

# Energieeffizienz in der Kaltdampfkompresionstechnik

## Grenzen von Forschung und Entwicklung<sup>1</sup>

Stephan Engelking, Michael Arnemann, Jörn Schwarz

### Einleitung

Die Begriffskombination 'Forschung und Entwicklung' (FuE) umfasst sowohl die Suche nach neuen Erkenntnissen auf Basis wissenschaftlicher Methoden wie auch die Vorgänge, die ein Produkt von der Idee bis zu Markteinführung nimmt. FuE findet in allen Bereichen der Technik statt. Ziele dabei sind z. B. Steigerung der Energie- oder Materialeffizienz, Schutz der Umwelt, Verbesserung menschlicher Lebensbedingungen und natürlich auch die Mehrung bzw. Generierung wirtschaftlichen Nutzens. Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten sind für Industriegesellschaften von enormer Bedeutung.

In der Kälte- und Klimatechnik lassen sich die Aktivitäten in Forschung und Entwicklung in zwei große Bereiche unterteilen:

- In der Grundlagenforschung werden theoretische und langfristige Fragestellungen untersucht, die nicht in einem unmittelbaren Zusammenhang mit einer kurzfristigen Anwendung in der Praxis stehen, die aber für zukünftige Technologien von Bedeutung sein können.
- In der angewandten Forschung werden eher kurz- und mittelfristige Ziele verfolgt, die zu einer zeitnahen Produktentwicklung führen sollen.

In Deutschland betreiben Universitäten und Hochschulen eigene sowie fremdfinanzierte Forschung und Entwicklung im Bereich der Kälte- und Klimatechnik. Daneben existieren einige privatwirtschaftlich geführte Institutionen, die ebenfalls forschen und entwickeln, und zwar im öffentlichen Auftrag oder im Rahmen von Industrieaufträgen.

Neben diesen Einrichtungen existiert noch der Zweig der industriellen Forschung. Insbesondere Hersteller von Komponenten für Kälte- und Klimaanlageanlagen forschen und entwickeln sowohl an neuen Technologien als auch an der Optimierung ihrer Produkte. Dies erfolgt insbesondere, um wettbewerbsfähig zu bleiben bzw. um Wettbewerbsvorteile zu erlangen.

### Prozesse der Kälteerzeugung

In Abbildung 1 sind die hauptsächlich eingesetzten Prozesse dargestellt. Der Kaltdampfkompresionsprozess ist der überwiegend verwendete Pro-

zess, der in den meisten Kälte-, Klima- und Wärmepumpenanlagen eingesetzt wird. Beim zweitwichtigsten Prozess, dem Sorptionsprozess, wird ebenfalls ein Kaltdampf komprimiert, allerdings nicht mechanisch, sondern thermisch. Sorptionsmaschinen werden, meist für größere Leistungen, dort eingesetzt, wo Abwärme oder andere kostengünstige Energieträger zur Verfügung stehen. Sorptionsanlagen für kleine Leistungen sind in den letzten Jahren, besonders in Deutschland<sup>2</sup>, entwickelt worden und am Markt verfügbar. Anlagen, die in warmen Ländern, autark von der Elektroenergieversorgung betrieben werden, beispielsweise Medikamente kühlen, existieren ebenfalls in kleinen Stückzahlen.

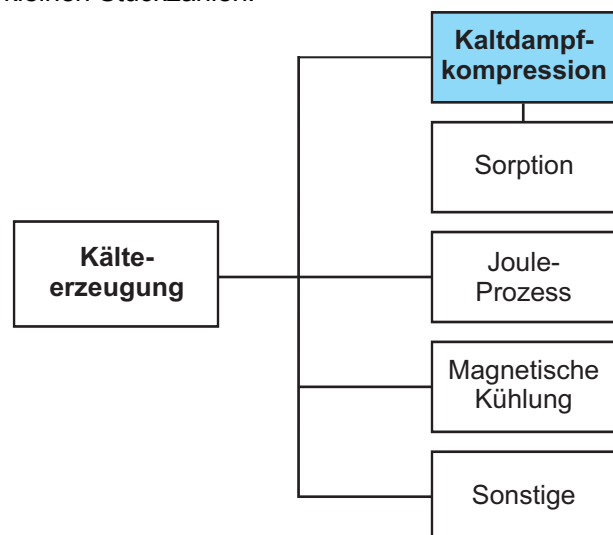


Abb. 1: Vereinfachte Darstellung der Prozesse zur Erzeugung von Kälte

Wegen der besonderen Randbedingungen werden in Luftfahrzeugen bisher fast ausschließlich Anlagen eingesetzt, die nach dem Joule-Prozess arbeiten. Der Nachteil der niedrigen erreichbaren Kälteleistungszahlen wird durch Gewichtsvorteile ausgeglichen.

