

## Die Wärmepumpe

Stichworte: Thermische Maschinen; 1. und 2. Hauptsatz; Wirkungsgrad und Leistungsziffer

### 1 Einführung und Themenstellung

Mit einer Wärmepumpe wird - entgegen der natürlichen Richtung eines Wärmestroms - Wärme von einem kälteren auf einen wärmeren Körper übertragen.

Im Versuch wird eine Demonstrations-Wärmepumpe eingesetzt, die den Kältemittel-Kreislauf und das Kompressor-Aggregat eines üblichen Kühlschranks enthält. Durch Messung der zugeführten Arbeit und der übertragenen Wärme sollen die energetische Bilanz, die Leistungszahl der Anordnung und ihre Abhängigkeit von den Betriebstemperaturen bestimmt werden.

### 2 Physikalische Grundlagen

Von einem Bereich mit hoher Temperatur fließt ein Wärmestrom stets in Richtung zu einem anderen mit niedriger Temperatur. Dieser Vorgang ist irreversibel; der anfängliche Temperaturunterschied wird dabei verringert. Diese Erfahrung wird im Zweiten Hauptsatz der Thermodynamik formalisiert:

- Zustandsänderungen laufen in Richtung maximaler Wahrscheinlichkeit (maximaler Entropie) ab.

Zur Umkehrung dieser Richtung des Wärmestroms muss eine Kältemaschine eingesetzt werden. Eine solche Maschine wird als **Wärmepumpe** bezeichnet, wenn sie zum Aufheizen eines Raums mit höherer Temperatur verwendet werden soll. Dazu muss ein kalter Bereich noch weiter abgekühlt werden. Eine Wärmepumpe braucht mechanische bzw. elektrische Energie zu ihrem Betrieb. Diese Energie kann mit einer Wärmekraftmaschine erzeugt werden. Es ist daher zweckmäßig, diese beiden Maschinentypen zusammen zu betrachten.

Wärmekraftmaschine und Wärmepumpe können, ohne Bezug auf ihre spezielle Konstruktion und Funktionsweise, allein auf Grund der darin umgesetzten Energien und ihrer Temperaturen beschrieben werden. Wir betrachten dazu noch eine Wärmekraftmaschine im Leerlauf, das ist energetisch dasselbe wie ein Ofen.

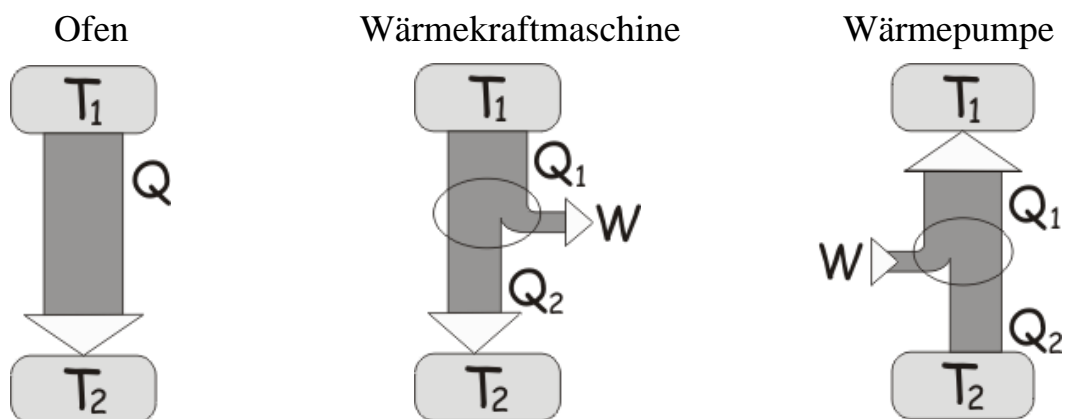


Abb. 1: Energiefluss-Diagramme für Ofen, Wärmekraftmaschine und Wärmepumpe

Bei **Ofen** und **Wärmekraftmaschine** wird Wärmeenergie  $Q_1$  im Brennerraum freigesetzt, dieser ist ein heißer Wärmespeicher mit der Temperatur  $T_1$

Bei der **Wärmekraftmaschine** wird ein Teil davon in mechanische bzw. elektrische Arbeit  $W$  umgewandelt und genutzt. Die verbleibende Wärmeenergie fließt als Abwärme  $Q_2$  an die Umgebungsluft mit der Temperatur  $T_2$ , die den kalten Wärmespeicher darstellt.

