

# Modellgestützte Auslegung hocheffizienter CO<sub>2</sub>-Kälteanlagen für gewerbliche und industrielle Anwendungen

Dipl.-Ing. Christian Doerffel  
BITZER-Professur für Kälte-, Kryo und Kompressorentchnik  
Technische Universität Dresden  
Helmholtzstraße 10, 01069 Dresden

[christian.doerffel@tu-dresden.de](mailto:christian.doerffel@tu-dresden.de)

0351 463 40726

# Modellgestützte Auslegung hocheffizienter CO<sub>2</sub>-Kälteanlagen für gewerbliche und industrielle Anwendungen

## Zusammenfassung

Um die Klimaschutzziele für Deutschland im Speziellen und Europa für die kommenden Jahre zu erreichen, werden zwei Wege beschritten: einerseits der Ausbau der Elektroenergieerzeugung mittels regenerativer Energiequellen (Fotovoltaik, Windkraftanlagen, in geringem Maße Biomasse, Wasserkraft sowie Geothermie) und andererseits Minderung der Treibhausgasemissionen durch Energieeffizienzmaßnahmen und damit vermindertem Verbrauch fossiler Energieträger.

Kältetechnische Anlagen machen in Deutschland ca. 16 % des Elektroenergiebedarfs aus, was weiter untergegliedert werden kann in Anlagen zur (Komfort-)Klimatisierung und in Anlagen für Prozess- und Lebensmittelkühlung im gewerblichen und industriellen Kontext. Der Gesamtbedarf an Elektroenergie teilt sich in die beiden Bereiche etwa hälftig auf. Im Folgenden liegt der Fokus auf Anlagen zur Kälteerzeugung, die einen Bereich von +6°C bis -50°C abdecken können und gleichermaßen ein Bestandteil einer Klimaanlage sein können oder in der gewerblichen oder industriellen Kühlung eingesetzt werden.

Im Hinblick auf gewerbliche Kälteanlagen wurden in den letzten Jahren viele Energieeinsparmaßnahmen vorgenommen, die zu teils erheblichen Einsparung des Elektroenergiebedarfs führten. Kühlmöbel als Oberbegriff kann im Folgenden Kühlregale wie auch Kühltruhen bezeichnen, unabhängig vom Temperaturniveau. Ein Beispiel für eine Effizienzmaßnahme ist die Beleuchtung von derzeit neu installierten Kühlmöbeln statt mittels Halogenlampen durch LED-Leuchtmittel realisiert. Weiterhin werden als Antrieb der Lüfter moderne EC-Motoren eingesetzt mit vermindertem Leistungsbedarf und damit auch geringerem Wärmeeintrag in das Kühlmöbel und somit niedrigerer erforderlicher Kälteleistung. Im Segment von Supermärkten und Großmärkten setzen sich verstärkt verschlossene Kühlmöbel durch, d.h. Kühlregale mit transparenten Türen und Kühltruhen mit transparenten Schiebedeckeln. Mit dieser Maßnahme kann der Kühlbedarf eines Kühlmöbels am effizientesten reduziert werden (teils bis zu 75 %) und in der Folge sinkt der Energiebedarf der Anlage näherungsweise proportional dazu. Insbesondere im Discounterbereich wird diese Maßnahme jedoch häufig abgelehnt, da ein höheres Hemmnis der Warenentnahme für den Kunden vermutet wird und sinkende Umsatzerlöse befürchtet werden.

Neben diesen Maßnahmen zur Reduktion der erforderlichen Kälteleistung, gewinnen Maßnahmen im Bereich des Designs, Auslegung und Regelung der Anlage zunehmend an Bedeutung. Hier im Fokus sollen Kälteanlagen mit dem Kältemittel CO<sub>2</sub> (R-744) stehen. Hintergrund davon ist, dass die Kühlung für neu errichtete oder modernisierte Supermärkte heute in den meisten Fällen als CO<sub>2</sub>-Verbundkälteanlage oder als Kühlwasserkreislaufsystem mit dezentralen Kälteerzeugungsaggregaten im Kühlmöbel

realisiert wird. Letzteres wird auch als Waterloop-System bezeichnet und nutzt üblicherweise Propan (R-290) als Kältemittel. Dieser Trend ist auf Einschränkungen der Verwendung und Verfügbarkeit von konventionellen, synthetischen Kältemitteln auf FKW- und HFKW-Basis (fluorierte und teilfluorierte Kohlenwasserstoffe) aufgrund von deren hohem Treibhauspotentials (GWP) zurückzuführen.

