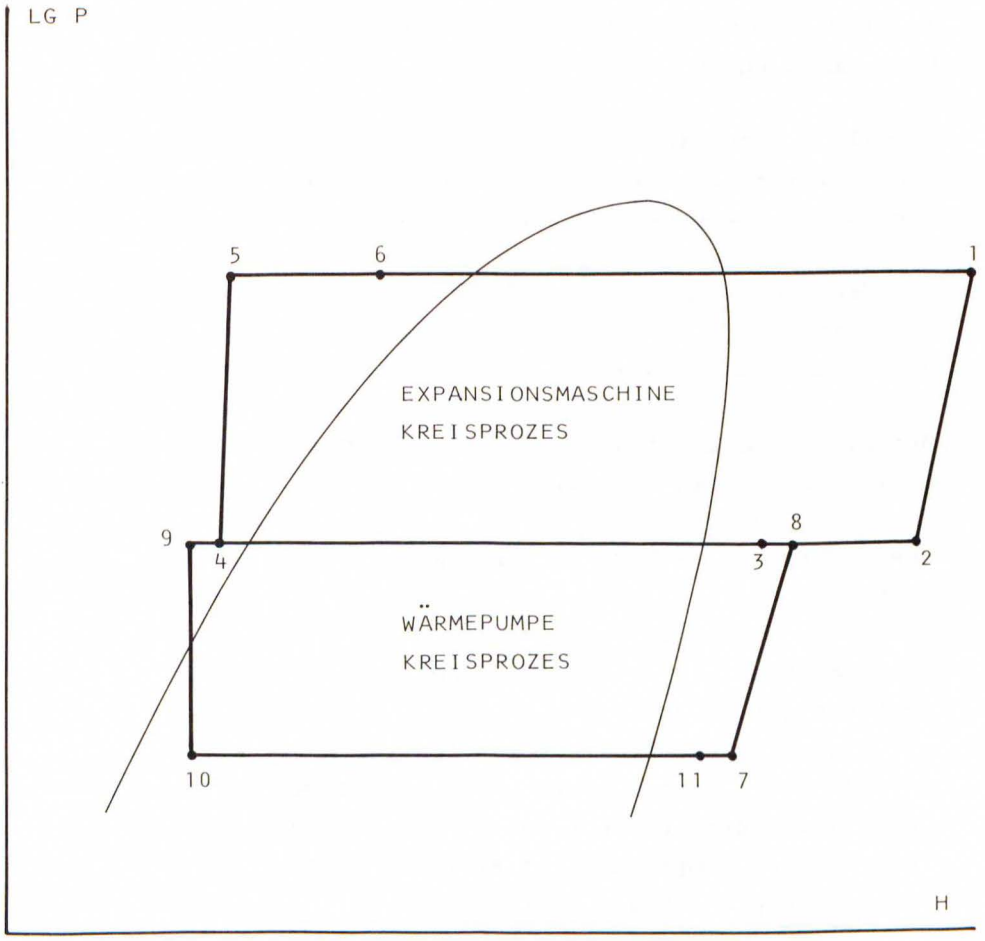
Die technischen Daten der Versuchsanlage sind an eine Schraubenmaschine angepaßt, leihweise zu Versuchen verfügbar von SRM in Schweden.

Wärmeträger	BP Transcal N
Temperatur	160°C
Arbeitsstof (ORC)	R 114
Dampfgeneratortemp./-druck	140°/26 bar
Verflüssigungstemp./-druck	40°C/3,4 bar
Verdampfungstemp./-druck	- 10 bis 10°C/ 0,6 bis 1,3 bar
Schraubenexpander/-kompressor	Ölgeschmiert
Schmieröl Mobil SHC 234	10 Vol. %
Volumenverhältnisse	4,5/3,2
Teoretisches Füllvolumen	0,019/0,516 dm^3/umdr.
Drehzahl	4000/6000 min
Kühlmedium	Wasser

2. Beschreibung

2.1 Funktion

Der prinzipielle Aufbau der Anlage kann dem Bild 1 entnommen werden. Im Bild 4 ist ein detailliertes Anlagenschema dargestellt. Bild 5 und 6 zeigt die Wärmepumpen Versuchsanlage.



1-2 EXPANSIONSMASCHINE
2-3 REKUPERATOR (GASKÜHLUNG)
3-4 VERFLÜSSIGER (ARBEITSPROZES)
4-5 DRUCKERHÖHUNGSPUMPE
5-6 REKUPERATOR (FLÜSSIGKEITS-VORWÄRMUNG)
6-1 DAMPFERZEUGER
7-8 KOMPRESSOR
8-4 VERFLÜSSIGER (WÄRMEPUMPE-PROZES)
4-9 UNTERKÜHLUNG (FLÜSSIGKEIT)
9-10 EXPANSIONSVENTIL
10-11 VERDAMPFER
11-7 GASÜBERHITZUNG

BILD 2.
LG P-H DIAGRAM DER WÄRMEBETRIEBENE WÄRMEPUMPE

Im Bild 2 sind die kombinierten Kreisprozesse im lg p, h Diagramm dargestellt.