Der Wirkungsgrad der Maschine ist

$$\eta = \frac{W}{Q_1} \quad (1)$$

Beim Ofen bzw. im Leerlauf ist in diesem Sinn der Wirkungsgrad Null.

Aus dem Zweiten Hauptsatz lässt sich folgern, dass nicht die gesamte Ausgangswärme  $Q_1$  in Arbeit umgewandelt werden kann.

Der Wirkungsgrad für eine ideale Wärmekraftmaschine ergibt sich theoretisch bei einem reversiblen Kreisprozess mit einem idealen Gas als Arbeitsmedium, dem Carnot-Prozess. Hierfür ergibt sich als maximal möglicher, idealer Wirkungsgrad

$$\eta_{ideal} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1} \quad \begin{array}{l} T \text{ absolute Temperatur in Kelvin} \\ \vartheta \text{ Temperatur in } ^\circ\text{C} \end{array} \quad (2)$$

stets ist  $\eta_{real} < \eta_{ideal}$

( $T$  bedeutet absolute Temperatur in Kelvin,  $\vartheta$  bedeutet Temperatur in  $^\circ\text{C}$ ; dabei gilt für Temperaturdifferenzen  $\Delta\vartheta = \Delta T$ )

Man sieht:  $\eta$  wird größer mit zunehmender Temperaturdifferenz, aber in der Realität ist  $T_2$  gegeben durch die Umgebungstemperatur, und  $T_1$  ist begrenzt durch die Warmfestigkeit der Motorwerkstoffe.

Lässt man die ideale Maschine in die andere Richtung laufen, dann entsteht die **Wärmepumpe** oder die **Kältemaschine**. Größere kommerzielle Wärmepumpen werden zur Gebäudebeheizung eingesetzt: die kalte Umgebung mit der Temperatur  $T_2$  (Außenluft, Erdboden, ...) wird noch weiter abgekühlt und dabei dort die Wärmeenergie  $Q_2$  entzogen. Zum Antrieb der Wärmepumpe durch einen Elektro- oder Verbrennungsmotor ist die Arbeit  $W$  zuzuführen.

Gemäß dem Ersten Hauptsatz (Energieerhaltungssatz) wird dem zu beheizenden Innenraum mit der Temperatur  $T_1$  insgesamt die Wärmeenergie  $Q_1 = Q_2 + W$  zugeführt.

Die Wärmepumpe wird charakterisiert durch ihre Leistungsziffer  $\varepsilon$

$$\varepsilon = \frac{Q_1}{W} \quad \text{mit} \quad \varepsilon > 1 \quad (3)$$

Die ideale Leistungsziffer für einen theoretischen reversiblen Prozess lässt sich analog wie bei der Wärmekraftmaschine berechnen, sie hängt nur von den Temperaturen der beiden Wärmespeicher ab:

$$\text{ideale Leistungsziffer} \quad \varepsilon_{ideal} = \frac{T_1}{T_1 - T_2} \quad (4)$$

Stets ist  $\varepsilon_{real} < \varepsilon_{ideal}$ .

Könnte man eine ideale Wärmekraftmaschine und eine ideale Wärmepumpe miteinander kombinieren, d.h. die Nutzarbeit der Wärmekraftmaschine zum Antrieb der Wärmepumpe nutzen, so würde darin ein reversibler Kreisprozess mit  $\eta \cdot \varepsilon = 1$  ablaufen.

