

Maschinenkreisläufe mit Schraubenmotoren

Dipl.-Ing. G. Hanselmann, München

Zusammenfassung

Einsatzmöglichkeiten von Schraubenmotoren sowie deren technische und wirtschaftliche Randbedingungen werden aufgezeigt. Die allgemeinen Einflußparameter für eine Kreislaufauslegung werden kurz dargestellt. Über bisherige Auslegungs- und Betriebserfahrungen wird berichtet.

1. Einsatzmöglichkeiten von Schraubenmotoren

Die Tendenz den Energieverbrauch zu reduzieren, führt zur Nutzung immer kleinerer Energieströme mit immer geringerer Exergie. Außerdem werden zunehmend die Möglichkeiten des Einsatzes von regenerativen Energien untersucht, wobei hier meist ebenfalls kleinere Leistungen und niedrige Temperaturen in Frage kommen.

Der erste Bereich umfaßt das gesamte Gebiet der Abwärmennutzung, wobei hier die Erzeugung von mechanischer Energie eine der Möglichkeiten darstellt.

In Bild 1 sind die jährlichen Abwärmemengen der Bundesrepublik über der Temperatur aufgetragen. Erfasst werden hierbei nur die Abwärmequellen mit Temperaturen über 90°C, einer thermischen Leistung größer als 2 MW und mit einem Anfall von mehr als etwa 5.000 h pro Jahr. Analysiert man die Abwärmeströme weiter, so entfallen zunächst sämtliche Quellen im obersten Temperaturbereich für eine unmittelbare Nutzung, da es sich hier ausschließlich um an Festkörper (Schlacke, Koks) gebundene Wärme handelt. Ähnlich verhält es sich mit den Abwärmeströmen im Bereich von 330 - 360°C. Es handelt sich hier um stark verschmutzte oder korrosive Abgase, bei denen die Auskopplung der Wärme zu einem prohibitiven Aufwand führt.

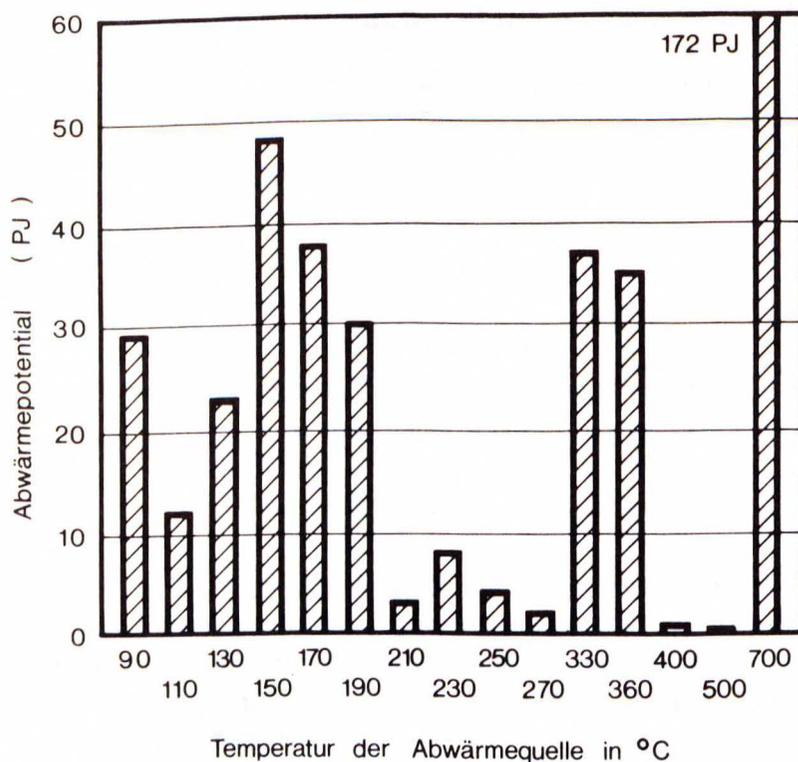


Bild 1. Abwärmepotential (Abwärmeenergie pro Jahr) in Abhängigkeit von der Temperatur der Abwärmequelle für die Bundesrepublik.

