

Neue Verdichtertechnologien

Stirling-Kältemaschinen in der Praxis

Holger Schikora und Markus Mai, Essen

zu den Autoren

Dipl.-Ing. Holger Schikora,
wissenschaftlicher Mitarbeiter,
Institut für angewandte Thermodynamik und Wärmepumpentechnik, Universität Essen



Dipl.-Ing. Markus Mai,
wissenschaftlicher Mitarbeiter,
Institut für angewandte Thermodynamik und Wärmepumpentechnik, Universität Essen



Stirling-Kältemaschinen stehen auch heute noch in dem Ruf, nur schlechte Leistungszahlen bei geringer Zuverlässigkeit zu erreichen. Lediglich in Randbereichen der Kryotechnik konnten sie sich durchsetzen, zum Beispiel zur Kühlung von Infrarotsensoren bei ca. 80 K. Bei höheren Temperaturen werden sie derzeit in keiner industriellen Anwendung eingesetzt. Jedoch gibt es auch dort viele interessante Anwendungen, angefangen bei der Gewerbetiefkühlung, über die Kältebereitstellung bei chemischen Prozessen bis hin zur Lösemittel-Rekondensation.

In der Kältetechnik werden, von der Kryotechnik abgesehen, derzeit fast ausschließlich Kaltdampf-Kältemaschinen eingesetzt. Noch bis vor einigen Jahren wurden als Arbeitsmedium bevorzugt FCKW-Kältemittel eingesetzt. Diese sogenannten Sicherheitskältemittel galten als die idealen Arbeitsstoffe, denn sie waren weder brennbar noch toxisch. Nach dem Bekanntwerden ihrer ozonzerstörenden Wirkung Mitte der 70er Jahre gerieten sie jedoch mehr und mehr in die Kritik. Mittlerweile ist ihr Einsatz in Neuanlagen in Deutschland vom Gesetzgeber verboten worden [1]. Die von den Kältemittelfirmen vorgestellten Ersatzstoffe konnten jedoch bisher noch nicht in allen Bereichen überzeugen. Die derzeit verfügbaren synthetischen Kältemittel besitzen ein hohes Treibhauspotential, und die natürlichen Kältemittel sind meistens brennbar und/oder giftig. Ausnahmen sind Kohlendioxid und Wasser, bei denen sich jedoch die Drucklagen als problematisch erweisen.

Neben der Suche nach alternativen Kältemitteln ist auch die Suche nach alternativen Kälteerzeugungsverfahren sinnvoll. Eine erfolgversprechende Alternative zu den herkömmlichen Kaltdampf-Kältemaschinen ist die Stirling-Kältemaschine. Aus diesem Grund werden am Institut für angewandte Thermodynamik und Klima-

technik (IATK) an der Universität Essen seit 1995 Forschungen auf dem Gebiet der Stirling-Technik durchgeführt.

Verfahren zur Kälteerzeugung

Kälteanlagen werden heutzutage in vielen Bereichen eingesetzt. Neben den klassischen Anwendungen, wie beispielsweise der Klimatechnik oder der Kühlung von Lebensmitteln, ergeben sich laufend neue Anwendungsfelder. Vor allem bei tieferen Temperaturen wird in Zukunft ein großer Bedarf an Kälte bestehen. Theoretische Untersuchungen haben gezeigt, daß Stirling-Kältemaschinen bei Temperaturen unterhalb von -30 °C konkurrenzfähige Leistungsdaten im Vergleich zu den herkömmlichen Kaltdampf-Kältemaschinen aufweisen können.

Bild 1 zeigt die wichtigsten Anwendungen in dem für Stirling-Kältemaschinen interessanten Temperaturbereich.

