

Schraubenmaschinen als Kompressor für Wärmepumpen und Expander in ORC-Anlagen

Dipl.-Ing. P. Randrup-Christensen, Aarhus/Dänemark

Abstract

An organic Rankine cycle system for heat production has roughly been built-up in comparison with a gas motor driven heat pump. Differences in plant investment and operating costs have been drawn-up for some operating points. Supplementarily a description of a 100 kW ORC plant in operation for production of electricity.

1. EINLEITUNG

Als ein Ergebnis der während der letzten vielen Jahre steigenden Energiepreise hat es sich herausgestellt, dass bedeutende energiemässige und kostenbestimmte Ersparungen durch Investitionen in Isolierung, in Geräte mit hohen Wirkungsgraden, Wärmepumpen, Geräte zum Ausnutzen der Sonnen- und Windenergie u.s.w. erreicht werden können. Ersparungen, die die Wirkung der Energiekrise vermindert hat.

Im Anschluss an industrielle Anlagen mit Abwärme auf Niedertemperaturniveau (d.h. 100 bis 400^oC) hat man sich dafür interessiert, einen grösseren oder kleineren Teil zur mechanischen oder elektrischen Energie umzuformen. Bei hohen Temperaturniveaus ist der Prozess zur Herstellung von Elektrizität von den Elektrizitätswerken bekannt.

Für das beschriebene Projekt verwenden wir R114 als Arbeitsmedium entgegengesetzt dem Wasserdampf der Elektrizitätswerke. Als Expansionsmaschine wird ein gewöhnlicher Schraubenverdichter verwendet, der mit wenigen Änderungen im Prozess eingeht. Als Wärmepumpenkompressor wird ebenfalls ein Schraubenverdichter verwendet.

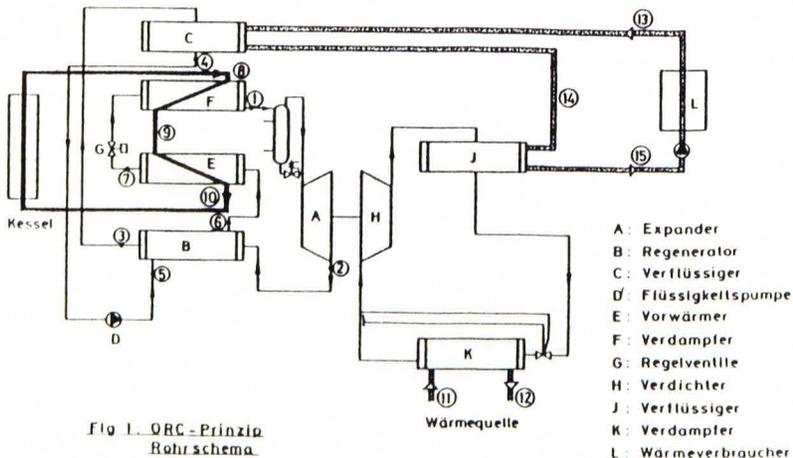
Betrieb und Investitionen zwischen einer ORC-getriebenen Wärmepumpe und einer gasmotorgetriebenen Wärmepumpe werden verglichen.

2. ANLAGEBESCHREIBUNG

Die ORC-Wärmepumpenanlage ist um zwei Schrauben aufgebaut, die mit den Wellenenden gegen einander montiert und mit einer gewöhnlichen mechanischen Kupplung verbunden sind. Die ORC-Anlage führt ihren Prozess mit R114 als Arbeitsmedium durch, wogegen die Wärmepumpe R22 verwendet.

Der Aufbau geht aus Fig. 1 her, während Fig. 2 den R114-Prozess in einem h -log p Diagramm darstellt. Die Nummern der beiden Diagramme entsprechen einander.

Die Wärmezuleitung zur ORC-Anlage findet in diesem Fall durch Verbrennung in einem Kessel statt, der für Vergleichszwecke gasgefeuert ist. Es könnte selbstverständlich auch reine Abwärme sein.