Es bleibt im Wesentlichen die Abwärme im Temperaturbereich unter 200°C. Sie stellt ein Potential zur Erzeugung von etwa 750 MW elektrischer Leistung in der Bundesrepublik dar. Für die USA, wo ähnliche Untersuchungen durchgeführt wurden, kommt man auf ein Potential von 3.200 MW elektrisch.

Die Verteilung der Leistungsgrößen konnte mit den erfaßten Daten nur sehr grob bestimmt werden. Es ergab sich ein Schwerpunkt bei 400 - 600 kW elektrisch. Auf eine genauere Erfassung wurde jedoch verzichtet, da festgestellt wurde, daß mit den verfügbaren Schraubenmaschinen (aus dem Kompressorbau) der Leistungsbereich bis 1.300 kW abgedeckt werden kann.

Bezüglich der Wirtschaftlichkeit der Abwärmenutzungsanlagen zeigt sich, daß der Wirkungsgrad eine eher untergeordnete Rolle spielt (nimmt man als Gütekriterium die Rückzahlzeit und geht man vom bestehenden Stand der Technik aus). Dies kommt daher, daß die verwendete Energie kostenlos anfällt und die Investitionshöhe praktisch allein durch den Kreislauf bestimmt wird.

Einen besonderen Einsatzbereich bei der Abwärmenutzung stellt der "Bottoming Cycle" bei Großdieselmotoren dar. Hier eröffnen sich Möglichkeiten für die Schraubenmaschine insbesondere im Leistungsbereich unter 600 kWel und bei den mit extrem niedrigen Abgastemperaturen fahrenden Zweitaktmotoren. Dieser Einsatzbereich wird noch nicht von den konventionellen Systemen abgedeckt.

Ein Einsatzbereich für Schraubenmotoren, der langfristig zu sehen ist, ist die Ausnutzung von regenerativen Energien (Geothermie, Sonne, Biomasse). Es werden hier auch meist kleinere Leistungseinheiten benötigt und die Temperaturen liegen ebenfalls niedrig. Ein Markt im üblichen Sinne ist hier noch nicht vorhanden. Es ist daher nur zu erwähnen, daß für diesen Einsatzbereich die Wirtschaftlichkeit im Gegensatz zur Abwärmenutzung hauptsächlich durch den Wirkungsgrad bestimmt wird. Dies hängt damit zusammen, daß die Investitionskosten hauptsächlich für die Energieerzeugung verwendet werden müssen.

2. Allgemeine Einflußparameter für die Auslegung von Maschinenkreisläufen

Eine Optimalauslegung für jeden Einsatzfall führt im allgemeinen zu unterschiedlichen Lösungen was Arbeitsmedium und Expansionsmaschine angeht (und damit auch zu anderen Komponenten). Selbst bei gleichem Einsatz werden Firmen mit unterschiedlichem Produktionsprogramm zu unterschiedlichen Lösungen kommen. Einen Konsens darüber, mit welchem System ein akzeptabler Bereich der Einsatzmöglichkeiten abgedeckt werden kann, gibt es zur Zeit noch nicht. Es werden daher im folgenden nur einige generelle Aspekte dargelegt.

In Bild 2 ist der Gesamtwirkungsgrad von Kreisläufen für verschiedene Temperaturen des Heizmediums (obere Abwärmtemperatur) und Arbeitsmedien aufgetragen.

