



Untersuchung des Stirlingprozesses für eine umweltfreundliche Kälteerzeugung - Systemanalyse

R. Stiglbrunner, E. Podesser

Berichte aus Energie- und Umweltforschung

17/2003

Impressum:

Eigentümer, Herausgeber und Medieninhaber:
Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie
Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Verantwortung und Koordination:
Abteilung für Energie- und Umwelttechnologien
Leiter: DI Michael Paula

Liste sowie Bestellmöglichkeit aller Berichte dieser Reihe unter <http://www.nachhaltigwirtschaften.at>
oder unter:

Projektfabrik Waldhör
Nedergasse 23, 1190 Wien
Fax 01 /36 76 151 - 11
Email: projektfabrik@nexta.at

Untersuchung des Stirlingprozesses für eine umweltverträgliche Kälteerzeugung - Systemanalyse

DI Dr. Rudolf Stiglbrunner, Erich Podesser

Joanneum Research
Institut für Energieforschung

Graz, Mai 2002

Ein Projektbericht im Rahmen der Programmlinie



Impulsprogramm Nachhaltig Wirtschaften

Im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie

ABSTRACT

Gegenstand der Untersuchungen war die Beurteilung des Stirling-Kälteprozesses für den Einsatz im umgebungsnahen Temperaturbereich (ca. -50 bis $+20$ °C), das sind die Anwendungsbereiche Klimatechnik, Kühltechnik, Gefriertechnik und Schockgefriertechnik. Hierzu wird der aktuelle Stand des Wissens dargestellt. Für alle Anwendungsbereiche wird die Stirling-Kältetechnik mit der konventionellen Kältetechnik im Hinblick auf Umwelt, Technik und Wirtschaftlichkeit, verglichen. Es zeigt sich, dass die aussichtsreichsten Einsatzbereiche für die Stirling-Kältetechnik im unteren Teil des umgebungsnahen Temperaturbereiches liegen, d.h. Anwendungen in der Gefrier- und Schockgefriertechnik. Im Hinblick auf die Entwicklung von kommerziellen Anlagen wurde das Interesse der Industrie untersucht. Dabei konnte ein möglicher Kooperationspartner für ein Folgeprojekt gefunden werden. Als nächster Schritt zum praktischen Einsatz der Stirling-Kältetechnik werden Untersuchungen des Kältemarktes vorgeschlagen, auf die eine Entwicklung von Stirling-Kältemaschinen erfolgen soll.

There is an increasing demand of cooling capacity in the near ambient temperature range (between -50 and $+20$ °C): air conditioning, cooling, freezing and shock-freezing. The use of state-of-the-art cooling-systems may cause environmental problems (e.g. ozone depletion, global warming), because of the refrigerants used in these systems. A possibility to avoid these problems is the use of cooling systems, for example Stirling cooling systems, not relying on refrigerants as working fluids. So far the Stirling cooling technology is used for cyro-applications (temperature below -100 °C) like gas liquefaction or cooling of electronic devices (e. g. infrared sensors). Theoretical and practical investigations of Stirling cooling systems for the use in the near ambient temperature range have been started with modified Stirling engines of the η - and ζ -types. One result of the tests was, that Stirling coolers are more efficient than vapor compression coolers at temperatures less then -30 °C, i. e. for freezing and shock-freezing applications. As a next step a market analysis should be performed, followed by the development of prototype Stirling cooler in cooperation with industry.

INHALTSVERZEICHNIS

KURZFASSUNG	V
1. Einleitung	1
2. Grundlagen der Kältetechnik	3
2.1 Definitionen	3
2.2 Anwendungsbereiche	3
2.3 Kälteprozesse	4
3. Stirling-Prozess	9
3.1 Allgemeine Beschreibung	9
3.2 Stirling-Kraftprozess (Motor)	10
3.3 Stirling-Kälteprozess (Kältemaschine bzw. Wärmepumpe)	13
4. Aktueller Wissensstand der Stirling-Kältetechnik	19
4.1 Historischer Überblick	19
4.2 Stirling-Kältetechnik in der Kryotechnik	20
4.3 Stirling-Kältetechnik im umgebungsnahen Temperaturbereich	24
5. Systemauswahl für Stirling-Kältemaschinen	27
5.1 Stirling-Systeme allgemein	27
5.2 Stirling-Systeme für Kältemaschinen	31
5.2.1 Mechanisch betriebene Stirling-Kältemaschinen	31
5.2.2 Thermisch betriebene Stirling-Kältemaschinen	34
5.2.3 Kältemaschine „Stirling Thermal Motors“	39
5.2.4 Kältemaschine „Royal Institut of Technology“	41
5.2.5 Kältemaschine „Universität GH Essen“	42
5.2.6 Kältemaschine „Sunpower“	44
5.3 Ergebnisse der Systemauswahl	45
6. Systemvergleich: Stirling-Kältetechnik – konventionelle Kältetechnik	48
6.1 Klimatechnik	48
6.2 Kühltechnik	49
6.3 Gefriertechnik	50
6.4 Schockgefriertechnik	52
6.5 Ergebnisse des Systemvergleichs	52
7. Umweltaspekte der Kältetechnik	55
8. Industriekontakte	63
9. Empfehlungen	65
10. Literatur	66

KURZFASSUNG

Der Stirlingprozess für die Kälteerzeugung

Der zunehmende Bedarf an Kälte im umgebungsnahen Temperaturbereich (von ca. -50 bis $+20$ °C) sowie die Forderung, damit zusammenhängende Umweltprobleme (z.B. Ozonzerstörung, Treibhauseffekt) zu vermeiden, erfordern den Einsatz umweltverträglicher Verfahren zur Kälteerzeugung. Bei der derzeit überwiegend eingesetzten Kaltdampf-Kompressions-Kältetechnik werden Kältemittel eingesetzt, welche die Hauptursache des Ozonabbaus in der oberen Stratosphäre sind, und auch einen Beitrag zum künstlichen Treibhauseffekt leisten. Es wird daher angestrebt, Kältemittel einzusetzen, welche keine schädlichen Auswirkungen auf die Umwelt haben, oder Kälteprozesse anzuwenden, für welche keine umweltschädigenden Arbeitsmittel erforderlich sind. Einer dieser Prozesse ist der Stirling-Kälteprozess, bei welchem „natürliche“ Arbeitsmittel, wie z.B. Luft, Helium oder Wasserstoff, eingesetzt werden können.

Das traditionelle Einsatzgebiet des Stirling-Kälteprozesses liegt in der Tieftemperaturtechnik, z.B. zur Luftverflüssigung (Siedepunkt von Stickstoff bei Umgebungsdruck: $-195,9$ °C) und zur Kühlung von elektronischen Bauteilen z.B. Infrarotsensoren für Nachtsichtgeräte. In der vorliegenden Arbeit wird der Einsatz des Stirling-Kälteprozesses im umgebungsnahen Temperaturbereich untersucht, der in folgende Anwendungsbereiche unterteilt ist:

- ☞ Klimotechnik mit Nutztemperaturen zwischen ca. $+10$ und $+20$ °C
- ☞ Kühltechnik mit Nutztemperaturen zwischen ca. 0 und $+10$ °C
- ☞ Gefriertechnik mit Nutztemperaturen zwischen ca. -40 und 0 °C
- ☞ Schockgefriertechnik mit Nutztemperaturen zwischen ca. -50 und -20 °C.

Aktueller Wissensstand

Versuche zum praktischen Einsatz der Stirling-Kältetechnik im umgebungsnahen Temperaturbereich werden derzeit hauptsächlich mit modifizierten Stirling-Motoren durchgeführt, das heißt, es gibt keine speziell für die Kälteerzeugung konzipierten Maschinen. Bei den durchgeführten Versuchen zeigte sich, dass der Stirling-Kälteprozess bei Temperaturen unter ca. -30 °C der konventionellen Kaltdampf-Kompressions-Kältetechnik im Hinblick auf die Leistungszahl überlegen ist. Versuche mit Freikolben-Stirling-Kältemaschinen, welche mit Linearmotoren betrieben werden

und für Tieftemperaturanwendungen entwickelt wurden, wurden im Bereich der Kühltechnik (Haushaltskühlschränke) durchgeführt, kamen jedoch nicht über das Pilotstadium hinaus.

Systemauswahl und Systemvergleich

Die meisten Erfahrungen mit Stirling-Kältemaschinen, mit Ausnahme der Miniatur-Kryokühler, gibt es mit η -Typ Stirling-Kältemaschinen nach dem „System Philips“, welche zur Luftverflüssigung konzipiert wurden. Auch bei den in Kühlschränken erprobten Freikolben-Stirling-Kältemaschinen handelt es sich um η -Typ Maschinen. Für Versuche im Bereich der Gefrierkühlung wurden auch ζ -Typ Maschinen verwendet. Für den Einsatz der Stirling-Kältetechnik im umgebungsnahen Temperaturbereich erscheinen daher η - oder ζ -Typ Stirlingmaschinen geeignet zu sein.

Der für die vier Anwendungsbereiche im umgebungsnahen Temperaturbereich durchgeführten Systemvergleich der Stirling-Kältetechnik mit der konventionellen Kältetechnik führte zu den in Tabelle I dargestellten Ergebnissen.

Tabelle I: Systemvergleich Stirling-Kältetechnik - konventionelle Kältetechnik

Anwendung	Nutztemperatur	konventionelle Kältetechnik	Bewertung der Stirling-Kältetechnik betreffend		
			Umwelt	Technik	Wirtschaftlichkeit
Klimatechnik	> +10 °C	KKK (SK)	++	--	--
Kühltechnik	> 0 und < +10 °C	KKK	++	-	-
Gefiertechnik	> -40 und < 0 °C	KKK (SK)	++	++	+
Schockgefiertertechnik	< -20 °C	KKK (SK)	++	++	+/-

Abkürzungen:

KKK **K**altdampf-**K**ompressions-**K**älteprozesse
(SK) **S**orptions-**K**älteprozesse (Sonderanwendungen)

Bewertungen:

++ weit überlegen - unterlegen
+ überlegen -- weit unterlegen
+/- gleichwertig

Die größten Chancen für einen erfolgreichen praktischen Einsatz der Stirling-Kältetechnik liegen im Bereich der Gefiertechnik, eventuell auch in der Schockgefiertertechnik.

Umweltaspekte der Kältetechnik

Der Einsatz von umweltschädigenden Kältemitteln (Ozonabbau, Treibhauseffekt) ist das größte Problem der konventionellen Kältetechnik. Der stufenweise Ersatz gewisser Kältemittel ist im Laufen, jedoch gibt es bisher keine in allen Belangen zufriedenstellende Ersatzkältemittel. Es ist daher sinnvoll, Kälteprozesse zu

untersuchen, für deren Betrieb keine umweltschädlichen Kältemittel erforderlich sind. Einer dieser Prozesse ist der Stirling-Kälteprozess.

Industriekontakte

Zur Abschätzung des Interesses der österreichischen Industrie an der Stirling-Kältetechnik bzw. an einer Kooperation bei Folgeprojekten, wurde eine Befragung durchgeführt. Dabei konnte ein sehr erfolgversprechender Kontakt hergestellt werden.

Empfehlungen

Als nächster Schritt wird die Durchführung einer Bedarfsanalyse für den Anwendungsbereich Gefrierfriertechnik in Kooperation mit einem Industriepartner vorgeschlagen. Ziel dabei ist es, die Potentiale und technische Rahmenbedingungen für den Einsatz der Stirling-Kältetechnik zu ermitteln. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen könnte die Entwicklung eines Labormusters einer Stirling-Kältemaschine in Angriff genommen werden.

1. Einleitung

Der Bedarf an Kälte im umgebungsnahen Temperaturbereich (von ca. –50 bis +20 °C) wird steigen. Ein Überblick über die wirtschaftliche Bedeutung der Kältetechnik wird mit den in Tabelle 1.1 zusammengestellten Zahlen der deutschen Kälteindustrie gegeben.

Tabelle 1.1: Kennzahlen der deutschen Kälteindustrie /38/

	Produktion kältetechnischer Erzeugnisse (in Mio. DM)				
	1996	1997	1998	1999	2000*
Gewerbliche Kühlmöbel	856	831	972	1.085	1.121
Kältemaschinen und -anlagen	1.806	1.974	2.106	2.617	2.707
Teile für gewerbliche Kühlmöbel, -geräte, Kältemaschinen; Wärmepumpen	443	489	556	593	632
Kältetechnik insgesamt	3.105	3.294	3.634	4.295	4.461

*) vorläufige Werte
Quelle: Statistisches Bundesamt / VDMA

Im Jahr 2000 wurden in Deutschland kältetechnische Erzeugnisse (inklusive Wärmepumpen) im Wert von insgesamt knapp 4,5 Mrd. DM (ca. 2,3 Mrd. €) produziert. Beschäftigt waren ca. 16.000 Mitarbeiter. Erzeugnisse im Wert von ca. 1,8 Mrd. DM (ca. 0,9 Mrd. €) wurden exportiert. Die Importe beliefen sich auf 3 Mrd. DM (ca. 1,5 Mrd. €).

Es besteht daher verstärkter Bedarf an umweltschonender und energieeffizienter Bereitstellung von Kälte in diesem Temperaturbereich. Derzeit wird dieser Bedarf zum größten Teil (über 90%) mittels Kaltdampf-Kompressions-Kälteprozessen gedeckt. Hierfür werden „Sicherheitskältemittel“ (d.h. nicht gesundheitsschädlich, nicht explosiv, unbrennbar, nicht korrosiv) eingesetzt. Bis zur Entdeckung des Ozonabbaus in der Stratosphäre und des künstlichen Treibhauseffektes, welche auch durch die „Sicherheitskältemittel“ verursacht werden, schien es keine umweltrelevanten Probleme bei der Kälteerzeugung zu geben. Der Einsatz von vollhalogenierten Fluorchlorkohlenwasserstoffen (FCKW, z.B. R 11, R 12, R 502,

R 114) ist bereits seit 01.01.2001 verboten. Als Ersatz für diese Kältemittel werden teilfluorierte Kohlenwasserstoffe (HFKW) verwendet, welche in Österreich, entsprechen einem Verordnungsentwurfes der BMLFUW, in der Kältetechnik schrittweise beginnend mit 01.01.2003 bis spätestens 01.01.2007 verboten werden sollen. Ein zusätzlicher Beitrag zum Treibhauseffekt wird durch die Bereitstellung der Energie zum Antrieb der Kältemaschinen verursacht. Da derzeit kein in allen Belangen zufriedenstellendes Ersatzkältemittel für Kaldampf-Kompressionskälteanlagen in Sicht ist, sind verstärkte Anstrengungen hinsichtlich des Einsatzes anderer, umweltverträglicherer Kälteerzeugungsverfahren notwendig. Eine dieser Möglichkeiten ist der Stirling-Kälteprozess, in welchem als Arbeitsmittel Stoffe der Biosphäre (z. B. Luft, Stickstoff, Helium, Wasserstoff) verwendet werden können. Andere Möglichkeiten einer umweltverträglicheren Kälteerzeugung sind die Verwendung von Kohlendioxid (CO₂) oder Ammoniak (NH₃) als Kältemittel, im Bereich der Klimatechnik der Einsatz von Desiccant-Klimaanlagen. In dieser Arbeit wird der Einsatz des Stirling-Kälteprozesses für die umgebungsnahe Kälteerzeugung untersucht.

2. Grundlagen der Kältetechnik

In diesem Kapitel werden einige wichtige Grundlagen der Kältetechnik behandelt, welche das Verständnis der folgenden Kapitel erleichtern sollen.

2.1 Definitionen

Unter Kältetechnik versteht man die Technik zur Erzeugung, Aufrechterhaltung und Ausnutzung einer im Vergleich zu den benachbarten Volumina tieferen Temperatur in einem räumlich begrenzten Volumen. Wärmeentzug aus einem begrenzten, wärmegeprägten Raum heißt Kühlung. Für das Kühlen sind technische Einrichtungen erforderlich, welche eine tiefere Temperatur erzeugen als das gewünschte Temperaturniveau im zu kühlenden Raum. Entsprechend dem 2. Hauptsatz der Thermodynamik kann Wärme nicht „von selbst“ von einem kälteren auf einen wärmeren Körper übergehen.

2.2 Anwendungsbereiche

Traditionell wurde die Kältetechnik in die „eigentliche“ Kältetechnik (mit Temperaturen höher als ca. -100 °C) und in die Tieftemperaturtechnik (Stichwort „Luftzerlegung“) eingeteilt. Heute ist die Unterteilung der Kältetechnik in folgende zwei Anwendungsbereiche /35/ üblich:

1. Die „umgebungsnahe Kältetechnik“, die den Temperaturbereich von ca. -80 °C bis ca. $+100\text{ °C}$ umfasst.
2. Die Kryotechnik, zu der alle Anwendungen unterhalb von ca. -80 °C zu zählen sind.

Die obere Grenze der umgebungsnahe Kältetechnik wird deshalb mit $+100\text{ °C}$ festgelegt, um auch die Wärmepumpentechnik in dieses Gebiet zu integrieren.

Die umgebungsnahe Kältetechnik umfasst beispielsweise folgende Anwendungen:

≠ Wärmepumpen

- ≠ Klimaanlage für Produktionsstätten, Gebäude und Transportmittel
- ≠ Lebensmittelfrischhaltung (z.B. Kühlhäuser, Kühltheken, Haushaltskühlschränke, Kühltransporte)
- ≠ Gefrierlagerung von Lebensmitteln (Haushalt, Supermärkte, etc.), Gefriertransport von Lebensmitteln sowie Eiserzeugung (für Kühltransporte, Eishallen, etc.).
- ≠ Schockgefrieretechnik in der industriellen Lebensmittelproduktion, Gefriertrocknung, Verflüssigung von Brenngasen wie Propan und Butan sowie zur Herstellung von Trockeneis.

In der weiteren Folge wird in dieser Arbeit nur die umgebungsnahe Kältetechnik, allerdings ohne Berücksichtigung der Wärmepumpen und Brenngasverflüssigung, behandelt.

2.3 Kälteprozesse

Bei der „Kälteerzeugung“ wird Wärme bei niedriger Temperatur aufgenommen und bei höherer Temperatur wieder abgegeben. (Anmerkung: Der Begriff „Kälteerzeugung“ ist physikalisch nicht korrekt, da es in der Thermodynamik den Begriff „Kälte“ nicht gibt. Es gibt nur Wärme, welche zwischen unterschiedlichen Temperaturniveaus „verschoben“ werden kann.) Zur „Kälteerzeugung“ ist eine *Kältemaschine* erforderlich, welcher Arbeit zugeführt werden muss. In diesem Falle ist der gewünschte Nutzen also die „Kälteerzeugung“ bei niedriger Temperatur. Ist der gewünschte Nutzen hingegen die Nutzung der Wärme bei höherer Temperatur, so spricht man von einer *Wärmepumpe*. Wärmepumpen und Kältemaschinen unterscheiden sich prinzipiell also nur dadurch, dass „Wärme“ oder „Kälte“ der gewünschte Nutzen ist.

Die gebräuchlichsten Kälteprozesse sind:

- ≠ Kompressions-Kälteprozesse (unter Zufuhr mechanischer Energie):
 - Kaltdampf-Kompressions-Kälteprozesse (Verwendung von Kältemitteln, welche bei den Arbeitstemperaturen den Aggregatzustand zwischen Dampfphase und Flüssigkeitsphase ändern)

- Kaltgas-Kompressions-Kälteprozesse (Gase als Kältemittel ohne Aggregatzustandsänderung)
- Dampfstrahl-Kompressions-Kälteprozess (z. B. mit Wasserdampf als Treibmittel und Wasser als Kältemittel)
- ≠ Absorptions-Kälteprozesse (Kältemittel wird mittels eines Lösungsmittelkreislaufes in einem Absorber absorbiert und unter Zufuhr von Wärme im Austreiber wieder ausgetrieben)
- ≠ Thermoelektrischer Kälteprozess (Nutzung des Peltier-Effekts)

Der Kaltdampf-Kompressions-Kälteprozess hat mit über 90% aller installierten Anlagen z. Z. die größte Bedeutung in der Kälte- und Klimatechnik.

Die „Kälteerzeugung“ kann prinzipiell durch alle in Abbildung 2.1 dargestellten idealen thermodynamischen Kreisprozesse erfolgen. Diese Kreisprozesse können in der Praxis aber nur näherungsweise durchlaufen werden, weil es keine idealen Zustandsänderungen gibt.

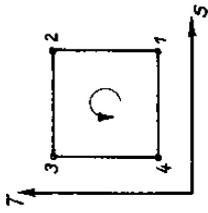
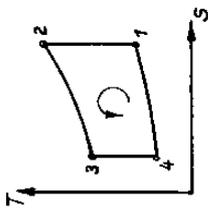
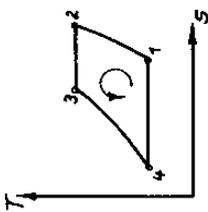
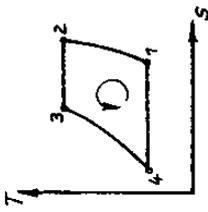
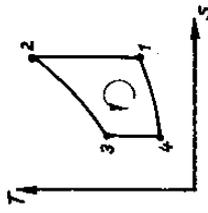
Prozeß	Carnot	Lorenz	Ackeret-Keller	Stirling	Joule
Zustands- änderungen	2 Isentrope 2 Isotherme	2 Isentrope 2 Polytrope	2 Isobare 2 Isotherme	2 Isochore 2 Isotherme	2 Isentrope 2 Isobare
Prozeßverlauf im T, s -Diagramm					
Leistungszahl ε	$\frac{T_{4,1}}{T_2 - T_1}$	$\frac{T_1 - T_4}{(T_2 - T_3) - (T_1 - T_4)}$	$\frac{T_{4,1}}{T_2 - T_1}$	$\frac{T_{4,1}}{T_2 - T_1}$	$\frac{T_1 - T_4}{(T_2 - T_3) - (T_1 - T_4)}$

Abbildung 2.1: Thermodynamische Kreisprozesse zur „Kälteerzeugung“ /34/

Carnot-Prozess

Der Carnot-Prozess ist der wichtigste Kreisprozess in der Thermodynamik, weil er angibt, wie Wärme bei gegebenen Temperaturen am besten in Arbeit umgewandelt wird bzw. umgekehrt, wie Arbeit am besten in Wärme (bzw. „Kälte“) umgewandelt wird. D.h. der Wirkungsgrad des Carnot-Prozesses kann von keinem anderen Kreisprozess übertroffen werden.