Besonderer Erwähnung bedarf das Gebiet der magnetischen Kühlung. Diese vergleichsweise alte Technik lag lange Zeit brach, weil keine geeigneten Materialien verfügbar waren. Sie wurde daher nur für Sonderanwendungen für sehr tiefe Temperaturen eingesetzt. Neue Materialien ermöglichen nun den Einsatz bei höheren Temperaturen. Die Technik ist einfach und verschleißfrei. Durch Magnetisierung und Entmagnetisie-

<sup>1</sup> Erweitertes Manuskript eines anlässlich der Verleihung der Förderpreise des BMU für hocheffiziente Kälte/Klima-Technologien am 26.3.2009 in Berlin von Prof. Dr.-Ing. Stephan Engelking gehaltenen Vortrags.

<sup>2</sup> Phönix Sonnenwärme, SEW

rung nimmt ein ferromagnetisches Material abwechselnd einen geordneten und ungeordneten Zustand an, was thermodynamisch einer Entropiezunahme bzw. Abnahme entspricht. Gemäß dem 2. Hauptsatz der Thermodynamik muss dabei Wärme abgeführt bzw. aufgenommen werden. Durch neue Materialien könnte sich hier ein neues Gebiet herauskristallisieren, was der Kältetechnik neue Anwendungsfelder erschließen könnte.

Die sonstigen Möglichkeiten der Erzeugung von Kälte sind energetisch von geringer Bedeutung: Peltierelemente ermöglichen nur niedrige Kälteleistungszahlen. Sie werden in kleinen Geräten z. B. in tragbaren Kühltaschen eingesetzt. Die Verdunstungskühlung hat in Klimaanlage eine gewisse Bedeutung, ist aber als alleiniger Lieferant für Kälteleistung eher von untergeordneter Bedeutung.

Gemäß DKV-Statusbericht 'Energiebedarf für die technische Erzeugung von Kälte'<sup>3</sup> sind Kältdampfkompansionsmaschinen mit einem Anteil am Gesamtmarkt von 90-95 % die am häufigsten eingesetzten Kältemaschinen. Daher soll nachfolgend der Kältdampfkompansionsprozess eingehender betrachtet werden. Alle anderen Bereiche werden vor dem Hintergrund der oben dargelegten geringeren wirtschaftlichen und energetischen Bedeutung nicht näher analysiert.

Im Folgenden sollen keine Detail-Forschungsergebnisse dargelegt, verglichen oder diskutiert werden, es soll vielmehr ein Eindruck vermittelt werden, inwieweit Forschung und Entwicklung mit dem Ziel der Energieeffizienzsteigerung für diese Technik relevant sind und welche prinzipiellen Potenziale und Grenzen bestehen.

## Grenzen der Effizienz

In der Kältdampfkompansionstechnik ist das Maß für die Effizienz die Kälteleistungszahl  $\varepsilon$  (engl. COP: Coefficient of Performance). Diese nach oben nicht begrenzte Kennzahl, die eine Funktion der Zeit ist, gibt das Verhältnis von bereitgestellter Kälteleistung zu aufgewandter Antriebsleistung an. Zur sinnvollen Beurteilung von Anlagen müssen allerdings Grenzen bekannt sein. Diese hat Nicolas L. S. Carnot bereits Anfang des 19. Jahrhunderts aufgezeigt:

- Eine Kälteanlage nimmt auf niedrigem Temperaturniveau Wärme auf ( $q_k$ ) und gibt auf einem höheren Temperaturniveau Wärme ( $q_w$ ) ab.
- Dazu ist technische Arbeit erforderlich ( $w_t$ ).
- Stellt man die Wärme und Arbeit in einem  $T$ - $s$ -Diagramm dar, so ergibt sich für eine ideal arbeitende Maschine mit isentropen Zustandsänderungen und Wärmezufuhr und -abgabe ohne

Temperaturdifferenzen das in Abbildung 2 gezeigte Diagramm.

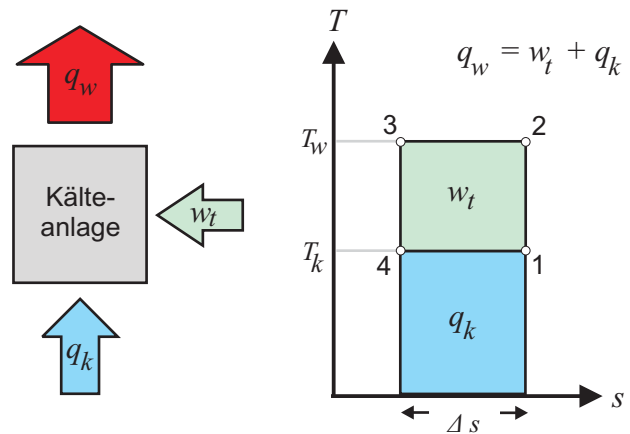


Abb. 2: Kälteanlage und idealer Prozess im  $T$ - $s$ -Diagramm

Hieraus ergibt sich als maximal erreichbarer Wert die Carnot-Kälteleistungszahl, die nur von den Temperaturen auf der warmen und kalten Seite abhängig ist:

$$\varepsilon_C = \frac{T_k}{(T_w - T_k)} \cdot \frac{\Delta s}{\Delta s} \quad (\text{Gl. 1})$$

Für verschiedene Kombinationen der Temperaturen von Wärmeaufnahme und -abgabe ist in Abbildung 3 die Carnot-Kälteleistungszahl dargestellt.