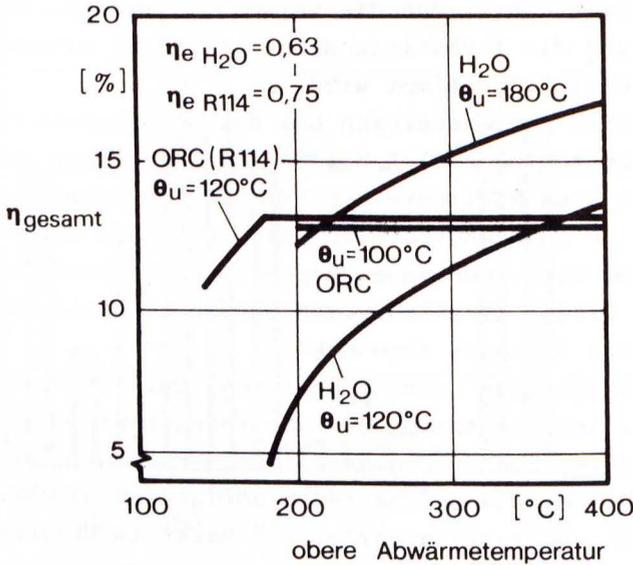


Bild 2. Gesamtwirkungsgrad von Kreisläufen mit unterschiedlichen Arbeitsmedien in Abhängigkeit der oberen Abwärmtemperatur und für verschiedene untere Abwärmtemperaturen.

Als Parameter wurde noch die unterste zulässige Abwärmtemperatur berücksichtigt (meist durch Korrosions- oder Umweltbedingungen gegeben). Die Wärme wird durch Abkühlung des Heizmediums eingekoppelt. Gerechnet wurde mit Kreislaufparametern die den heutigen Stand der Technik darstellen. Hierbei ist zu erwähnen:

- Der innere effektive Wirkungsgrad wurde für Wasserdampf mit 63 % für R 114 mit 75 % angesetzt.
- Die Temperatur des Arbeitsmediums R 114 wurde auf 140°C begrenzt.
- Als Leistungsgröße wurden 500 kW gewählt.

Ein besonderer Punkt ist die Auswahl der Arbeitsmedien. Über diese Problematik gibt es eine Unzahl von Arbeiten, die jedoch bisher zu keiner eindeutigen Linie geführt haben. Beschränkt man sich auf Schraubenmaschinen und betrachtet zunächst die Bedingungen der Abwärmenutzung wie sie erläutert wurden, so kommen die Frigene R 114 und R 11 bevorzugt in Frage. Sie

- erlauben eine weitgehende Ausnutzung der Abwärme
- haben eine hohe volumetrische Leistung (d. h. pro Abdampfvolumen) was zu kleinen Maschinen führt
- sind handelsüblich.

Bei höheren Temperaturen und Schwerpunktlegung auf den Wirkungsgrad, wie es bei regenerativen Energien der Fall ist, erscheint Wasserdampf als eine der technisch besten Lösungen. Auf jeden Fall haben die Arbeitsmedien für diesen Anwendungsbereich wesentlich höhere Abdampfvolumenströme als die genannten Frigene, was sich nachteilig auf den Einsatz von Schraubenmaschinen auswirkt.

In Bild 3 sind die spezifischen Kosten der Komponenten von Schraubenmaschinenkreisläufen für die Arbeitsmedien Wasserdampf und R 114 dargestellt. Die Werte gelten für eine Leistungsgröße von 500 kW und gehen von Abgas als Heizmedium aus. Nicht berücksichtigt sind bauliche Maßnahmen und die Integration des Kreislaufes in eine bestehende Anlage. Bei den Kosten der Schraubenmaschinen wurde aufgrund bisheriger Erfahrungen davon ausgegangen, daß verfügbare Kompressoren durch einfache Modifikation als Motoren verwendet werden können. Die hohen spezifischen Kosten für die Wasserdampfversion resultieren daher, daß die Volumenströme trockenlaufende Maschinen bedingen, die selten gefertigt werden. Trockenläufer erscheinen aufgrund der bisherigen Erfahrungen für Wasserdampf auch wegen des Problems der Ölabscheidung notwendig.