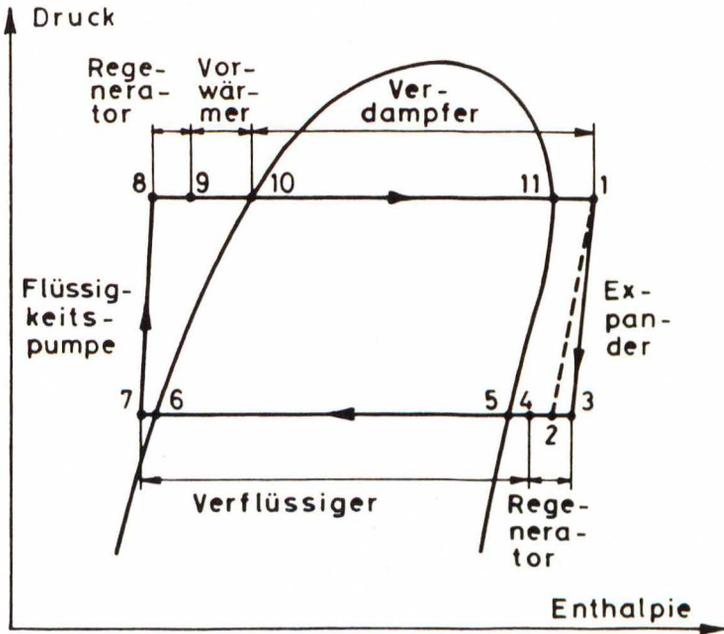


Fig. 2: Thermodynamische Kreisprozeß für ORC-System

Der Prozessverlauf, wie er in Fig. 1 und 2 beschrieben ist:

Die R114-Dämpfe verlassen den Dampfgenerator in Punkt 1 bei hohem Druck und einer kleinen Überhitzung. Durch einen Flüssigkeitsabscheider geht das Gas zur Expansionsmaschine A und verlässt diese in Punkt 2 bei einem wesentlich niedrigeren Druck und einer niedrigeren Temperatur.

Im Regenerator B geben die Dämpfe zur kalten Flüssigkeit Wärmeenergie ab und verlassen sie im Zustand Punkt 3. Er tritt in den Kondensator C ein, wo er verdichtet und zum Zustand Punkt 4 abgekühlt wird.

Durch die Pumpe D läuft die Flüssigkeit durch den Regenerator B, den Vorwärmer E und das Regelventil G zum Verdampfer F.

Der Prozessverlauf des Wärmepumpenteils ist ganz traditionell mit einem Kompressor, einem Kondensator und einem Verdampfer von einem Thermoventil gesteuert gezeigt. Die Wärmepumpe kann selbstverständlich mit einem Überhitzungsentferner, Flüssigkeitsabkühler und Ekonomiser zur Verbesserung des COP-Werts ausgebaut werden.

Die Wärmepumpe erhält die Wärme durch den Verdampfer K und liefert sie im Kondensator J ab.

Der R114-Kondensator C und der R22-Kondensator J sind an der Wasserseite serienverbunden.

Im Gegensatz zu einer ORC-Anlage, in welcher die Energie zur Produktion von Elektrizität umgeformt wird, wird die Kondensatorwärme für direkte Erwärmung genutzt.

Ohne Näheres auf das Wärmewiederherstellungssystem eines Gasmotors einzugehen, vergleichen wir die primären Energiewirkungsgrade unter den folgenden Voraussetzungen:

Gasmotor:

Wirkungsgrad 0,28 im Verhältnis zum unteren Brennwert des Gases unter Berücksichtigung von Verlust in Getriebe zwischen Gasmotor und Schraubenverdichter.

Die Energie des Gasmotors wird 90% im Verhältnis zum unteren Brennwert ausgenutzt.

ORC-Anlage:

Der Kesselwirkungsgrad wird auf 0,9 im Verhältnis zum unteren Brennwert festgesetzt. (Könnte vermutlich erhöht werden).

Der isentropische Wellenwirkungsgrad wird auf 0,80 festgesetzt.

Der isentropische Wirkungsgrad bei der Expansion wird auf 0,82 festgesetzt.

Der Füllgrad des Expanders wird auf 1,0 festgesetzt.

WÄRMEPUMPE:

Die Kondensierungstemperatur wird zwischen 45 und 55°C variiert. Die berechneten Werte sind auf den SRM-Versuchswerten basiert, die auf die verwandte Kompressorgröße modifiziert sind.

Sowohl als Expander als auch als Kompressor wird VMY 436H mit Hubvolumen bei 2950 UpM für 2708 m³/h verwendet.

Mit Bezug auf die Berechnungen wird mit konstantem Welleneffekt für Expander, Gasmotor bzw. Kompressor gerechnet.