Im Bild 3 sind die Zustandsgrößen für die Kreisprozesse in einem charakteristischen Betriebspunkt zusammengestellt. Die Punkte beziehen sich zum Bild 2.

Die dem Dampfgenerator zugeführte thermische Energie erfolgt über den Wärmeträger Heizöl bei 160°C. Dabei wird R 114 unter einem Druck von max. 26 bar vorgewärmt, vollständig verdampft und auf 140°C überhitzt. Dieser hochgespannte überhitzte Dampf gelangt über einen Dampf-Speicher in einen Schraubenexpander und wird dort arbeitsleistend auf den Verflüssigungsdruck von 3,4 bar entspannt. Der um ca. 30°C überhitzte R 114-Dampf verläßt den Schraubenexpander und durchströmt einen Rekuperator, in dem die Überhitzungswärme teilweise abgegeben und zur Vorwärmung der R 114 Flüssigkeit genutzt wird. Unter der Wärmeabfuhr im wassergekühlten Verflüssiger, wird der R 114 Dampf bei 40°C kondensiert und nur einige °C unterkühlt. Das flüssige R 114 wird danach mittels einer Zahnradpumpe vom Verflüssigungsdruck auf Dampfgeneratordruck gebracht und gelangt über den Rekuperator in den Dampfgenerator zurück. Damit ist der Kreislauf des Arbeitsprozesses geschlossen.

Die an dem Schraubenexpander freiwerdende mechanische Energie dient zum Direkt-Antrieb des Schraubenkompressors, der den bei niedrigem Druck von 0,6 bis 1,3 bar im Verdampfer entstehenden R 114-Dampf ansaugt und in den gemeinsamen Verflüssiger drückt. Von dem im Verflüssiger aus beiden Kreisläufen anfallenden Kondensat, wird ein Teilstrom über den Sauggas-Austauscher und das Expansionsventil dem Verdampfer zugeführt.

Der angesaugte Dampf, wird hierbei vor dem Kompressor überhitzt.

Im Verdampfer verdampft das R 114 Kondensat bei einer Temperatur von -10°C bis + 10°C. Damit ist der Wärmepumpenkreislauf geschlossen.

2.2 Belastungsvariation

Die Versuchsanlage ist so aufgebaut, daß verschiedene Belastungssituationen erprobt werden können. Dieses geschieht durch einer Änderung der Verdampfertemperatur indem ein Teil des Kondensatorkühlwassers mit Wasser vom Verdampferkreislauf gemischt wird. Hierbei, ist es möglich eine Wiedergabe der Wärmequelle bei verschiedener Temperaturen zu erreichen. Gleichzeitig ist es möglich die Kondensatorbedingungen zu ändern, durch eine Änderung der Volumenströme und Temperaturen des Kühlwassers.

Die varierenden Belastungen ändern natürlicherweise des Kompressors Effektverbrauch, der mit Regelung der Volumenströme durch die Flüssigkeitspumpe geregelt wird.

2.3 Arbeitsmedium

Bei der Wahl von Arbeitsmedium für eine Rankine/Rankine Wärmepumpe muß bemerkt werden, daß der Wirkungsgrad für das System mit dem Unterschied zwischen maximal Prozesstemperatur und Kondensatortemperatur für den Arbeitsprozess

Pkt.	T	P	h	s
	°C	bar	KJ/Kg	KJ/Kg °K
1	145,2	20	430,7	1,6426
2	68,1	2,9	384,3	1,6006
3	34,5	2,9	358,8	1,5219
4	23,1	2,8	222,7	
5	25,5	21,6	225,2	
6	67,8	20,5	270,3	
7	22,1	0,7	353,0	1,5685
8	68,1	2,9	384,3	1,6006
9	21,0	2,8	220,6	
10		1,2		
11	20,1	0,8	351,5	1,5569

Bild 3. Zusammenstellung der Zustandgrößen in den Kreisprozessen

steigt. R 114 ist auf Grundlage einer Reihe von gewünschten Eigenschaften gewählt worden.

Streng genommen ist nur eine Eigenschaft, die notwendigerweise erfüllt werden sollte, nämlich die Forderung für hinreichend thermische Stabilität bei der höchsten Prozesstemperatur in Verbindung mit angewandten Konstruktionsbaustoffen. Dazu sollte bemerkt werden, daß die thermische Stabilität für Fluorkohlenwasserstoff normalerweise verringert wird durch das Vorhandensein von Schmieröl.

In der Versuchsanlage ist mit Rücksicht auf die Schraubenmaschine etwa 10 vol. % Schmieröl zugesetzt worden. Dieses hat weitgehend Anleitung dazugegeben, auf einer Reihe Konstruktionserwägungen und im Großen und Ganzen bei der konstruktiven Ausformung mitgewirkt.