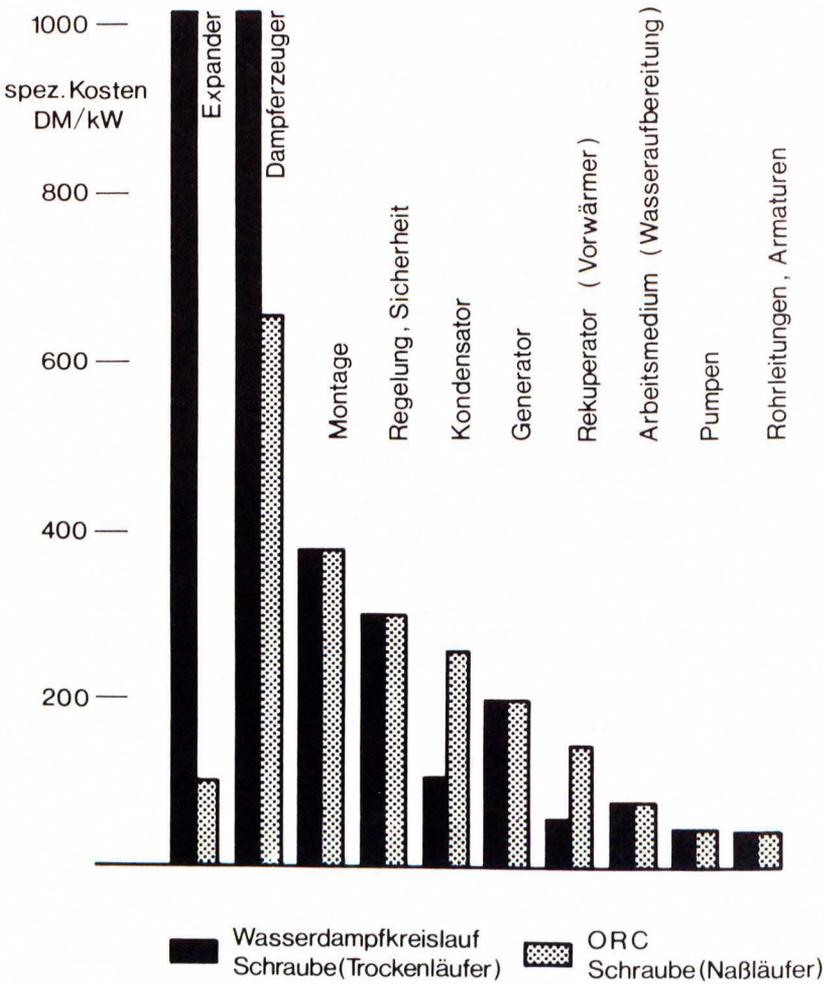


Bild 3. Spezifische Kosten für die Komponenten von Schraubenmaschinenkreisläufen.

3. Bisherige Erfahrungen mit Schraubenmotoren

Schraubenmaschinen sind bereits sehr häufig als Motore eingesetzt worden mit Arbeitsmedien von Wasserstoff über Wasserdampf, Luft bis hin zu Frigenen und siedendem Wasser. Die Erfahrungen sind jedoch sehr unzulänglich dokumentiert und konzentrieren sich auf die Schraube selber, die jedoch gar nicht das wesentliche Problem bei einer kommerziellen Anwendung sein dürfte (dies ist auch am Kostenanteil der Maschine an den Gesamtkosten für den ORC Kreislauf in Bild 3 zu sehen). Es wird hier über die speziellen Erfahrungen mit einem Schraubenmaschinenkreislauf berichtet, der mit Förderung durch das BMFT zur kombinierten Nutzung der Abwärme von Dieselmotoren und von Sonnenenergie entwickelt wurde.

Der Kreislauf ist schematisch in Bild 4 dargestellt.