Abgesehen von der Lebensmitteltiefkühlung liegen die dargestellten Anwendungen in Temperaturbereichen, die mit herkömmlichen Kaltdampf-Kältemaschinen nur schwer erreicht werden können. Temperaturen unterhalb von 200 K werden nur noch mit aufwendigen Kaskaden realisiert, die jedoch einen erheblichen Regelungsaufwand erfordern. Auch die Leistungsdaten fallen bei diesen Kälteanlagen mit sinkender Temperatur stark ab. Bild 2 zeigt die Gütegrade verschiedener Kälteerzeugungsverfahren in Abhängigkeit von der Temperatur der Kälteerzeugung. Das Diagramm endet zwar bei einer Temperatur von -80 °C , dies stellt jedoch keineswegs die untere Grenze für Stirling-Kältemaschinen dar.

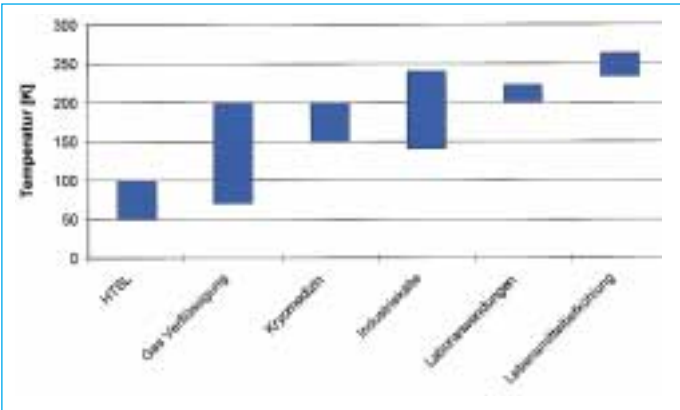


Bild 1 Mögliche Anwendungen für Stirling-Kältemaschinen

Kaltdampf-Kältemaschinen sind für jeweils eine bestimmte Temperatur der Kälteerzeugung ausgelegt und konstruiert. Bereits bei wenigen Kelvin Abweichungen vom Auslegungspunkt gibt es erhebliche Einbußen bei den Leistungsdaten. Zudem wird der Einsatzbereich einer Kaltdampf-Kältemaschine durch die Drucklagen des eingesetzten Kältemittels begrenzt. Eine Kälteanlage sollte, um ein Eindringen von Feuchtigkeit zu vermeiden, nicht im Unterdruckbereich betrieben werden. Dadurch wird die Temperatur der Kälteerzeugung nach unten hin begrenzt. Stirling-Maschinen hingegen können über einen weiten Temperaturbereich eingesetzt werden. Die dabei auftretende Verringerung der Leistungsdaten ist verhältnismäßig gering. Auch die Temperatur der Wärmeabgabe unterliegt bei Kaltdampf-Kältemaschinen einigen Einschränkungen. Bei einfachen Kälteanlagen wird zur Aufrechterhaltung der Drucklagen häufig die Kondensati-

onstemperatur künstlich hoch gehalten. Eine energetisch vorteilhafte Absenkung der Temperatur der Wärmeabgabe bei entsprechenden Umgebungsbedingungen ist somit nicht möglich. Die obere Grenze ergibt sich durch den maximal zulässigen Betriebsdruck der Kälteanlage. Bei Stir-

ling-Kältemaschinen ist auch diese Temperatur variabel und kann den Umgebungsbedingungen angepaßt werden. Sie kann zum Beispiel auch so gewählt werden, daß eine Abwärmenutzung möglich ist.

Prototyp einer Stirling-Kältemaschine

Im Rahmen eines vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) geförderten Forschungsvorhabens [4] wurde am Institut für angewandte Thermodynamik und Klimatechnik eine Stirling-Kältemaschine (Bild 3) entwickelt und meßtechnisch untersucht. Die Kältemaschine basiert auf dem Solo 161 Stirling-Motor der Firma Solo Kleinmotoren GmbH, Sindelfingen. Von diesem wurden die gesamte Antriebseinheit und das Kolben-Zylinder-System übernommen