In Abbildung 2.2 ist der Carnot-Prozess (rechtslaufend d.h im Uhrzeigersinn) im p,v und T,s Diagramm dargestellt.

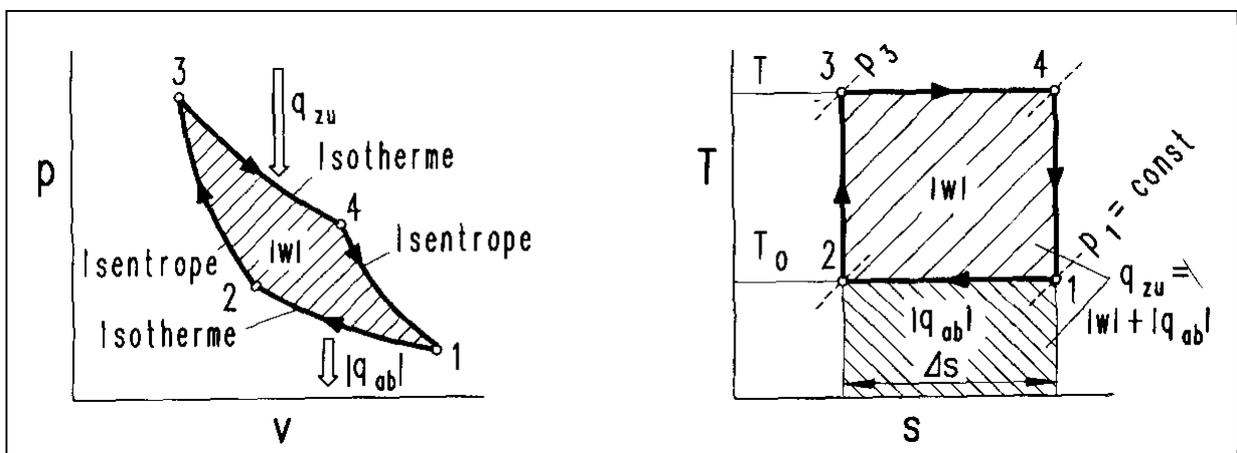


Abbildung 2.2: p, v und T, s Diagramm des (rechtslaufenden) Carnot-Prozesses /32/

Folgende Zustandsänderungen werden durchlaufen:

- 1 à 2: Isotherme Verdichtung ($T_0 = \text{const.}$)
- 2 à 3: Isentrope Verdichtung ($s = \text{const.}$)
- 3 à 4: Isotherme Entspannung ($T = \text{const.}$)
- 4 à 1: Isentrope Entspannung ($s = \text{const.}$)

Bei der isothermen Verdichtung (1 à 2) wird bei der Temperatur T_0 die Wärme $\sqrt{q_{ab}}$ abgeführt, während bei der isothermen Entspannung (3 à 4) bei der Temperatur T die Wärme q_{zu} zugeführt werden muss. Die von den Kurven eingeschlossene Fläche stellt die gewonnene Arbeit w dar. Es gilt:

$$w = q_{zu} - \sqrt{q_{ab}}$$

Allgemein wird das Verhältnis von Nutzen zu Aufwand als Wirkungsgrad bezeichnet. Der thermische Wirkungsgrad ξ_{th} ist also das Verhältnis von gewonnener Arbeit (Nutzen) zur zugeführten Wärme (Aufwand), welcher beim Carnot-Prozess auch als Carnot-Wirkungsgrad oder Carnotfaktor ξ_C bezeichnet wird.

$$\begin{aligned}\xi_{th} = \xi_C &= \sqrt{w} / q_{zu} = (q_{zu} - \sqrt{q_{ab}}) / q_{zu} = (T \cdot s - T_0 \cdot s) / (T \cdot s) = \\ &= (T - T_0) / T = 1 - (T_0 / T)\end{aligned}$$

Durchläuft man den Carnot-Prozess in umgekehrter Richtung (linksläufig d.h. entgegen dem Uhrzeigersinn) so wird bei der niedrigen Temperatur T_0 die Wärme q_{zu} zugeführt und bei der höheren Temperatur T die Wärme $\sqrt{q_{ab}}$ abgeführt. Liegt die niedrige Temperatur des Kreisprozesses oberhalb der Umgebungstemperatur, so handelt es sich um eine Wärmepumpe (Nutzen ist Wärme bei höher Temperatur), liegt die niedrige Temperatur hingegen unterhalb der Umgebungstemperatur, handelt es sich um eine Kältemaschine (Nutzen ist die Erzeugung von „Kälte“). Zur Bewertung von linksläufigen Prozessen verwendet man die sogenannten Leistungszahlen κ (diese werden häufig auch als COP - Coefficient Of Performance bezeichnet), die wie folgt definiert sind:

Für Wärmepumpen: $\kappa_W = \sqrt{q_{ab}} / w = \sqrt{q_{ab}} / (\sqrt{q_{ab}} - q_{zu})$

Für Kältemaschinen: $\kappa_K = q_{zu} / w = q_{zu} / (\sqrt{q_{ab}} - q_{zu})$

Für den Carnot-Prozess ergeben sich somit folgende Carnot-Leistungszahlen κ_C :

Für Wärmepumpen: $\kappa_{C, W} = T / (T - T_0)$

Für Kältemaschinen: $\kappa_{C, K} = T_0 / (T - T_0)$

Da die Carnot-Leistungszahl die höchste (theoretisch) zu erreichende Leistungszahl darstellt, wird zur Beurteilung realer Prozesse der Gütegrad Υ definiert, welcher das Verhältnis der tatsächlichen Leistungszahl κ_{real} zur Carnot-Leistungszahl κ_C ist.

$$\Upsilon = \kappa_{real} / \kappa_C$$

3. Stirling-Prozess

In diesem Kapitel wird der Stirling-Kreisprozess zuerst allgemein beschrieben, anschließend der Stirling-Kraftprozess (Motor) und abschließend der Stirling-Kälteprozess (Kältemaschine bzw. Wärmepumpe) behandelt.

3.1 Allgemeine Beschreibung

Der ideale Stirling-Prozess ist ein Kreisprozess, welcher aus zwei Isothermen ($T = \text{const.}$) und zwei Isochoren ($v = \text{const.}$) besteht (siehe Abbildung 3.1).

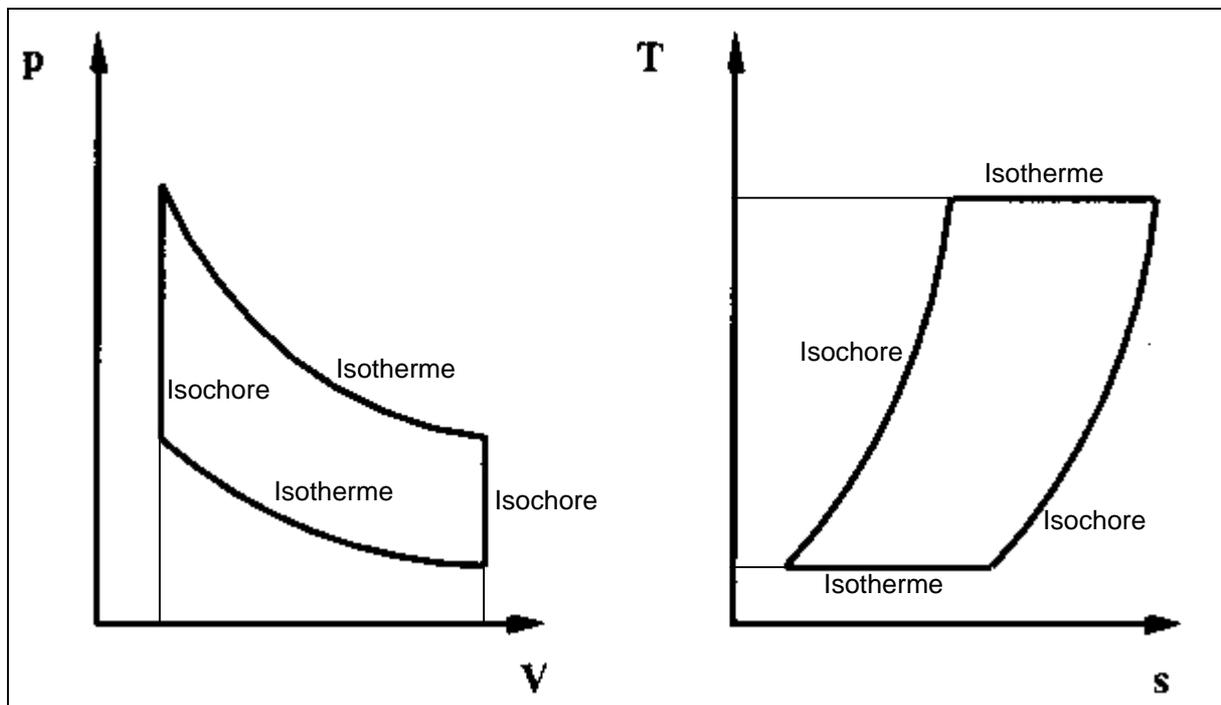


Abbildung 3.1: p, v und T, s Diagramm des idealen Stirling-Prozesses (nach /35/)

Alle folgenden Betrachtungen beziehen sich auf den idealen Prozess d.h. ideales Gas als Arbeitsgas, keine Wärmeverluste, keine Reibungsverluste, idealer Regenerator, etc.

Wird der Kreisprozess nach rechts durchlaufen, handelt es sich um einen Kraftprozess (d.h. Wärme wird in Arbeit umgewandelt), wird er nach links durchlaufen um einen Kälte- bzw. Wärmepumpenprozess (d.h. Arbeit wird in Wärme

umgewandelt). Wie bereits erwähnt, besteht der Unterschied zwischen Kälteprozess und Wärmepumpenprozess nur darin, dass beim Kälteprozess die „Kälte“ (Wärme auf niedrigem Temperaturniveau) der gewünschte Nutzen ist, während beim Wärmepumpenprozess die „Wärme“ (Wärme auf hohem Temperaturniveau) der gewünschte Nutzen ist.

Zu beachten ist, dass die Wärmezufuhr sowohl beim Motor als auch bei der Kältemaschine bei der isothermen Entspannung erfolgt, d.h. jener Teil einer Stirling-Maschine der beim Motor beheizt werden muss, wird bei der Kältemaschine kalt. Anders ausgedrückt, ist beim Motor die Temperatur T_E bei der Entspannung höher als die Temperatur T_C bei der Verdichtung, während bei der Kältemaschine die Temperatur T_E bei der Entspannung niedriger als die Temperatur T_C bei der Verdichtung ist.

Eine detaillierte Beschreibung des Stirling-Prozesses erfolgt anhand des Stirling-Kälteprozesses (Kapitel 3.3).

3.2 Stirling-Kraftprozess (Motor)

Beim Stirling-Kraftprozess wird der Kreisprozess nach rechts durchlaufen (siehe Abbildung 3.2), wobei Arbeit „gewonnen“ d.h. aus dem Prozess abgeführt und Wärme „verbraucht“ d.h. dem Prozess zugeführt wird.

- 2 à 3: Isochore Erwärmung bei kleinem Volumen v_2 von niedriger Temperatur T_C auf hohe Temperatur T_E
- 3 à 4: Isotherme Entspannung von kleinem Volumen v_2 auf großes Volumen v_1 bei hoher Temperatur T_E
- 4 à 1: Isochore Abkühlung bei großem Volumen v_1 von hoher Temperatur T_E auf niedrige Temperatur T_C

Bei hoher Temperatur T_E wird die Wärme q_{zu} dem Prozess zugeführt, bei niedriger Temperatur T_C wird die Wärme q_{ab} aus dem Prozess abgeführt. Die von den Kurven im p, v Diagramm eingeschlossene Fläche stellt die abführbare („gewinnbare“) Arbeit w dar.

Nach den Gesetzen der Thermodynamik lässt sich die aus dem Prozess insgesamt abführbare Arbeit W mit folgender Formel (Negatives Vorzeichen, da laut Vorzeichenkonvention die aus einem System abgeführte Arbeit negativ und die zugeführte Arbeit positiv ist. Dasselbe gilt auch für zu- und abgeführte Wärmemengen) errechnen:

$$W = w * m = - m * R * \ln(v_1 / v_2) * (T_E - T_C)$$

mit

W	insgesamt abführbare Arbeit (J)
w	abführbare Arbeit pro kg Arbeitsgas (J/kg)
m	Masse des Arbeitsgases (kg)
R	Gaskonstante des Arbeitsgases (J/(kg*K))
v_1	großes Volumen pro kg Arbeitsgas (m ³ /kg)
v_2	kleines Volumen pro kg Arbeitsgas (m ³ /kg)
T_E	hohe Temperatur (K)
T_C	niedrige Temperatur (K)

Die dem Prozess insgesamt zuzuführende Wärme Q_{zu} bzw. insgesamt abzuführende Wärme Q_{ab} errechnet sich wie folgt:

$$Q_{zu} = q_{zu} \cdot m = m \cdot R \cdot T_E \cdot \ln(v_1 / v_2)$$

$$Q_{ab} = q_{ab} \cdot m = - m \cdot R \cdot T_C \cdot \ln(v_1 / v_2)$$

mit

Q_{zu} insgesamt zuzuführende Wärme (J)

q_{zu} zuzuführende Wärme pro kg Arbeitsgas (J/kg)

Q_{ab} insgesamt abzuführende Wärme (J)

q_{ab} abzuführende Wärme pro kg Arbeitsgas (J/kg)

Die Berechnung des Wirkungsgrades des Stirling-Motors $\xi_{St, M}$ ergibt:

$$\xi_{St, M} = - W / Q_{zu} = (T_E - T_C) / T_E$$

Wie man sieht, entspricht der Wirkungsgrad des idealen Stirling-Motors ξ_{St-M} dem Carnot-Wirkungsgrad ξ_C , d. h. dem theoretisch höchsten möglichen Wirkungsgrad.

3.3 Stirling-Kälteprozess (Kältemaschine bzw. Wärmepumpe)

Beim Stirling-Kälteprozess wird der Kreisprozess nach links durchlaufen (siehe Abbildung 3.3), wobei „Kälte“ bzw. Wärme „gewonnen“ d. h. aus dem Prozess abgeführt und Arbeit „verbraucht“ d. h. dem Prozess zugeführt wird.

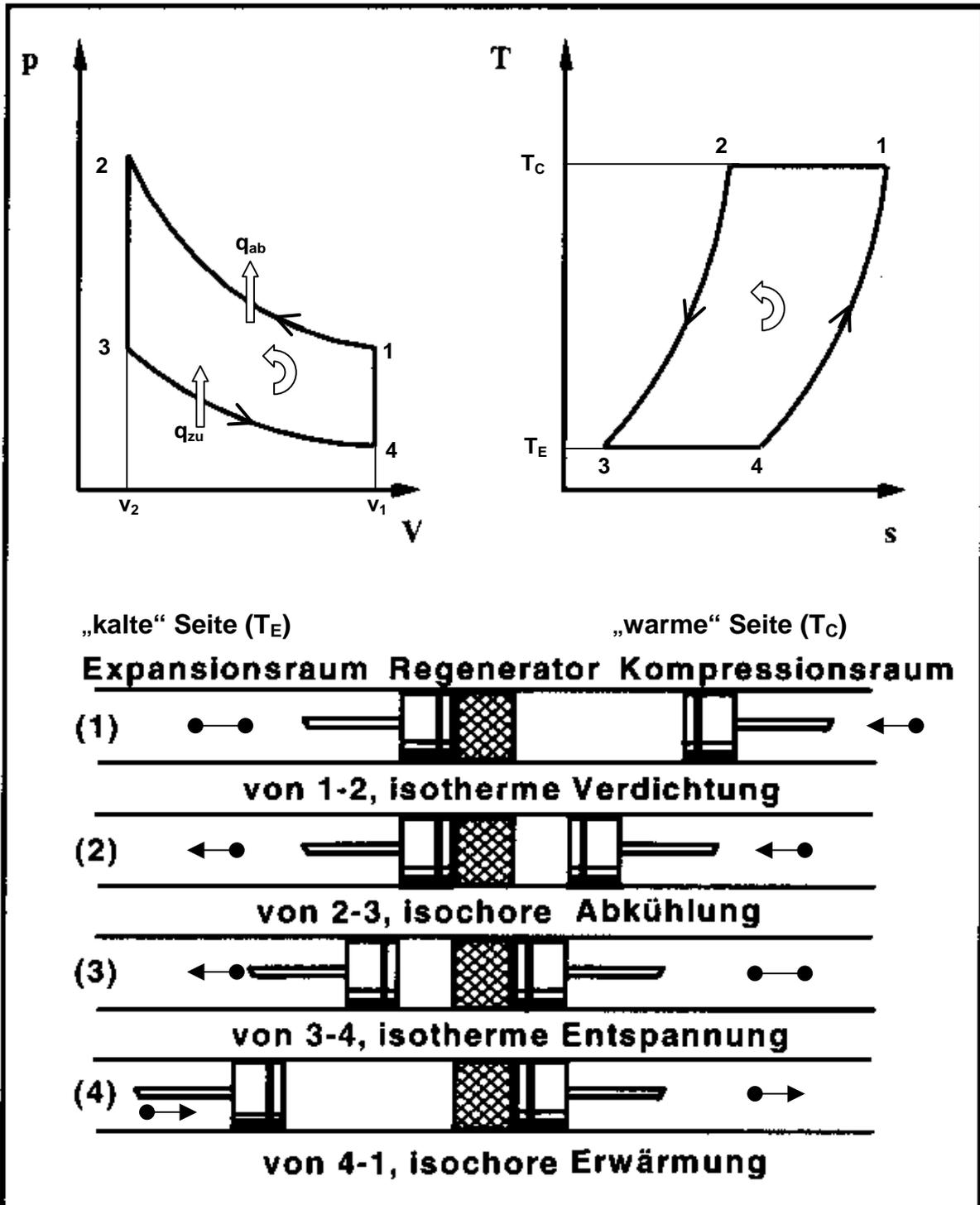


Abbildung 3.3: p, v und T, s Diagramm sowie die zugehörige Kolbenbewegungen (●—●... Stillstand, ←●... Bewegung) des Stirling-Kälteprozesses (Kältemaschine bzw. Wärmepumpe) (nach /35/)

Es werden dabei folgende Zustandsänderungen durchlaufen:

1 à 2: Isotherme Verdichtung:

Warmes Arbeitsgas mit hoher Temperatur T_C wird bei konstanter

Temperatur T_C im Kompressionsraum (rechts vom Regenerator) durch die Bewegung des Kompressionskolbens nach links vom großen Volumen v_1 auf kleines Volumen v_2 verdichtet. Der Expansionskolben (links vom Regenerator) wird dabei nicht bewegt. Um die hohe Temperatur T_C des Arbeitsgases konstant halten zu können, muss dabei die Wärme q_{ab} abgeführt werden. Der Regenerator ist kalt, das gesamte Arbeitsgas befindet sich im Kompressionsraum.

2 à 3: Isochore Abkühlung:

Bei konstantem, kleinem Volumen v_2 wird das warme Arbeitsgas mit der hohen Temperatur T_C durch die synchrone Bewegung beider Kolben nach links vom Kompressionsraum durch den kalten Regenerator in den Expansionsraum (links vom Regenerator) verschoben. Dabei wird das Arbeitsgas durch die vom Regenerator aufgenommene „Kälte“ auf die niedrige Temperatur T_E abgekühlt. Das gesamte Arbeitsgas befindet sich nun im Expansionsraum.

3 à 4: Isotherme Entspannung:

Durch die weitere Bewegung des Expansionskolbens nach links wird das Arbeitsgas vom kleinen Volumen v_2 auf das große Volumen v_1 bei konstanter, niedriger Temperatur T_E entspannt. Um die niedrige Temperatur T_E des Arbeitsgases konstant halten zu können, muss dabei die Wärme q_{zu} zugeführt werden. Das gesamte Arbeitsgas befindet sich im Expansionsraum.

4 à 1: Isochore Erwärmung:

Bei konstantem großem Volumen v_1 wird das kalte Arbeitsgas mit der niedrigen Temperatur T_E durch die synchrone Bewegung beider Kolben nach rechts vom Expansionsraum durch den warmen Regenerator in den Kompressionsraum (rechts vom Regenerator) verschoben. Dabei wird das Arbeitsgas durch die vom Regenerator aufgenommene Wärme auf die hohe Temperatur T_C erwärmt. Das gesamte Arbeitsgas befindet sich nun wieder im Kompressionsraum. Somit ist wieder der Ausgangszustand (Zustand 1) erreicht und der Kreisprozess kann von vorne beginnen (1 à 2).

Bei niedriger Temperatur T_E wird die Wärme q_{zu} dem Prozess zugeführt und bei hoher Temperatur T_C wird die Wärme q_{ab} aus dem Prozess abgeführt. Die von den Kurven im p, v Diagramm eingeschlossene Fläche stellt die dafür aufzuwendende Arbeit w dar.