Bei der Wahl des Arbeitsmediums ist in der Versuchsanlage folgendes berücksichtigt worden:

- Das Medium darf nicht giftig, nicht brennbar oder explosionsgefährlich sein.
- Das Medium sollte chemisch inaktiv sein d.h. es darf nicht Konstruktionsbaustoffe oder Materialien in der Umgebung angreifen.
- Gute thermische Stabilität in Anwesenheit von Schmieröl.
- Gute thermodynamische Eigenschaften und zugängliche thermodynamische Daten so daß Anlageberechungen durchgeführt werden können.
- Temperatur und Druck relationen sollten für beide Prozesse akzeptiert werden können.
- Das Medium sollte billig und zugänglich sein.

2.4 Anlagekomponenten

Die Anlage ist überwiegend aus Standardkomponenten aufgebaut, wo zu einem späteren Zeitpunkt abhängig von den Versuchsergebnissen Modifikationen erbringen, um die Wirtschaftlichkeit optimieren zu können.

Der Dampfgenerator ist ein Rohrbündel Wärmeaustauscher mit geschweißtem Schwimmkopf speziell ausgeformt für den Transport von Schmieröl. Der Arbeitsstoff strömt gegensinnig in zwei Durchgängen in Stahlrohren, die mit einem Aluminium-Sternprofil versehen sind, um das Wärme übertragende Areal steigern zu können.

Umlenksegmente werden auf der Heizölseite verwendet und das Flächenverhaltnis beträgt 0,4.

Der Kondensator ist ein Rohrbündelwärmeübertrager mit äußerlich berippten Cu-Rohren. Der Arbeitsstoff wird auf der Außenwand der Rohre verflüssigt. Das Kühlwasser strömt in vier Durchgängen in den Rohren durch. Das Flächenverhaltnis beträgt 3.6.

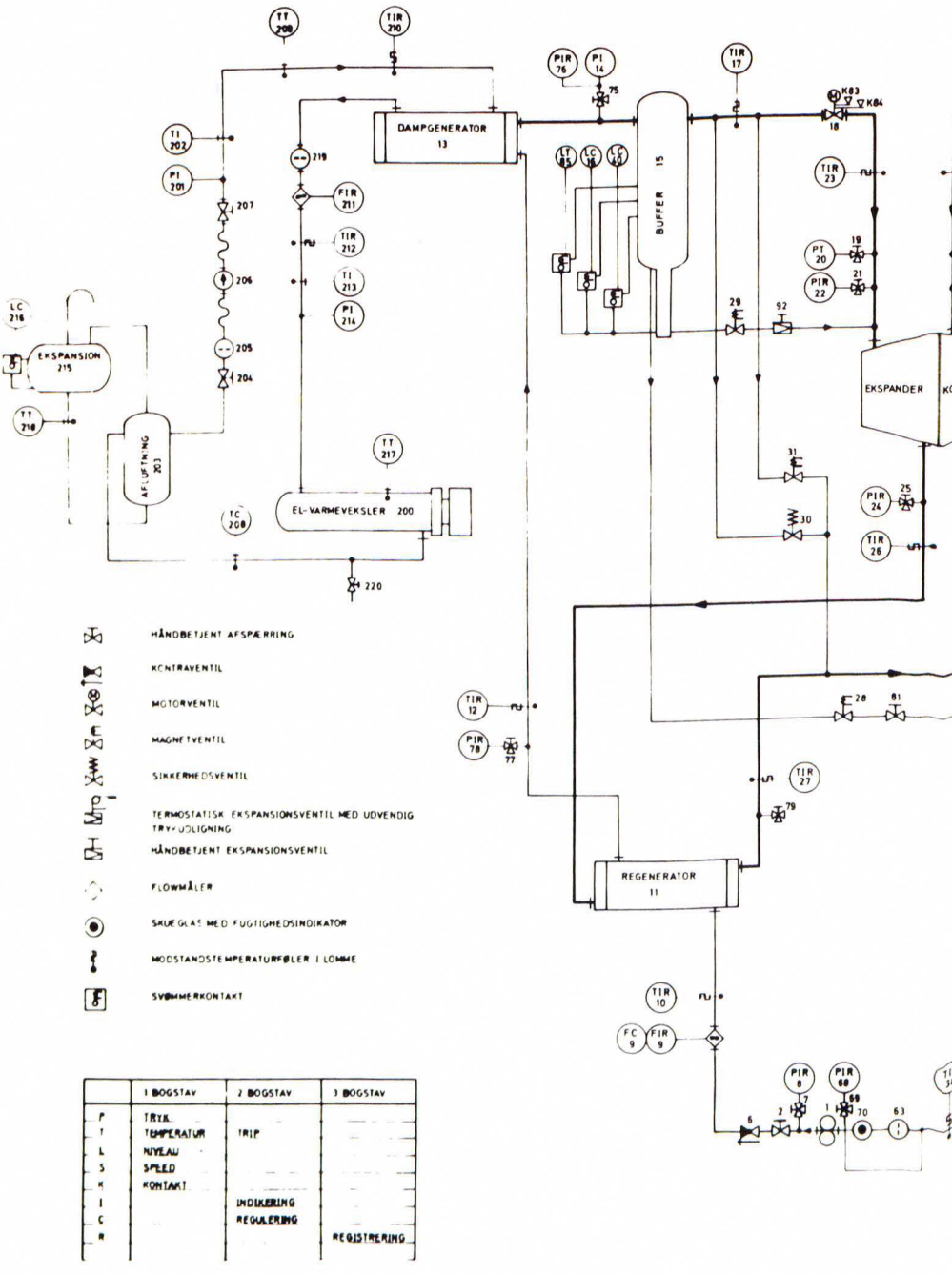
Die Flüssigkeitspumpe ist eine Zahnradpumpe mit Kunstkohlenlagern. Der Volumenstrom im Arbeitsprozess und hiermit die Leistung der Wärmepumpe wird bei der Änderung der Drehzahl geregelt.