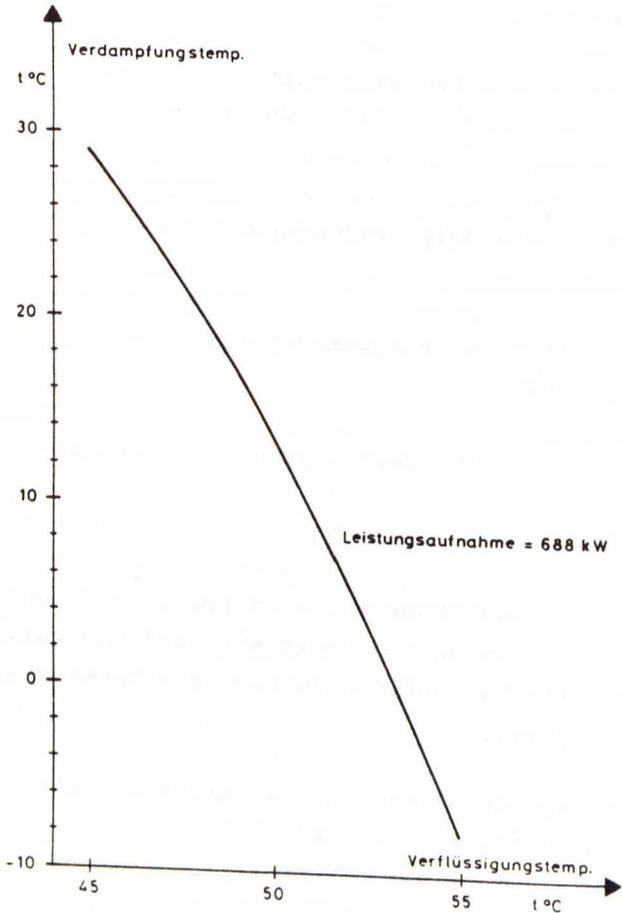


Fig. 3 Zusammenhang zwischen Verflüssigungstemperatur und Verdampfungstemperatur am Wärmepumpe mit konstantem Kraftbedarf.

Der Zusammenhang zwischen Verflüssigungstemperatur und Verdampfungstemperatur an Wärmepumpe ist in Fig. 3 angegeben. Die Leistungsaufnahme des Verdichters ist 688 kW.

FLÜSSIGKEITSPUMPE:

Ihr Kraftverbrauch ist auf 96 kW berechnet worden, was einen primären Energieverbrauch von 323 kW gibt. Aus praktischen Gründen ist es bei der Inbetriebsetzung ein Vorteil, dass sie e-getrieben ist.

Die berechneten Werte des Energieverbrauchs, der Wärmeproduktion und die primären Energiewirkungsgrade sind in Tabelle 1 aufgestellt.

Es ist daraus ersichtlich, dass der primäre Energiewirkungsgrad der gasmotorgetriebenen Wärmepumpe 1,4 bis 1,9 mal besser als der der ORC-Wärmepumpe ist.

In diesem Zusammenhang ist die ORC-Anlage also nur berechtigt, falls ein preisgünstigerer Brennstoff verwendet werden kann.

TABELLE 1 Übersicht des Energieverbrauchs

T-Kond. R22 °C	Kond.Kap. R22 kW	Kond.Kap. R114 kW	Wärme- leistung kW	* Primärer Energie- verbrauch kW	ORC-Anlagen Primärer Energie-	Gasmotor Brennstoff Verbrauch kW	Gasmotor Abwärmeaus- nutzung kW	Wärmeleist. gasmotorget. Wärmepumpe kW	Gasmotor WP Primärer Wirkungsgrad
45	6019	4738	10757	6268	1,72	2312	1393	7412	3,21
46	5465	-	10203	-	1,63	-	-	6858	2,97
47	5005	-	9743	-	1,55	-	-	6398	2,77
48	4580	-	9318	-	1,49	-	-	5973	2,58
49	4198	-	8936	-	1,43	-	-	5591	2,42
50	3825	-	8563	-	1,37	-	-	5218	2,26
51	3360	-	8098	-	1,29	-	-	4753	2,06
52	2955	-	7693	-	1,23	-	-	4348	1,88
53	2597	-	7335	-	1,17	-	-	3990	1,73
54	2281	-	7019	-	1,12	-	-	3674	1,59
55	2010	-	6748	-	1,08	-	-	3403	1,47

* Kessel = 5945 kW; Pumpe = 323 kW

Wir haben das Preisniveau folgender Brennstoffe untersuchen lassen:

Naturgas	0,19 Dkr./kWh
Schweröl	0,16 Dkr./kWh
Leichtöl	0,21 Dkr./kWh

Die Preise sind in hohem Masse mit Zuschlag von Energiesteuer etc. politisch bestimmt.

o o o o o o

Die Beschaffungspreise der beiden Typen von Anlagen sind als Anschlagpreise aufgrund der normalerweise von uns projektierten Anlagen erreicht worden:

ORC-Anlage:	4.0 Mill.Dkr.
Wärmepumpe ohne Motor:	2.5 Mill.Dkr.
Gasmotor 750 kW:	2.0 Mill.Dkr.
Kessel:	1.0 Mill.Dkr.

