

DKV-Forschungsbericht Nr. 75

Wilfried Jörg Nickl

Entwicklung einer Expander-Kompressor-Einheit
zur Realisierung eines transkritischen
Linksprozesses mit dem Arbeitsstoff Kohlendioxid
(vergriffen!)

2007

978-3-932715-78-5



Kurzfassung

In dieser Arbeit wurden zunächst Kälteprozesse für CO₂ mit arbeitsleistender Expansion für sub- und transkritischen Betrieb untersucht, wobei geschätzte Einzelwirkungsgrade von Expander und Kompressor von $\eta_{E,s} = 0,65$ bzw. $\eta_{C2,s} = 0,85$ verwendet wurden.

Die nachfolgende Suche des besten Prinzips der Energieübertragung für die Expander-Kompressor-Einheit (z. B. Turbo- oder Verdrängermaschine) ergab unter Berücksichtigung besonderer Umstände (Expansion ins Zweiphasengebiet, evtl. Flüssigkeitsschlag) eine mehrstufige Freikolbenmaschine mit direkter Energieübertragung vom Expander zum Kompressor und verschwindend geringer Speicherung kinetischer Energie (kein Schwungrad).

Für die optimierten thermodynamischen Prozessparameter (u.a. Volumenstromverhältnis von Kompressor und Expander = 3 bzw. 4,5 für transkritischen bzw. subkritischen Betrieb) wurde im weiteren Verlauf die Freikolbenmaschine energetisch optimiert. Es ergaben sich bestimmte geometrische Verhältnisse und eine maximale Kolbengeschwindigkeit von $c_k = 0,15$ m/s. Allerdings zeigte diese Optimierung, dass man mit dem anfangs angesetzten isentropen Expanderwirkungsgrad $\eta_{E,s}$ von 65 % zu optimistisch war und auch schon nach theoretischen Untersuchungen nur max. 60 % ansetzen sollte.

Beim Bau eines Prototyps mussten Kompromisse eingegangen werden, da er für zwei interessante Prozesse verwendbar sein sollte. Außerdem konnten nicht die optimalen Hubvolumenverhältnisse der Stufen im Expander realisiert werden, da man an die Liefermöglichkeiten bestimmter Kolbenring-durchmesser gebunden war. Aus organisatorischen Gründen musste auf eine Honung aller Zylinder, das Innenrundschleifen der Schieberbuchsen, sowie eine besondere Sitzbearbeitung der Kompressor-ventile verzichtet werden.

Die Versuchsmaschine wurde in einer vorhandenen Versuchsanlage im Kältekreislauf getestet. Sie zeigte eine stabile, schwingungssarme Betriebsweise und einen sicheren Anlauf. Allerdings wurde der erwartete Gesamtwirkungsgrad der Expander-Kompressor-Einheit von 55 % unter Versuchsbedingungen nur zu ca. ¾ erreicht (41 %).

Die Abschätzung der Einzelverluste anhand der vorliegenden Messwerte lässt als Ursachen für die aufgetretene Differenz größere Reibungsverluste, größere innere Undichtheiten, sowie größere Abkühlungsverluste beim Einströmen in den Expander vermuten.

Eine Analyse der Einzelverlusteinflüsse zeigte, dass ein Gesamtwirkungsgrad von 48 % unter ausschließlicher Berücksichtigung der größeren „Abkühlungsverluste“ beim Einströmen in den Expander hätte erreicht werden können.

Unter diesem Gesichtspunkt erhält der Temperaturfaktor des Expanderwirkungsgrades (siehe Kap. 4.2.7) eine stärkere Wichtung. Das hat evtl. Einfluss auf die optimalen Maschinenparameter (siehe Kap. 4.2.10).

Diesbezüglich bietet auch eine stärkere Unterkühlung vor dem Expander den Vorteil, dass dessen erste Stufe nicht so stark ins „Zweiphasengebiet“ expandiert. Die dadurch geringeren Wärmeübergangszahlen könnten die Abkühlungsverluste reduzieren und den Gesamtwirkungsgrad weiter erhöhen. Auch war die Entscheidung für eine mehrstufige Expansion richtig, die das Druckverhältnis in der massestrombestimmenden ersten Stufe und damit die Temperaturdifferenz deutlich reduziert.

Auch wäre es hinsichtlich niedriger Druckverluste und „Aufheizung“ am Kompressor günstig, zwei separate – somit kurze – Saugleitungen nach „außen“ zu führen. Durch den damit nach „außen“ verlagerten Verbinder beider Saugseiten werden grundsätzlich innere Undichtheiten über Dichtungen in diesem Bereich vermieden.

Zur Verbesserung der inneren Dichtheit könnten dünne Metalldichtungen zwischen Kolbenstangenhülsen und Kolben, sowie die Anordnung des Gewindes der Kolbenstangenzentralschraube an der Mitnehmerplatte beitragen. Des Weiteren würde die Verlagerung der Ventilschaftführung auf die Ventilsitzseite die Dichtheit der Kompressorventile erhöhen, da dann in einer Aufspannung Führung und Sitz bearbeitet werden können, wodurch das Führungsspiel und damit ein evtl. Schräganlauf des Tellers deutlich verringert werden.

Des Weiteren könnte ein thermostatisches Regelventil entwickelt werden, das entsprechend der Überhitzung direkt die Drossel zwischen Hilfs- und Hauptschieber stellt.

Um die Dissipation bzgl. des Einzelübertragungsfaktors Ψ_{C2} des Kompressors (i.B. auf die beim Volldruckprinzip fehlende Gegenkraft am Expander, siehe Abb. 24 u. 37) von der Expanderseite zur Kompressorseite zu verlagern, könnte mit geringem Aufwand die (Haupt-) Schiebersteuerung auf den Kompressor erweitert werden, wodurch dort eine Volldruckarbeit resultiert. Die so dem Expander entzogene zusätzliche Energie wird dann im Hochdruck- Wärmeübertrager abgeführt und schmälert so nicht die Enthalpiedifferenz über dem Verdampfer. Allerdings ist zu untersuchen, inwieweit die zusätzlichen Leckagen eines voraussichtlich undichteren Schiebers gegenüber einem Ventil diesen Vorteil aufheben oder überwiegen. Außerdem ist wegen eines sicheren Anlaufs, d.h. für den anfänglichen Druckaufbau auf der Expansionsseite, ein Rückschlagventil zwischen Saug- und Druckseite des Kompressors zu installieren, das mit der Durchströmrichtung dieser Arbeitsmaschine übereinstimmt.

Sicherheitshalber sollte zumindest am Expandereintritt generell ein direkt angebauter bzw. integrierter (jedoch auswechselbarer) Filter installiert werden, um den besonders schmutzempfindlichen Expanderteil zu schützen.

Grundsätzlich kann man diese Arbeit auch als Fahrplan für die Entwicklung von Expander-Kompressor-Einheiten für andere Kältemittel bzw. Kreislaufschaltungen verwenden. Mit einem geschätzten isentropen Gesamtwirkungsgrad von 50..60 % kann bei der Prozessoptimierung festgestellt werden, ob sich ein Expander lohnt.