Die Wärmeversorgung wie gezeigt im Bild 5 ist elektrisch beheizt und hat eine Leistung von 115 KW. Als Wärmeträger wird ein Wärmeübertragungsöl verwendet.

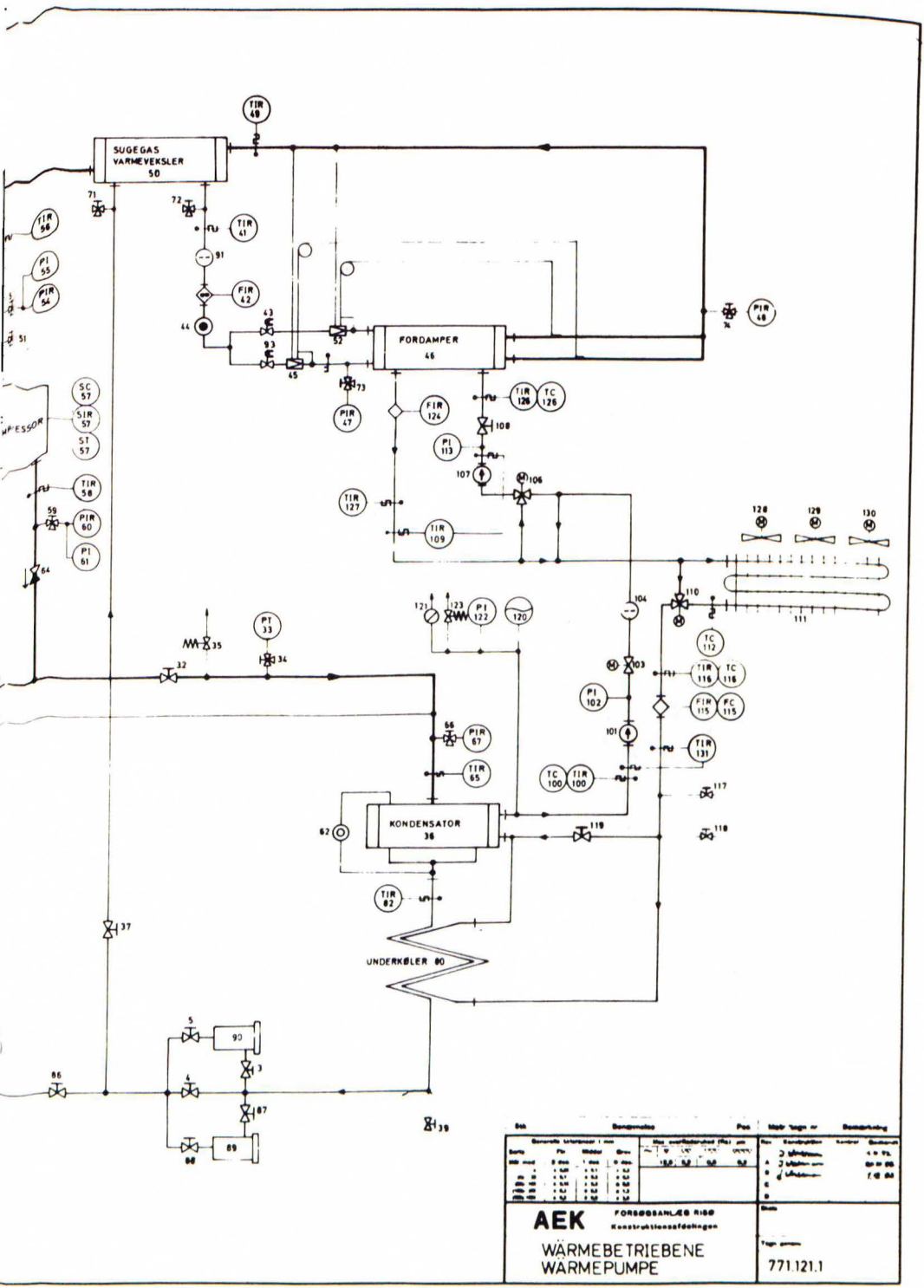
Die Heizwärme der Wärmepumpe wird in einem Kühler an die Luft abgeführt. Als Wärmeträger wird Wasser verwendet. Das Kühlsystem ist teilweise im Bild 6 dargestellt.