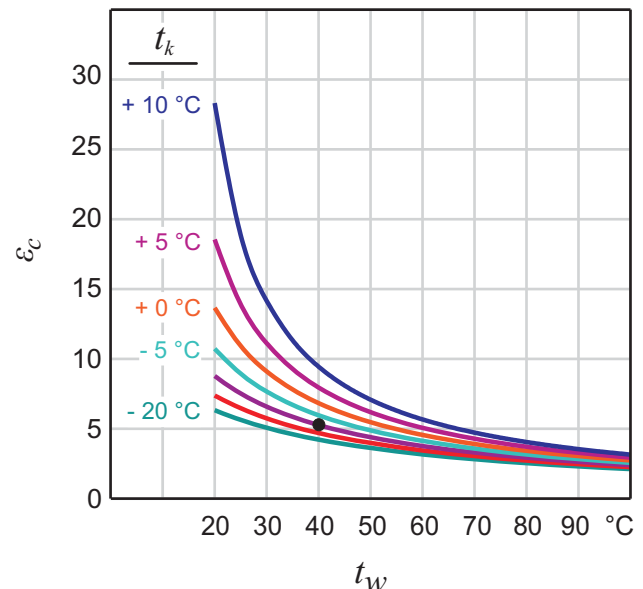


Abb. 3: Carnot-Kälteleistungszahlen

Die Kurvenzüge zeigen bei geringen Differenzen zwischen  $t_k$  und  $t_w$  sehr hohe Leistungszahlen, die bei größeren Differenzen immer kleiner werden. Diese oberen Grenzkurven der Effizienz können wegen der als verlustfrei vorausgesetzten Prozessführung nicht erreicht werden. Es stellt sich jedoch die Frage, wie viel davon in der Praxis realisiert werden kann. Das Maß dafür ist der Carnot-

<sup>3</sup> Statusbericht Nr. 22; 2002, ISBN 2 932 715-06-3

Gütegrad, in dem die tatsächliche Leistungszahl auf das theoretische Maximum bezogen wird:

$$\eta_c = \frac{\varepsilon}{\frac{T_w - T_k}{T_k}} = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} \quad (\text{Gl. 2})$$

Dazu ein Zahlenbeispiel: Eine Anlage nach Stand der Technik arbeite bei einer Verflüssigungstemperatur von 40 °C und einer Verdampfungstemperatur von -10 °C, und bei Verwendung des Kältemittels R 404A stellt sich ein  $\varepsilon$  von 3,6 ein. Wie Abbildung 3 zeigt, resultiert aus diesen Randbedingungen von Verdampfung und Verflüssigung eine Carnot-Kälteleistungszahl von ca. 5,3 und damit gemäß Gleichung 2 ein Carnot-Gütegrad von 68 %.

Bei Verwendung von R 134a als Kältemittel betrüge unter denselben Randbedingungen das  $\varepsilon$  4,05 und der Carnot-Gütegrad sogar 77 %.

## Forschung und Entwicklung

Eine Steigerung der Effizienz im Bereich der Kaldampfkompressionstechnik ist sowohl durch bekannte technische Maßnahmen möglich als auch durch noch unbekannte, die zunächst erforscht werden müssen.

Dabei müssen zwei Fragen immer berücksichtigt werden: Wie viel Annäherung an die (Carnot-)Grenze kann tatsächlich erreicht werden und wie viel ist wirtschaftlich und energetisch sinnvoll? – Dazu sollen im Folgenden eine Analyse der Einflussfaktoren durchgeführt und Potenziale aufgezeigt werden.

## Prozessführung und Komponenten

Grundlage ist zunächst der in Abbildung 4 schematisch dargestellte, ideale Carnot-Prozess im Vergleich zu einem realitätsnahen Prozess, dessen Verluste sich im Einzelnen wie folgt ergeben:

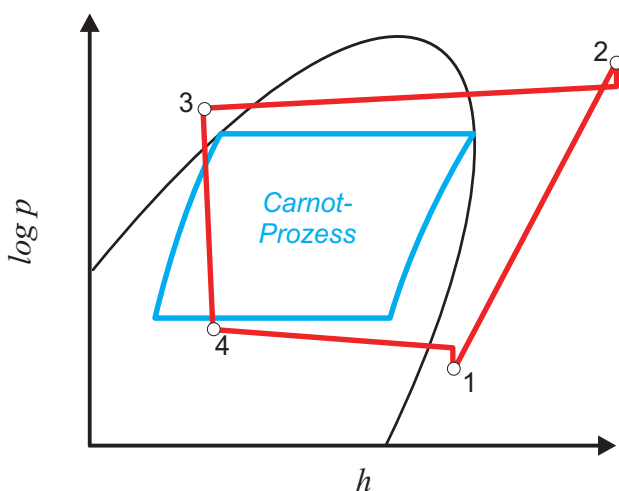


Abb. 4: Carnot- und realitätsnaher Prozess (grafisch übertrieben)

## Verdichtung

Die Verdichtung (1 → 2) ist mit Verlusten behaftet<sup>4</sup>. Die Summe der Abweichungen der realen von der idealen Verdichtung wird mittels des isentropen Verdichter-Gütegrades  $\eta_{is}$  beschrieben: Für kleine hermetische Verdichter beträgt dieser Wert ca. 0,5, für Halbhermetik-Verdichter etwa 0,6 und für die in Gewerbe- und Industriekälte eingesetzten Schrauben- oder Turboverdichter größenordnungsmäßig 0,7.

Die maximalen Gütegrade der Verdichter können höher sein als hier eingestuft, jedoch werden die Verdichter nicht immer im besten Betriebspunkt betrieben, sodass hier von den angegebenen Werten ausgegangen werden kann.

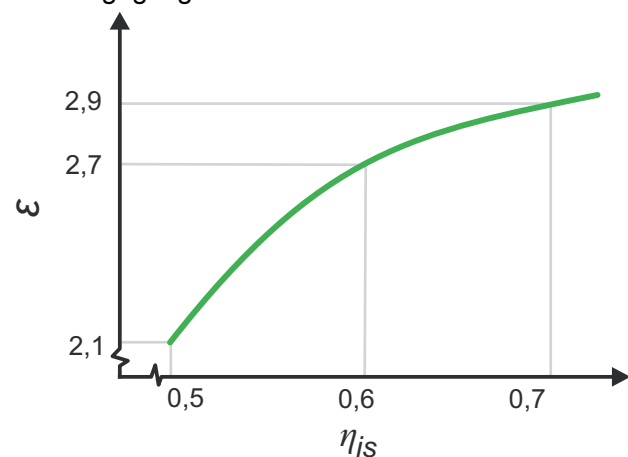


Abb. 5:  $\varepsilon$  einer Kälteanlage als Funktion des isentropen Gütegrades des Verdichters

In Abbildung 5 ist der Einfluss des isentropen Gütegrades auf das  $\varepsilon$  einer Gesamtanlage dargestellt. Es ist zu erkennen, dass der Einfluss des Gütegrades degressiv ist: Eine weitere Steigerung des Gütegrades bewirkt eine immer geringere Zunahme des  $\varepsilon$ . Die wesentlichen Verluste im Verdichter sind Druckverluste, die bei Kolbenmaschinen überwiegend in der Ventilplatte auftreten. Je nach Anwendung können diese erheblich sein: Försterling<sup>5</sup> hat beispielsweise an verschiedenen Verdichtern für die Anwendung von CO<sub>2</sub> als Kältemittel Messungen durchgeführt und gezeigt, dass bei einem Gegendruck von 80 bar durchaus Zylinderdrücke von 100 bar auftreten können, was also einem Druckverlust von 20 bar entspricht. Eine Reduzierung ist nur durch größere Maschinen und ggf. eine Drehzahlensenkung möglich. Die vom Markt geforderten Ziele 'klein leicht und leistungsfähig' wären dann nicht haltbar.

## Drosselung

Durch die isenthalpe Drosselung (3 → 4) in einem thermostatischen oder elektronischen Expansi-

<sup>4</sup> Kruse, H.: Grundlagen der Kälte- und Wärmepumpentechnik; Universität Hannover, Oktober 1993

<sup>5</sup> Försterling, S.: Vergleichende Untersuchung von CO<sub>2</sub>-Verdichtern in Hinblick auf den Einsatz in mobilen Anwendungen; Dissertation; Technische Universität Braunschweig; Juni 2003

onsventil wird prinzipiell verwertbare Energie vernichtet. Würde man stattdessen Expansionsmaschinen einsetzen, könnte theoretisch diese Energie genutzt werden. Dabei ergeben sich jedoch zwei grundsätzliche Probleme.

- durch eine entsprechende Maschine würden sowohl Flüssigkeit als auch Dampf strömen, was hinsichtlich Bauart und Standfestigkeit besondere Anforderungen an die Maschine stellt;
- würde man unterstellen, eine entsprechende Maschine bauen zu können, und weiter unterstellen, dass sie den gleichen Wirkungsgrad wie ein Standard-Verdichter hat, dann würde eine solche Maschine in einer Kälteanlage mit 30 kW Nenn-Kälteleistung etwa 150 W Nutzleistung bereitstellen. Diese Leistung liegt in der Größenordnung, die der Verdichter für seine Ölpumpe benötigt und ist damit, verglichen mit anderen Verbrauchern an einer Kälteanlage, als sehr gering einzustufen.