Analog wie beim Stirling-Motor lassen sich auch für die ideale Stirling-Kältemaschine bzw. -Wärmepumpe die entsprechenden Formeln ableiten. Die dem Prozess insgesamt zuzuführende Arbeit W - laut Vorzeichenkonvention positives Vorzeichen - beträgt:

$$W = w * m = m * R * \ln(v_1 / v_2) * (T_C - T_E)$$

mit

W	insgesamt zuzuführende Arbeit (J)
w	zuzuführende Arbeit pro kg Arbeitsgas (J/kg)
m	Masse des Arbeitsgases (kg)
R	Gaskonstante des Arbeitsgases (J/(kg*K))
v_1	großes Volumen pro kg Arbeitsgas (m ³ /kg)
v_2	kleines Volumen pro kg Arbeitsgas (m ³ /kg)
T_C	hohe Temperatur (K)
T_E	niedrige Temperatur (K)

Die dem Prozess insgesamt zugeführte Wärme Q_{zu} bzw. insgesamt abgeführte Wärme Q_{ab} errechnen sich wie folgt:

$$Q_{zu} = q_{zu} * m = m * R * T_C * \ln(v_1 / v_2)$$

$$Q_{ab} = q_{ab} * m = - m * R * T_E * \ln(v_1 / v_2)$$

mit

Q_{zu}	insgesamt zugeführte Wärme (J)
q_{zu}	zugeführte Wärme pro kg Arbeitsgas (J/kg)
Q_{ab}	insgesamt abgeführte Wärme (J)
q_{ab}	abgeführte Wärme pro kg Arbeitsgas (J/kg)

Bei der Berechnung der Leistungszahlen (entsprechend dem Wirkungsgrad beim Stirling-Motor) ist zwischen der Leistungszahl der Kältemaschine und der Leistungszahl der Wärmepumpe zu unterscheiden, da bei der Kältemaschine die dem Prozess zugeführte Wärme Q_{zu} („Kälte“) den Nutzen darstellt, während der Nutzen bei der Wärmepumpe die vom Prozess abgeführte Wärme Q_{ab} ist.

Für die Leistungszahl der Stirling-Kältemaschine $\kappa_{St, K}$ ergibt sich:

$$\kappa_{St, K} = Q_{zu} / W = T_E / (T_C - T_E)$$

Für die Leistungszahl der Stirling-Wärmepumpe $\kappa_{St, W}$ ergibt sich:

$$\kappa_{St, W} = - Q_{ab} / W = T_C / (T_C - T_E)$$

Wenig überraschend sind auch hier die Leistungszahlen identisch mit den Carnot-Leistungszahlen für Kältemaschinen $\kappa_{C, K}$ bzw. für Wärmepumpen $\kappa_{C, W}$.

Der ideale Stirling-Prozess kann mit realen Maschinen nie erreicht werden. Es sind daher Kenntnisse über die Abweichungen (Verluste) des realen vom idealen Prozess erforderlich. Für Stirling-Kältemaschinen bzw. –Wärmepumpen lassen sich die Verluste in folgende Gruppen einteilen:

- ⚡ Wärmeübertragungsverluste
- ⚡ Regeneratorverluste
- ⚡ Gasströmungsverluste
- ⚡ Wärmeleitfähigkeitsverluste
- ⚡ Reibungsverluste
- ⚡ Sonstige Verluste

Da diese Verluste erheblichen Einfluss auf die tatsächlichen Leistungszahlen bzw. den Wirkungsgrad von Stirling-Maschinen haben, wurden dazu umfangreiche Arbeiten durchgeführt (z. B. /3/, /26/, /35/). Die Abschätzung bzw. Beherrschung dieser Verluste ist Voraussetzung für die Konstruktion und den Bau von funktionsfähigen Stirling-Maschinen.

4. Aktueller Wissensstand der Stirling-Kältetechnik

Im Folgenden wird, nach einem kurzen historischen Überblick über die Entwicklung der Stirling-Kältetechnik und, der Vollständigkeit halber, der Einsatz der Stirling-Technik in der Kryotechnik, der aktuelle Wissensstand der Stirling-Kältetechnik für den Einsatz im umgebungsnahen Temperaturbereich dargestellt.

4.1 Historischer Überblick

Die „Geburtsstunde“ der Stirling-Maschine war die Patentanmeldung eines Luft-Motors mit „Economiser“ durch den 25-jährigen Pfarrer Robert Stirling im Jahre 1816. Die Stirling-Motoren wurden verbessert und einige in Betrieb genommen, bis durch die Erfindung des Otto-Motors (1876) und des Diesel-Motors (1896) das Interesse am Stirling-Motor wieder abnahm. Die zweite Phase der Entwicklung des Stirling-Motors, welche bis heute andauert, begann im Jahre 1938 bei der Fa. Philips, Eindhoven, Holland, mit der Herstellung von Stirling-Stromaggregaten zum Betrieb von Rundfunkempfängern.

Die Stirling-Kältetechnik nahm ihren Ausgang ebenfalls bei der Fa. Philips. Im Jahre 1941 wurden Versuche mit einem Stirling-Motor (Typ 10) zum Einsatz als Wärmepumpe durchgeführt. Wie sich bald herausstellte, war der „Motor“ aber viel besser zur „Kälteerzeugung“ als als Wärmepumpe geeignet und erreichte nach einigen Modifikationen bereits -100 °C . Kriegsbedingt wurden die Versuche eingestellt, sind aber bereits 1945 wieder aufgenommen worden. Bei Versuchen mit einem abermals modifizierten Typ 10 Motor wurden bereits Temperaturen, welche zur Luftverflüssigung (Siedepunkt: Sauerstoff 90,2 K bzw. -183 °C ; Stickstoff 77,3 K bzw. $195,9\text{ °C}$) ausreichen, erzielt. Daraufhin wurde mit der Entwicklung einer eigenen Stirling-Kältemaschine (Kryokühler) begonnen und 1952 ein Prototyp fertiggestellt. Eine erste Serie von 20 Stück (Typ A-Maschine) kam 1955 auf den Markt, 1959 kam die Typ B-Maschine und 1960 die Typ C-Maschine auf den Markt. Bis heute werden Stirling-Kryomaschinen von Nachfolgefirma der Fa. Philips erfolgreich erzeugt und verkauft.

Der derzeit häufigste Einsatz von Stirling-Kältemaschinen erfolgt in der Kryotechnik zur Kühlung von Infrarot-Sensoren (IR-Sensoren) und zur Kühlung von (Hochtemperatur-) Supraleitern. IR-Sensoren werden beispielsweise in Nachtsichtgeräten, Satelliten, Lenkwaffen (z.B. Raketen, wie im Golfkrieg eingesetzt), IR-Kameras und in der Medizin (z. B. zur Krebsdiagnose) eingesetzt. Es sei hier darauf hingewiesen, dass die bisher einzige kommerziell erfolgreiche Anwendung der Stirling-Technik in der Stirling-Kältetechnik, namentlich in der Kryotechnik, war.

4.2 Stirling-Kältetechnik in der Kryotechnik

Die Anwendung Stirling-Kältetechnik in der Kryotechnik wird hier nur der Vollständigkeit halber kurz erwähnt, weil es das derzeitige Hauptanwendungsgebiet der Stirling-Kältetechnik ist. Außerdem ist dieser Bereich auch kommerziell erfolgreich.

Die Hauptanwendungen der Stirling-Technik in der Kryotechnik sind:

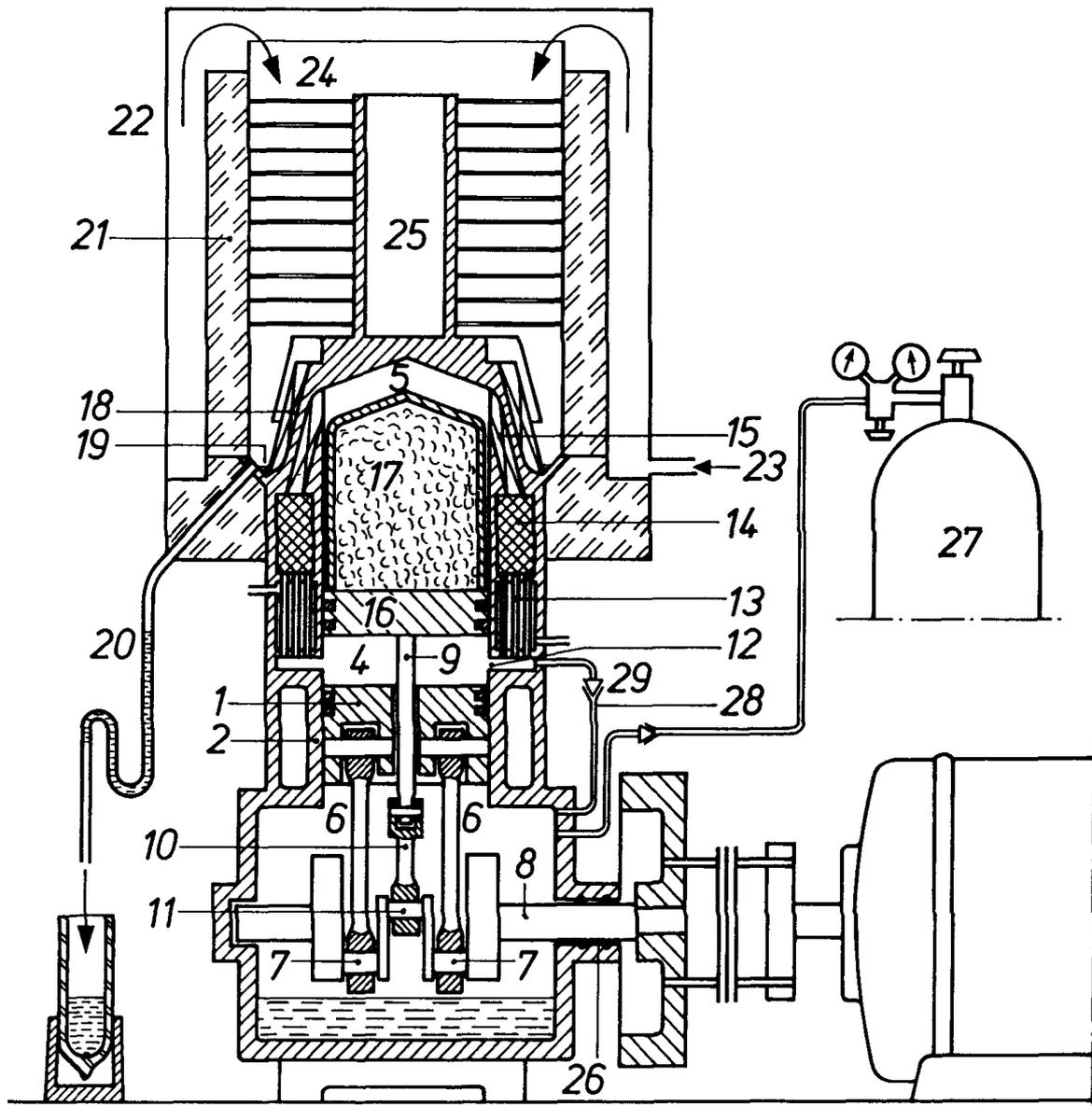
Gasverflüssigung

Kühlung von Sensoren und Elektronik-Bauteilen

- IR-Sensoren
- Supraleiter und Hochtemperatur-Supraleiter (HTS – High Temperature Superconductivity)

Die häufigste Anwendung der Gasverflüssigung ist die Erzeugung von flüssigem Stickstoff („Luftverflüssigung“). Neben dem Linde-Verfahren (auch als Linde-Hampson-Verfahren bezeichnet) ist die Stirling-Technik die am häufigsten dafür eingesetzte Technik. Ein Hersteller von Stirling-Gasverflüssigungsanlagen (für verschiedene Gase und Leistungsbereiche) ist z.B. die Fa. Stirling Cryogenics & Refrigeration BV in Eindhoven, Holland. Laut Firmenangaben wurden bisher weltweit über 4.000 Systeme verkauft. Es handelt sich dabei um Nachfolgegeräte der ab den 50iger-Jahren bei Philips entwickelten Stirling-Kältemaschinen. Da sich das Prinzip der Gasverflüssigung seither nicht geändert hat, ist in [Abbildung 4.1](#) eine Philips

Typ A Kältemaschine vereinfacht dargestellt und kurz beschrieben. Mit dieser Maschine konnten pro Stunde ca. 6,5 Liter Flüssigluft produziert werden, der Stromverbrauch lag bei unter einer kWh pro Liter Flüssigluft.



Beschreibung:

1 ... Arbeitskolben, 2 ... Zylinder, 4 ... Kompressionsraum, 5 ... Expansionsraum, 6 ... Pleuel Arbeitskolben, 7 ... Pleuellager, 8 ... Kurbelwelle, 9 ... Kolbenstange Verdrängerkolben, 10 ... Pleuel Verdrängerkolben, 11 ... Pleuellager, 12 ... Einlässe für das Arbeitsgas, 13 ... Kühler, 14 ... Regenerator, 15 ... Kaltkopf, 16 ... Verdrängerkolben, 17 ... Verdränger, 18 ... Kondensator, 19 ... Sammelkanal für Flüssigluft, 20 ... Ableitung der Flüssigluft, 21 ... Isolierung, 22 ... Abdeckhaube für Eisabscheider, 23 ... Lufteintritt, 24 ... Eisabscheider aus perforiertem Kupferblech zur Reinigung, Trocknung und CO₂-Abscheidung aus der Luft vor der Verflüssigung, 25 ... Rohr mit thermischem Kontakt zum Kaltkopf, 26 ... Dichtung der Kurbelwelle, 27 ... Druckbehälter für Arbeitsgas, 28 ... Zuleitung für Arbeitsgas, 29 ... Ein-Weg-Ventil

Abbildung 4.1: Vereinfachte Darstellung und Beschreibung einer Philips Typ A Kältemaschine zur Luftverflüssigung (nach /3/)

Stirling-Kältemaschinen für die Kühlung von Elektronikbauteilen sind Massenprodukte. Wegen ihrer geringen Kälteleistung ($< \text{ca. } 5 \text{ W}$) werden sie als Miniatur-Kryokühler bezeichnet und können je nach Bauform in Integral-Kryokühler (siehe Abbildung 4.2) und Split-Kryokühler (siehe Abbildung 4.3) unterteilt werden.

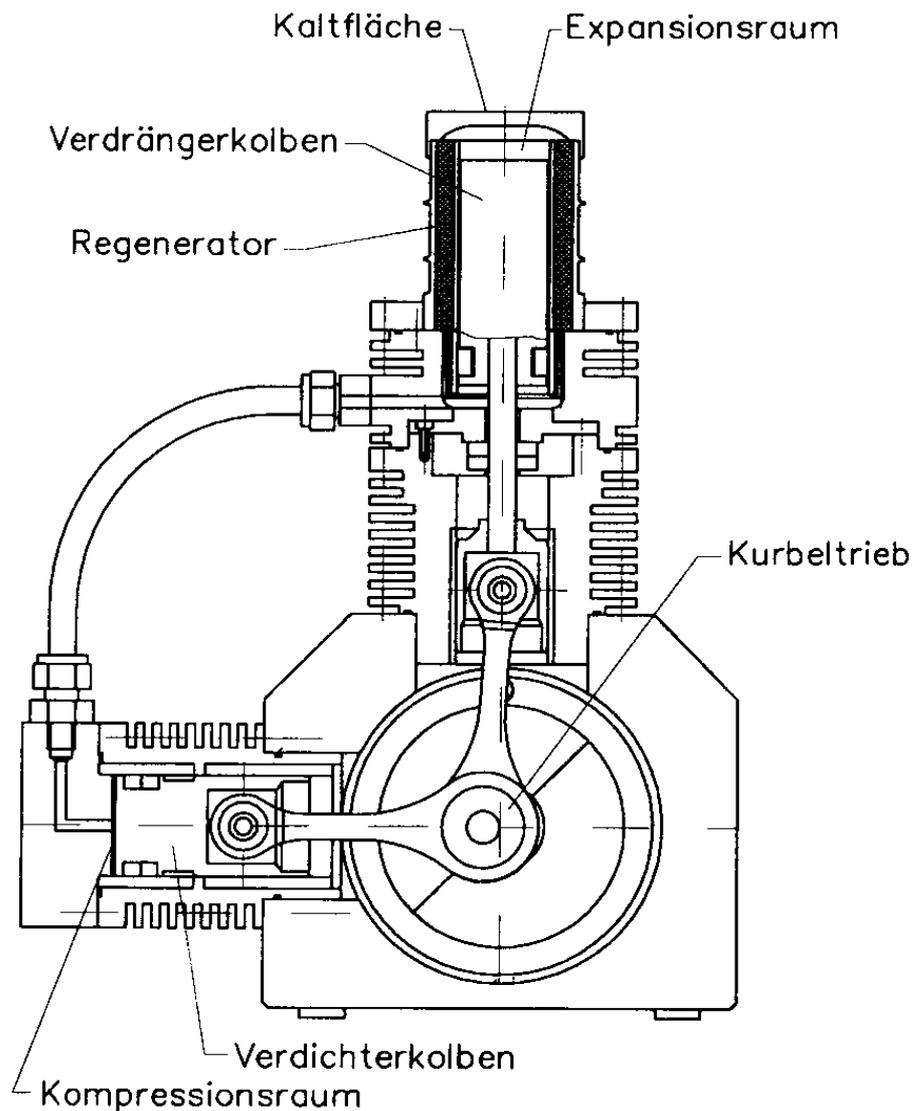


Abbildung 4.2: Integral-Kryokühler (mit Kurbeltrieb) /34/

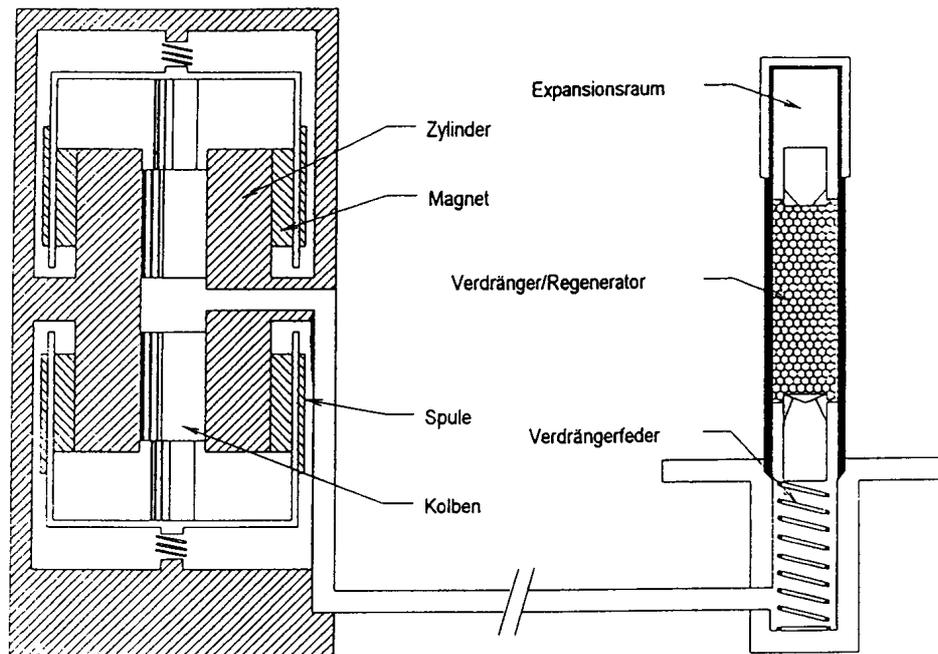


Abbildung 4.3: Split-Kryokühler (mit Freikolben) /34/

Stirling-Miniatur-Kryokühler werden von einer Reihe von Firmen (z.B. AEG, AMI, SCE, Leybold in Deutschland; STC, Sunpower Inc., Hughes Aircraft Company in den USA; Signaal USFA, Holland) hergestellt. Alleine zu Kühlung von IR-Sensoren werden jährlich rund 10.000 Stück erzeugt. Mit Abstand der größte Abnehmer ist das Militär.

4.3 Stirling-Kältetechnik im umgebungsnahen Temperaturbereich

Die wichtigsten Informationsquellen waren, aufbauend auf dem vorhandenen Wissen und der entsprechenden Fachliteratur, die „10th International Stirling Engine Conference 2001 (10th ISEC)“ vom 24. bis 26. September 2001 in Osnabrück, Deutschland, und Recherchen im Internet.

Zur umgebungsnahen „Kälteerzeugung“ werden derzeit fast ausschließlich Kompressions-Kältemaschinen eingesetzt. Zum Betrieb dieser Kältemaschinen sind Kältemittel erforderlich. Ausgelöst durch die Entdeckung der Beeinträchtigung der Umwelt durch diese Kältemittel (Ozonabbau, Treibhauseffekt - siehe Kapitel 7),

begann die Suche nach alternativen Kältemitteln bzw. alternativen Kältetechniken. Da in der Stirling-Kältetechnik keine Kältemittel erforderlich sind, erscheint sie auch für den Einsatz im umgebungsnahen Temperaturbereich eine interessante Alternative darzustellen. Es werden daher seit einiger Zeit an verschiedenen Forschungseinrichtungen und bei Firmen Arbeiten zum Thema Stirling-Kältetechnik durchgeführt. Im folgenden werden diese Aktivitäten kurz aufgezählt, die wichtigsten werden in Kapitel 5.2 näher behandelt.

Die Fa. AEG AG in Heilbronn, Deutschland, beschäftigt sich auf dem Gebiet der Kältetechnik vorwiegend mit der Entwicklung und Anwendung von Miniatur-Stirling-Kryokühlern für militärische und zivile Anwendungen. Für den Einsatz in der umgebungsnahen Kühlung oder Klimatisierung wurde eine Stirling-Maschine mit Rotationsverdrängern entworfen und auch patentiert. Es wurde auch ein Simulationsprogramm für diese Maschine entwickelt.

Von der Fa. Stirling Thermal Motors, Ann Arbor, MI, USA, bzw. Stirling Cryogenics & Refrigeration BV, Eindhoven, Holland, wurden Versuche mit einem modifizierten STM4-120 Stirling-Motor zur Kälteerzeugung (STM4-120RF) für Supermärkte durchgeführt.