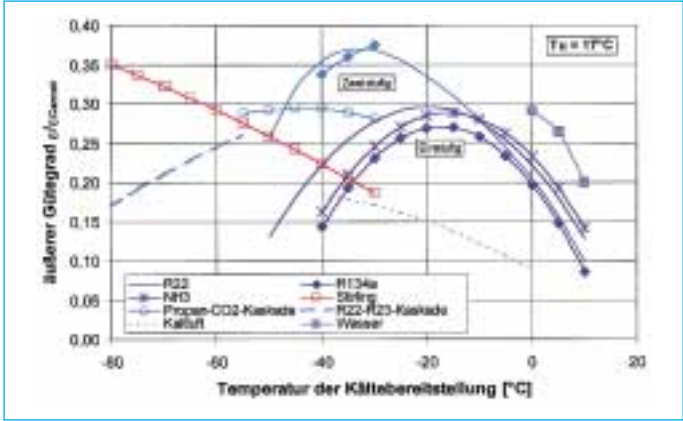


Bild 2 Vergleich verschiedener Kälteerzeugungsverfahren [2]



Bild 3 Solo 161 Stirling-Kältemaschine

(rote Bereiche in Bild 3). Die Wärmeübertragereinheit wurde am IATK mit einem im Rahmen eines früheren Forschungsvorhabens entwickelten Simulationsprogramms ausgelegt [3].

Durch die Verwendung aller bewegten Teile des Stirling-Motors konnten die für Stirling-Maschinen typischen Probleme, die durch den erforderlichen Trockenlauf der Kolben entstehen, bereits im Vorfeld als gelöst betrachtet werden. Diese Teile haben ihre Zuverlässigkeit beim Stirling-Motor durch über 100 000 akkumulierte Betriebsstunden unter Beweis gestellt.

Die entwickelte Kältemaschine wurde für eine Temperatur der Kälteerzeugung von -40 °C ausgelegt. An einem Leistungsprüfstand für Kältemaschinen am IATK wurde die entwickelte Stirling-Kältemaschine meßtechnisch untersucht. Die erreichten Leistungsdaten können als konkurrenzfähig zu den derzeit eingesetzten Kaltdampf-Kältemaschinen angesehen werden. Ein großer Vorteil dieser Kältemaschine liegt in der Flexibilität der Temperatur der Kälteerzeugung. Da in Stirling-Kältemaschinen kein Phasenwechsel stattfindet, ist die Temperatur der Kälteerzeugung auch nicht von den Drucklagen in der Kältemaschine abhängig. Die entwickelte Stirling-Kältemaschine wurde bereits bei einer Temperatur von -80 °C betrieben. In diesem Temperaturbereich ist eine Kältebereitstellung durch Kaltdampf-Kältemaschinen nur durch sehr aufwendige Kälteanlagen realisierbar. Mit der Stirling-Kältemaschine hingegen können auch tiefere Temperaturen problemlos erreicht werden. Als problematisch erweist sich dabei lediglich der „Kältetransport“. Die Auskopplung der bereitgestellten Kälte muß

bei Stirling-Kältemaschinen durch einen Kälteträger erfolgen. Die Temperatur der Kälteerzeugung wird deshalb durch dessen Gefrierpunkt begrenzt. Bei dem verwendeten Leistungsprüfstand wurde bisher Methanol als Kälteträger eingesetzt, wodurch die Temperatur auf -80 °C begrenzt wurde. Durch eine an die Temperaturen der Wärmeaufnahme und Wärmeabgabe angepaßte Wärmeübertragereinheit lassen sich die guten bereits erreichten Leistungsdaten in diesem Temperaturbereich nochmals steigern.

Industrieller Einsatz der Solo 161 Stirling-Kältemaschine

Nachdem in den Laboruntersuchungen zufriedenstellende Leistungsdaten für die Solo 161 Stirling-Kältemaschine nachgewiesen werden konnten, soll nun der Einsatz unter industriellen Bedingungen erfolgen. Im Rahmen eines neuen Forschungsvorhabens [5] soll die Stirling-Kältemaschine zur Reinigung der Abluft einer Oberflächenentfettungsanlage eingesetzt werden. Die Massenkonzentration des Lösemittels in der Abluft kann durch Rekondensation verringert werden. Bisher wird die Abluft mittels herkömmlicher Kaltdampf-Kältemaschinen auf Temperaturen von etwa -50 °C abgekühlt. Die Grenzwerte der 2. BImSchV können bei diesen Temperaturen nur durch den zusätzlichen Einsatz von Aktivkohlefiltern erreicht werden. Um die gesetzlichen Vorschriften auch ohne den Einsatz dieser einhalten zu können, muß die Abluft auf eine Temperatur von etwa -120 °C abgekühlt werden. Diese Temperatur ist von der entwickelten Stirling-Kältemaschine gut erreichbar.