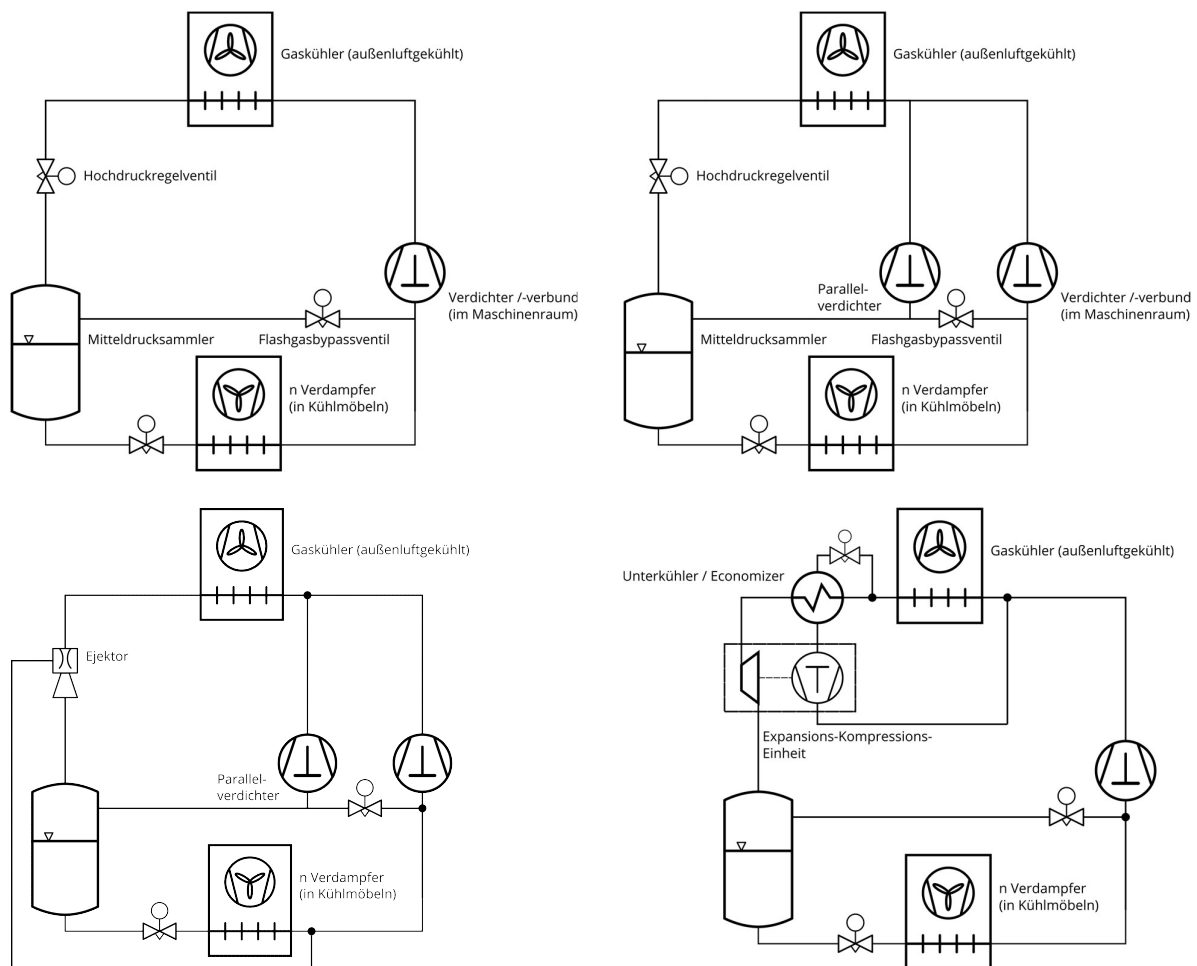
Die Verwendung von CO<sub>2</sub> als natürliches Kältemittel weist gegenüber den synthetischen Kältemitteln deutliche Unterschiede auf: in erster Linie ist hervorzuheben, dass es sich hierbei um ein umweltfreundliches Kältemittel handelt, dessen Treibhauspotential (GWP) eins beträgt, da es die Referenz für diese Größe bildet. Synthetische Kältemittel auf HFKW-Basis weisen Werte im Bereich von 700 bis 15000 auf. Moderne, sogenannte „low-GWP-Kältemittel“ auf HFO-Basis (teilfluorierte, ungesättigte Kohlenwasserstoffe) weisen zwar ein niedrigeres Treibhauspotential auf, werden aber in der aktuellen Debatte sehr kritisch hinsichtlich toxischer, bio-persistenter Abbauprodukte (TFA, Trifluoressigsäure) hinterfragt. CO<sub>2</sub> ist weiterhin nicht brennbar und auch in makroskopischen Konzentrationen der Atemluft bis zu 2 % nicht toxisch und physiologisch unbedenklich, was es für die Anwendung für Bereiche mit Publikumsverkehr prädestiniert. Thermodynamische Besonderheit von CO<sub>2</sub> ist die niedrige kritische Temperatur von 31°C bei einem hohen Druck von rund 7,4 MPa (74 bar). Dies führt bei außenluftgekühlten Anlagen zu hohen Drücken im Regelbetrieb (zwischen 4,5 MPa (45 bar) und 12 MPa (120 bar) auf der Hochdruckseite) und einer transkritischen Betriebsweise bei höheren Umgebungstemperaturen (typischerweise oberhalb von 25°C). Die transkritische Betriebsweise ist dadurch gekennzeichnet, dass im Außenluftwärmeübertrager keine Kondensation im Zweiphasengebiet stattfindet, sondern eine näherungsweise isobare Wärmeabgabe der überkritischen (auch: superkritischen) Phase. Der Druck im Wärmeübertrager muss dafür effizienzoptimiert geregelt werden und ist in erster Linie abhängig von der Austrittstemperatur – und damit indirekt von der Außenlufttemperatur.