Die Fa. Sunpower Inc., Athens, Ohio, USA, entwickelte sowohl eine Freikolben-Stirling-Kältemaschine (mit Linearmotor betrieben), wie auch eine Freikolben-Duplex-Stirling-Kältemaschine. Die Freikolben-Stirling-Kältemaschine wurde auch für den Einsatz in Kühlschränken bzw. in Kühlboxen mit Fotovoltaik-Antrieb des Linearmotors getestet. Von der Freikolben-Kältemaschine für den Einsatz in Kühlschränken wurde, unter finanzieller Beteiligung von Greenpeace, USA, und Energie Holland NV eine Pilotserie von 100 Stück gefertigt.

Weiters beschäftigen sich auch folgende Firmen unter anderem mit dem Einsatz der Stirling-Technik in Kühlschränken:

≠ Stirling Technology Company, Richland, Washington, USA

€# Medis Technologies und IST Engineering Ltd., Tel-Aviv, Israel, in Kooperation mit Electrolux, Schweden

€# Toshiba und Sanyo, Japan,

€# LG Electronics Inc., Korea

Im Rahmen einer Dissertation wurden am Royal Institut of Technology Stockholm, Schweden, umfangreiche theoretische Arbeiten über den Stirling-Kälteprozess und Versuche mit einem zur Kältemaschine umgebauten V160 Stirling-Motor durchgeführt.

Am Institut für Angewandte Thermodynamik und Klimatechnik an der Universität GH Essen, Deutschland, laufen seit Jahren Arbeiten zum Thema Stirling-Kältetechnik. Dabei werden auch praktische Untersuchungen durchgeführt.

Weitere Universitäten und Forschungseinrichtungen welche sich mit dem Thema Stirling-Kältetechnik befassen sind:

€# Universität Dresden, Deutschland, Institut für Luft- und Kältetechnik

€# Technical University of Denmark, Department of Energy Engineering Energy Conversion, Lyngby/Kopenhagen

€# University of Oxford, Großbritannien, Department of Mechanical Engineering Science

€# The University of Reading, Großbritannien, Department of Engineering – Energy Group

€# University of Canterbury, Neuseeland, Mechanical Engineering Department, Stirling-Cycle Research Group

€# University of Calgary, Alberta, Kanada, Department of Mechanical Engineering

€# Oakridge National Laboratory (ONL), Oakridge, Tennessee, USA

5. Systemauswahl für Stirling-Kältemaschinen

In diesem Kapitel werden zuerst die Stirling-Systeme allgemein dargestellt, anschließend die Stirling-Systeme für Kältemaschinen behandelt und die Ergebnisse zusammengefasst.

5.1 Stirling-Systeme allgemein

Zur Realisierung des Stirling-Prozesses, egal ob als Motor oder Kältemaschine, sind Maschinen erforderlich. Prinzipiell geht es immer darum, das Arbeitsgas, über einen Regenerator, zwischen einem „kalten“ und einem „warmen“ Raum hin- und herzuschieben und dabei Arbeit ab- und Wärme zu- und abzuführen (Motor) bzw. Arbeit zu- und Wärme ab- und zuzuführen (Kältemaschine oder Wärmepumpe). Zur Kategorisierung der vielen verschiedenen möglichen Anordnungen gibt es verschiedene Systematiken.

Eine mögliche Unterteilung ist in Maschinen mit

- ⚡ *einfach wirkenden Arbeitskolben* (d.h. die Druckschwankungen des Arbeitsraumes wirken nur auf eine Seite des Kolbens) oder
- ⚡ *doppelt wirkenden Arbeitskolben* (d.h. die Druckschwankungen des Arbeitsraumes wirken auf beide Seiten des Kolbens).

Eine andere mögliche Unterteilung ist in

- ⚡ Maschinen mit *kinematischem Getriebe* (d.h. die Bewegung der Kolben wird durch mechanische Kopplung auf eine Welle übertragen) und
- ⚡ *Freikolbenmaschinen* (d.h. die Kolben können sich frei bewegen, die Energieübertragung erfolgt durch eine Membrane, einen Generator bzw. Motor, Wärmetauschern oder durch beliebige Kombination dieser Elemente).

Auch können die Maschinen entsprechend der geometrischen Anordnung der Zylinder, Kolben bzw. Verdränger und Regenerator in folgende drei Typen eingeteilt werden, wobei es innerhalb der einzelnen Typen wieder unterschiedliche Anordnungen geben kann:

- # ζ -Typ (*Alpha-Typ*): Jeder der beiden Kolben (Arbeits- und Verdrängerkolben) ist in einem eigenen Zylinder untergebracht, der Regenerator befindet sich zwischen den Zylindern.
- # η -Typ (*Beta-Typ*): Beide Kolben laufen in einem (gemeinsamen) Zylinder, der Verdrängerkolben kann dabei auch den Regenerator enthalten.
- # ν -Typ (*Gamma-Typ*): Auch hier sind, wie beim ζ -Typ, die Kolben in verschiedenen Zylindern untergebracht, der Regenerator befindet sich dabei aber nicht zwischen den beiden Zylindern. Diese Anordnungen werden auch als *Split-Stirling* bezeichnet.

In Abbildung 5.1 bis Abbildung 5.5 sind einige Beispiele möglicher Bauarten von Stirling-Maschinen dargestellt.

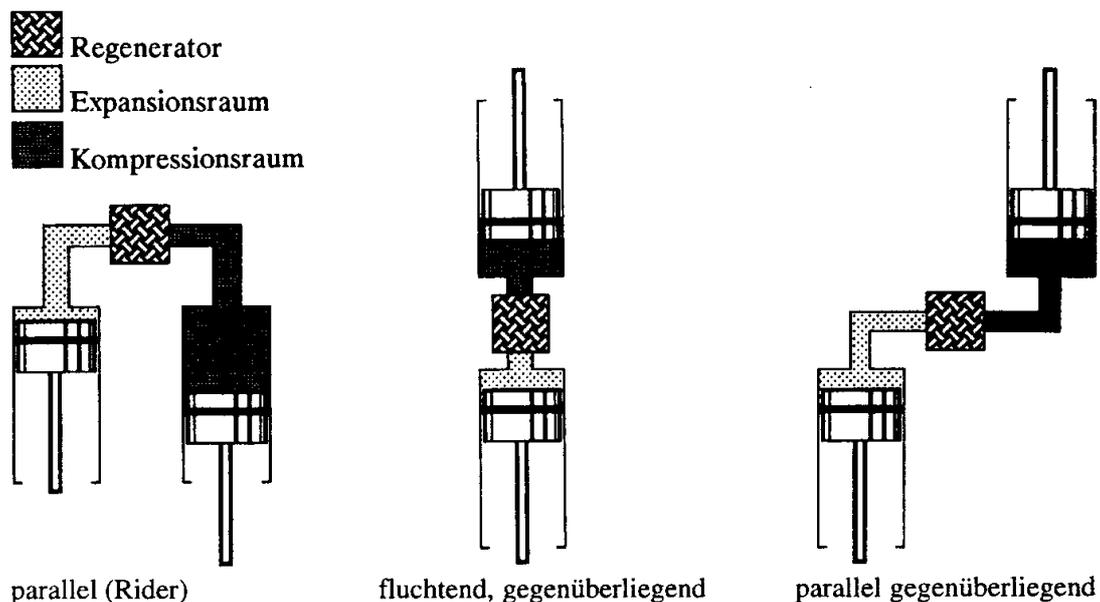


Abbildung 5.1: ζ -Typ Maschine in drei verschiedenen Anordnungen /7/

H - Heater
 R - Regenerator
 C - Cooler

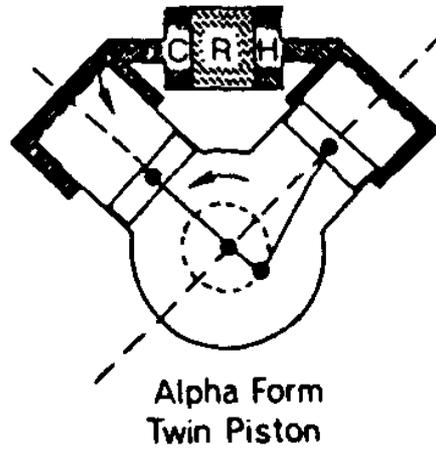


Abbildung 5.2: Häufigste Anordnung von ζ -Typ Maschinen /26/

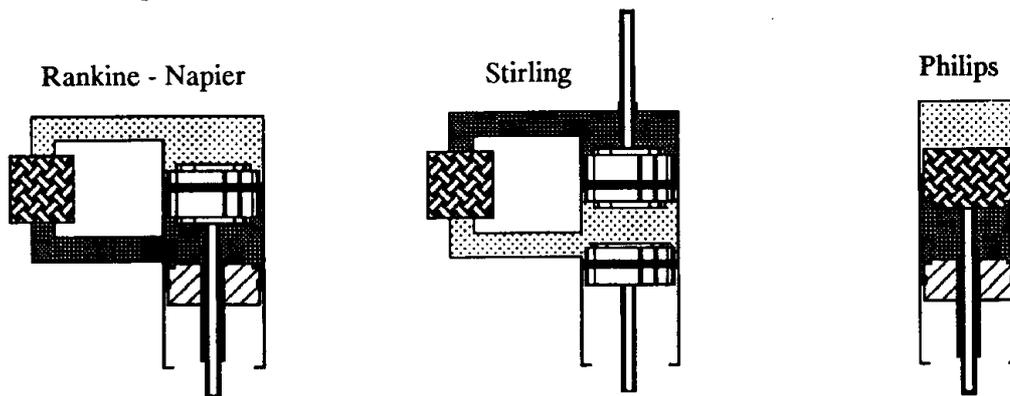
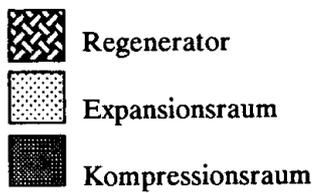


Abbildung 5.3: η -Typ Maschine in drei verschiedenen Anordnungen /7/

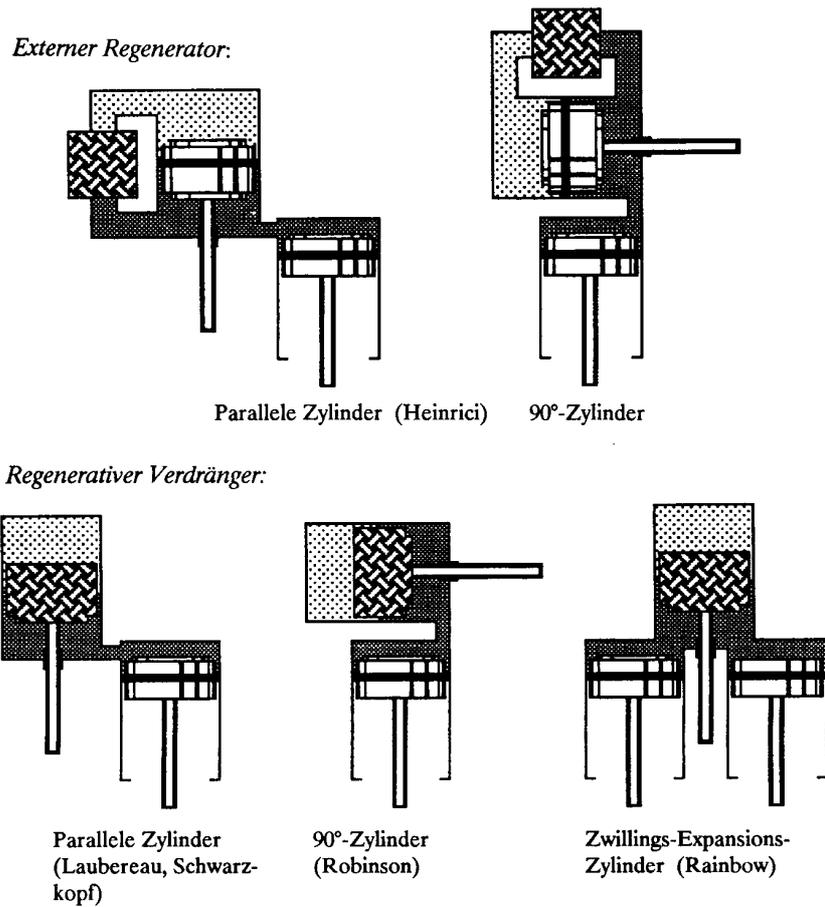


Abbildung 5.4: v-Typ Maschine in fünf verschiedenen Anordnungen /7/

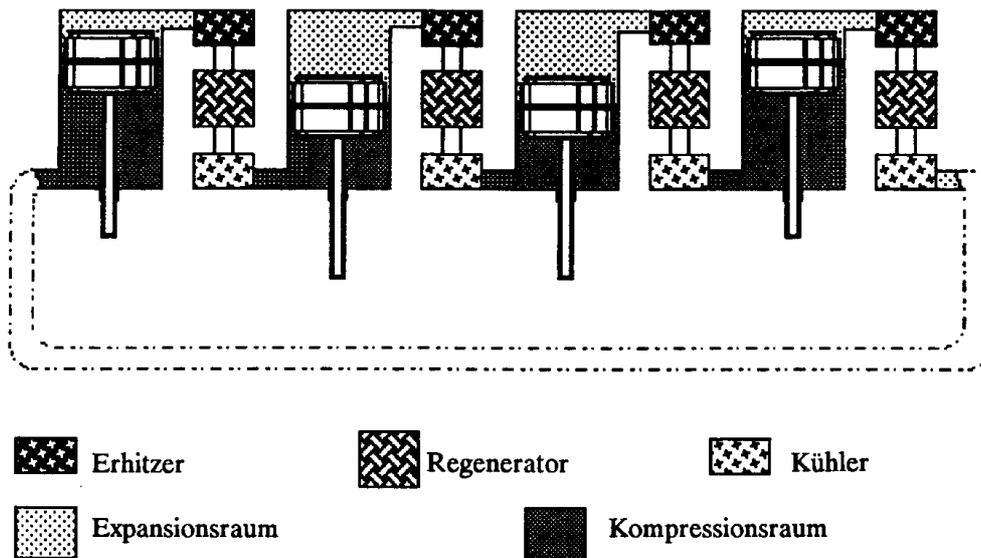


Abbildung 5.5: Siemens- oder Rinia-Maschine mit doppelwirkenden Kolben /7/

5.2 Stirling-Systeme für Kältemaschinen

In Abbildung 5.6 sind die verschiedenen Möglichkeiten der Stirling-„Kälteerzeugung“ dargestellt. Prinzipiell ist zwischen mechanisch (in der Regel elektrisch) und thermisch betriebenen Maschinen zu unterscheiden. Theoretisch möglich, aber für praktische Anwendungen ohne Bedeutung, wäre auch der Antrieb beliebiger mechanisch-betriebener Kältemaschinen (z.B. Kaltdampf-Kompressions-Kältemaschinen) mit einem Stirlingmotor. Dabei würde jedoch nicht der Stirling-Kälteprozess zur direkten „Kälteerzeugung“ genutzt, sondern der Stirling-Kraftprozess zur Erzeugung der mechanischen Antriebsenergie für andere Kälteprozesse. Diese Variante ist daher in Abbildung 5.6 nicht dargestellt und wird auch nicht weiter behandelt.

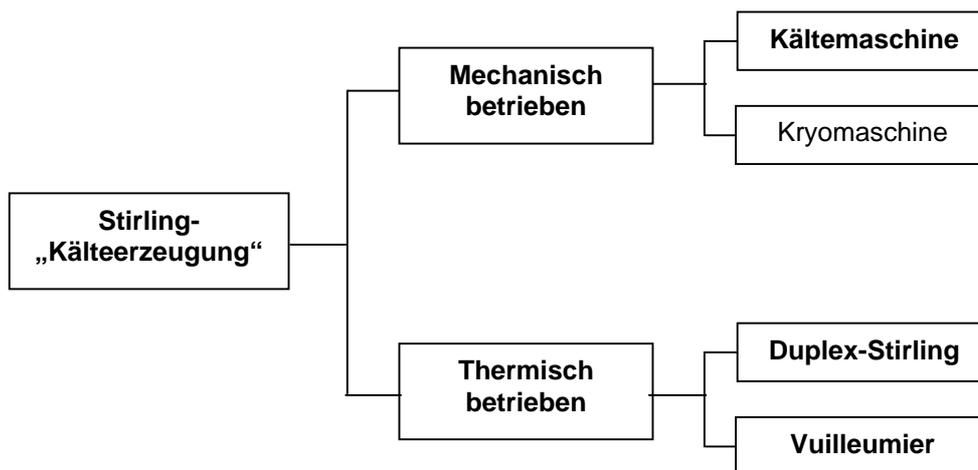


Abbildung 5.6: Möglichkeiten der Stirling-„Kälteerzeugung“ (nach /26/)

5.2.1 Mechanisch betriebene Stirling-Kältemaschinen

Die überwiegende Anzahl der Stirling-Kältemaschinen wird mechanisch (elektrisch) betrieben. Es werden hier nur Kältemaschinen für den Einsatz im umgebungsnahen Temperaturbereich betrachtet (Überblick Kryomaschinen siehe Kapitel 4.2). Da es in der Regel keine speziell für die „Kälteerzeugung“ ausgelegten Stirling-Maschinen gibt

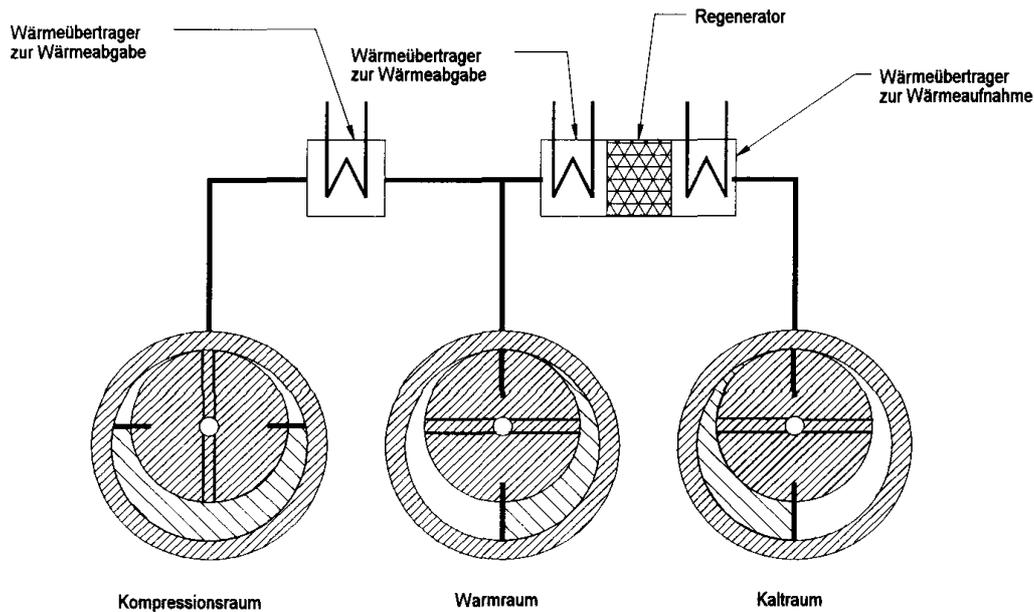


Abbildung 5.8: AEG Rotationsverdränger Stirling-Kältemaschine /35/

Die AEG Rotationsverdränger Stirling-Kältemaschine wurde speziell für den Einsatz im umgebungsnahen Temperaturbereich entwickelt. Sie besteht aus drei Drehschieberverdrängern, wobei der linke Verdränger den Kompressor darstellt und die beiden rechten Verdränger zusammen den „eigentlichen“ Verdränger der Stirling-Maschine darstellen. Dies wird dadurch erreicht, dass der Warm- und Kaltraumverdränger um 180° phasenverschoben sind und somit das Volumen gleich bleibt. Das Arbeitsgas wird dabei nur zwischen der „warmen“ und „kalten“ Seite hin- und hergeschoben.

Ein als Kältemaschine eingesetzter „normaler“ Stirling-Motor (TEM-Motor) ist in Abbildung 5.9 schematisch dargestellt. Mit dieser Maschine wurden Tests am Royal Institut of Technology, Stockholm, Schweden, durchgeführt.

