



## Die Kosten des Kühlens

Klimaanlagen treiben mit ihrem hohen Energiebedarf und den eingesetzten Kältemitteln den Klimawandel an, doch es gibt Alternativen.

Denise Müller-Dum und Jens Kube

**A**ngesichts des globalen Temperaturanstiegs könnte der Energiebedarf für Kühlung bis zur Mitte des Jahrhunderts den für das Heizen übertreffen. Auch Deutschland nutzt deutlich mehr Klimageräte als noch vor zehn Jahren: In Büros sollen sie die Produktivität an heißen Tagen erhalten, in Autos gehören sie längst zur Standardausstattung. Auch in Wohngebäuden finden sie immer mehr Verbreitung.

Als Erfinder der Klimaanlage gilt Willis Haviland Carrier. Sein 1902 entwickeltes Gerät sollte die Luftfeuchtigkeit in einer Druckerei reduzieren. Weil warme Luft mehr Feuchtigkeit speichert als kalte, wollte er die Raumluft mithilfe von Wasser kühlen. Später entwickelte er seine Erfindung weiter: Seine Carrier Global Corporation ist heute einer der führenden Hersteller von Kälteanlagen weltweit.

Klimaanlagen nutzen das gleiche Prinzip wie Kompressorkühlschränke (**Abb. 1**): Ein anfangs flüssiges Kältemittel zirkuliert in einem geschlossenen Kreislauf; ein Drosselventil reduziert seinen Zustrom in den zu kühlenden Raum. Dadurch sinkt der Druck, und das Kältemittel kühlt un-

ter die Raumtemperatur ab. Über eine größere Oberfläche nimmt das Kältemittel Wärme aus der Raumluft auf und verdampft. Außerhalb des Kühlbereichs verdichtet ein Kompressor es stark, sodass es über die Außentemperatur aufheizt. Nun gibt es Wärme ab und lässt sich wieder verflüssigen.

Das Kältemittel verdampft und verflüssigt sich also im Wechsel. Diese Zustandsänderungen müssen bei den üblichen Betriebstemperaturen ohne starke Druckvariationen ablaufen. Der Dampfdruck beschreibt den Übergang zwischen flüssigem und gasförmigem Zustand: Im Druck-Temperatur-Diagramm zeigt er die Phasengrenze zwischen den Aggregatzuständen an. Die Steigung der

Dampfdruckkurve hängt mit der spezifischen Verdampfungsenthalpie zusammen, die angibt, wie viel Energie pro Masse zum Verdampfen nötig ist. Ein Kältemittel sollte dafür möglichst viel Energie brauchen, also eine große spezifische Verdampfungsenthalpie besitzen, um viel Wärme abzutransportieren. Außerdem braucht ein Kältemittel eine hohe Wärmeleitfähigkeit, um einen raschen Wärmeaustausch zu gewährleisten.

Weitere Eigenschaften sind für den Betrieb wünschenswert: Kältemittel sollten im flüssigen Zustand sehr fließfähig sein, thermisch und chemisch stabil bleiben, weder giftig noch brennbar oder explosiv sein und möglichst nicht gesundheitsschädlich.

## Nomenklatur der Kältemittel

Die Bezeichnung eines Kältemittels folgt dem Schema  $R-(c-1)(h+1)(f)$ , wobei  $c$ ,  $h$  und  $f$  die Zahl der Kohlenstoff-, Wasserstoff- und Fluoratome angeben. Die Zahl der Chloratome ergibt sich anhand der freien Bindungsplätze, sodass die Bezeichnung die chemische Zusammensetzung eindeutig wiedergibt. Für Trichlorfluormethan ergibt sich demnach R-011; weil die führende „0“ entfällt, heißt das Kältemittel R-11. Die erste Ziffer zeigt auch an, ob es sich um Gemische handelt (4 oder 5) oder um ein anorganisches Kältemittel (7). Ein Buchstabe hinter den Ziffern verweist auf die chemische Struktur bei gleicher Summenformel.

Diese Kriterien schränken den Kreis möglicher Substanzen ein, sodass die Suche nach geeigneten Kältemitteln andauert. Heute sind vor allem synthetische Stoffe im Einsatz.

Das Montrealer Protokoll von 1987 hat die vormals weit verbreiteten Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW) verboten. Bei diesen Verbindungen ersetzen Fluor oder Chlor eines, mehrere oder alle Wasserstoffatome. Ein Beispiel ist Trichlorfluormethan (CCl<sub>3</sub>F). Weil sich die Chlor- und Fluoratome unterscheiden und deutlich größer sind als Wasserstoffatome, besitzt das Molekül keine streng tetraedrische Struktur wie Methan und ist polarisiert. Die Moleküle ziehen sich gegenseitig an, was die Substanz weniger flüchtig macht und ihr eine hohe Verdampfungsenthalpie verleiht.

### Nur ohne Chlor erlaubt

Wegen ihrer langen Lebensdauer können FCKW bis in die oberste Atmosphärenschicht, die Stratosphäre, gelangen. Dort bilden sie Chlorradikale, die nach einer Reaktion mit ultravioletter Strahlung die Ozonschicht zerstören. Deshalb verzichten die Vertragsstaaten des Montrealer Protokolls darauf, FCKW zu verwenden und herzustellen – und die Ozonschicht erholt sich. Chlorfreie Fluorkohlenwasserstoffe haben die FCKW ersetzt und erreichen als Mischungen ähnliche physikalische Eigenschaften. Das heute gängige Kältemittel R-410a besteht zu gleichen Teilen aus Difluormethan (CH<sub>2</sub>F<sub>2</sub>, R-32) und Pentafluorethan (CHF<sub>2</sub>CF<sub>3</sub>, R-125). Dadurch findet der Phasenübergang

nicht mehr an einem Punkt statt, sondern in einem Temperaturbereich, dem Temperaturleit.