### 3 Die Realisierung der Wärmepumpe

Der Wärmetransport in der Kompressor-Wärmepumpe erfolgt durch ein reales Gas als Arbeitsmedium, das in einem Kreisprozess bewegt wird und dabei abwechselnd gasförmig und flüssig ist. Beim Versuchsgerät ist das Arbeitsmedium Difluordichlormethan  $\text{CCl}_2\text{F}_2$ , bezeichnet als Kältemittel R 12.

Beim Kreislauf des Arbeitsmediums wird Wärme als Verdampfungswärme von außen aufgenommen und als Kondensationswärme an anderer Stelle, beim Verflüssiger, nach außen abgegeben. Dabei werden folgende

Prozessschritte durchlaufen:

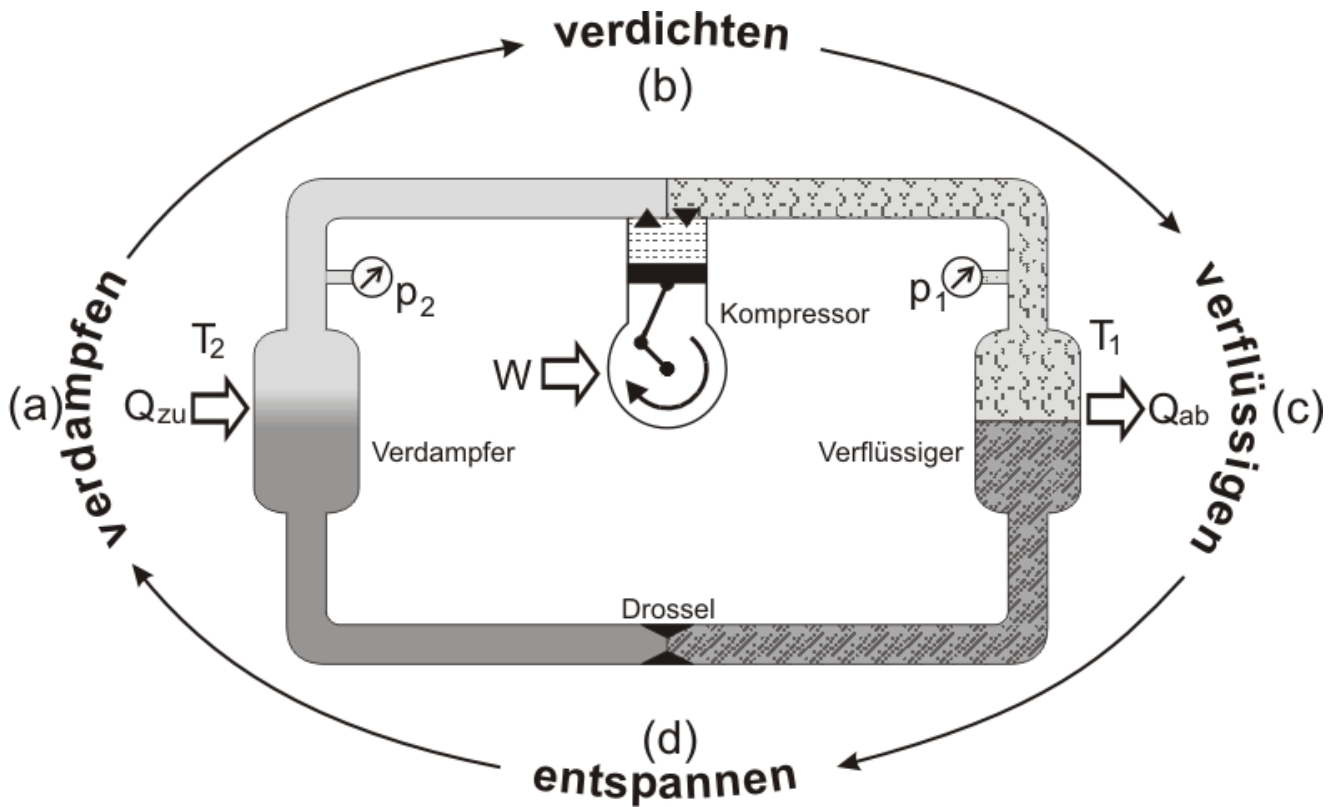


Abb. 2: Kreisprozess in der Kompressor-Wärmepumpe

- a) Im Verdampfer ist das Arbeitsmedium gasförmig bei niedrigem Druck und tiefer Temperatur. Der niedrige Druck entsteht durch das Ansaugen des Arbeitsgases durch den Kompressor.
- b) Im Kompressor wird das Gas verdichtet, Druck und Temperatur steigen an. Zum Betrieb des Kompressors wird Arbeit zugeführt.
- c) Im Verflüssiger gibt das Gas Wärme nach außen ab und kondensiert bei dieser Abkühlung; die Umgebung wird an dieser Stelle erwärmt.
- d) Die unter hohem Druck stehende Flüssigkeit strömt durch die Drosselstelle, eine enge Düse, in den Verdampferraum, in dem ein geringer Druck herrscht.
- e) = a) Die Flüssigkeit verdampft bei dieser Expansion und nimmt dazu Verdampfungswärme aus der Umgebung auf, an dieser Stelle wird die Umgebung abgekühlt.

⇒ Beginn des Kreislaufs von neuem.

Das Arbeitsmedium wird als verflüssigbares reales Gas durch sein  $p(V)$ - Zustandsdiagramm und durch die Dampfdruckkurve  $p(\vartheta)$  beschrieben. Beide sind im Anhang aufgeführt.