Daraus ergeben sich die Preise der beiden Konstellationen:

ORC-Anlage + Kessel + Wärmepumpe:	7.5 Mill.Dkr.
Gasmotor + Wärmepumpe:	4.5 Mill.Dkr.

Der Preis für Gasmotor + Wärmepumpe gilt für Anlage derselben Wellenleistung wie die ORC-Anlage.

Bei einer Kondensierungstemperatur von 50°C für die Wärmepumpe muss die Investierung um das Verhältnis der Wärmeleistungen erhöht werden.

Die Investierung in Wärmepumpe mit Gasmotor beträgt
8563/5218 x 4.5 Mill.Dkr. = 7.4 Mill.Dkr.

Bei einer Betriebszeit pro Jahr von 8000 Stunden erscheint die folgende Zusammenstellung:

ORC-Konstellation:

Invest.	7.5 Mill.Dkr.
Brennstoff	8.0 - -
<u>Service</u>	<u>0.1 - -</u>
Betriebskosten	8.1 Mill.Dkr.

Gasmotor-Konstellation:

Invest.	7.4 Mill.Dkr.
Brennstoff	5.8 - -
Schmieröl	0.2 - -
<u>Service</u>	<u>0.5 - -</u>
Betriebskosten	6.5 Mill.Dkr.

Aus dem obenstehenden Zahlenmaterial geht es hervor, dass die Betriebskosten der ORC-Anlage wesentlich höher als die der gasmotorgetriebene Anlage sind. Die Unterschiede der Investierung ist im Verhältnis zum Verbrauch ohne Bedeutung.

Falls Abwärme oder Wärme aus wesentlich billigerem Brennstoff produziert verfügbar ist, wird die ORC-Anlage eine konkurrenzfähige Alternative sein.

Konklusion:

Bei grossen Anlagen ist die Investierung in ORC-Wärmepumpenanlagen auf Schrauben basiert konkurrenzfähig und wird mit Bezug auf Betriebskosten für Abwärme oder billigen Brennstoff als Antriebsenergie konkurrenzfähig sein.

Servicemässig ist die ORC-Anlage wesentlich weniger anspruchsvoll, weil weder häufige Schmierölwechsel noch häu-

fige Nachstellungen der Karburierung oder Schleifen der Ventile notwendig sind.

Auf der negativen Seite zählt für die ORC-Wärmepumpe der grössere Brennstoffverbrauch und, dass die ORC-Anlage noch nicht so allgemein und durchgeprüft ist.

o o o o o o o

Beschreibung der ORC-Anlage einer Müllverbrennungsanlage

Im Zuge der Entwicklung hat die Firma Thomas Ths. Sabroe in Zusammenarbeit mit dem Forschungscenter RISOE eine ORC-Vorführungsanlage auf einer Müllverbrennungsanlage KARA in Roskilde, Dänemark, aufgebaut.

Der Aufbau der Anlage geht aus Fig. 4 hervor. Sie hat die Aufgabe, Elektrizität auf Überschusswärme der Müllverbrennungsanlage basiert herzustellen.

Das Arbeitsmedium ist R114, das mittels einer Zentrifugalpumpe vom niedrigen Kondensatordruck zum Dampfgenerator durch Regenerator und Ölbadkocher gepumpt wird. Vom Dampfgenerator passiert das Gas durch den Überhitzer zum Expander, wo es während Abgabe von Antriebsenergie zur Schraubenwelle expandiert wird. Die Dämpfe passieren weiter durch den Ölabscheider zum Regenerator, wo ein Teil der Wärmeenergie zur Vorwärmung der R114-Flüssigkeit abgegeben wird. Die R114-Dämpfe werden im Kondensator verdichtet, der durch einen Kühlturm gekühlt wird. Vom Kondensator wird die Flüssigkeit durch einen wassergekühltem Unterkühler zur Flüssigkeitspumpe geführt, und der Kreislauf ist geschlossen.