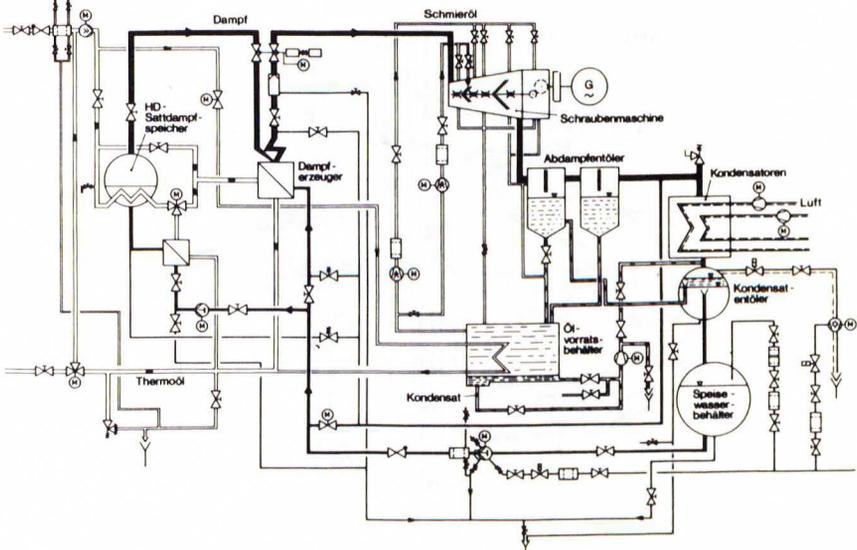


Bild 4. Schematische Darstellung eines 100 kW Schraubenmaschinenkreislaufes.

Das Heizmedium ist Thermoöl, welches in einem Durchlaufdampferzeuger überhitzten Dampf mit 13 bar und 250°C erzeugt. Ein Sattdampfspeicher wird bei Inselbetrieb zur Abdeckung plötzlicher Laständerungen verwendet. Durch die Bedingungen des Aufstellungsortes (Meekatharra in Westaustralien) mußte ein Luftkondensator verwendet werden. Die Kondensatortemperatur wurde auf 70°C festgelegt. Als Arbeitsmedium wurde aufgrund des Temperaturniveaus, sowie durch den kostenmäßigen Einfluß der Solaranlage Wasserdampf gewählt. Die Nennleistung liegt bei 100 kW. Als Expansionsmaschine wurde eine zweistufige, naßlaufende Schraubenmaschine gewählt, die aus Modifikationen der Kompressortypen CF 90 und SKF 204 von M.A.N.-GHH gebildet wurde. In Bild 5 ist die Anordnung der Maschinen und des Getriebes schematisch zu sehen.

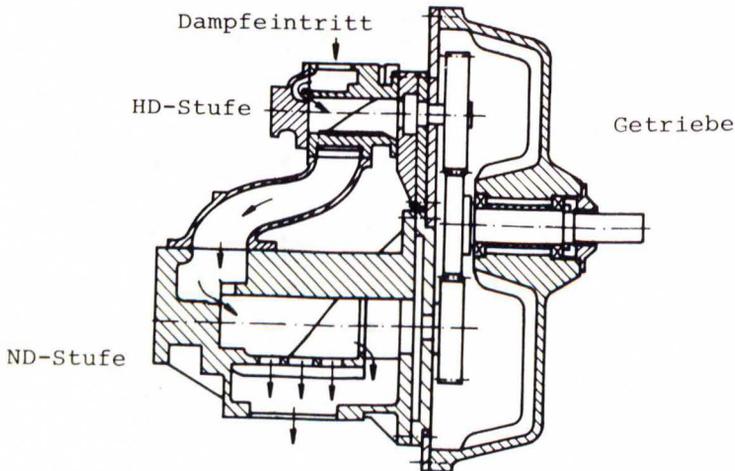


Bild 5. Schematische Darstellung einer zweistufigen Schraubenexpansionsmaschine mit Getriebe.

Die wesentlichen Modifikationen gegenüber der Kompressor-ausführung waren:

- Die Ölzufuhr erfolgt auf der Hochdruckseite direkt am Einlaß.
- Die Ölmenge wird auf 30 % des Wasserdampfmassenstromes begrenzt (dies ergab sich aus Versuchen als notwendiges Minimum).

- Anpassung der Lagerungen an die Betriebsbedingungen.

Aufgrund der relativ hohen Temperatur wurden die Spaltweiten groß gehalten; es wurde Schmieröl von Mobiloil Typ ED 62/135 F verwendet, welches für die spezielle Anwendung zusammengestellt wurde.

Die versuchstechnische Optimierung der Maschinen wurde auf der TU Dortmund durchgeführt. In Bild 6 sind die Ergebnisse der Leistungs- und Wirkungsgradmessungen für die oben erwähnte Maschinenkombination zusammengestellt.