Außer der hier beschriebenen Kompressions-Wärmepumpe gibt es die Absorber-Wärmepumpe (Camping-Kühlschrank mit Gasheizung). Bei beiden Ausführungen der Wärmepumpe sind die realen Kreisprozesse unterschiedlich, und beide sind völlig verschieden vom idealen Carnot-Prozess. Dieser ideale Prozess wird nur zum Gütevergleich mit den realen Prozessen herangezogen.

## 4 Versuchsdurchführung

- a) Die Wärmetauscherrohre von Verdampfer und Verflüssiger tauchen je in ein Gefäß mit kaltem Leitungswasser. Wassertemperaturen  $\vartheta_1 \approx \vartheta_2 \approx 15^\circ\text{C}$ . Die Wärmetauscher müssen vollständig mit Wasser bedeckt sein. Ermitteln Sie die Masse des Wassers durch abwiegen. In jedes Gefäß kommt ein Thermometer.

*Hinweis:* Den Schutz für die empfindlichen Thermofühler nicht entfernen!

- b) Energiemessgerät auf Energiemessung (Skalierung auf Wh) einstellen; evtl. angezeigten Skalenwert durch Reset (2-3 sek. halten) auf Null stellen.
- c) Vor dem eigentlichen Versuchsbeginn werden die Wassertemperaturen  $\vartheta_1$  und  $\vartheta_2$  in den Gefäßen mindestens zwei Minuten lang beobachtet und alle Minuten ( $t = -2 \text{ min}$ ;  $-1 \text{ min}$ ) notiert. An den beiden Manometern werden die Arbeitsdrücke  $p_1$  und  $p_2$  im Verdampfer und Verflüssiger abgelesen und notiert.
- d) Falls keine Temperaturänderung mehr auftritt, bei  $t = 0$  Wärmepumpe einschalten, Wassertemperaturen  $\vartheta_1$  und  $\vartheta_2$ , zugeführte elektrische Arbeit  $W$  sowie Arbeitsdrücke  $p_1$  und  $p_2$  im Abstand von 1 Minute messen und protokollieren. Falls Eisansatz am Verdampfer beobachtet wird, ist das im Protokoll zu vermerken.

*Hinweis:* Gutes Umrühren verbessert die Ergebnisse.

- e) Bei einer Temperaturerhöhung von  $\vartheta_1$  auf  $50^\circ\text{C}$  den Versuch beenden.
- f) Wiederholen Sie den Versuch, jedoch mit verschieden temperiertem Wasser: auf der Verdampferseite um 10 - 15 K höhere Anfangstemperatur als beim Verflüssiger.