Neben der Auslegung der Wärmeübertragereinheit, bestehend aus dem Wärmeüberträger zur Wärmeaufnahme, dem Wärmeüberträger zur Wärmeabgabe und dem Regenerator, muß vor allem die Regelung der Kälteanlage an die Besonderheiten dieses Anwendungsfalles angepaßt werden, so daß ein vollautomatisierter Betrieb der Entfettungsanlage möglich ist. Die Regelung der Kältemaschine erfolgt durch Drehzahl- und/oder Druckvariation. Die Leistungsdaten bei Teillast können als ausgesprochen gut bezeichnet werden. Wird die Kälteleistung beispielsweise auf 30 % der Maximalleistung reduziert, sinkt der Gütegrad der Kältemaschine lediglich auf etwa 90 %. Im mittleren Leistungsbe- reich ergeben sich sogar teilweise höhere Gütegrade als bei Maximalleistung. Durch dieses Teillastverhalten ist ein kontinuier-

licher Betrieb der Kälteanlage auch bei variierendem Kältebedarf energetisch sinnvoll. Nach dem Aufbau der Versuchsanlage wurde diese über einen Zeitraum von mehreren Monaten betrieben. Dadurch wurde vor allem die Zuverlässigkeit der Kälteanlage und die Qualität der Regelung überprüft.

Der Einsatz der entwickelten Stirling-Kältemaschine in einer Oberflächenentfettungsanlage stellt jedoch nur eine mögliche Anwendung dar. Denkbar sind viele weitere Einsatzgebiete, die ähnliche Anforderungen bezüglich Kälteleistung und Temperatur der Kälteerzeugung haben. Beim Einsatz unter realen Bedingungen entspricht der Kältebedarf häufig nicht den Auslegungsbedingungen. Durch das gute Teillastverhalten der Stirling-Maschine ist im Vergleich zu Kaltdampf-Kältemaschinen eine Energieeinsparung zu erwarten. Aus energetischer Sicht erscheint somit der Einsatz der entwickelten Kälteanlage auch bei höheren Temperaturen, bis etwa -30 °C sinnvoll. Bei entsprechenden Stückzahlen und der damit verbundenen Reduzierung der Herstellungskosten könnte dieser Bereich auch wirtschaftlich interessant werden. Zudem sind bei der Stirling-Maschine der Arbeitsaufwand und somit auch die Kosten bei der Installation sehr gering. Ursache dafür ist die integrierte Wärmeübertragereinheit, die den direkten Anschluß des Kälteträger- und des Kühlwasserkreislaufs ermöglicht. □

Literatur

- [1] Bundesministerium der Justiz; FCKW-Halon-Verbots-Verordnung; Bundesgesetzblatt I, S. 1090, 06.05.1991
- [2] Institut für Luft- und Kältetechnik gGmbH (LLK); Studie zur Recherche und Bewertung von Verfahren zur Kälteerzeugung; Dresden, 1991
- [3] Schiefelbein, K.; Theoretische und experimentelle Untersuchung von Stirling-Kältemaschinen für die Kältebereitstellung bei Temperaturen oberhalb von -40 °C ; Dissertation, Universität GH Essen, 1997
- [4] Schikora, H.; Mai, M.; Steimle, F.; Auslegung, Bau und experimentelle Untersuchung einer Stirling-Kältemaschine für die Tiefkühlung in Supermärkten; Schlußbericht zum gleichnamigen Forschungsvorhaben, gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi), Förderkennzeichen: 0327213, 2001
- [5] Universität Essen; Entwicklung einer Stirling-Kälteanlage für die Rekondensation von Lösungsmitteln; Förderkennzeichen 0329831A, Forschungsvorhaben gefördert durch das BMWi, 2001–2003