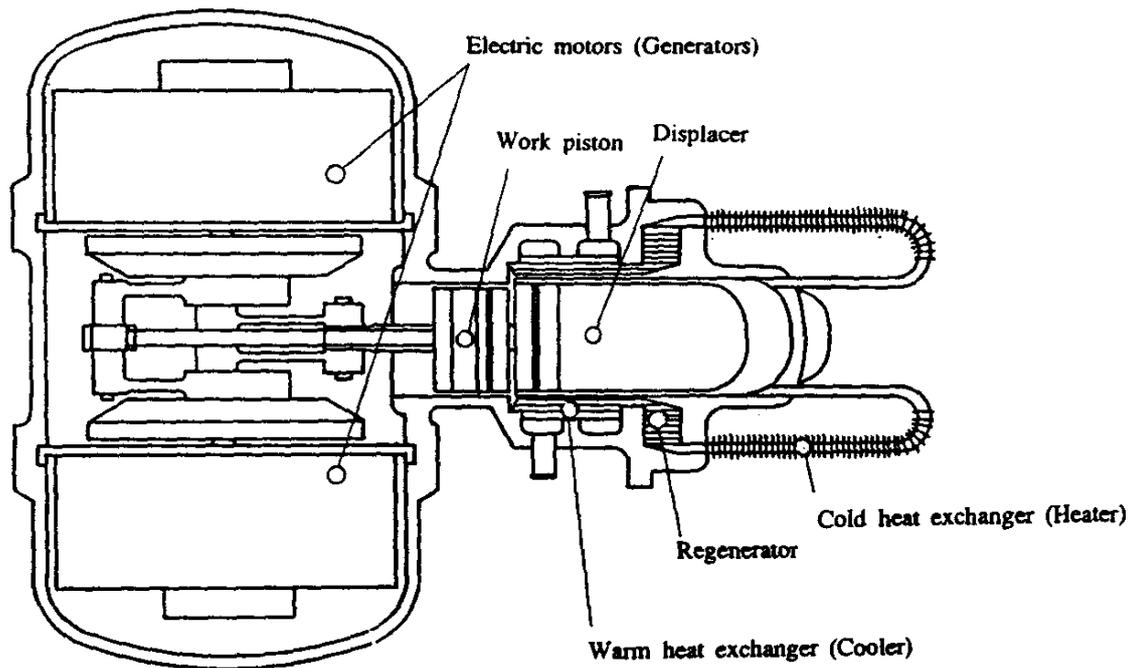


Abbildung 5.9: TEM-Motor als Kältemaschine /26/

5.2.2 Thermisch betriebene Stirling-Kältemaschinen

Bei thermisch betriebenen Stirling-Kältemaschinen wird Wärme als Antriebsenergie genutzt. Dabei sind zwei unterschiedliche Prinzipien zu unterscheiden:

- ☞ *Duplex-Stirlingmaschinen* sind die Kombination eines Stirling-Motors mit einer Stirling-Kältemaschine. Ein Stirling-Motor wandelt Wärme in Arbeit um und treibt damit eine Stirling-Kältemaschine an.
- ☞ *Vuilleumier-Maschinen* nutzen die geschickte Kombination von zwei Stirling-Prozessen, wobei einer rechts- und einer linkslaufend ist. Vuilleumier-Maschinen arbeiten zwischen drei verschiedene Temperaturniveaus. Die Antriebs-Wärme wird auf hohem Temperaturniveau zugeführt, bei Wärmepumpenbetrieb wird das mittlere und bei Kältemaschinen das niedrige Temperaturniveau genutzt. Ein mechanischer Antrieb der Maschinen ist nur zur Überwindung der Reibungsverluste erforderlich.

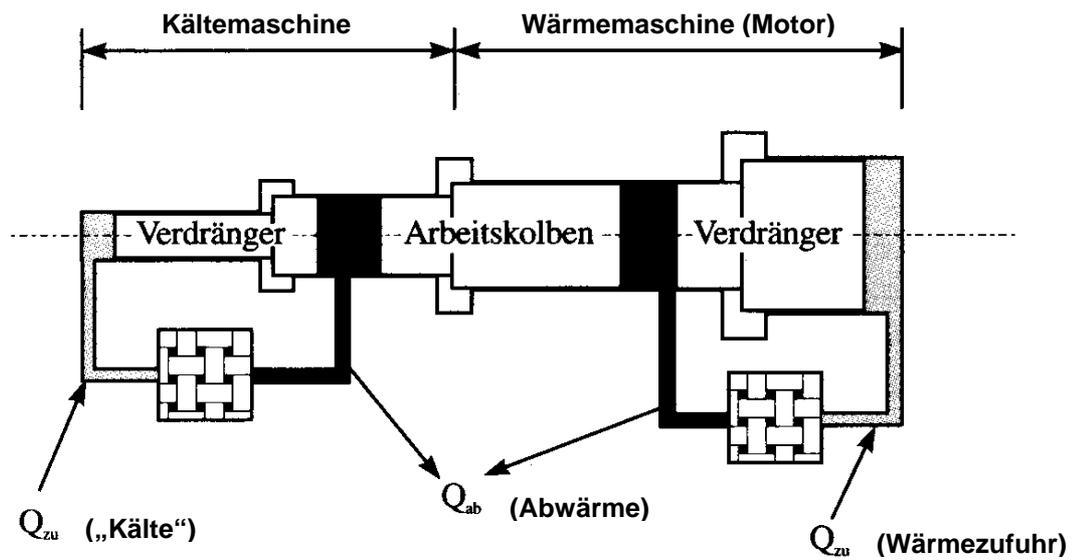


Abbildung 5.11: Freikolben-Duplex-Stirlingmaschine (nach /7/)

Vuilleumier-Maschinen

Vuilleumier-Maschinen sind Maschinen, die nach dem vom amerikanischen Ingenieur Rudolph Vuilleumier 1918 patentierten Prozess (Vuilleumier-Prozess) arbeiten. Der Vuilleumier-Prozess besteht aus einem linksläufigen und einem rechtsläufigen Stirling-Prozess. In Abbildung 5.12 ist die prinzipielle Wirkungsweise einer Vuilleumier-Maschine und der Vuilleumier-Prozess im T,s-Diagramm dargestellt.

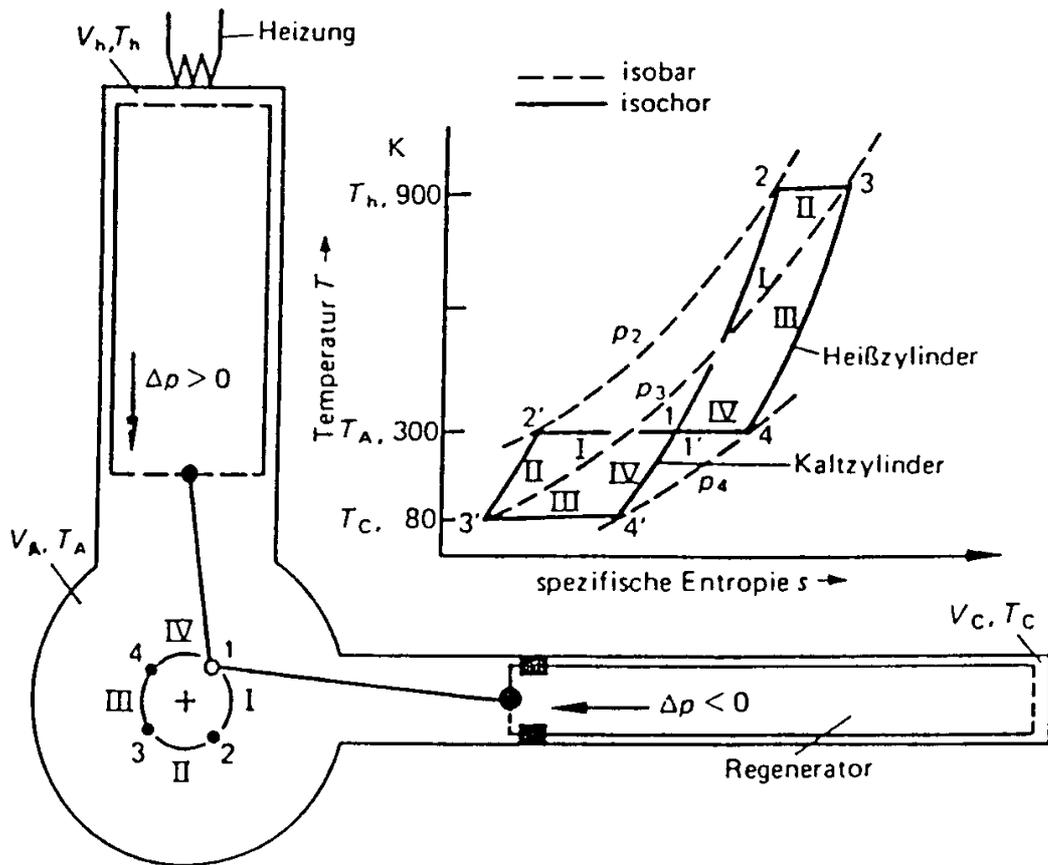


Abbildung 5.12: Prinzip einer Vuilleumier-Maschine mit Darstellung des Vuilleumier-Prozesses im T,s-Diagramm /34/

Vuilleumier-Maschinen können als Wärmepumpen (Abbildung 5.13) oder Kältemaschinen (Abbildung 5.14) eingesetzt werden. Mit einem einstufigen Vuilleumier-Kryokühler werden Temperaturen von 80 K erreicht.

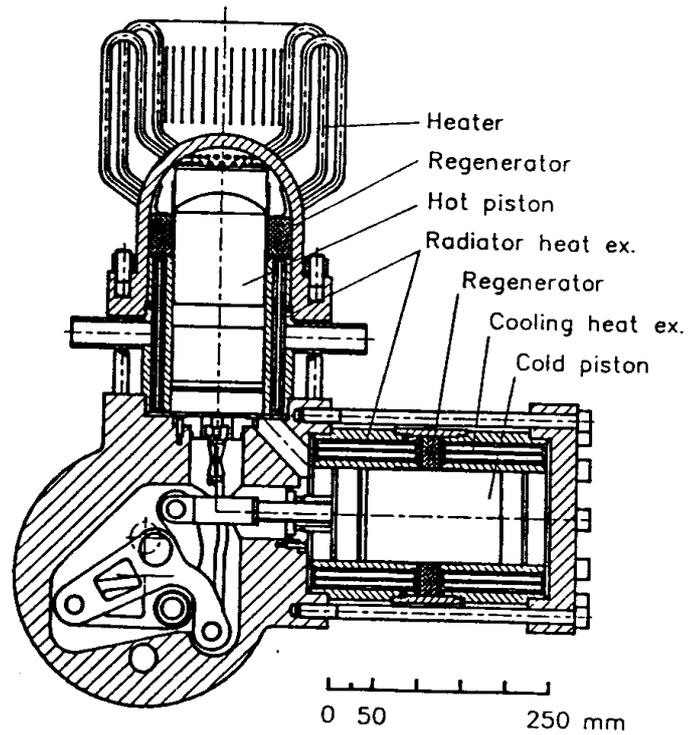


Abbildung 5.13: Vuilleumier-Wärmepumpe nach Carlsen /26/

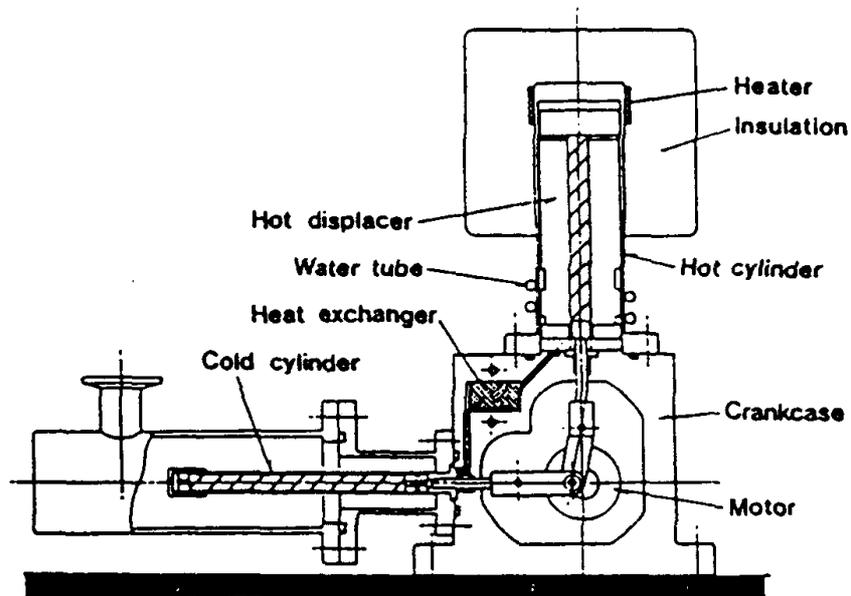


Abbildung 5.14: Vuilleumier-Kältemaschine für den Kryobereich nach Walker /26/

Prototypen von Vuilleumier-Kältemaschinen/Wärmepumpen wurden auch von den Firmen Petry, Deutschland, Philips, Holland, und Sanyo, Japan, gebaut.

5.2.3 Kältemaschine „Stirling Thermal Motors“

Von der Fa. Stirling Thermal Motors, Inc., USA, wurde, unter Verwendung eines STM4-120 Motors, eine Stirling-Kältemaschine mit der Bezeichnung STM4-120 RF (RF steht für Refrigerator, siehe [Abbildung 5.15](#)) für den Einsatz in Supermärkten entwickelt.

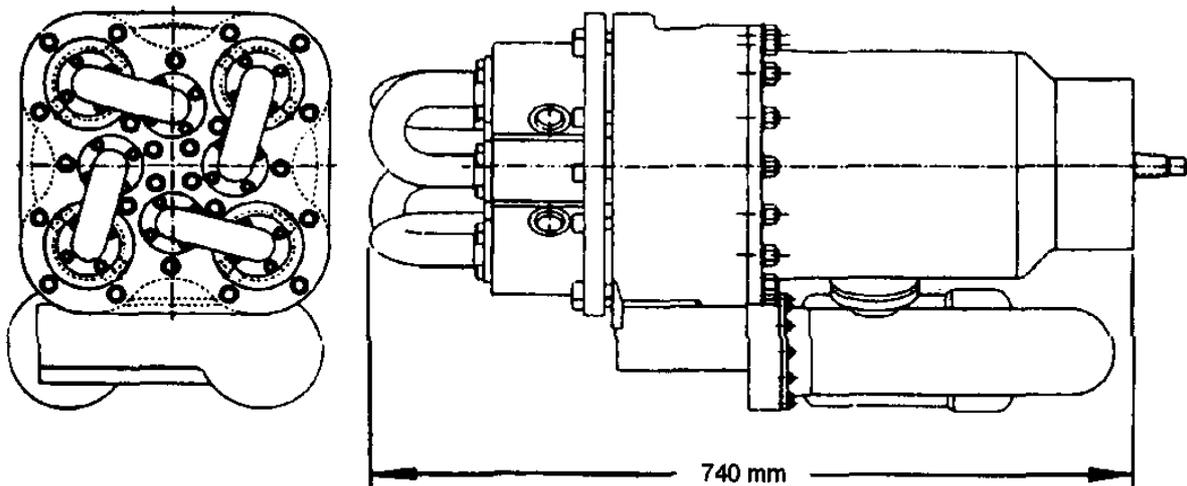


Abbildung 5.15: Stirling-Kältemaschine STM4-120 RF zum Einsatz in Supermärkten

/1/

Der STM4-120 Motor ist ein doppelwirkender Vier-Zylinder-Motor mit einem Hubvolumen von 120 cm^3 pro Zylinder. Das Besondere daran ist das Schiefscheibengetriebe, mit welchem der Hub (und somit die Leistung) verstellt werden kann. Im Vergleich zum Motor wurde für die Kältemaschine als Arbeitsgas Wasserstoff (statt Helium) verwendet, der Systemdruck wurde auf 12 MPa erhöht und neue Wärmetauscher verwendet. [Abbildung 5.16](#) zeigt die COP der STM4-120 RF und einer Kompressions-Kältemaschine (Bock FZ 16) für Temperaturen von -60 bis $-30 \text{ }^\circ\text{C}$ an der „kalten“ und $+30$ bzw. $+60 \text{ }^\circ\text{C}$ an der „warmen“ Seite.

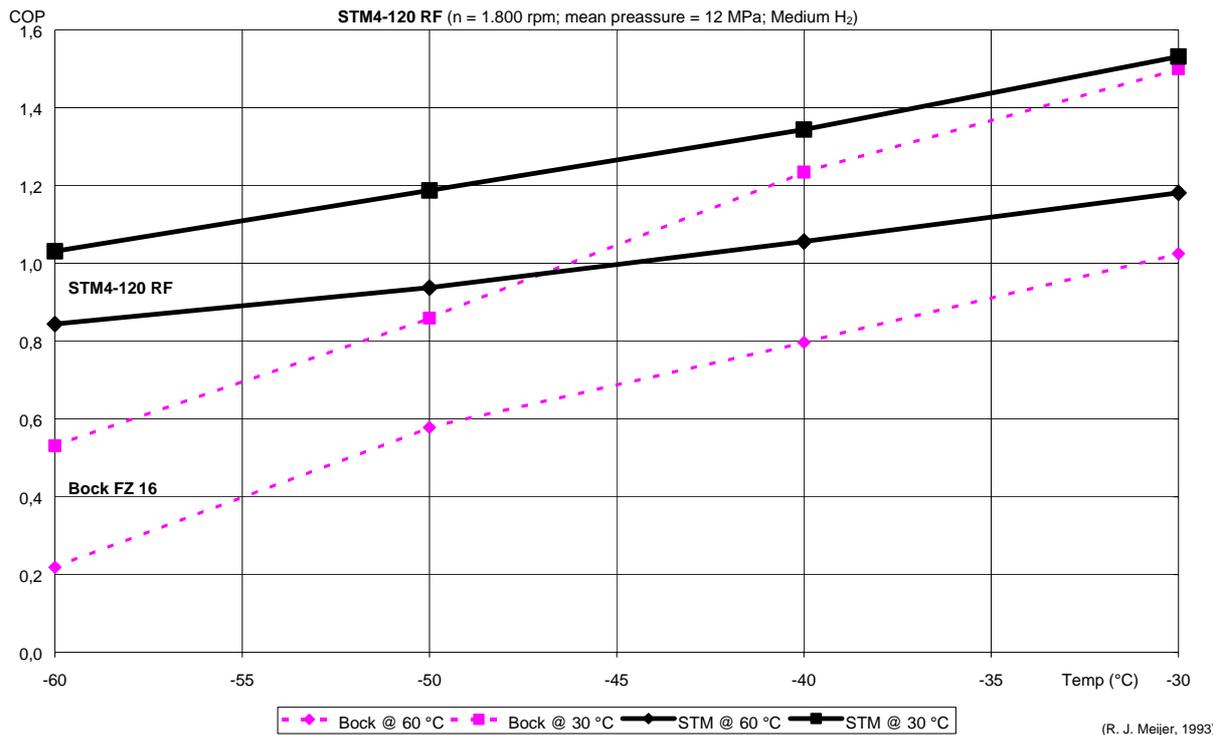


Abbildung 5.16: COP einer Stirling-Kältemaschine (STM4-120 RF) und einer Kompressions-Kältemaschine (Bock FZ 16) /1/

Es ist deutlich zu sehen, dass der COP der Stirling-Kältemaschine bei Temperaturen unter -30 °C immer höher als jener der Kompressions-Kältemaschine ist. Je tiefer die Temperatur, desto größer wird der Unterschied der COP zwischen den beiden Kältemaschinen. Ein großer Vorteil des STM4-120 RF ist, dass durch die Verstellung des Schiefscheibengetriebes die Kälteleistung zwischen ca. 2 und 22 kW variiert werden kann, ohne dass sich der COP wesentlich ändert. Außerdem ist die Kälteleistung nur wenig von der Kühltemperatur abhängig, d.h. die STM4-120 RF ist für einen großen Temperaturbereich „gleich gut“ geeignet. Dies ist ein großer Vorteil gegenüber einer Kaltdampf-Kompressions-Kältemaschine bei der, systembedingt, die Abhängigkeit der Kälteleistung von der Kühltemperatur groß ist.

5.2.4 Kältemaschine „Royal Institut of Technology“

Am Royal Institute of Technology, Stockholm, Schweden, wurden umfangreiche theoretische und praktische Arbeiten zum Thema Stirling-Kältetechnik durchgeführt. Der Schwerpunkt der Arbeiten lag bei der Erstellung eines Berechnungsmodells (Stisim), welches mittels der praktisch durchgeführten Versuche abgeglichen wurde, wobei vorrangig versucht wurde, die einzelnen Verlustterme der Stirling-Maschine zu quantifizieren. Die Versuche wurden mit einem modifizierten V160 Stirling-Motor (Abbildung 5.17) durchgeführt.