☞ Weitere Punkte zur Versuchsdurchführung bei vertiefter Bearbeitung:

- g) An den beiden Manometern befindet sich neben der Druckskala noch eine Temperaturskala für das Arbeitsmedium. Notieren Sie die Zuordnung zwischen Druck (in bar) und Temperatur (in  $^\circ\text{C}$ ) in Schritten von  $10^\circ\text{C}$ .

## 5 Auswertung

- a) **Diagramm I:**

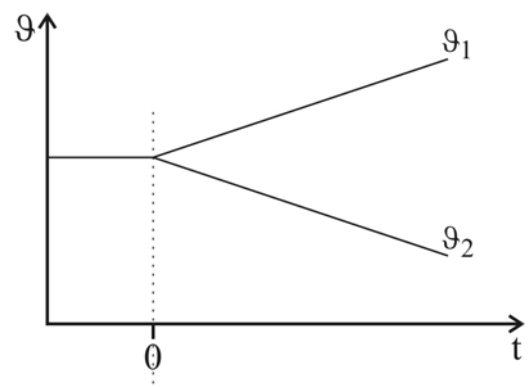
Auftragen der Temperaturverläufe für die Wassertemperaturen  $\vartheta_1$  und  $\vartheta_2$  in Abhängigkeit von der Zeit auf Millimeterpapier.

- b) Für die jeweiligen Messzeitpunkte ist die zum Wassergefäß auf der Warmseite zugeführte Wärmeenergie  $Q_1$  sowie die vom Wassergefäß auf der Kaltseite entzogene Wärmeenergie  $Q_2$ , jeweils in der Einheit Wh zu berechnen.

Diese Werte ergeben sich aus der Formel

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta\vartheta \quad (5)$$

$\Delta\vartheta$  bezieht sich auf die Anfangstemperatur zu Messbeginn  
m Wassermasse  
c 4,2 kJ/kg K spezifische Wärmekapazität von Wasser



⇒Beachten Sie bitte den Umrechnungsfaktor von kJ in Wh!

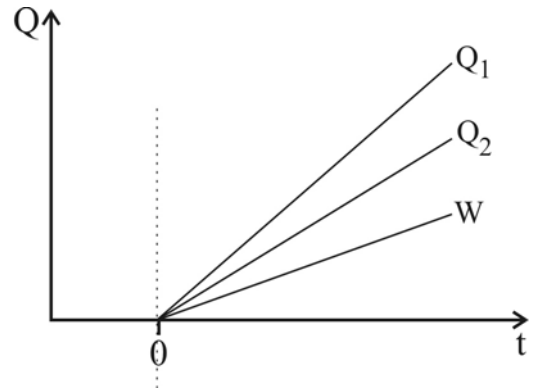
c) **Diagramm II:**

Auftragen von  $Q_1$ ,  $Q_2$  und  $W$  (jeweils in Wh) in Abhängigkeit von der Zeit für die jeweiligen Messzeitpunkte auf Millimeterpapier.

d) Berechnen der Leistungsziffer für eine Wärmepumpe

$$\varepsilon_{real} = \frac{\Delta Q_1}{\Delta W} \quad (6)$$

für die jeweiligen Messzeitpunkte.

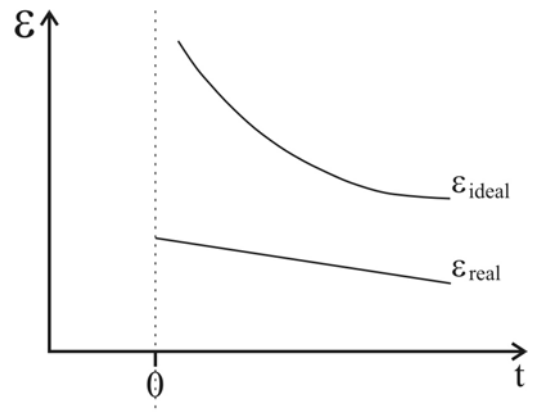


e) **Diagramm III:**

Auftragen von  $\varepsilon_{real}$  in Abhängigkeit von der Zeit für die jeweiligen Messzeitpunkte.