Die transkritische Betriebsweise führt zu einer verminderten Effizienz der Kälteanlage, da die spezifische Verdichterarbeit mit steigenden Rückkühltemperaturen deutlich zunimmt, während die erzielte spezifische Kälteleistung abnimmt. Umgekehrt kann eine Anlage mit CO<sub>2</sub> als Kältemittel bei niedrigen Umgebungstemperaturen eine deutlich höhere Effizienz als Anlagen mit konventionellen Kältemitteln erreichen, da die thermodynamisch bedingten niedrigen Druckverhältnisse im Verdichter zu einer höheren Verdichtereffizienz führen können. Aus diesen Eigenschaften wird abgeleitet, dass eine Effizienzsteigerung von CO<sub>2</sub>-Kälteanlagen bei mäßigen bis hohen Rückkühltemperaturen einen wesentlichen Beitrag zum Klimaschutz durch Verringerung des Energiebedarfs leisten kann.

Um eine hohe ganzjährige Anlageneffizienz zu erreichen, ist es erforderlich die Auslegung der Kälteanlage auf dynamische Randbedingungen und nicht auf einen statischen Betriebspunkt bei Extrembedingungen (z.B. 40°C Lufttemperatur, maximale Kälteleistung) zu beziehen. Im Rahmen dieser Dissertation wird ein modellbasiertes Auslegungstool entwickelt, das den Jahresenergiebedarf unterschiedlicher Anlagendesigns anhand von Klimadaten von Referenzstandorten annähernd berechnet.

Dabei werden in das Modell variable Randbedingungen wie Umgebungstemperatur, Teillastfälle, Einsatzgrenzen von Anlagenkomponenten einbezogen und als Ergebnis die Wirtschaftlichkeit ganzjährig effizienzoptimierter Kreisläufe berechnet.

Alle unterschiedlichen betrachteten Kreisläufe in eine Versuchsanlage im Labor implementiert, um die Anlageneffizienz unter gleichen Randbedingungen vermessen zu können und das theoretische Modell zu validieren. Die untersuchten Kreisläufe umfassen unter anderem das Referenzsystem, das den Bezug für alle effizienzgesteigerten Kreisläufe bildet, 3 Arten von Economizer-Systemen und zwei Arten von Ejektor-Systemen. Das Referenzsystem ist das üblicherweise verwendete System von Discountern. Economizer-System (1) stellt ein Open-Flash-Economizer-System mit einem zusätzlichen Verdichter dar und wird im Kontext von CO<sub>2</sub> üblicherweise auch als Anlage mit Parallelverdichtung bezeichnet. Economizer-System (2) nutzt einen internen Economizer-Wärmeübertrager, unter Nutzung der Expansionsarbeit von Hochdruckkältemittel für die Verdichtungsarbeit des Economizer-Kreislaufts. Economizer-System (3) kombiniert beide vorher genannten Economizer-Systeme. Ejektor-System (1) nutzt einen Ejektor (Strahlpumpe) zur Rückgewinnung von Expansionsarbeit und kombiniert das mit Economizer-System (1). Ejektorsystem (2) nutzt gleichfalls den Ejektor um eine Vorverdichtung für nur eine Verdichterstufe zu erreichen.