Doch diese neuen Kältemittel sind Treibhausgase aufgrund der starken Polarität der Kohlenstoff-Fluor-Bindungen. Diese erlauben dem Molekül bei Absorption eines IR-Photons unterschiedliche Schwingungen, sodass die Fluorkohlenwasserstoffe Wärme viel besser absorbieren und re-emittieren als etwa Kohlendioxid: Deshalb ist ihr Treibhauspotential (GWP100) hundert- bis tausendfach höher (Tab. 1). Daher sieht eine europäische Verordnung von 2015 vor, fluoridierte Treibhausgase bis 2030 deutlich zu reduzieren, sodass viele gebräuchliche Kältemittel mittelfristig vom Markt verschwinden werden.

Natürliche Kältemittel wie Ammoniak (NH<sub>3</sub>) und Wasser (H<sub>2</sub>O) punkten mit einem GWP100 von Null. Die niedrige Siedetemperatur von Ammoniak (–33 °C) macht den Stoff zum Kältemittel in Tiefkühl- und Schlachthäusern, Chemiefabriken und Brauereien. Doch für die giftige Verbindung gelten zahlreiche Sicherheitsvorschriften, die den häuslichen Gebrauch ausschließen. Auf Wasser basierende Klimaanlage kommen in Einrichtungen mit geringem, aber kontinuierlichem Kühlbedarf zum Einsatz – zum Beispiel in Serverräumen.

Aber es geht auch ohne Kältemittel durch neue Technologien wie Luft-Erdwärmetauscher. Diese nutzen die geringen Temperaturschwankungen im Erdboden aus, der im Sommer etwas kühler, im Winter etwas wärmer als die Oberfläche ist. Dadurch kühlt die Luft, die im Erdboden liegende

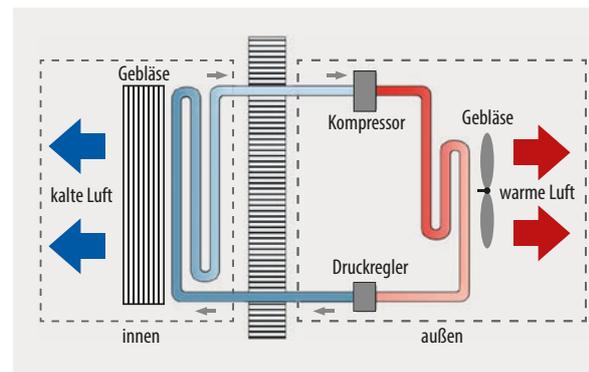


Abb. 1 Das Kältemittel einer Klimaanlage nimmt Wärme beim Verdampfen auf und gibt sie beim Verflüssigen ab.

Leitungen durchströmt, einen Raum an sehr heißen Tagen und wärmt ihn an sehr kalten. In Deutschland kommt das Konzept in Büro- und Industriegebäuden sowie Passivhäusern zum Einsatz. Eine ähnliche Technologie, die Hafenwasser zum Kühlen nutzt, setzt das Alfred-Wegener-Institut in Bremerhaven seit fast 20 Jahren ein.

In Autos finden sich dagegen meist die klassischen Klimaanlagen; auch an Häuserfassaden sieht man häufig die Außenmodule solcher Anlagen. Sie nutzen in der Regel R-410a oder R-32 als Kältemittel. Diese Substanzen fallen zwar nicht unter die europäische Verordnung, dürften aber durch die steigende Nachfrage beim Verbot anderer Stoffe teurer werden. Die Suche nach umweltverträglichen Alternativen ist daher voll im Gange.

### Die Autor:innen

Dr. Denise Müller-Dum und Dr. Jens Kube, awk/jk – Agentur für Wissenschaftskommunikation, awkjk.de

### Physikalische Eigenschaften von Kältemitteln

Bezeichnung und chemische Summenformel		Kältemittel	Spezifische Verdampfungsenthalpie	Dampfdruck bei 20 °C	Siedepunkt bei 1 bar	GWP100
Trichlorfluormethan	CCl <sub>3</sub> F	R-11	182 kJ/kg (bei 20 °C)	0,89 bar	23,6 °C	5352
Dichlordifluormethan	CCl <sub>2</sub> F <sub>2</sub>	R-12	162 kJ/kg (bei 20 °C)	5,7 bar	–29,8 °C	11547
Ammoniak	NH <sub>3</sub>	R-717	1368 kJ/kg (bei 20 °C)	8,57 bar	–33 °C	0
Wasser	H <sub>2</sub> O	R-718	2453 kJ/kg (bei 20 °C)	0,02 bar	100 °C	0
Difluormethan	CH <sub>2</sub> F <sub>2</sub>	R-32	381 kJ/kg (bei 25 °C)	14,8 bar	–51,7 °C	675
Pentafluorethan	C <sub>2</sub> HF <sub>5</sub>	R-125	164 kJ/kg (bei 25 °C)	12,1 bar	–48,1 °C	3691

Tab. 1 Das Treibhauspotential GWP100 steht für die Wirkung eines Stoffs bezogen auf hundert Jahre und normiert auf die gleiche Menge Kohlendioxid. Je größer der Wert ausfällt, desto schädlicher ist die Substanz für das Klima.