Die aktuell eingesetzten Expansionsventile stellen also eine energetisch und ökonomisch sinnvolle Lösung dar. Um die Verdampferfläche möglichst vollständig auszunutzen, sollte mit möglichst geringer Überhitzung gefahren werden, was in der Regel mit elektronischen Ventilen besser realisierbar ist, da diese eine kurze Regelzeit und einen großen Regelbereich ermöglichen. Zudem ist hier der Massenstrom unabhängig von der Überhitzung regelbar, was zu einer sehr konstanten Überhitzung führt. Der Verflüssigungsdruck sollte gleichzeitig möglichst niedrig gehalten werden.

### Enthitzung und Verflüssigung

Die Verluste bei Enthitzung und Verflüssigung (2 → 3) gegenüber dem Idealprozess setzen sich wie folgt zusammen: Die Enthitzung nach der Verdichtung auf Verflüssigungstemperatur-Niveau erfolgt durch Wärmeabgabe der Druckleitung (wodurch der Verflüssiger entlastet wird); anschließend tritt ein Druckverlust des Kältemittels beim Durchströmen der Druckleitung, des Verflüssigers und der Flüssigkeitsleitung auf. Außerdem erfordert eine endliche Temperaturdifferenz zwischen Kältemittel und Wärmeträger beim Wärmedurchgang im Verflüssiger eine höhere Verflüssigungstemperatur.

Die nahezu waagerechte Verflüssigungslinie macht je nach Betriebszustand durchaus 75 % der gesamten an die Umgebung abzugebenden (oder durch Wärmerückgewinnung nutzbare) Wärme aus. Diese Linie kann durch eine vergrößerte Fläche des gesamten Wärmeübertragers nach unten verschoben werden, womit der reale Prozess dem Carnot-Prozess näher käme.

Ein weiterer signifikanter Aspekt ist die Regelung des Verflüssigungsdruckes. Selbst wenn die Auslegung auf eine vergleichsweise hohe Verflüssigungstemperatur (bei Maximalbedingungen) erfolgt, so kann für den Teillastbetrieb die Verflüssi-

gungstemperatur gesenkt werden. Eine Regelung der Art, dass der Hochdruck möglichst konstant bleibt, ist energetisch nicht zufriedenstellend.

### Verdampfung

Eine endliche Temperaturdifferenz beim Verdampfer-Wärmedurchgang vom gekühlten Medium auf das Kältemittel (4 → 1) erfordert eine tiefere Verdampfungs- als die Nenn-Verdampfungstemperatur; außerdem erfährt das Kältemittel einen Druckverlust beim Durchströmen des Verdampfers und der Saugleitung, was zu einer abfallenden Verdampfungstemperatur führt; anschließend resultiert aus der Überhitzung des Kältemitteldampfes durch Wärmeeinfall in die Saugleitung eine gestiegene Ansaugtemperatur für den Verdichter.

### Wärmeübertrager

Sowohl für den Verflüssiger als auch für den Verdampfer verringert eine größere Wärmeübertragerfläche den Abstand zwischen dem idealen und dem realen Prozess. Daher ist die Frage zu stellen, wie viel Flächenvergrößerung energetisch und wie viel wirtschaftlich sinnvoll ist.

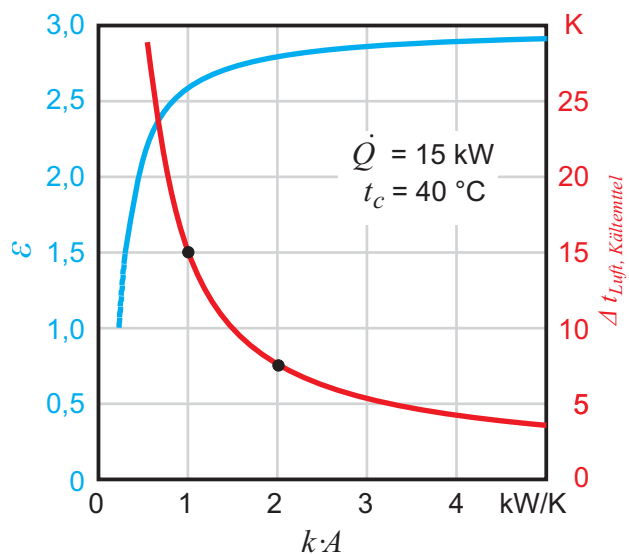


Abb. 6: COP und Wärmeübertrager-Temperaturdifferenz als Funktion der Wärmeübertragungsfähigkeit  $k \cdot A$

Abbildung 6 zeigt die Zusammenhänge zwischen dem  $k \cdot A$ -Wert, einem Maß für die Güte des Wärmeübertragers und dem  $\epsilon$  sowie der Temperaturdifferenz zwischen Umgebungsluft und Kältemittel:

- Ein Wärmeübertrager habe bei einer Temperaturdifferenz von 15 K ein  $k \cdot A$  von 1 kW/K. Das möge einer Wärmübertragungsfläche von 10 m<sup>2</sup> entsprechen.
- Bei halbiertem Temperaturdifferenz betrüge der  $k \cdot A$ -Wert 2 kW/K, und der Wärmeübertrager wäre mit 20 m<sup>2</sup> doppelt so groß.