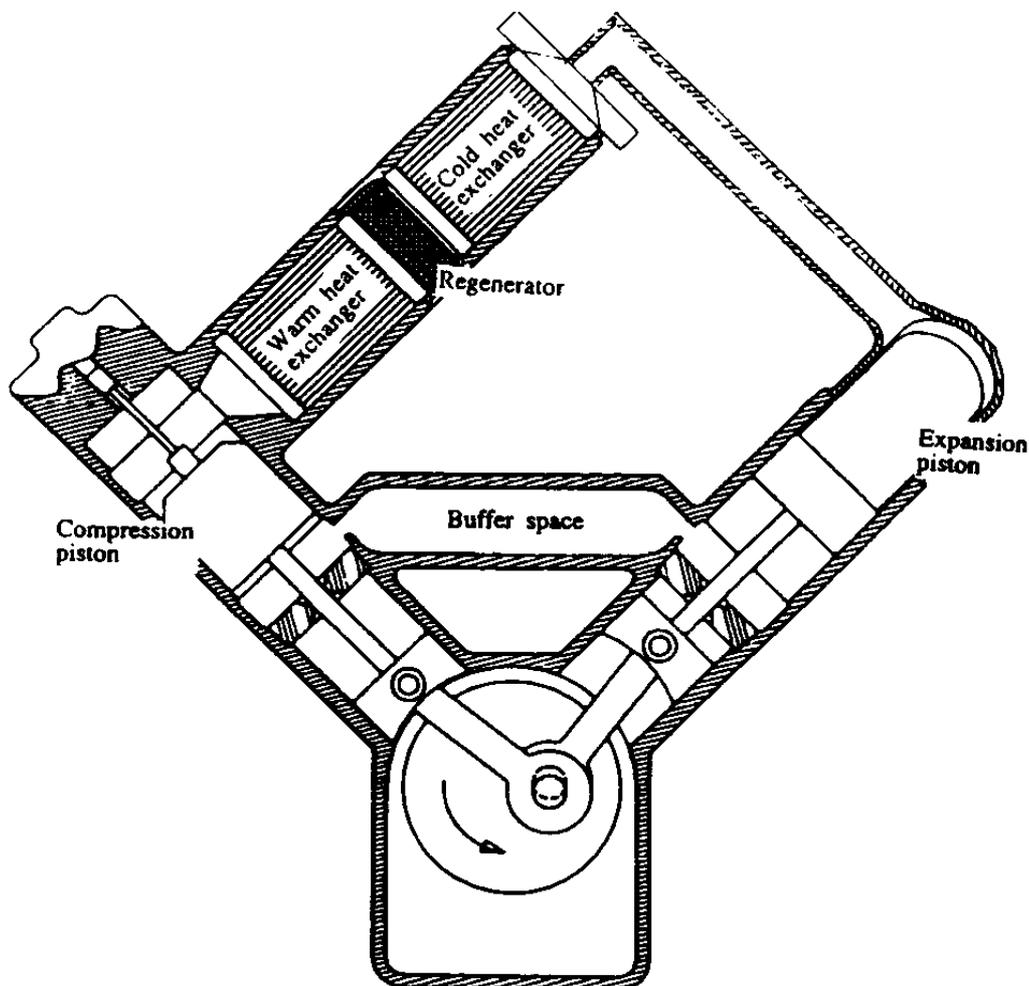


Abbildung 5.17: Stirling-Kältemaschine (modifizierter V160 Stirling-Motor) /26/

In Abbildung 5.18 sind Daten eines Versuchslaufes dargestellt. In Abhängigkeit von der Temperatur auf der „kalten Seite“ der Maschine sind die zugeführte elektrische Leistung (E. (kW)) und die auf der „kalten Seite“ abgeführte Wärmeleistung (Q₂. (kW)); sowie die Kälte-Leistungszahl (COP₂) dargestellt. Weitere Parameter des Versuchslaufes waren:

Arbeitsgas:	Helium
Drehzahl:	1.480 / min
mittlerer Druck:	ca. 40 bar
Temperatur der „warmen Seite“:	ca. 65 °C
abzuführende Wärmeleistung:	ca. 6 kW

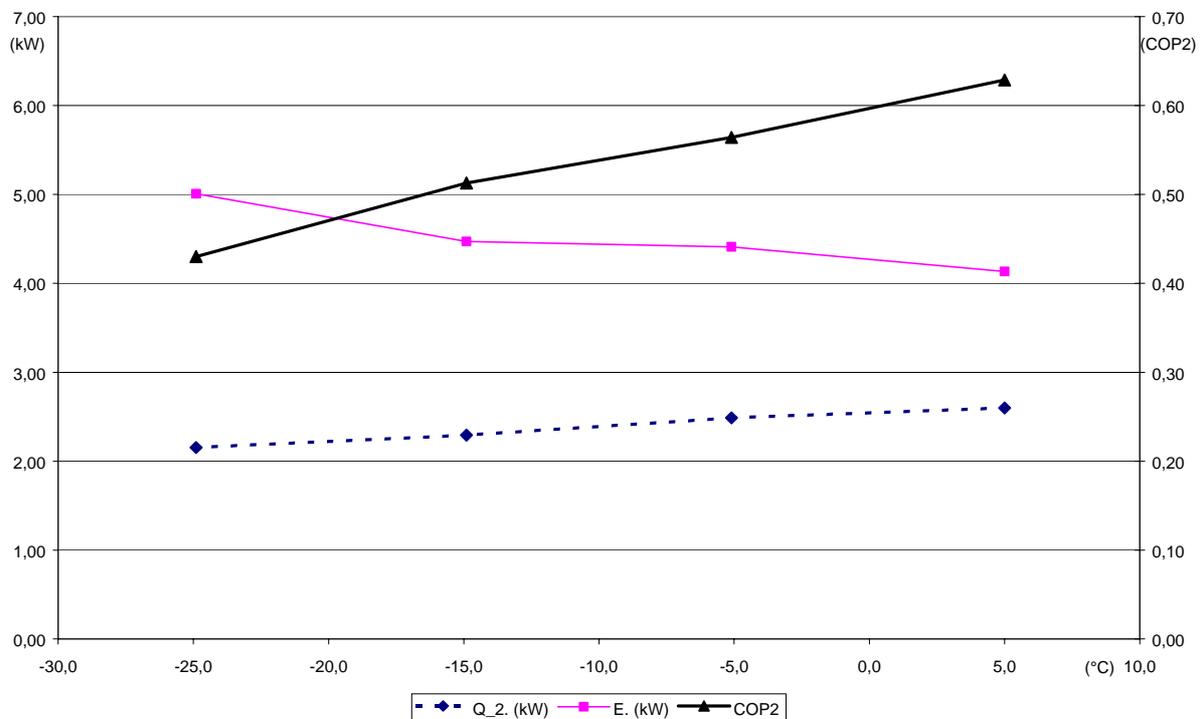


Abbildung 5.18: Daten eines Versuchslaufes mit einem als Kältemaschine modifizierten V160 Stirling-Motor (nach /26/)

5.2.5 Kältemaschine „Universität GH Essen“

Am Institut für Angewandte Thermodynamik und Klimatechnik der Universität GH Essen, Deutschland, beschäftigt sich seit Jahren eine Gruppe mit dem Thema Stirling-Kältemaschinen, wobei ebenfalls ein Berechnungsprogramm für Stirling-

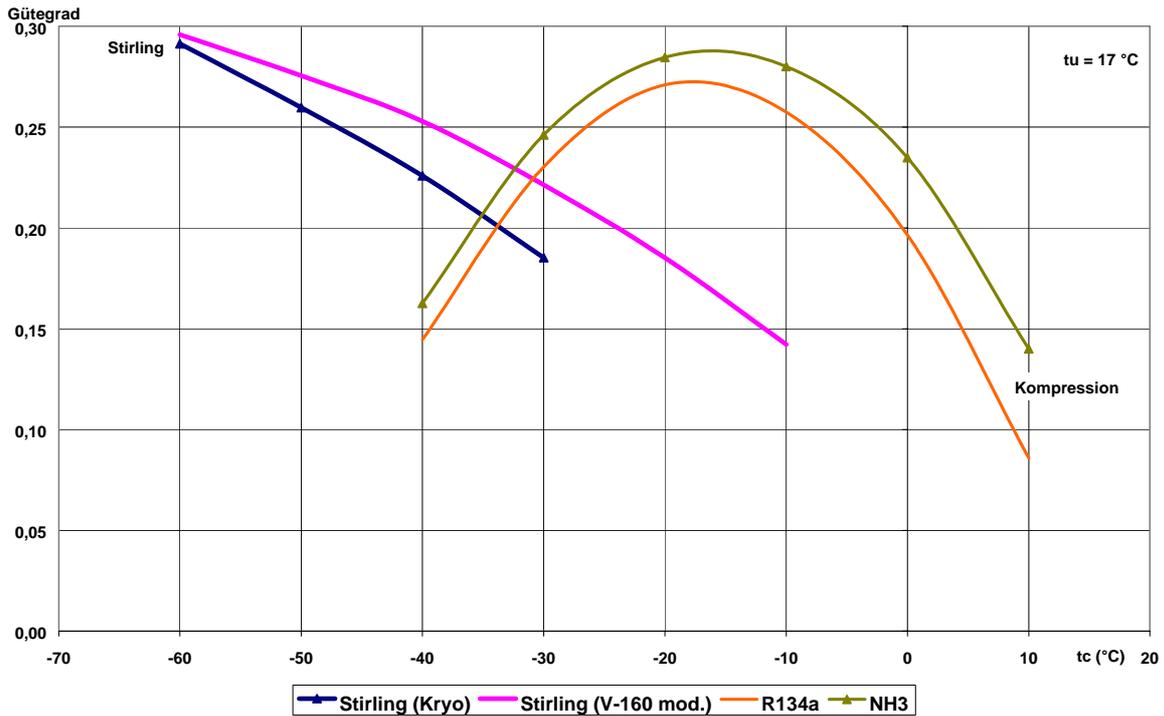


Abbildung 5.20: Vergleich der Gütegrade von Stirling-Kältemaschinen mit Kompressions-Kältemaschinen (nach /40/)

5.2.6 Kältemaschine „Sunpower“

Die Fa. Sunpower, USA, beschäftigt sich bereits seit Jahrzehnten mit dem Einsatz von Freikolben-Stirlingmaschinen für den Einsatz im umgebungsnahen Temperaturbereich. In [Abbildung 5.21](#) ist ein Freikolben-Stirlingkühler der Fa. Sunpower schematisch dargestellt. Der Antrieb des Kühlers erfolgt mittels eines Linearmotors.

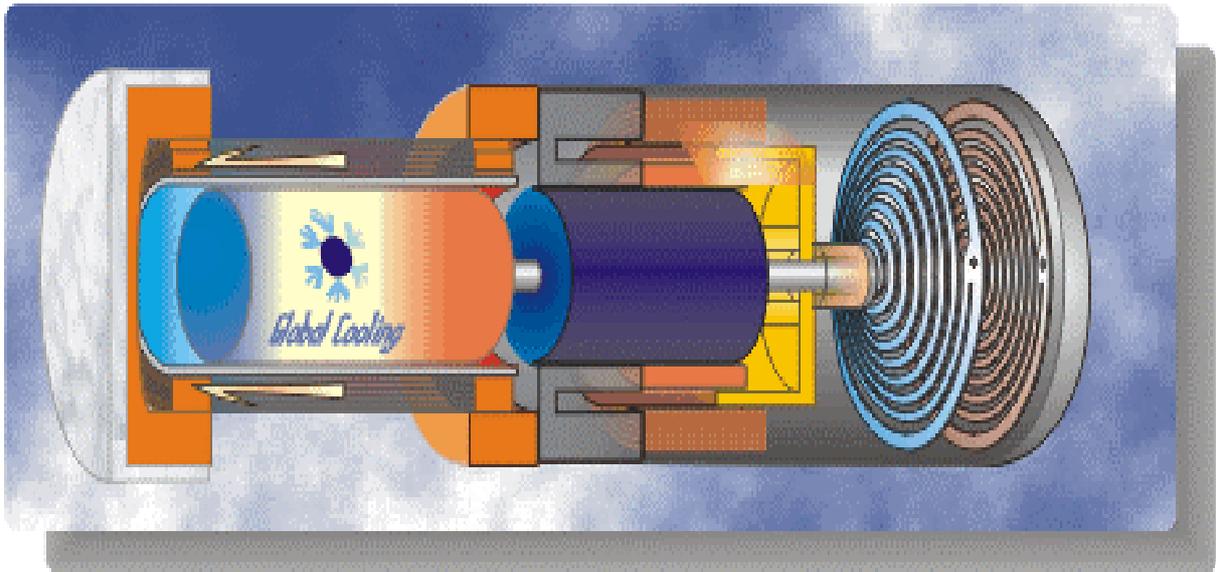


Abbildung 5.21: Freikolben-Stirling-Kältemaschine der Fa. Sunpower /Internet/

Im Laufe der Zeit wurden verschiedenste Typen der Freikolben-Stirlingmaschine entwickelt. Der Anwendungsbereich der Maschinen reicht von der Kryotechnik über Biomasse-KWK bis hin zum Einsatz in Kühlschränken.

5.3 Ergebnisse der Systemauswahl

Der Einsatz der Stirling-Kältetechnik im umgebungsnahen Temperaturbereich befindet sich im Stadium der Konzeption bzw. Erprobung. Es gibt derzeit keine „Standard-Stirling-Kältemaschinen“, die oben angeführten Arbeiten wurden mit mehr oder weniger modifizierten Stirling-Motoren durchgeführt, wobei außerdem oft der Abgleich von Berechnungsmodellen im Vordergrund stand und weniger der praktische Einsatz der Maschine. Eine Ausnahme ist eine Pilotserie von 100 Stück Freikolben-Stirling-Kältemaschinen von der Fa. Sunpower für den Einsatz in Kühlschränken.

Von den theoretischen Möglichkeiten der Stirling-„Kälteerzeugung“ (siehe Abbildung 5.6) können, aufgrund des derzeitigen Entwicklungsstandes, nur die mechanisch betriebenen Systeme als erfolversprechend eingeschätzt werden. Eine Ausnahme davon könnten, mit Brenngas betriebene, Vuilleumier-

Wärmepumpen/Kältemaschinen als Klimageräte, die sowohl zum Beheizen als auch zur Kühlung von Gebäuden genutzt werden könnten, bilden.

Es erscheint sinnvoll, für die weiteren Betrachtungen die umgebungsnahen Kälteanwendungen in zwei Bereiche einzuteilen:

- a) „Massenanwendungen“: Darunter werden jene Einsatzbereiche verstanden, in welchen große Stückzahlen erforderlich sind wie z.B. Haushaltskühlschränke und -gefriertruhen, Klimaanlage (zur Raum- und Autoklimatisierung). Diese Produkte werden direkt (Bsp. Kühlschrank) oder indirekt (Bsp. Autoklimaanlage) vom Konsumenten gekauft.
- b) „Spezialanwendungen“: Darunter werden alle anderen Einsatzbereiche verstanden, welche nicht der „Massenanwendung“ zuzuordnen sind. Wesentlich dabei ist, dass „Spezialisten“ (z.B. Technische Büros und/oder einschlägige Firmen) mit diesen Anwendungen befasst sind. Beispiele dafür sind: Gebäudeklimatisierung, Supermarkt-Kälteanlagen, Industrie-Kälteanlagen (z.B. zum Einsatz bei der Schockgefrierung in der Lebensmittelverarbeitung, in Gefrier- bzw. Kühlhallen zur Lebensmittellagerung), Kälteanlagen zur Kunsteisernerzeugung z.B. für Eislaufplätze.

Für diese beiden unterschiedlichen Anwendungsgebiete werden auch unterschiedliche Stirling-Kältetechnik-Systeme erforderlich sein.

Im Bereich der „Massenanwendung“ liegen die erforderlichen Nutzttemperaturen eher im oberen Bereich (+1 bis +5 °C für Kühlschränke, -18 bis 0 °C für Gefrierschränke). Die Leistungszahlen der Stirling-Kältemaschinen in diesem Temperaturbereich liegen weit unter jenen der Kaltdampf-Kompressions-Kältemaschinen (siehe z.B. Abbildung 5.20). Trotzdem wurden Versuche, hauptsächlich mit Freikolben-Stirling-Kältemaschinen der Fa. Sunpower, zum Einsatz in Kühlschränken durchgeführt. Obwohl es scheint, dass der Bereich der „Massenanwendung“ nicht das optimale Einsatzgebiet der Stirling-Kältetechnik ist, kann die mit einem Linearmotor betriebene η -Typ Freikolben-Stirling-Kältemaschine (Fa. Sunpower) als aussichtsreichstes System betrachtet werden.

Der Bereich der „Spezialanwendungen“ umfasst ein wesentlich größeres Anwendungsspektrum als die „Massenanwendungen“, darunter auch jene im unteren

Temperaturbereich der umgebungsnahen Kältetechnik. Wie bereits mehrfach ausgeführt liegt der, vom Gütegrad her betrachtete, interessante Temperaturbereich der Stirling-Kältetechnik bei Temperaturen niedriger als ca. -30 °C . Erfolgreiche Versuche wurden dabei mit modifizierten ζ -Typ Stirlingmaschinen (z.B. V161 Stirlingmotor der Fa. Solo Kleinmotoren) an der Universität GH Essen und am Royal Institut of Technology, Stockholm unternommen. Ebenfalls als erfolgversprechend sind die, wie in den Philips-Kältemaschinen eingesetzten, η -Typ Stirlingmaschinen anzusehen.

Ist, neben dem „Kältebedarf“ auch Wärmebedarf vorhanden (wie z.B. häufig in der Lebensmittelindustrie), so kann eine Stirling-Kältemaschine derart ausgelegt werden, dass das Temperaturniveau der „Abwärme“ der Stirling-Kältemaschine als Prozesswärme genutzt werden kann. Dies ist unabhängig vom eingesetzten Stirling-System.

6. Systemvergleich: Stirling-Kältetechnik – konventionelle Kältetechnik

Im folgenden Kapitel wird der Systemvergleich der Stirling-Kältetechnik mit der konventionellen Kältetechnik für die vier Bereiche der umgebungsnahen Kältetechnik

☞ Klimotechnik mit Nutzttemperaturen über ca. +10 °C,

☞ Kühltechnik mit Nutzttemperaturen zwischen ca. 0 und +10 °C,

☞ Gefriertechnik mit Nutzttemperaturen zwischen ca. –40 und 0 °C, sowie die

☞ Schockgefriertechnik mit Nutzttemperaturen unter –20 °C

angestellt.

6.1 Klimotechnik

Aufgabe der Klimotechnik ist die Herstellung und Aufrechterhaltung eines gewünschten Raumklimas mit Hilfe von luft- und kältetechnischen Maßnahmen. Dies kann einerseits geschehen um das Wohlbefinden der Raumnutzer zu gewährleisten (Komfortklima), andererseits um den ungestörten und für die dort Beschäftigten unschädlichen Ablauf von Produktionsprozessen sicherzustellen (Prozessklima).

Der größte Zuwachs in Europa wird in den Bereichen Fahrzeug- und Raumklimatisierung erwartet. EU-weit waren 1996 ca. 7,4 Millionen Raumklimageräte mit einem Stromverbrauch von ca. 11 TWh/a im Einsatz. Es wird erwartet, dass bis 2010 deren Anzahl auf rund 21 Millionen, bis 2030 auf rund 33 Millionen ansteigt, wobei mit einem Stromverbrauch von ca. 28,3 TWh/a (2010) bzw. 43,9 TWh/a (2030) gerechnet wird.

Zur Raumklimatisierung sind Zulufttemperaturen im Bereich von 18 bis 21 °C erforderlich. Der Leistungsbereich der Geräte reicht dabei von wenigen kW (Einzelraumklimatisierung) bis zu einigen zig MW (Gebäudeklimatisierung). Im kleinen und mittleren Leistungsbereich kommen fast ausschließlich Kaltdampf-Kompressionskältemaschinen zum Einsatz, im höheren Leistungsbereich auch Absorptionskältemaschinen. Eine interessante Alternative zu den Kaltdampf-Kompressions-Kältemaschinen ist der Einsatz von Sorptions-Kältemaschinen

(Desiccant-Klimaanlagen), welche keine Kältemittel benötigen, mit (Niedertemperatur-) Wärme „angetrieben“ werden und auch zur Belüftung und Beheizung eingesetzt werden können. Das Prinzip der Desiccant-Klimaanlagen beruht auf gezielter Be- und Entfeuchtung des Zu- bzw. Abluftstromes. Ein Prototyp einer Desiccant-Klimaanlage ist zur Klimatisierung eines Gebäudes am Ökopark Hartberg, Steiermark in Betrieb.

Die Stirling-Kältetechnik ist in diesem Einsatzbereich den konkurrierenden Verfahren unterlegen, da die tatsächlichen Leistungszahlen von Stirling-Kältemaschinen in diesem Temperaturbereich weit unter jenen von Kaltdampf-Kompressions-Kältemaschinen liegen. Versuche zum Einsatz der Stirling-Technik in der Klimatechnik waren Prototypen von Vuilleumier-Wärmepumpen/Kältemaschinen welche z.B. bei der Fa. Petry, Deutschland und Sanyo, Japan entwickelt wurden.

6.2 Kühltechnik

Unter Kühlung wird die Abkühlung und/oder Kühlung von Lebensmitteln im Temperaturbereich zwischen Umgebungs- und Gefrieranfangstemperatur verstanden. Ziel ist vor allem die Haltbarkeitsverlängerung.

Die Kühltechnik ist das klassische Einsatzgebiet der Kaltdampf-Kompressions-Kältemaschinen. Diese sind technisch ausgereift und werden für alle Leistungsbereiche serienmäßig hergestellt. Einziges Problem bei diesen Maschinen ist das für den Kälteprozess erforderliche Arbeitsmittel (siehe hierzu Kapitel 7 Umweltaspekte der Kältetechnik). Hauptsächlich ausgelöst durch die Diskussionen über den Ozonabbau durch die Kältemittel wurden zahlreiche Arbeiten und praktische Versuche zur „umweltfreundlichen Kühlung“ durchgeführt. U.a. wurde der Einsatz von Stirling-Kältemaschinen in Haushaltskühlschränken erprobt. Allerdings kamen diese Anwendungen nie über das Versuchsstadium hinaus. Ein Grund dafür waren auch die im Vergleich zu den Kaltdampf-Kompressions-Kältemaschinen (theoretisch) relativ schlechten Leistungsziffern der Stirling-Kältemaschinen. Von Sunpower, Inc. und General Electric Company, USA wurden Anfang der 90-iger Jahre dahingehende Versuche durchgeführt, wobei auch Abschätzungen über die Erzeugungskosten von Freikolben-Stirling-Kältemaschinen bei Massenproduktion

(> 250.000 Stück/Jahr bzw. > 1.000.000 Stück/Jahr nach Anpassung für Massenfertigung) gemacht wurden.

Der Einsatz von Stirling-Kältemaschinen für Kühlzwecke erscheint zwar wegen des großen Potentials als sehr interessant, die, für eine Stirling-Entwicklung, zahlreichen Versuche konnten jedoch bisher keinen Durchbruch erzielen.

6.3 Gefriertechnik

Die Gefriertechnik dient der langfristigen Haltbarmachung von Lebensmitteln, bei denen die Temperaturen unterhalb des Gefrierbeginns der Produkte liegen. Der ausfrierbare Wassergehalt wird dabei weitgehend ausgefroren. Die Gefriereschwindigkeit hat einen wesentlichen Einfluss auf die Qualität der gefrorenen Produkte. Als Tiefgefrieren wird eine thermische Stabilisierung unterhalb von -18 °C bezeichnet. Hinsichtlich der Haltbarkeit von tiefgefrorenen Lebensmitteln unterscheidet man die praktische Lagerfähigkeit (PSL - Practical Storage Life) mit einem für den Verbraucher akzeptablen Qualitätsminderung und die Lagerfähigkeit bei Erhaltung einer ausgezeichneten Qualität (HQL – High Quality Life). In Abbildung 6.1 ist der Zusammenhang zwischen Lagerzeit (in Tagen), Qualität und Lagertemperatur von gefrorenen Lebensmitteln dargestellt.