Abbildungen 1-4: Schemata von betrachteten Anlagenkreisläufen (Auswahl), links oben: Referenzkreislauf, rechts oben: Economizer-System (1), rechts unten: Economizer-System (2), links unten: Ejektor-System (1)

Exemplarisch sind in Abbildung 5 die Ergebnisse aus Messungen an der Laboranlage zu sehen. Auf der Abszisse ist die Kondensator- bzw. Gaskühleraustrittstemperatur (subkritischer bzw. transkritischer Betrieb) als Messgröße für die Rückkühltemperatur dargestellt. Diese Temperatur bildet gleichzeitig die wesentliche Eingangsgröße um den jeweils effizienzoptimierten Hochdruck und Mitteldruck zu bestimmen. Auf der Ordinate ist die relative Effizienzänderung im Vergleich zum Referenzsystem in Prozent angegeben.

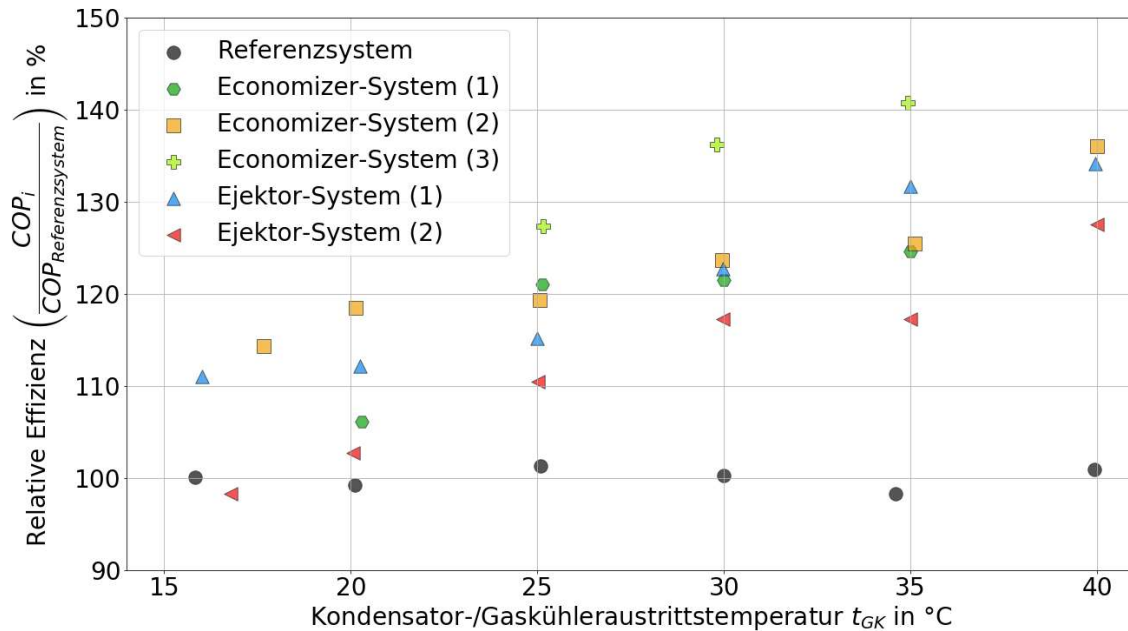


Abbildung 1: Darstellung der Effizienzsteigerung - Gemessene Effizienz der einzelnen Systeme (Auswahl) relativ zum Fit des Referenzsystems in Abhängigkeit der jeweiligen Rückkühltemperatur (Gaskühleraustrittstemperatur)

Die Messungen zeigen, dass betriebspunktabhängige Effizienzsteigerungen um bis zu 40% durch ein optimales Anlagendesign (Economizer-System (3)) im Kombination mit einer effizienzoptimierten Regelung erreicht werden kann. Im ganzjährigen Verlauf sind damit Einsparungen des Elektroenergiebezugs um bis zu 20% rechnerisch möglich.

Das entwickelte Softwaretool bietet somit eine validierte Möglichkeit, die Anlagenplanung und -auslegung zu vereinfachen und gleichzeitig eine hohe Gesamteffizienz der Anlage zu erreichen. Zusätzlich können für Nachrüstungen von Effizienzmaßnahmen die Einsparungen des Elektroenergiebezugs und die Wirtschaftlichkeit für den Betreiber nachgerechnet werden.

Zusammengefasst soll mit dieser Dissertation der zukünftige Energiebedarf gewerblicher und industrieller CO<sub>2</sub>-Kälteanlagen durch eine neuartige optimale Auslegungsmethode reduziert werden.