Jede weitere Halbierung der Temperaturdifferenz würde einen wiederum doppelt so großen

Wärmeübertrager ergeben und in der Folge zu einem noch besseren  $\epsilon$  führen. Der apparative und finanzielle Mehraufwand ist dann aber eventuell nicht mehr gerechtfertigt. Hier sind Wirtschaftlichkeitskriterien von größerer Bedeutung.

Im Tiefkühl- und im Normalkühlbereich ergibt sich bei Verwendung großer Wärmeübertragerflächen ein weiterer Vorteil: Es tritt eine geringere Vereisung auf, wodurch weniger Abtauzyklen erforderlich sind und der Energiebedarf zusätzlich gesenkt wird.

## Kältemittel

Die Stoffeigenschaften der Kältemittel haben einen sehr großen Einfluss auf die Effizienz des Prozesses. Die Größe des Einflusses kann mithilfe des in Gleichung 2 definierten Carnot-Gütegrades dargestellt werden, der ein Maß dafür ist, wie weit die Annäherung an das theoretische Maximum möglich ist. Abbildung 7 zeigt, gerechnet auf der Grundlage eines einfachen Kreislaufes, für drei Verdampfungstemperaturen die Carnot-Gütegrade verschiedener Kältemittel<sup>6</sup>. Unabhängig vom Verdampfungs- und Verflüssigungstemperaturniveau weist dabei das Kältemittel R 134a die höchsten Carnot-Gütegrade auf.

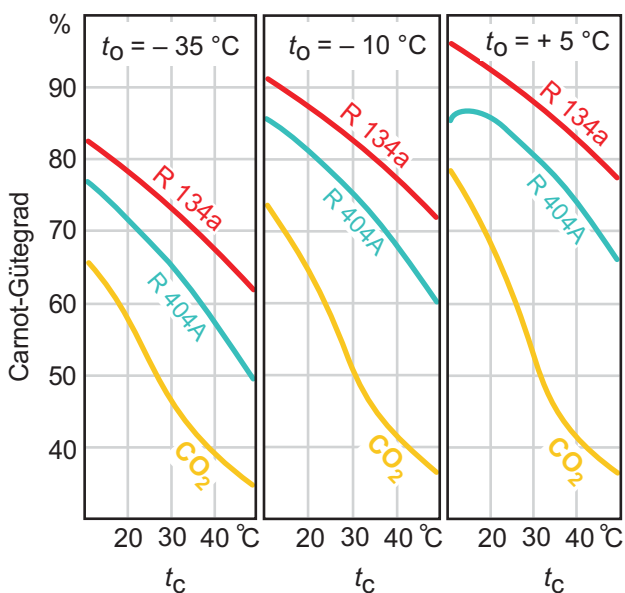


Abb. 7: Carnot-Gütegrade versch. Kältemittel

Derzeit existieren für eine Vielzahl von Anwendungsfeldern geeignete Kältemittel, die einen energieeffizienten Betrieb von Kälteanlagen erlauben und damit bei elektrischem Antrieb ein Minimum an indirekten CO<sub>2</sub>-Emissionen ermöglichen.

Gleichwohl ist festzustellen, dass ein weiterer (direkter) Beitrag zum Treibhauseffekt durch ungewollt emittierte Kältemittel aus undichten Anlagen möglich ist. In den letzten 10 Jahren sind je-

<sup>6</sup> Energy Efficiency – Environment Protection, Case Studies CO<sub>2</sub>; J. Süß, Danfoss, ASERCOM/EPEE-Symposium 2008, Nürnberg

doch von der Branche systematische Anstrengungen unternommen worden, um Leckagen weitgehend zu vermeiden. Außerdem sind seit Juli 2008 die Betreiber von Kälteanlagen gemäß der Chem-KlimaschutzV verpflichtet, die Dichtheit ihrer Anlagen regelmäßig überprüfen und große Lecks beseitigen zu lassen. – Die Umsetzung dieser Verordnung sowie weitere Anstrengungen der Branche werden dazu beitragen, dass in den nächsten Jahren der direkte Beitrag von Kälteanlagen zum Treibhauseffekt weiter gesenkt wird.