Als Dampfgenerator ist ein "Shell & Tube" Typ mit der Flüssigkeitszuleitung von einem Hochdruckschwimmer gesteuert, der unmittelbar unter dem Kondensator plaziert ist, erwähnt worden.

Die Menge wird durch ein an der Druckseite der Pumpe plaziertes Ventil reguliert.

Der Expander ist ein gewöhnlicher, ölgeschmierter Schraubenverdichter von Aerzener Maschinenfabrik, Aerzen, hergestellt. Im Verhältnis zu Kùhlschrauben gibt es weniger Änderungen an der Ölseite.

Der Generator ist aus dem Asynchronotyp, d.h. dass er in diesem Zusammenhang von der Netzfrequenz gesteuert wird und den Effekt zum Betrieb der Müllverbrennungsanlage liefert. Aus Rücksicht auf Netzausfall und andere Unterbrechungen der Belastung ist ein TACO-Generator auf dem Generator montiert worden, der verhindert, dass die Drehzahl der Anlage bei Impulsgebung zum Schliessen des Schnellschliessventils erhöht wird. Dieses ist ein druckluftgesteuertes Kugelventil, das zwischen dem Überhitzer und Expander montiert ist - ein auf Turbinenanlagen wohlbekanntes System.

Die Wärme wird dem Überhitzer und dem Dampfgenerator durch wärmes Wasser vom Kessel der Müllverbrennungsanlage zugeleitet. Temperaturniveau 110°C bis Maximum 120°C .

Im Projekt geht ein Messdiagramm zur Aufsammlung der Betriebsdaten und zur Berechnung der Wirkungsgrade etc. ein. Daten werden durch das Fernsprechnetzzum nahe gelegenen Forschungszentrum RISØE übertragen.

Die Anlage wird vom dänischen Energieministerium finanziert, das in dieser Weise die dänische Energieforschung unterstützt hat.

Die Kapazität der Anlage ist netto 100 kW mit kleineren Variationen wegen des Betriebszustands.

Als ein Ergebnis des projekts haben wir schon zum gegenwärtigen Zeitpunkt mehrere neue Anwendungsgebiete in Betrieb und erwarten, dass ein allgemeines Akzept der ORC-Anlage wie im Falle der Wärmepumpen erreicht wird.

Die Photos der Anlage werden unten gezeigt.