3. Regelung- und Meßsystem

Das Regelungssystem basiert auf einen schwedischen Prozesscomputer, der für die Regelung von Ventilations- und Klimaanlagen konstruiert ist.



	1 BOGSTAV	2 BOGSTAV	3 BOGSTAV
P	TRYK		
T	TEMPERATUR	TRIP	
L	NIVEAU		
S	SPEED		
K	KONTAKT		
I		INDIKERING	
C		REGULERING	
R			REGISTRERING


SUGEGAS VARMEVEKSLER 50
FORDAMPER 46
KONDENSATOR 36
UNDERKØLER 90
AEK
FORSØGSANLÆG RISØ
Konstruktionsafdelingen
WÄRMEBETRIEBENE WÄRMEPUMPE
771.121.1

Die besonderen Anforderungen an das System waren:
- Sequenzsteuerung
- PID Regler
- Festwert- und Kaskadenregelkreise
- Schnelle Änderungen von Sollwerten
- Umkuplung von Regelgrößen und Änderung von Parametern
- Zusammenkuplung mit einem Microcomputer für Datenerfassung
- Hand-Betrieb

Der Prozesscomputer ist einem ABC80 Microcomputer angeschlossen. Von dem Microcomputer können verschiedene Regler-Parameter , Sollwerte sowie die Sequenzsteuerung geändert werden. Das Regelungs- und Meßsystem ist im Bild 11 dargestellt.

Eine Reihe Programme sind entwickelt, teils zur Lagerung und teils zur laufenden Berechnunge von allen bedeutenden Betriebsdaten, sowie Rapportausschreibung.

In der Versuchsanlage sind 39 Meßpunkte angebracht wo Temperatur, Druck und Durchfluß gemessen werden. Die Meßpunkte und ihre Standorte sind im Bild 4 aufgezeichnet.

4. Betriebserfahrungen

Die Anlage hat bis jetzt ohne Schwierigkeiten von besonderer Art etwas weniger als 100 Betriebsstunden gelaufen. Am Anfang waren einige Komponentenfehler aufgetreten, sie scheinen aber jetzt gelöst zu sein. Der Einbau von Expansionsventilen hat anfänglich Anleitung zu Drehzahlschwankungen gegeben und damit Schwierigkeiten bei der Datenbehandlung.

5. Meßergebnisse

Die Leistungen der Anlage bei varierender Verdampfertemperaturen und Belastungen sind im Bild 7 dargestellt.