Darüber hinaus wird, besonders für den Bereich der mobilen Klimaanlage, an Kältemitteln geforscht, die sowohl über eine hohe Energieeffizienz verfügen als auch bei ungewollten Emissionen einen sehr niedrigen Beitrag zum Treibhauseffekt verursachen. Dabei wird besonderer Wert auf einen niedrigen CO<sub>2</sub>-äquivalenten Beitrag zum Treibhauseffekt während der gesamten Lebensdauer einer Klimaanlage gelegt. Der Kennwert dafür wird 'Life Cycle Climate Performance (LCCP)' genannt und beinhaltet direkte und indirekte Emissionen bei Herstellung, Anwendung und Entsorgung aller Materialien und Komponenten.

Von zwei Firmen der chemischen Industrie sind nach langjährigen FuE-Arbeiten 'neue' als Kälte- und Treibmittel geeignete Stoffe der 'dritten Generation' angekündigt worden, die ein sehr niedriges GWP (Global Warming Potential) aufweisen.

## Regelung

Die bisherigen Betrachtungen zur Effizienz erfolgten auf der Ebene von Komponenten, Prozessführung und Kältemitteln und basierten auf einem stationären Betrieb sowie einer einfachen Regelung, die bei Kälteleistungsbedarf die Kältemaschine ein- und ausschaltet. Die Funktionsebenen dazu sind in Abbildung 8 schematisch dargestellt.

Der Regelfall des Betriebs einer Kältemaschine ist jedoch ein instationärer Betrieb, bei dem sowohl die Aufnahme als auch die Abgabe der Wärme regelmäßigen Änderungen z. B. im Tages-, Wochen- und Jahresrhythmus unterliegen. Die Randbedingungen des instationären Betriebs sowie weitere haben einen erheblichen Einfluss auf die Gesamteffizienz der Kälteanlage und die Betriebskosten:

- die Startphase vom Einschalten bis zum Erreichen eines stabilen Betriebspunkts ist mit thermischen und mechanischen Verlusten behaftet;
- erfolgt der Start des Elektromotors dabei direkt oder über eine Stern/Dreieck-Schaltung, fließen hohe Anfahrströme, wodurch dem elektrischen Netz eine sehr hohe (kostenpflichtige) Leistung entzogen wird;
- gegenwärtig erfolgt eine Anpassung an einen geringeren Kälteleistungsbedarf noch oft durch Ein- und Ausschalten des Verdichters (mittels

- Zweipunkt-Regler); die in der Startphase auftretenden Anfahrverluste treten dadurch mehrfach auf, und der mechanische Verschleiß ist höher;
- eine Anpassung an einen (kurzzeitig) höheren Kälteleistungsbedarf war in der Vergangenheit nicht möglich (weswegen Kälteanlagen oft überdimensioniert sind);
  - aus Gründen der Betriebssicherheit und wegen geringer Elektroenergiekosten wurde in der Vergangenheit die Verdampfungstemperatur oft zu niedrig und die Verflüssigungstemperatur oft zu hoch gewählt, was zwar einen problemlosen Betrieb während des ganzen Jahres ermöglichte, aber energetische Nachteile im Betrieb als auch bei oft erforderlichen Abtauvorgängen der Verdampfer hatte.

Mit dem Übergang von analoger zu digitaler Regelungs- und Steuerungstechnik sind Einzelfortschritte erreicht worden:

- durch sogenannte Sanftanlauf-Steuerungen können hohe Anfahrströme deutlich reduziert werden;
- durch Frequenzumrichter-Steuerungen können Elektromotoren mit variablen Drehzahlen betrieben werden, wodurch eine Anpassung von Kälte- und Verflüssigungsleistung sowohl an Teillast als auch an eine kurzzeitige Überlast möglich ist;
- mittels elektronischer Kühlstellenregler können spezifische Kühlanforderungen erfüllt werden;
- durch Bedarfsabtauungssysteme können energieintensive Abtauprozesse minimiert werden;
- durch Einsatz elektronischer Expansionsventile kann die für jeden Betriebszustand optimale Überhitzung eingeregelt werden, und
- durch eine dynamische Anpassung der Verflüssigungs- an die tages- und jahreszeitvariable Umgebungstemperatur kann die Gesamteffizienz erheblich gesteigert werden.

Diese Einzelfortschritte weisen im Zusammenspiel mit der jeweiligen Anwendung mehr oder minder große Energieeinspar-Potenziale auf, die besonders dann nutzbar sind, wenn die Komponenten und Systeme nicht einzeln geregelt werden, sondern in eine 'übergeordnete' Regelung integriert werden, die nicht nur aktuelle Parameter berücksichtigt, sondern in der Lage ist, übergeordnete Strategien zu verfolgen und z.B. vorausehend 'Kälteenergie' bereitzustellen.