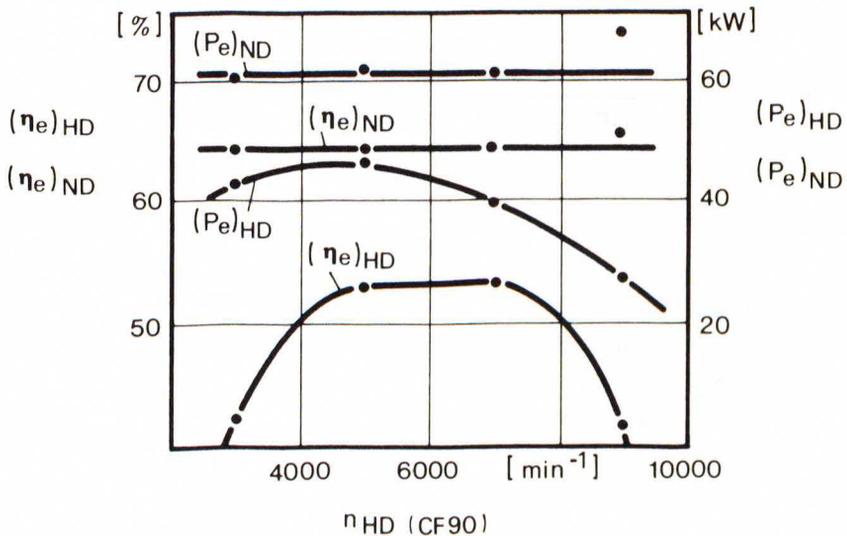


Bild 6. Maschinensatz CF 90/SKF 204. Wirkungsgrade und Leistungen in Abhängigkeit von der Hochdruckstufendrehzahl.

$$\begin{aligned} \text{Konstante } n_{ND} &= 5.000 \text{ min}^{-1} \\ \dot{m}_D &= 1.200 \text{ kg/h} \end{aligned}$$

Da der Wirkungsgrad der Hochdruckstufe nicht den Erwartungen entsprach, wurde noch eine zweite Kombination getestet bei der als Hochdruckstufe eine Modifikation des Kompressortyps CF 75 verwendet wurde. Die Ergebnisse der Leistungs- und Wirkungsgradmessungen für diese Kombination sind in Bild 7 zu sehen.

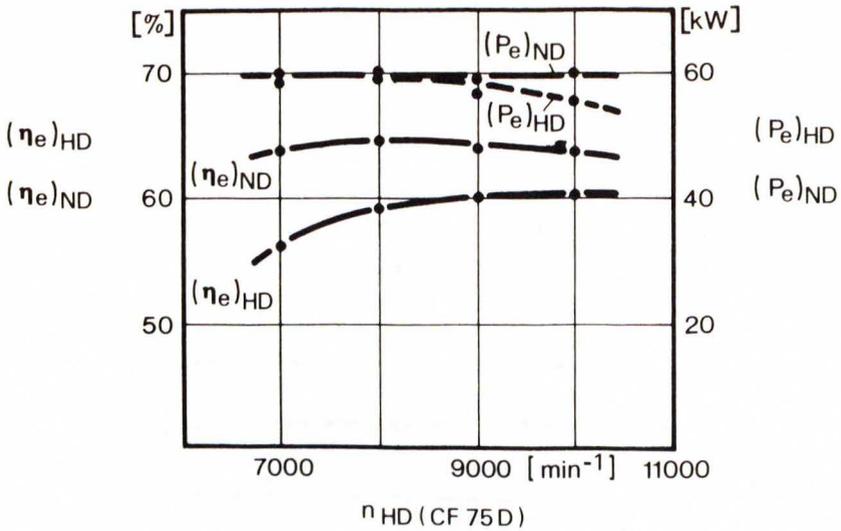


Bild 7. Maschinensatz CF 75 D/SKF 204. Wirkungsgrade und Leistungen in Abhängigkeit von der Hochdruckstufendrehzahl.

Konstante $n_{ND} = 5.000 \text{ min}^{-1}$

$\dot{m}_D = 1.200 \text{ kg/h}$

In Bild 8 ist schließlich noch der gesamte Kreislaufwirkungsgrad über der Last aufgetragen. Dies für die Maschinenkombination CF 90/SKF 204.