f) Berechnen der Leistungsziffern  $\varepsilon_{ideal} = \frac{T_1}{T_1 - T_2}$  für die Messzeitpunkte (zusätzlich eintragen in Diagramm III)

g) Für je einen Messzeitpunkt in der Mitte und am Ende der Versuchsreihe bestimme man aus den gemessenen Drücken des Arbeitsmediums  $p_1$  und  $p_2$  in Verdampfer und Verflüssiger die Temperaturen  $\vartheta_1^*$  und  $\vartheta_2^*$  an diesen Stellen. Verwenden Sie dazu die Zuordnung von 4 g).



Für die Messwerte der **Wiederholungsmessung** 4f) genügt die Auftragung von Diagramm I und II.

Im Hinblick auf die großen systematischen Abweichungen kann hier eine Abschätzung der zufälligen Messunsicherheiten unterbleiben.

☞ Weitere Punkte zur Auswertung bei vertiefter Bearbeitung:

h) Aus den gemessenen Drücken des Arbeitsmediums  $p_1$  und  $p_2$  in Verdampfer und Verflüssiger sind die Temperaturen  $\vartheta_1^*$  und  $\vartheta_2^*$  an diesen Stellen für alle Messzeitpunkte zu ermitteln. (Zuordnung entsprechend 4 g).

Auftragen dieser Werte zusätzlich in **Diagramm I**.

i) Zusätzlich ist in **Diagramm II** der Verlauf der Summe ( $Q_2 + W$ ) aufzutragen. Nach dem Ersten Hauptsatz sollte gelten

$$(Q_2 + W) = Q_1 \quad (8)$$

Vergleichen Sie die realen Verläufe dieser beiden Größen. Für einen sinnvoll gewählten Zeitpunkt bestimme man den relativen Wärmeverlust

$$v_Q = \frac{(Q_2 + W) - Q_1}{Q_1} \quad (9)$$

Wie groß ist zum Vergleich die relative Unsicherheit in der Bestimmung der Wärmeenergie  $Q_2$

$$\frac{\Delta Q_2}{Q_2} = \frac{\Delta m}{m} + \frac{\Delta(\Delta \vartheta_2)}{\Delta \vartheta_2} \quad (10)$$

j) Berechnen der idealen Leistungsziffern

$$\varepsilon_{ideal}^* = \frac{T_1^*}{T_1^* - T_2^*} \quad (11)$$

aus den Temperaturen  $\vartheta_1^*$ ,  $\vartheta_2^*$  des Arbeitsmediums für die jeweiligen Messzeitpunkte, zusätzliches Auftragen von  $\varepsilon_{ideal}^*$  in **Diagramm III**.

## 6 Diskussion

- Vergleichen Sie die Verläufe für  $\epsilon_{\text{real}}$  und  $\epsilon_{\text{ideal}}$ , begründen Sie die (quantitativen) Unterschiede.
- Entspricht die qualitative Abhängigkeit der Leistungsziffern von der Temperatur der Theorie?
- Welchen Einfluss hat eine Eisbildung am kalten Verdampfer?
- Wird der Ansatz  $(Q_2 + W) = Q_1$  erfüllt? Auf welche Weise geht hier Energie "verloren"?
- Vergleichen Sie die Verläufe für die Temperaturen in den Wassergefäßen und im Arbeitsmedium; begründen Sie die Unterschiede.



### Weitere Punkte zur Diskussion bei vertiefter Bearbeitung:

- Wie müsste man das Energieflussdiagramm der Wärmepumpe (Abb. 1) abändern, um die Verhältnisse am Versuchsgerät besser zu beschreiben?
- Durch welche Veränderungen am Versuchsgerät könnte die Anlage verbessert werden?
- Vergleichen Sie die in 4 g) vorgenommene Zuordnung von Druck und Temperatur im Arbeitsmedium mit den im Anhang dargestellten Diagrammen der Dampfdruckkurve  $p(\vartheta)$  und der Kurve  $p(V)$ .