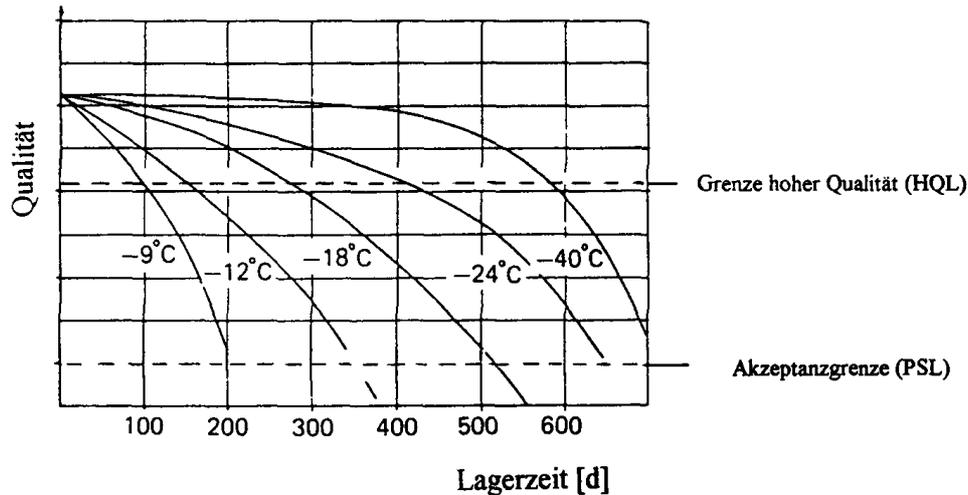


Abbildung 6.1: Charakteristisches Zeit-Temperatur-Verhalten gefrorener Lebensmittel /34/

Die wichtigsten Einsatzgebiete der Gefriertechnik sind Handel (z.B. Supermärkte), Gewerbe und Industrie (z.B. Gefrierhäuser), sowie der Transport der Gefriergüter und die Lagerung beim Verbraucher (Kühl- bzw. Gefrierschränke).

Kaltdampf-Kompressions-Kältemaschinen werden im kleinen und mittleren Leistungsbereich (z.B. Haushalte, Supermärkte) werden fast ausschließlich, im höheren Leistungsbereich (z.B. industrielle Gefrierhäuser) zum überwiegenden Teil eingesetzt. Im höheren Leistungsbereich werden auch Absorptions-Kältemaschinen eingesetzt.

Der Einsatz von Stirling-Kältemaschinen erscheint für diesen Einsatzbereich besonders interessant zu sein. Einerseits nehmen die Leistungszahlen von Kaltdampf-Kompressions-Kältemaschinen ab ca. -20 °C rapid ab, andererseits nehmen die Leistungszahlen der Stirling-Kältemaschinen mit sinkender Temperatur stetig zu (siehe z.B. Abbildung 5.20). Auch praktische Versuche zum Einsatz von Stirling-Kältemaschinen (siehe Kapitel 5.2.3 bis 5.2.5) wurden in diesem Temperaturbereich erfolgreich durchgeführt. Da auch in diesem Einsatzbereich die konkurrierenden Verfahren im Wesentlichen die Kaltdampf-Kompressions-Kälteprozesse sind, sprechen sowohl die Kältemittelproblematik als auch die Leistungsziffern für einen Einsatz von Stirling-Kältemaschinen. Der derzeitige Stand der Entwicklung von Stirling-Kältemaschinen befindet sich allerdings noch im

„Laborstadium“, sodass bis zum praktischen Einsatz noch enorme Entwicklungsarbeiten und Praxistests erforderlich sind.

6.4 Schockgefrieretechnik

Unter dem Begriff Schockgefrieretechnik werden hier alle Kälteanwendungen mit Nutzttemperaturen unter ca. -20 °C , mit Ausnahme der Gefrieretechnik (Kapitel 6.3), zusammengefasst. Die Schockgefrierung von Lebensmitteln erfolgt meist in Gefriertunneln mit Lufttemperaturen im Bereich von -40 bis -25 °C . Dabei unterscheidet man das konventionelle Gefrieren, bei dem die Kälte durch Kompressions-Kältemaschinen erzeugt wird, und kryogenes Gefrieren mit Flüssigkohlendioxid oder $-$ stickstoff. In Deutschland werden über 90% der Gefrierkapazität durch konventionelle Gefrieranlagen abgedeckt.

Für die Kältetechnik in diesem Temperaturbereich gelten sinngemäß auch die bei der Gefrieretechnik (Kapitel 6.3) getroffenen Feststellungen. Abermals erwähnt werden muss die mit sinkenden Temperaturen immer größer werdende Differenz der Leistungsziffern zugunsten der Stirling-Kältetechnik. Da in diesem Bereich neben tiefen Temperaturen auch große Kälteleistungen erforderlich sind, gibt es dazu derzeit keine praktischen Versuche mit Stirling-Kältemaschinen.

6.5 Ergebnisse des Systemvergleichs

Die Ergebnisse des Systemvergleiches der Stirling-Kältetechnik mit der konventionellen Kältetechnik für die vier wichtigsten Anwendungsbereiche im umgebungsnahen Temperaturbereich sind in Tabelle 6.1 zusammengefasst. Verglichen wird die Stirling-Kältetechnik mit der konventionellen Kältetechnik in Bezug auf Umwelt, Technik und Wirtschaftlichkeit.

Tabelle 6.1: Systemvergleich Stirling-Kältetechnik – konventionelle Kältetechnik

Anwendung	Nutztemperatur	konventionelle Kältetechnik	Bewertung der Stirling-Kältetechnik betreffend		
			Umwelt	Technik	Wirtschaftlichkeit
Klimatechnik	> +10 °C	KKK (SK)	++	--	--
Kühltechnik	> 0 und < +10 °C	KKK	++	-	-
Gefriertechnik	> -40 und < 0 °C	KKK (SK)	++	++	+
Schockgefriertechnik	< -20 °C	KKK (SK)	++	++	+/-

Abkürzungen:

KKK **K**altdampf-**K**ompressions-**K**älteprozesse
 (SK) **S**orptions-**K**älteprozesse (Sonderanwendungen)

Bewertungen:

++ weit überlegen - unterlegen
 + überlegen -- weit unterlegen
 +/- gleichwertig

Der Vergleich in Bezug auf die Umwelt fällt immer zugunsten der Stirling-Kältetechnik aus. Wegen der Kältemittelproblematik und den besseren Leistungszahlen der Stirling-Kältetechnik bei niedrigen Temperaturen (unter ca. -30 °C), was einen geringeren Energieeinsatz zum Antrieb der Kältemaschinen erforderlich macht, hat die Stirling-Kältetechnik hier die deutlichsten Vorteile.

Der Vergleich in Bezug auf die Technik ergibt ein etwas differenzierteres Bild. Allen Einsatzbereichen gemeinsam ist, dass die Stirling-Kältetechnik im gesamten umgebungsnahen Temperaturbereich sich im Stadium der Laborversuche, bestenfalls (bei Kühlschränken) bei Pilotserien befindet. Der Einsatz der Stirling-Kältetechnik im Bereich der Klimatechnik ist aufgrund der hohen Nutztemperaturen der konventionellen Kaltdampf-Kompressions-Kältetechnik deutlich unterlegen. Eine gewisse Chance könnte der Einsatz von Vuilleumier-Wärmepumpen/Kältemaschinen haben. Etwas höhere Chancen können der Stirling-Kältetechnik im Bereich der Kühltechnik eingeräumt werden. Dies ist auch der einzige Bereich der Stirling-Kältetechnik, in welchem Versuche über das Laborstadium hinaus durchgeführt wurden. Das Problem in diesem Einsatzbereich sind allerdings die relativ schlechten Leistungszahlen. Die aus der Sicht der Technik am erfolgsversprechendsten Einsatzbereiche liegen in der Gefrier- und Schockgefriertechnik. Einerseits sind niedrige Temperaturen erforderlich, andererseits müssen die Anwendungen ein großes Leistungsspektrum (von der Haushalts-Gefriertruhe über die Kühlung in Supermärkten bis zur Tiefgefrier-Lagerhalle) abdecken.

Der Vergleich in Bezug auf die Wirtschaftlichkeit ist nur eine sehr grobe Abschätzung, da es fast keine praktische Erfahrungen mit der Stirling-Kältetechnik gibt. Es ist zu erwarten, dass die Stirling-Kältetechnik in den Anwendungen Klima-

und Kühltechnik den derzeit verwendeten Techniken in wirtschaftlicher Hinsicht unterlegen sein wird. Die Chancen, eine Wirtschaftlichkeit zu erreichen, werden in der Gefriertechnik am höchsten eingeschätzt, während im Bereich der Schockgefriertechnik, aufgrund der hohen erforderlichen Kälteleistungen, die Chancen auf Wirtschaftlichkeit niedriger eingeschätzt werden.

Es sei darauf hingewiesen, dass es neben der Stirling-Kältetechnik auch andere umweltverträgliche Verfahren der Kälteerzeugung gibt. Im Bereich der Kaltdampf-Kompressions-Kältetechnik erscheinen Techniken mit Kohlendioxid oder Ammoniak als Kältemittel interessant. Ammoniak kann auch in der Absorptions-Kältetechnik eingesetzt werden. Im Bereich der Klimatechnik scheint der Einsatz von Desiccant-Klimaanlagen erfolgversprechend /41/.

7. Umweltaspekte der Kältetechnik

Wie bei allen anderen Energieanwendungen wird auch durch die Kältetechnik die Umwelt beeinflusst („Nachhaltigkeit“ der Kältetechnik). Die größten Einflüsse auf die Umwelt werden durch die Antriebsenergie für die Kältemaschinen und durch die erforderlichen Arbeitsmittel verursacht. Da die Umwelteinflüsse der Antriebsenergie (Strom bzw. Wärme) als bekannt vorausgesetzt werden können, werden in der weiteren Folge nur noch die Umwelteinflüsse der Arbeitsmittel näher betrachtet.

Das erste für Kompressions-Kältemaschinen eingesetzte Kältemittel war Äther, welcher bereits Anfang des 19. Jahrhunderts verwendet wurde. Bereits Mitte des 19. Jahrhunderts wurde Ammoniak (NH_3) sowohl für Absorptions- als für Kompressions-Kältemaschinen genutzt. Ende des 19. Jahrhunderts wurden bereits Methylchlorid und Kohlendioxid (CO_2) als Kältemittel eingesetzt. Die industrielle Produktion von Fluorchlorkohlenwasserstoffen (FCKW) begann bereits um 1913. 1987 betrug der weltweite Jahresverbrauch von FCKW-Kältemittel 224.100 t, was ca. 14% des gesamten FCKW-Verbrauchs entsprach. 1974 wurde von Rowland und Molina die sehr kontroversiell diskutierte FCKW-Ozon-Hypothese aufgestellt, welche den Abbau der Ozonschicht der Stratosphäre durch FCKW erklärt. Aufgrund dieser Erkenntnisse wurde auf einer Reihe von Konferenzen (Wien 1985; Montreal 1987, London 1990, Kopenhagen 1992 und Wien 1995) der stufenweise Ausstieg aus der FCKW Verwendung beschlossen. Das Montreal-Protokoll hat dazu geführt, dass FCKW durch Fluorkohlenwasserstoffe (HFCKW) ersetzt wurden. In den industrialisierten Ländern ist die Umstellung bereits abgeschlossen und wird in den Entwicklungsländern weiterhin durchgeführt. In der weiteren Folge soll auch ein Ausstieg aus den HFCKW erfolgen. Aus diesem Grunde könnten den „natürlichen Fluiden“ wie Ammoniak, CO_2 und den Kohlenwasserstoffen, aber auch umweltverträglichen Kältesystemen, wie z.B. der Stirling-Kältetechnik, künftig verstärkte Bedeutung zukommen.

Als Kältemittel bezeichnet man den in Kaltdampf-Kälteanlagen umlaufenden Arbeitsstoff, dessen Zustandsänderung den Kreisprozess bestimmt. Die drei Zustände, zwischen denen die Phasenübergänge stattfinden, sind Flüssigkeit, Nassdampf und gesättigter (trockener) Dampf.

Ein Kältemittel soll folgende Forderungen erfüllen:

- ≠ chemisch stabil
- ≠ nicht explosiv, nicht brennbar, nicht toxisch
- ≠ günstiger Verlauf der Dampfdruckkurve
- ≠ große volumetrische Kälteleistung.

Diese Eigenschaften werden durch die FCKW zufriedenstellend erfüllt und waren bis zur Entdeckung des Ozonabbaus in der Stratosphäre und ihren Beitrag zum Treibhauseffekt das „ideale“ Kältemittel. In Tabelle 7.1 sind die Eigenschaften einiger gängiger Kältemittel zusammengefasst.

Tabelle 7.1: Eigenschaften einiger gängiger Kältemittel

Gruppe	Kurzzeichen DIN 8962	chemische Formel	Siedepunkt °C	RODP 1)	GWP 2)	Lebensdauer Jahre ³⁾	MAK- Wert ⁴⁾	Verwendung
FCKW	R 11	CCl ₃ F	+ 23,8	1,0	4000	50	1000	Treibmittel, Reinigungsmittel, Kältemittel
	R 12	CCl ₂ F ₂	- 29,8	1,0	8500	100	1000	Treibmittel, Kältemittel
	R 13	CClF ₃	- 81,5	1,0	11700	600		Kältemittel
	R 113	C ₂ Cl ₃ F ₃	+ 47,6	1,07	5000	90	500	Reinigungsmittel (Kältemittel)
	R 114	C ₂ Cl ₂ F ₄	+ 3,6	0,8	9300	300	1000	Kältemittel
	R 115	C ₂ ClF ₅	- 38,0	0,5	9300	1700		Kältemittel (in R 502)
Azeotrope FCKW	R 500	R 12 + R 152	- 33,5	0,74				Kältemittel
	R 502	R 22 + R 115	- 45,6	0,33				Kältemittel
HFCKW	R 22	CHClF ₂	- 40,8	0,05	1700	13	500	Kältemittel
	R 123	C ₂ HCl ₂ F ₃	+ 27,1	0,02	93	1,4	10	Ersatz für R 11
HFKW	R 23	CHF ₃	- 82,0	0	11700			Ersatz für R 13
	R 32	CH ₂ F ₂	- 51,8	0	650	5,6		
	R 125	C ₂ H ₂ F ₆	- 48,5	0	2800	33		
	R 134 a	C ₂ H ₂ F ₄	- 26,5	0	1300	15,6		Ersatz für R 12
	R 143 a	C ₂ H ₃ F ₃	- 47,4	0	3800	48		
	R 152 a	C ₂ H ₄ F ₂	- 24,7	0	140	1,8		Kältemittel (in R 500)
Ammoniak	R 717	NH ₃	- 33,4	0		-	50	chemische Industrie, Kältemittel
Zum Vergleich	R 744	CO ₂	- 78,5	0	1,0	100	5000	

1) RODP = Relative Ozon Depletion Potential = Ozonabbaupotential im Verhältnis zu R 11.
2) GWP = Global Warming Potential, bezogen auf CO₂ = 1, Zeithorizont 100 Jahre.
3) Lebensdauer τ nach Abklingen der Anfangskonzentration auf 1/e = 37% nach Emissionsstopp.
4) MAK-Wert = Maximal zulässige Arbeitsplatzkonzentration in ppm.

Zur Beurteilung der Schädigung der Ozonschicht dient der RODP (Relativ Ozon Depletion Potential), welcher das Ozonabbaupotential relativ zu R11 angibt (RODP R11 = 1) /32/.

Der weltweite Kältemittelverbrauch lag im Jahre 1991 bei 484.200 t/a, wobei ca. 1/3 für neue Systeme und 2/3 für den Service bestehender Systeme verbraucht wurden. Die Aufteilung des Kältemittelverbrauchs auf die verschiedenen Sektoren ist in Abbildung 7.1 dargestellt.

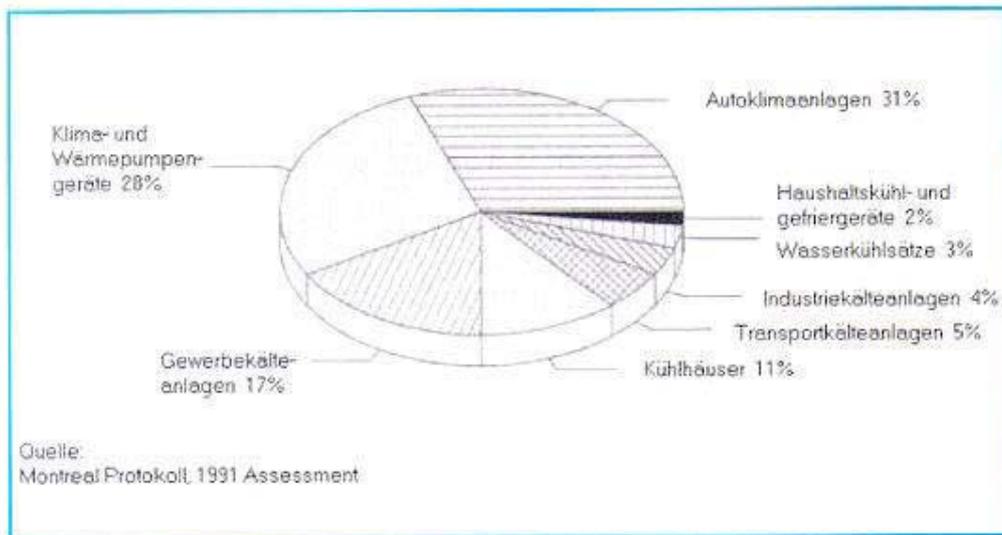


Abbildung 7.1: Aufteilung der weltweit verbrauchten Kältemittel auf die einzelnen Anwendungen /37/

Zur Beurteilung des Einflusses der Kältemittel auf den Treibhausgaseffekt dient der GWP (Global Warming Potential), welcher das Treibhausgaspotential in Bezug auf CO₂ und einem Betrachtungszeitraum von 100 Jahren angibt z.B. GWP (CO₂; 100a) = 1. Teilweise wird der GWP auch in Bezug zum Kältemittel R11 angegeben GWP (R11; 100a) = 1). Die Umrechnung zwischen den beiden Bezugssystemen lautet:

$$1 \text{ GWP (R11; 100a)} = 4.000 * \text{GWP (CO}_2\text{; 100a)}$$

Da der GWP nur einen Teilaspekt des Beitrages einer Kälteanlage zum Treibhauseffekt wiedergibt, muss zumindest auch das ID-GWP (Indirect Global Warming Potential) berücksichtigt werden, welches die Treibhausgasemissionen, die durch den Energieeinsatz für den Antrieb der Kälteanlage entstehen, angibt. Zur gesamtheitlichen Betrachtung der Treibhausgasemissionen von Kälteanlagen wird der TEWI (Total Equivalent Warming Impact) verwendet, der wie folgt definiert ist:

$$\text{TEWI} = \text{GWP} * L * n + \text{GWP} * m * (1 - \zeta_R) + n * E_a * \eta$$

mit

L Leckrate (kg/a)

n Betriebsdauer (a)

m Kältemittelfüllmenge (kg)

ζ_R Rückgewinnungsfaktor bei Anlagenentsorgung

E_a Energieverbrauch (kWh/a) für den Betrieb

η CO₂-Emissionsfaktor (kg/kWh) der Antriebsenergie

Der TEWI setzt sich aus einem direkten Anteil, verursacht durch die Emissionen der Kältemittel (in obiger Formel sind dies die ersten beiden Summanden), und einem indirekten Anteil, verursacht durch die Treibhausgasemissionen zur Bereitstellung der Antriebsenergie für die Kälteanlage (in obiger Formel der dritte Summand), zusammen. Außerdem ist der TEWI abhängig von der Lebensdauer der treibhauswirksamen Substanz, was bei exakter Anwendung die Angabe eines Betrachtungszeitraumes (meist 100 Jahre) erforderlich macht. Wie Untersuchungen gezeigt haben, ist der Einfluss des direkten TEWI auf den TEWI üblicherweise gering. D.h. es hat keinen Sinn für ein Kältemittel mit geringerem GWP einen höheren Energieverbrauch zu akzeptieren (außer es handelt sich um Energie aus erneuerbaren Energieträgern mit $\eta \sim 0$, was heute aber in der Regel nicht der Fall ist). In [Abbildung 7.2](#) ist das Verhältnis von direkten und indirekten TEWI für einige Anwendungen dargestellt.

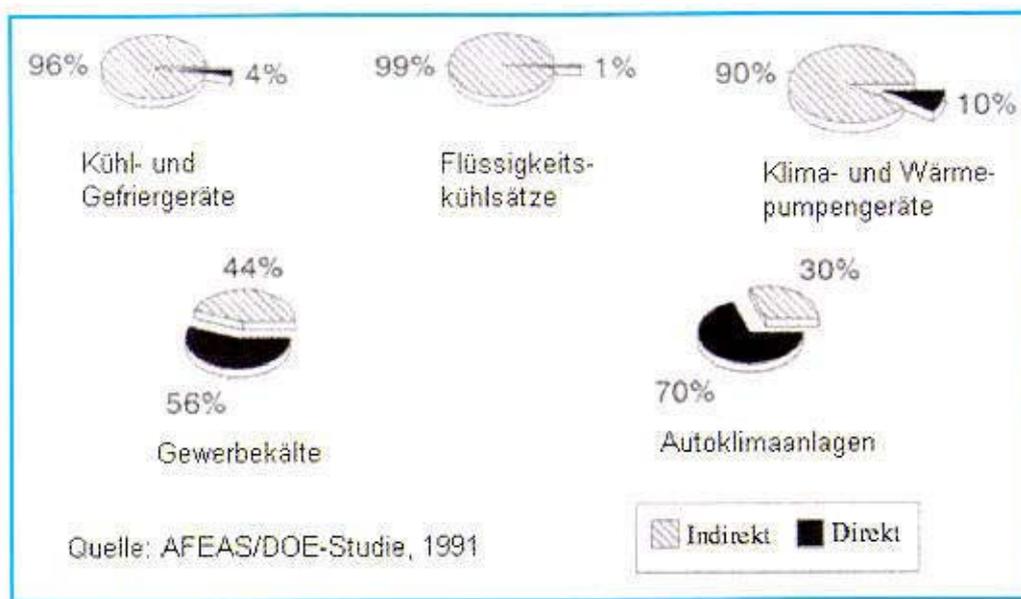


Abbildung 7.2: Direkter und indirekter TEWI einiger Kälteanwendungen /37/

Das Montreal-Protokoll hat dazu geführt, dass FCKW durch Fluorkohlenwasserstoffe (HFKW) ersetzt wurden. In den industrialisierten Ländern ist die Umstellung bereits abgeschlossen und wird in den Entwicklungsländern weiterhin durchgeführt. In der weiteren Folge soll auch ein Ausstieg aus den HFCKW erfolgen. Aus diesem Grunde könnten den „natürlichen Fluiden“ wie Ammoniak, CO₂, den Kohlenwasserstoffen und der Stirling-Kältetechnik künftig verstärkte Bedeutung zukommen. In Abbildung 7.3 ist das ODP und GWP (CO₂; 100a) für einige Kältemittel dargestellt.