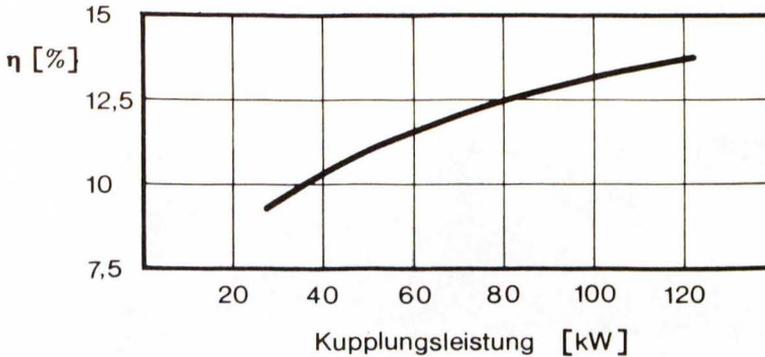


Bild 8. Kreislaufwirkungsgrad mit Maschinenkombination CF 90/SKF 204.

Der gesamte Kreislauf wurde auf einem Rahmen montiert Bild 9 und in einem Container installiert. Lediglich die Luftkondensatoren wurden bei der endgültigen Aufstellung auf dem Container angebracht.

Bis auf einen Problembereich zeigt die Anlage nach 1.500 h Betriebszeit ein sehr zufriedenstellendes Verhalten was Verfügbarkeit und Bedienbarkeit anbetrifft. Die einzige, allerdings gravierende Problematik ergab sich durch die Ölabscheidung. Es wurde festgestellt, daß die Abscheidefähigkeit des Öls durch bisher nicht erfaßbare Einflüsse drastisch verändert werden kann und zwar durch Bildung von tensidartigen Substanzen. Dies führt im Betrieb zur Überflutung des Kreislaufes mit Öl und damit zu einem Zusammenbruch der Wärmeübertragung. Es wurde daher notwendig, die Ölabscheidung wesentlich aufwendiger als ursprünglich geplant auszuführen und außerdem eine Reinigung des Öls (Filterung durch Bleicherde) durchzuführen, wenn die Abscheidefähigkeit des Öls nachläßt. Dieser Aufwand er-

scheint für kommerzielle Anwendungen prohibitiv. Daher wird der Einsatz von trockenlaufenden Schrauben bei Verwendung von Wasserdampf als Arbeitsmedium als unumgänglich angesehen. Für das Arbeitsmedium R 114 lassen die bisherigen Erfahrungen eine solche Problematik nicht erwarten.

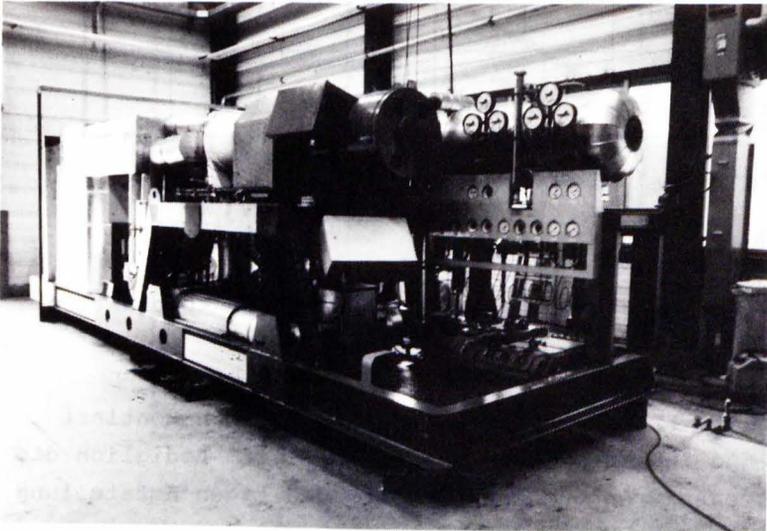


Bild 9. Ansicht des Schraubenmaschinenkreislaufes (ohne Luftkondensator) vor der Einbringung in den Container.