Beachten Sie, dass in den Diagrammen der absolute Druck angegeben ist, wogegen am Manometer der Über- bzw. Unterdruck gegenüber dem mittleren Atmosphärendruck angezeigt wird.

Im  $p(V)$ - Diagramm sind nur die Isothermen im Koexistenzbereich flüssig/gasförmig angegeben. Wie verlaufen die Isothermen in den angrenzenden Bereichen weiter?

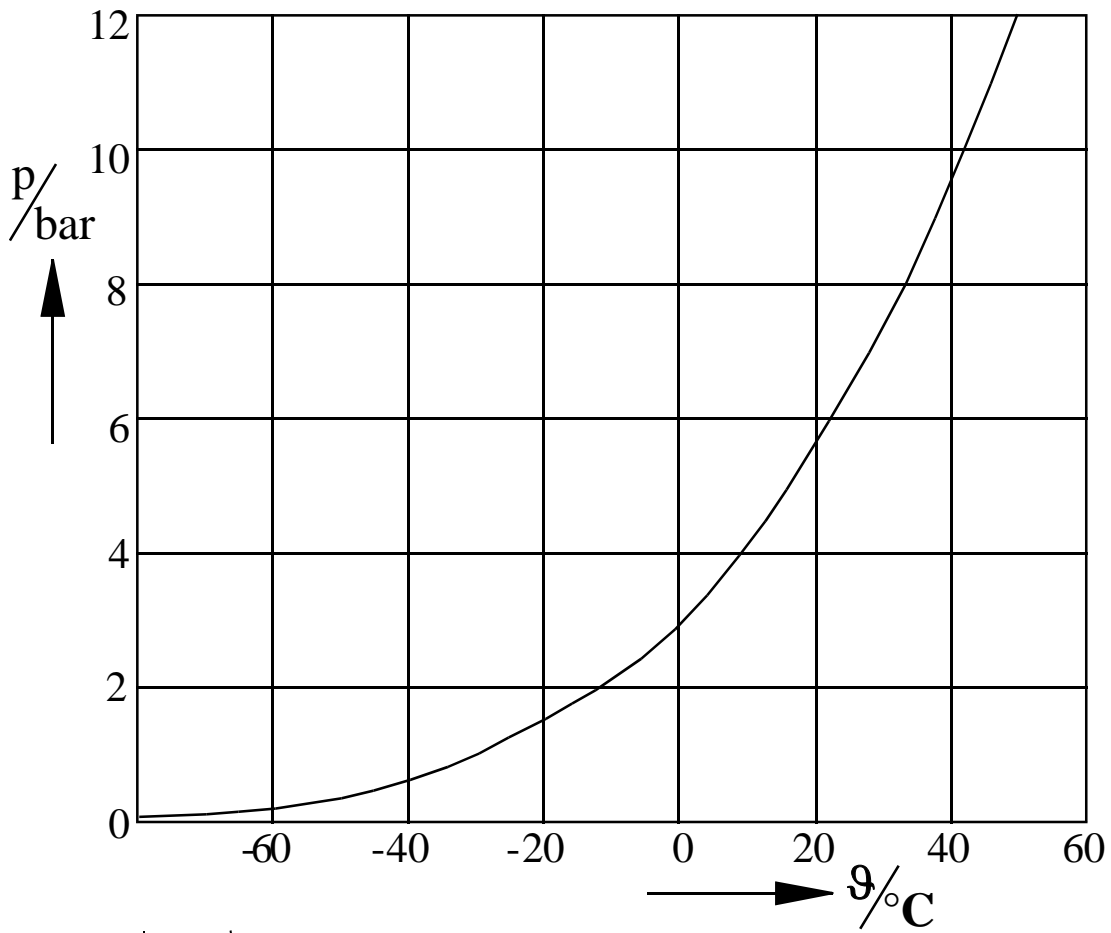
### Anhang:

Zustandsdiagramme für  $\text{CF}_2\text{Cl}_2$  (R 12):

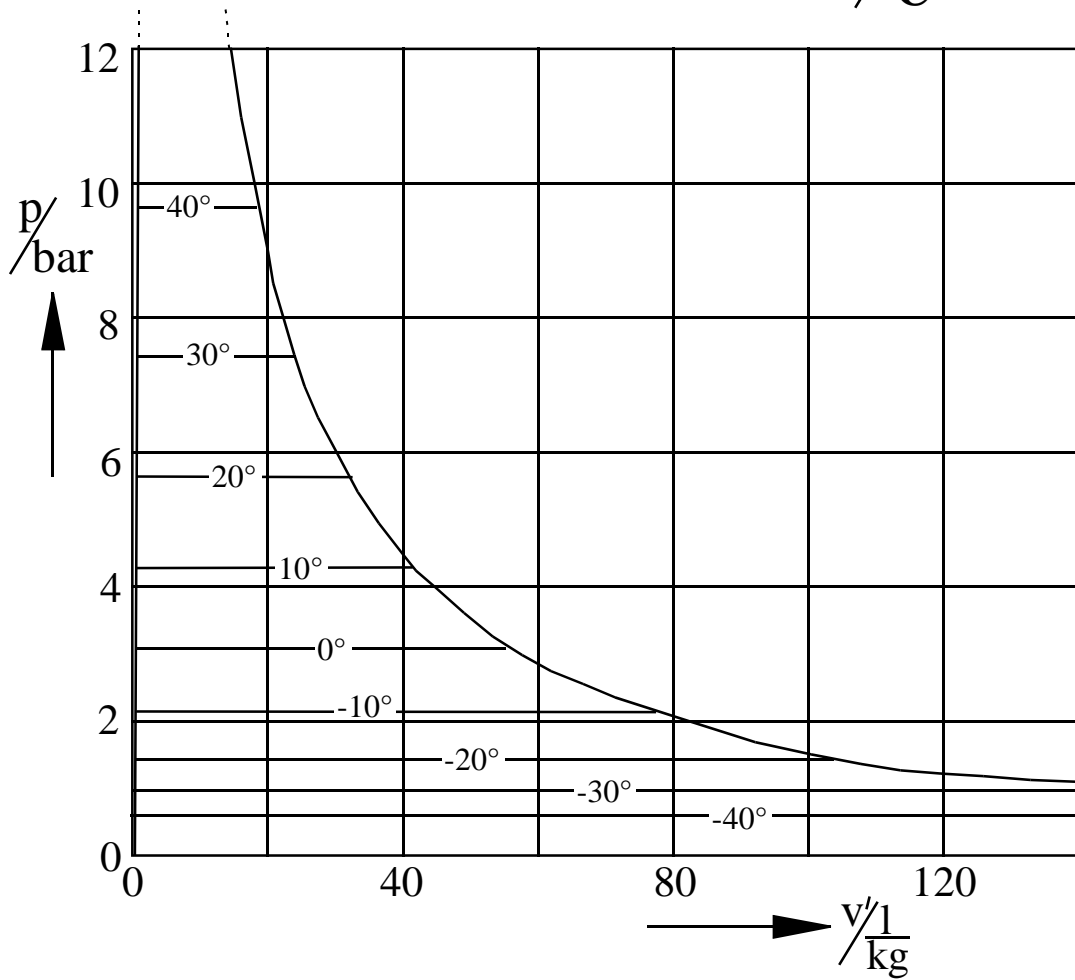
- Dampfdruckkurve
- Abhängigkeit zwischen Druck und spezifischem Volumen; dargestellt sind die Isothermen im Koexistenzbereich flüssig/gasförmig.

### Literatur:

Hering/Martin/Stohrer: Physik für Ingenieure. VDI-Verlag  
Gerthsen/Kneser/Vogel: Physik. Verlag Springer  
Stephan/Mayinger: Thermodynamik. Verlag Springer



a)



b)