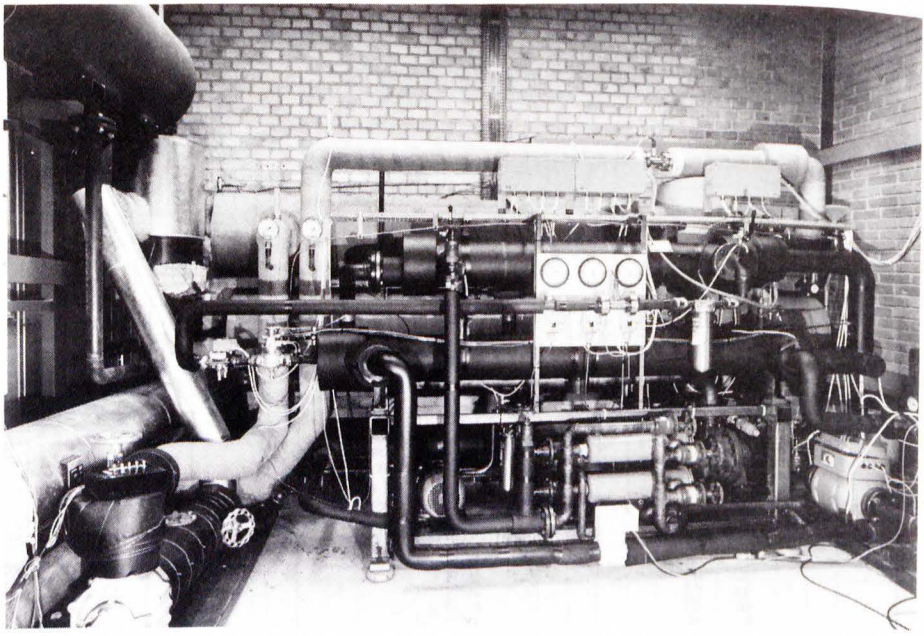


BILD 5.
DIE WÄRMEPUMPE PILOT-ANLAGE MIT ELEKTROBEHEITZTE HEIZÖLSYSTEM

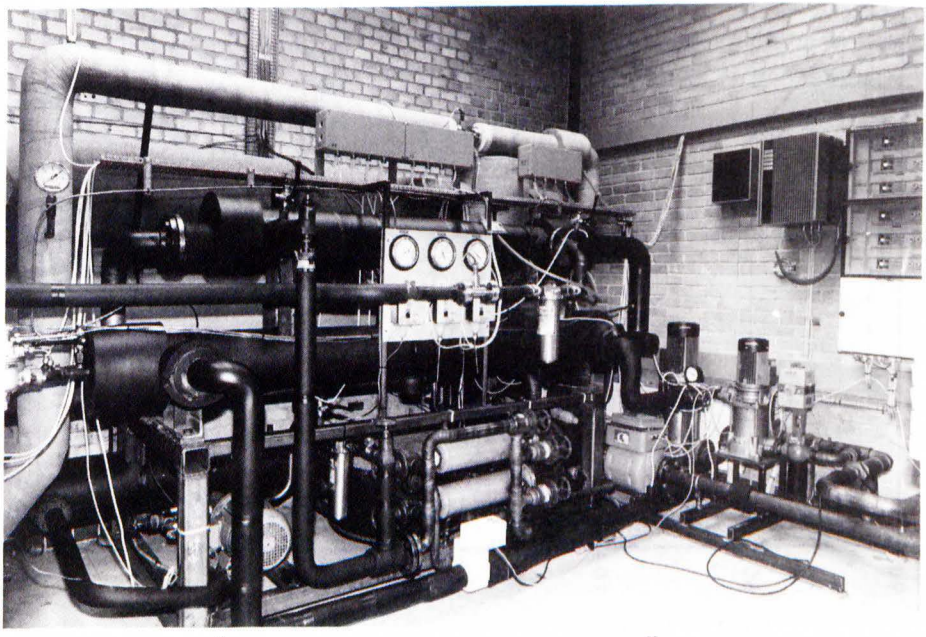


BILD 6. DIE WÄRMEPUMPE PILOT-ANLAGE MIT KÜHLSYSTEM

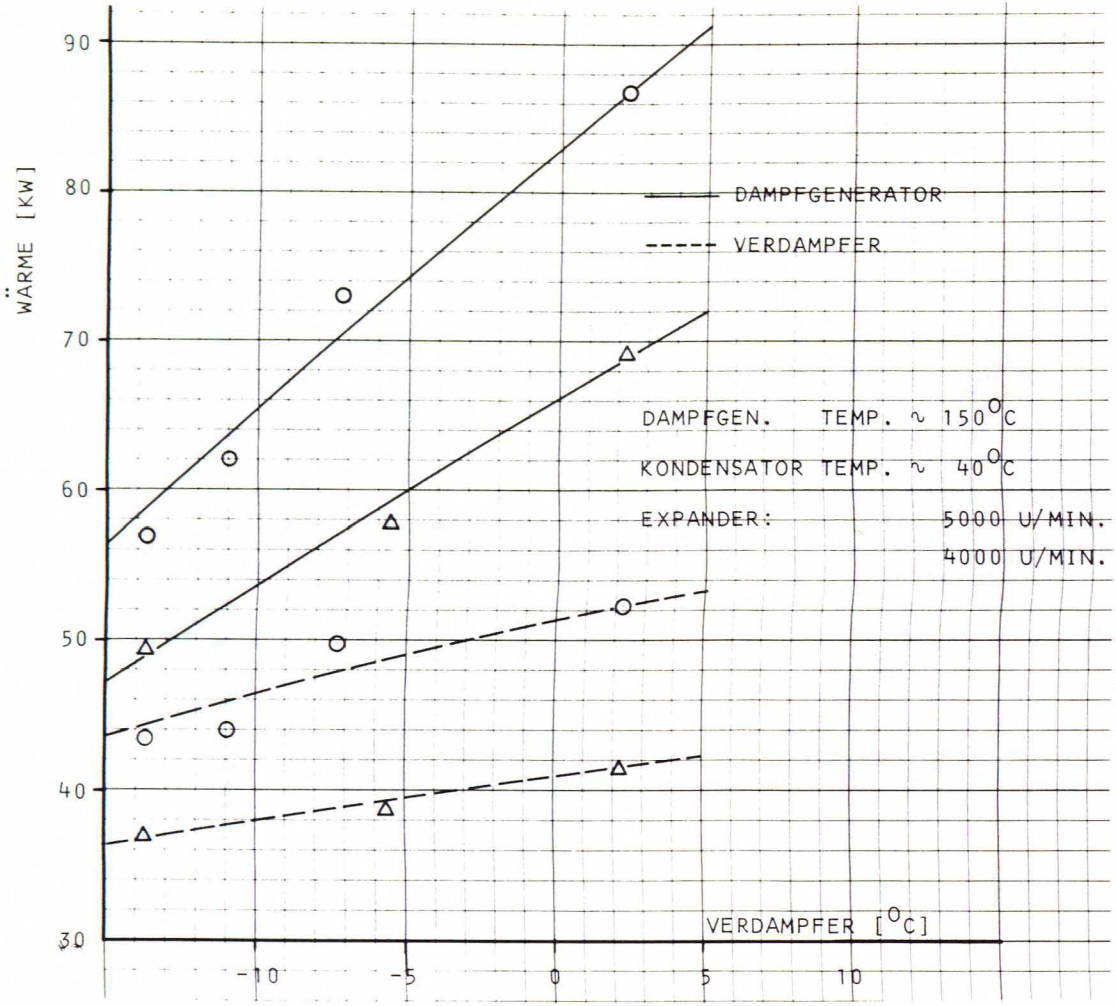


BILD 7.