Bild 1. Die Müllverbrennungsanstalt KARA in Roskilde

Bild 2. Die ORC-Anlage fertigmontiert

Bild 3. Die ORC-Anlage vom Ende gesehen

Bild 4. Die Gebäude mit Kühlturm im Vordergrund

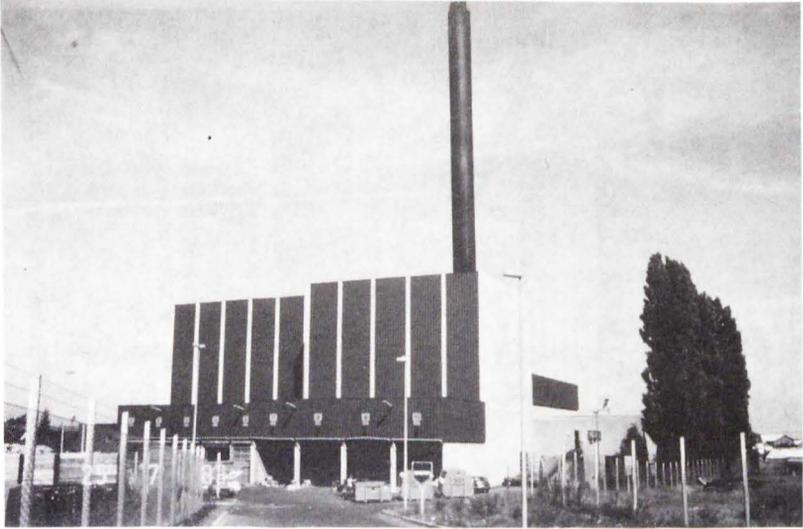


Bild 1. Die Müllverbrennungsanstalt KARA in Roskilde

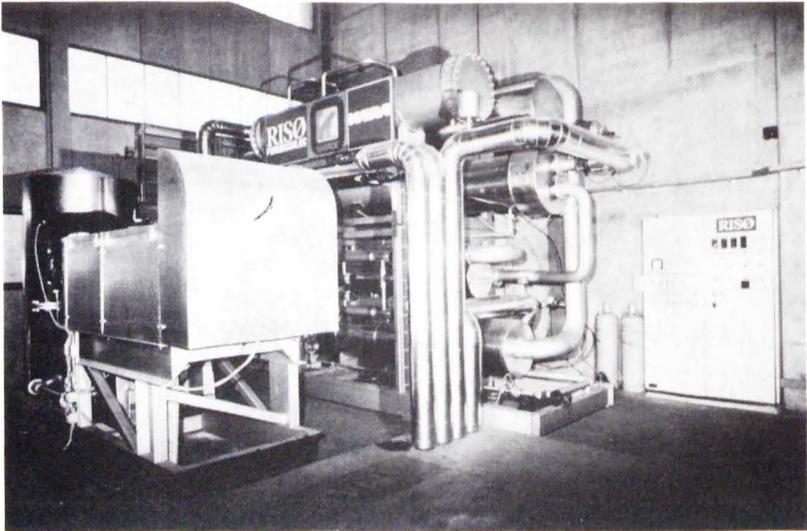


Bild 2. Die ORC-Anlage fertigmontiert. Die Schalttafel wird rechts im Bild gesehen.

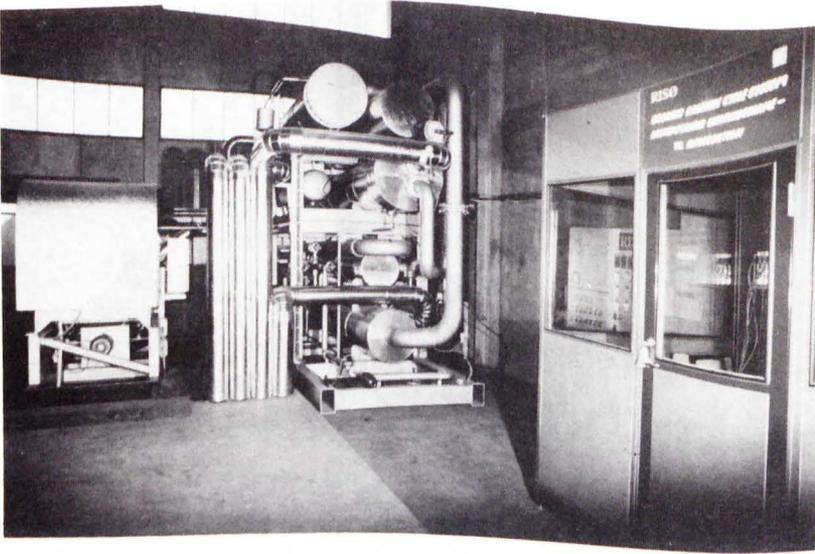


Bild 3. Die ORC-Anlage vom Ende gesehen. Im Vordergrund die Kabine mit Datenausrüstung.

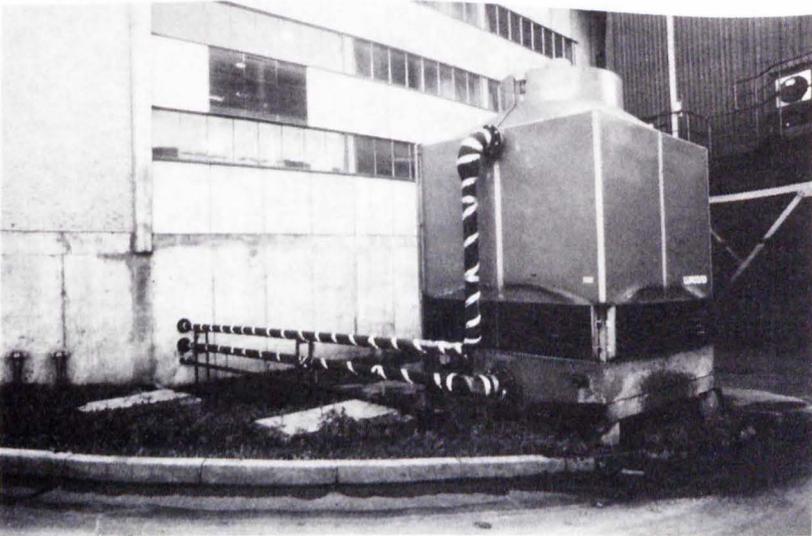


Bild 4. Der Kühlturm ist ausserhalb des Gebäudes aufgestellt. Die ORC-Anlage ist hinter dem Fenster plaziert.