Dafür sind gegenwärtig u.a. Kältelastprofile erforderlich sowie die Einbindung in ein Gebäudeautomations-System, das nicht nur autark arbeitet, sondern zukünftig z. B. Smart-Metering-Informationen des Elektroenergie-Versorgungsunternehmens berücksichtigt, die es erlauben, kostengünstige Energie zu Schwachlastzeiten zu beziehen und diese in Form von Kälte in Kühlräumen zu speichern. Der Energiebedarf wäre dadurch nicht unbedingt geringer, die Betriebskosten jedoch schon.

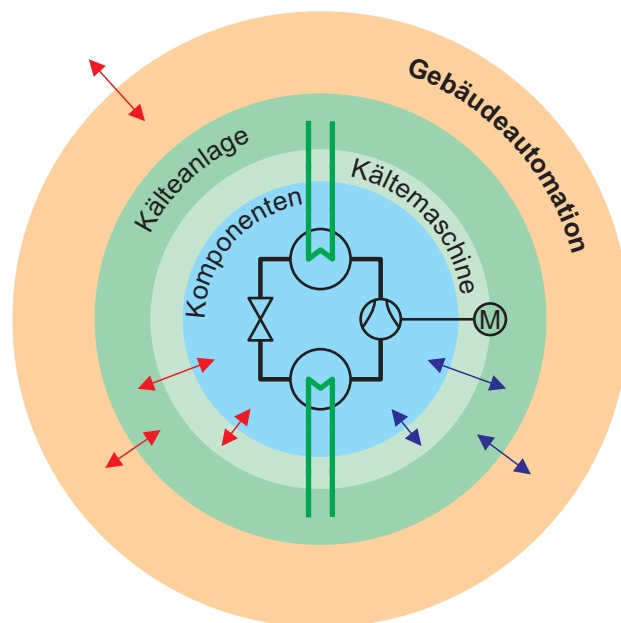


Abb. 8: Funktionsebenen Kältdampfkompensationstechnik

Als zusätzliches Teilsystem einer übergeordneten Regelung der Kälteanlage bzw. der Gebäudeautomation besteht die Möglichkeit, den Energieverbrauch sowie den Leistungsverlauf kontinuierlich zu erfassen und durch systematische Auswertung weitergehende Kenntnisse zu erlangen und in der Folge z.B. anwendungsspezifische Energieeffizienz-Kennzahlen zu generieren.

## Fazit

Forschung und Entwicklung im Bereich der Kältetechnik haben insgesamt große Potenziale, die in folgender Reihenfolge ansteigen:

- Komponenten
- Prozessführung,
- Kältemittel
- übergeordnete Regelsysteme.

Insgesamt sind Energieeffizienz-Steigerungen für die Mehrheit der in Betrieb befindlichen Kälteanlagen von 30 – 50 % möglich. Dadurch gehen die Kosten für elektrische Energie in gleichem Maße zurück und in geringerem Maße auch die Kosten für die elektrische Leistung.

Investitionen in 'moderne' Kältetechnik sind daher sowohl für die Betreiber als auch für die Umwelt ein lohnendes Geschäft.

Das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) hat vor diesem Hintergrund im Jahre 2008 'Richtlinien zur Förderung von Maßnahmen an gewerblichen Kälteanlagen' erlassen, bei denen Zuschüsse für die energieeffiziente Sanierung bzw. Ausführung von Neuanlagen gewährt werden. Darüber hinaus wurden vom BMU Förderpreise für hocheffiziente Kälte/Klima-Technologien ausgelobt, die im März

2009 an drei Preisträger verliehen wurden:

- In der Kategorie 'Kälte-Komponenten und -systeme' erhielt die Firma Wurm GmbH einen Förderpreis für das Regelsystem 'Frigotakt plus', das Kühlstellen, Regler und Verflüssiger ganzheitlich und vorausschauend mit dem Fokus auf eine optimale Kühlstellentemperatur regelt und Energieeffizienzsteigerungen von bis zu 50 % ermöglicht.
- Den zweigeteilten Förderpreis „Kälte und Wärme“ erhielten die Unternehmen Daikin Airconditioning GmbH und die Hauser GmbH, die für kleine und große Geschäfte des Lebensmitteleinzelhandels Systeme zur Nutzung der Abwärme von Kältemaschinen entwickelt haben, wodurch in der kalten Jahreszeit fast vollständig auf herkömmliche Gas- oder Ölheizungen verzichtet werden kann und was dadurch einen sehr großen Fortschritt in Richtung Umweltverträglichkeit des Lebensmitteleinzelhandels darstellt.
- Das Netzwerk 'Kälteeffizienz Hamburg' erhielt den dritten Förderpreis für seine Kampagne, den Energieverbrauch von Kälteanlagen in Hamburger Unternehmen durch energieeffiziente und innovative Kältetechnik zu senken. Dazu wurde eine Netzwerkstruktur aufgebaut, die den Informationsaustausch zwischen Betreibern, Fachbetrieben, Planern, Herstellern, Wissenschaftlern und Verbänden organisiert und eine Plattform für den Austausch von Erfahrungen schafft.