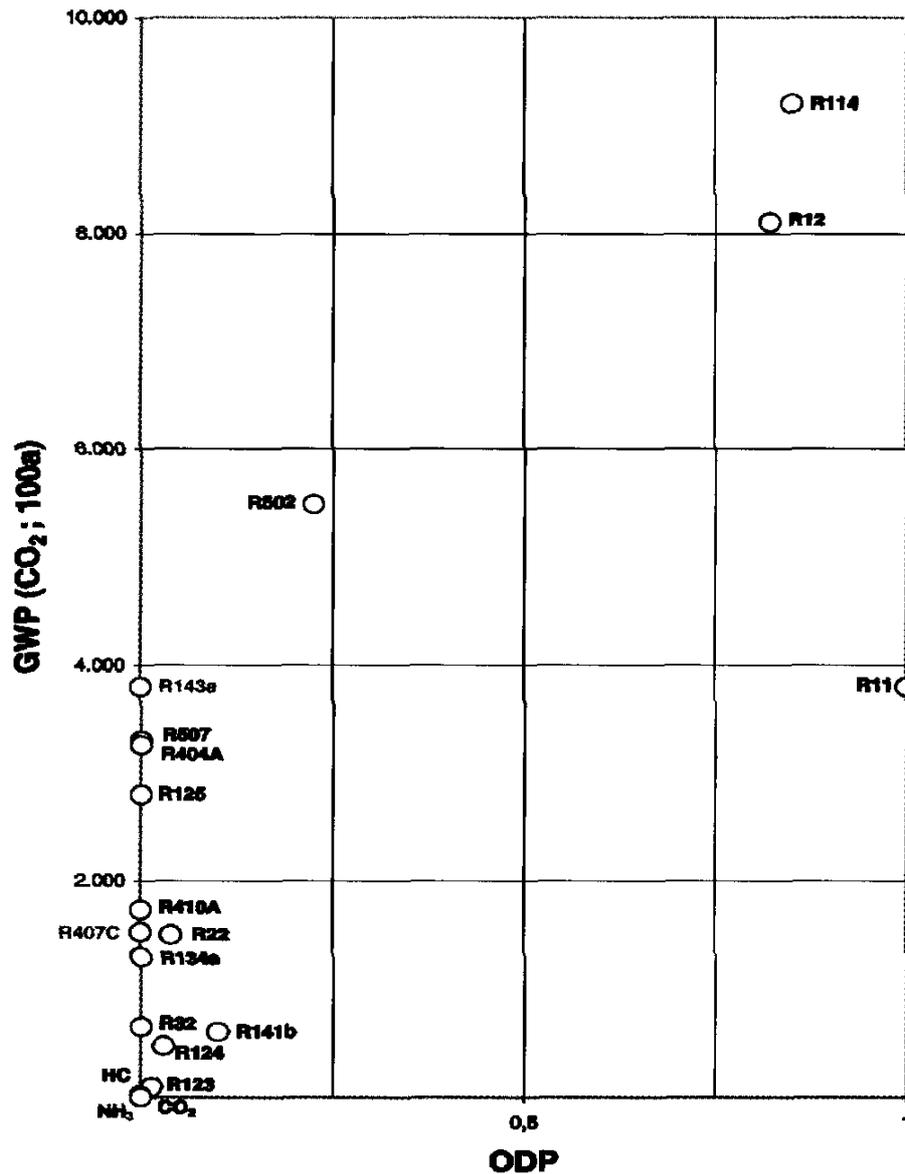


Abbildung 7.3: ODP und GWP (CO₂; 100a) einiger Kältemittel /37/

In Tabelle 7.2 sind die Ergebnisse einer Untersuchung über umweltverträgliche Kälteerzeugung /33/ dargestellt.

Tabelle 7.2: Bewertung verschiedener Kälteprozesse /33/

	PROZESSE	ODP	GWP	ID-GWP	UMSETZ- BARKEIT	ANWEN- DUNG	ARBEITS- STOFF
1	Period. Absorption mit flüssigem Absorber	0	0	2,27	2	KS	NH3
2	Period. Absorption mit festem Absorber	0	0	3,36	2	KS	NH3
3	Period. Adsorption mit festem Absorber	0	0	1,2...0,82	2	KS	NH3
4	Kont. AKM mit H2	0	0	1,2...0,93	1	KS	H2O/NH3
5a	Kont. AKM	0	0	0,368	1	KT	LiBr/H2O
5b	Kont. AKM	0	0	0,49	1	KT	H2O/NH3
5c	Kont. AKM	0	0	0,85	1	GL	H2O/NH3
5d	Kont. AKM mit Abwärme	0	0	0,04	1	GL	H2O/NH3
5e	Kont. AKM mit Booster	0	0	1	1	SKT	H2O/NH3
6	Vuilleumier	0	0	0,6	3,4	GL	He
7	Duplex-Ericsson	0	0	0,6	3,4	GL	He
8	Duplex-Stirling	0	0	0,7	3	GL	He
9a	Kaltdampf (Kompr.)	0,055	0,36	0,32	1	KT	R22
9b	Kaltdampf (Kompr.)	0,055	0,36	0,42	1	GL	R22
9c	Kaltdampf (Kompr.)	0,055	0,36	0,67	1	SKT	R22
9d	Kaltdampf (Kompr.)	0	0,25	0,45	2	KS	R134a
10a	Stirling	0	0	0,38	2	KT	H2
10b	Stirling	0	0	0,51	2	GL	H2
10c	Stirling	0	0	0,67	2	SKT	H2
10d	Stirling	0	0	0,45	2	KS	He
11	Ericsson	0	0	---	4	----	He, H2
12a	Joule/Brayton	0	0	0,32	2	KT	Luft, offen
12b	Joule/Brayton	0	0	0,42	2	GL	Luft, offen
13	KML	0	0	0,15	2	AK	H2O/NH3

Legende:

ODP...Ozon Depletion Potential (Bezug: R11 =1), GWP...Treibhauseffekt (Bezug: R11=1), ID-GWP...Indirekter Treibhauseffekt (kg CO2 je kWh Kältearbeit); Bei Antrieb mit Wärme:Bezug auf Heizöl el., d.i. 7.800 kg/TJ = 0,28 kg/ kWh; Bei Antrieb mit elektrischer Energie: Multipliziert mit Faktor 3.

UMSETZBARKEIT: 1... Ohne Entwicklungsarbeiten, 2...Erfahrung mit Prototypen, 3...Laborstadium, 4...Konzepte.

ARBEITSSTOFFE: He ...Helium, H2...Wasserstoff, LiBr...Lithium Bromid, NH3...Ammoniak.

ANWENDUNG: KS...Kühlschrank (Haushalt), KT...Klimatechnik (+5 °C), GL...Gefrierlagerung (-20 °C),SKT...Schockkältetechnik, (-40 °C), AK...Abgaskondensation.

PROZESSE: KML...Kompressionskältemaschine mit Lösungskreislauf; Kont. AKM...Kontinuierlich arbeitende Absorptionskältemaschine, Kont. AKM mit Abwärme...Kontinuierlich arbeitende Absorptionskältemaschine, betrieben mit Abwärme;

Für verschiedene Kälteprozesse wurden der ODP, der GWP, der ID-GWP, die Umsetzbarkeit, die Anwendungen und die erforderlichen Arbeitsstoffe betrachtet.

Für Anwendungen in der Klimatechnik sind auch offene Sorptions-Kälteprozesse (z.B. Dessicant-Klimaanlagen) eine interessante Alternative. Die Klimatisierung wird dabei durch die entsprechende Konditionierung der Zuluft - gezieltes Ent- und Befeuchten - erreicht. Die „Antriebsenergie“ für diese Prozesse ist Wärme, welche auch aus thermischen Solaranlagen oder aus erneuerbaren Energieträgern wie z.B. Biomasse bereitgestellt werden kann, das „Arbeitsmittel“ ist Wasser. Sowohl der ODP als auch der GWP sind null, bei Verwendung erneuerbarer Energieträger ist auch der ID-GWP nahezu null. Ein geringer ID-GWP wird einerseits dadurch verursacht, weil auch erneuerbare Energieträger nicht absolut CO₂-neutral sind und andererseits geringe Energiemengen (im Vergleich zur Antriebsenergie) für Gebläse und Hilfsantriebe wie z.B. Pumpen und Motore, erforderlich sind.

Wie oben dargestellt, sind der durch die Kältemittel verursachte Ozonabbau in der Stratosphäre und deren Beitrag zum Treibhauseffekt die Hauptursachen der Umweltbeeinträchtigung durch Kälteanlagen. Nutzt man also Prozesse, bei welchen keine umweltbeeinträchtigenden Arbeitsmittel erforderlich sind (z. B. beim Stirlingprozess oder bei bestimmten Sorptions-Kälteprozessen), so ist das ODP und der direkte TEWI gleich null. Der einzige Beitrag zum Treibhauseffekt beim Einsatz dieser Prozesse wird also durch den indirekten TEWI verursacht.

8. Industriekontakte

Die Abschätzung des Interesses der österreichischen Industrie für eine Kooperation in eventuellen Folgeprojekten war Teil dieses Projektes. Bei der Suche nach interessierten Industriepartnern wurde zuerst auf die eigenen langjährigern Erfahrungen auf den Gebieten der Kältetechnik (Beispiel: Desiccant-Klimaanlage Ökopark Hartberg) und des Motorenbaues (Beispiel: Biomasse-Stirling-Motore) zurückgegriffen. Im nächsten Schritt wurde mit Experten auf dem Gebiet der Kältetechnik (Technisches Büro ENERTEC, Graz, Fachhochschule Pinkafeld) Kontakt aufgenommen. Recherchen im Internet (z.B. Homepage der Österreichischen Wirtschaftskammer) und in einschlägigen Zeitschriften wurden ebenfalls durchgeführt. Daraus wurden 13 Firmen identifiziert, an die eine e-mail Befragung gerichtet wurde. Dabei wurden folgende zwei Kernfragen gestellt:

1. Ihre Einschätzung der Marktattraktivität der „Stirling-Kälteerzeugung“ im umgebungsnahen Temperaturbereich (ca. +10 bis -50 °C):

(Bewertungsskala: 1 bis 4; 1 = sehr große Attraktivität, 4 = absolut keine Attraktivität)

2. Ihr Kooperationsinteresse auf diesem Gebiet:

(Bewertungsskala: 1 bis 4; 1 = sehr großes Interesse, 4 = absolut kein Interesse)

Auf diese Befragung gab es Antworten von vier Firmen (entspricht ca. 30%) mit folgenden Ergebnissen:

- ≠ Eine Firma (Verkaufsgesellschaft einer internationalen Gruppe) erklärte sich für nicht zuständig, da sich der Hauptproduktionsort der Gruppe in Belgien befindet.
- ≠ Zwei Firmen hatten weder Interesse am Thema (Bewertung: 4 bzw. 3) noch an einer Kooperation (Bewertung: 3 bzw. 4). In einem Fall wurde als Grund des Desinteresses Zeitmangel („zur Zeit absolut keine Zeit“) genannt, im anderen Fall wurde auf negative „Erfahrungen mit diesem System“ verwiesen.
- ≠ Eine Firma hat sowohl Interesse am Thema (Bewertung: 2) als auch an einer Kooperation (Bewertung: 1). Grund für das Interesse war die Kältemittelproblematik bei konventionellen Anlagen.

Der Grund für das geringe Echo der österreichischen Industrie liegt in der Tatsache, dass es in Österreich nur sehr wenige Produzenten von kältetechnischen Anlagen bzw. Komponenten dafür gibt, welche zusätzlich zur Produktion auch eigene Forschung und Entwicklung betreiben. Der Schwerpunkt des Kältemarktes in Österreich liegt im Bereich der Anwendung bzw. Installation marktgängiger Komponenten der Kältetechnik sowie die dafür erforderlichen technischen Auslegungen (Engineering).

Die Firma mit Interesse am Thema und an einer Kooperation ist ein österreichischer Hersteller von Gefriermöbel. Gespräche über mögliche Kooperationen wurden begonnen.

9. Empfehlungen

Aufgrund der durchgeführten Arbeiten werden die Chancen der Stirling-Kältetechnik in den Bereichen Gefrier- und Schockgefrieretechnik am aussichtsreichsten eingeschätzt. Zur weiteren Vorgangsweise betreffend den praktischen Einsatz der Stirling-Kältetechnik können folgende Empfehlungen abgegeben werden:

Durchführung einer Bedarfsanalyse und Erhebung der technischen Rahmenbedingungen für den Anwendungsbereich Gefrieretechnik. Dazu sollte, in Zusammenarbeit mit einem Industriepartner, welcher Erfahrungen im Bereich des Kältemarktes und der Kälteanwendungen hat, das derzeitige und künftige Marktpotential abgeschätzt werden. Dabei sind auch die Entwicklungen der gesetzlichen Rahmenbedingungen für den künftigen Einsatz von Kältemitteln sowie zur Reduktion der Treibhausgase zu berücksichtigen. Es sollten auch technische Spezifikationen für konkrete Anwendungsbereiche erarbeitet werden. Ziel dieser Arbeit wäre, eine, den Marktbedürfnissen angepasste, Entwicklung von Stirling-Kältemaschinen in die Wege zu leiten. Ein wesentliches Kriterium für ein erfolgreiches Folgeprojekt ist die Kooperation mit einem österreichischen Industriepartner, der an einer weiteren Entwicklung maßgeblich beteiligt ist.

Bei positiven Ergebnissen der Marktpotentialuntersuchung sollte ein Labormuster einer Stirling-Kältemaschine entwickelt, gebaut und getestet werden. Dabei sollte auch die Idee einer diskontinuierlichen Steuerung des Verdrängers, welche bei Joanneum Research geprüft wird, berücksichtigt werden.

10. Literatur

- /1/ R.J. Meijer, E.C. Miniatt: „STM4-120RF as Refrigerators for Supermarkets“, 6th International Stirling Engine Conference (6. ISEC), Eindhoven, Mai 1993
- /2/ A. Siegel: „Entwicklung einer Stirlingmaschine mit Kurbeltrieb für die Kälteerzeugung bei Temperaturen von unterhalb von -40 °C.“, Europäisches Stirling Forum 1998, Osnabrück
- /3/ C.M. Hargreaves: „The Philips Stirling Engine“, Elsevier-Verlag, 1991
- /4/ K. Hamaguchi, T. Kaminishizono: „Effects of Regenerator Characteristics on Semi-free Piston Stirling Engine Alternator Performance“, 6th ISEC, Eindhoven, The Netherlands, May 1993
- /5/ M. Tanaka, K. Hamaguchi: „The Design of Stirling Engine Regenerator“, 7th ISEC, Tokyo, 1995
- /6/ K. Hamaguchi, Y.Hiratsuka, H. Miyabe: „Effects of Regenerator Size Change on Stirling Engine Performance“, Proceedings of the 26th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, Volume 5, (IECEC-91), August 1991, Boston, Massachusetts
- /7/ M. Werdich: „Stirling - Maschinen; Grundlagen, Technik, Anwendung“, Ökobuchverlag, Staufen bei Freiburg, 1992
- /8/ C.W. Behrens: „Open Cycle Air Cooler Operates with Freon“, Appliance Manufacturer, April 1975, Seite 44 u. 45
- /9/ A. Hilligweg, S. Schulz: „Ein neuartiger regenerativer Gaskreisprozeß mit freischwingendem Verdrängerkolben“; KI Klima-Kälte-Heizung, 4/1993
- /10/ H. Kruse: „Treibhauseffekt als Herausforderung für die Kältetechnik in den neunziger Jahren“; KI Klima-Kälte-Heizung, 11/1991
- /11/ H. Kruse, M. Kauffeld: „Kaltluftkältemaschinen nach dem Joule-Prozeß“; KI Klima-Kälte-Heizung, 5/1990
- /12/ H. Lotz: „Tendenzen beim FCKW-Ersatz in der Kältetechnik unter Berücksichtigung des Treibhauseffektes“; KI Klima-Kälte-Heizung, 10/1991
- /13/ M. Tanaka: „Effect Of Wire Diameter On Regenerator Performance“; 6. ISEC, Mai 1993

- /14/ Y. Kurosawa, I. Okamoto, J. Matsue: „The 2nd Report Of Development Of A Vuilleumier Cycle Heat Pump“; 6. ISEC, Mai 1993
- /15/ D.K. Shin, K.S. Cho, S.M. Chang, W.S. Chung, S.T. Kim: „Experimental Study On The Stirling Refrigerator“; 6. ICES, Mai 1993
- /16/ D.M. Berchowitz, W.F. Bessler: „Progress On Free-Piston Stirling Coolers“; 6. ISEC, Mai 1993
- /17/ K. Hashimoto, T. Sato, N. Isshiki, G. Walker: „Feasibility Study Of A Freon-Free Automotive Air Conditioner With An Charged Reserved Stirling Refrigerator Cycle“; 6. ISEC, Mai 1993
- /18/ G. Walker, G. Reader, R. Fauvel, E.R. Bingham: „Stirling, Near-Ambient Temperature Refrigerators: Innovative Compact Desings“; 6. ISEC, Mai 1993
- /19/ R.J. Meijer, R. Heijer: „STM4-120CC As Cryocooler For Liquid Natural Gas“; 6. ISEC, Mai 1993
- /20/ Th.J. de Lange, M.J. Vries: „The Application Of The Stirling Cycle To Refrigeration Maschines - A Design Methodological Analysis“, 6. ISEC, Mai 1993
- /21/ H. Carlsen, H-D. Kühl, S. Schulz, B. Thomas: „Effects Of An Improved Hot Regenerator On The Performance Of A Vuilleumier Heat Pump“; 6. ISEC, Mai 1993
- /22/ J. Mathews, G. Walker: „Limitations Of Kolin-Type Stirling Refrigerators“; 6. ISEC, Mai 1993
- /23/ C. Wu: „Performance Limit Of A Real Stirling Refrigerator“; 6. ISEC, Mai 1993
- /24/ G.W. Swift: „Malone Refrigeration“; 6. ISEC, Mai 1993
- /25/ H. Hisaki, H. Kawamoto, M. Mori, S. Fujiyama: „Development Of Stirling Engine Heat Pumps (SEHPS) Technology And Marketing“; 6. ISEC, Mai 1993
- /26/ Per G. Lundquist: „Stirling Cycle Heat Pumps and Refrigerators“, doctoral thesis, 1993, Royal Institut for Technology, Stockholm
- /27/ R. Plank: „Handbuch der Kältetechnik“, Band 5, Kaltgasmaschinen und Kaltdampfmaschinen, Springer-Verlag, 1966
- /28/ G. Walker: „Cryocoolers“, 2 Vols, New York, Plenum Publishing Corporation
- /29/ G. Walker, G. Reader, O.R. Fauvell, E.R. Bingham: „The Stirling Alternative“, University of Calgary, 1994

- /30/ R. Plank: „Wiederkehr der Kaltluftmaschine“, Kältetechnik, 01.03.1949, S 1
- /31/ G.E. Gregg: „Air Cycle Air Conditioning“, Refrig. Engng, November 1957, S 35 bis 39
- /32/ Recknagel, Sprenger, Schramek: „Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik“, 69. Auflage 1999, R. Oldenbourg Verlag München Wien
- /33/ E. Podesser: „Umweltverträgliche Kälteerzeugung“, Joanneum Research, Graz, Bericht Nr.: IEF-B-6/94, März 1994
- /34/ H. L. von Cube, F. Steimle, H. Lotz, J. Kunis (Hrsg.): „Lehrbuch der Kältetechnik“ 2 Bände, 4. Auflage 1997, C.F. Müller Verlag Heidelberg
- /35/ F. Steimle (Hrsg.): „Stirling-Maschinen-Technik“, 1. Auflage 1996, C.F. Müller Verlag Heidelberg
- /36/ H. Ritter: „Mit Klimaanlage zur Klimakatastrophe“, EVA Presseausendung, 8. 10. 2000, <http://www.eva.ac.at/publ/media/pa18.htm>
- /37/ H. Kruse: „Zukunft der Kältetechnik unter umwelttechnischen Herausforderungen“, KI Luft- und Kältetechnik, 3/2002
- /38/ G. Preuß: „Kennwerte zur Kälte- und Wärmepumpentechnik“, Marktinformationen, KI Luft- und Kältetechnik, 10/2001
- /39/ Conferenc Proceedings of the „10th International Stirling Engine Conferenc 2001 (10th ISEC)“, 24 – 26 September 2001, Osnabrück, Germany, VDI-Gesellschaft Energietechnik GET
- /40/ K. Schiefebein, et al.: „Stirling-Kältemaschinen als Alternative zu Kaltdampf-Kältemaschinen“, Festschrift zum 60. Geburtstag von Prof.Dr.-Ing. Fritz Steimle, Universität GH Essen
- /41/ E. Podesser, et. al.: „Errichtung und Betrieb einer Desiccant-Klimaanlage zur Technologie-Demonstration im Forschungshaus des Ökopark Hartberg“, Joanneum Research, Graz, Bericht Nr.: IEF-B-09/00, Dezember 2000