VERSUCHSERGEBNISSE DER WÄRMEPUMPE

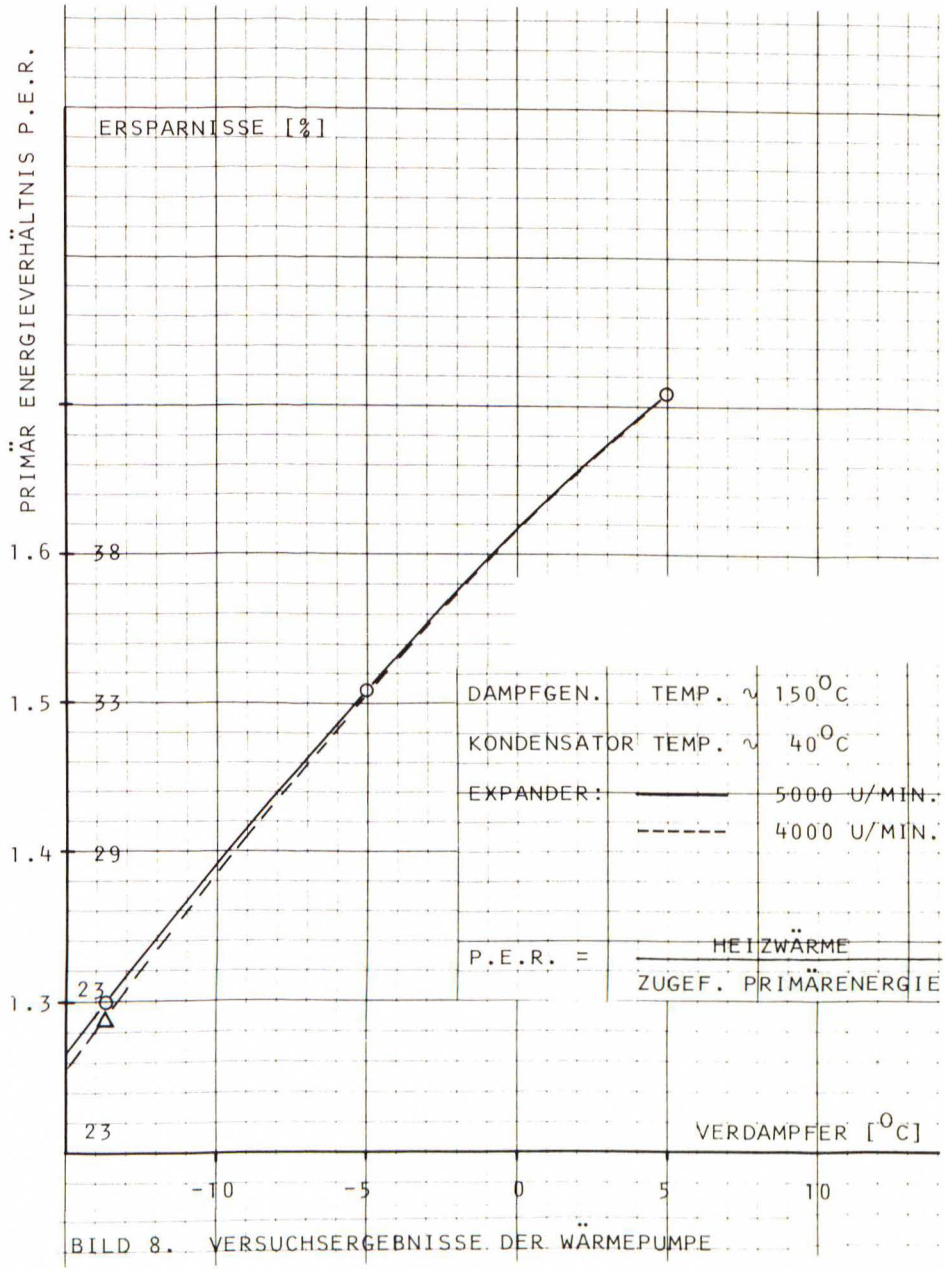


BILD 8. VERSUCHSERGEBNISSE DER WÄRMEPUMPE

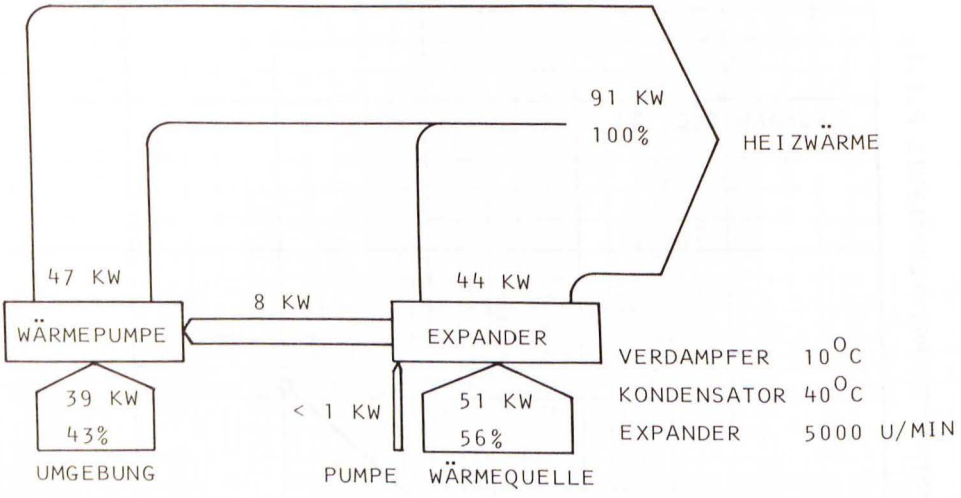


BILD 9. DER ENERGIEFLUß DER ANLAGE

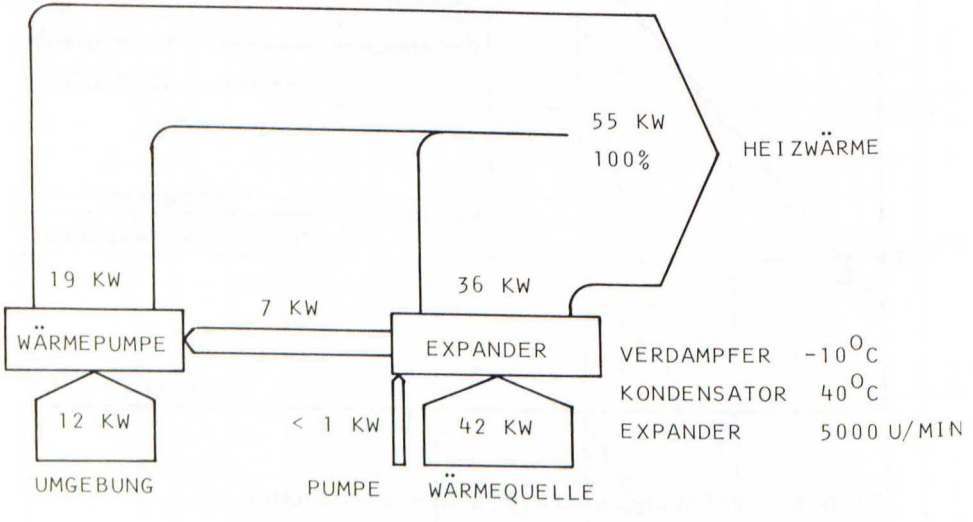


BILD 10. DER ENERGIEFLUß DER ANLAGE

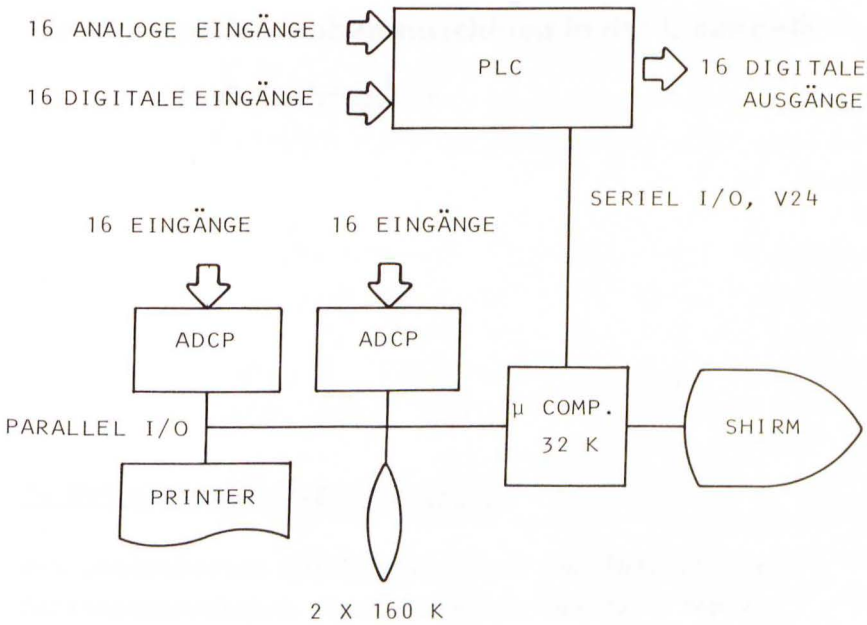


BILD 11. REGELUNG- UND MEßSYSTEM

Im Bild 8 sind die dazugehörigen primären Energiverhältnisse und Energieeinsparungen abgebildet.

Ein mehr übersichtliches Bild der Wärmepumpenanlage erhält man bei der Betrachtung der Energieflußdiagramme die im Bild 9 und 10 ersichtlich sind.

Schrifttum

1 R.C. Downing
Refrigerant Equations
Freon Products Division
The Du Pont Company
Willington DE.
Ashrae N. 2313