

# Energieeffizienz-Messungen an Kälte- und Klimaanlagen

## Methodik und Ergebnisse

**Maik Strauch,**  
Kälteanlagenbauermeister,  
CoolTool Technology GmbH,  
Duisburg-Rheinhausen

Seit 2008 werden Kälte- und Klimaanlagen in stationären Anwendungen im Rahmen der Nationalen Klimaschutzinitiative (Kälte-Klima-Richtlinie) in gewerblichen Anwendungen unter unterschiedlichen Rahmenbedingungen gefördert. Die geförderten Maßnahmen sollen zu einer Steigerung der Energieeffizienz, zu einer Minderung des Kältebedarfs sowie einer Reduktion der Emissionen fluorierter Treibhausgase beitragen. Für die Bearbeitung der Förderanträge und die Ausschüttung der Fördergelder ist das Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA) in Eschborn zuständig.

Um die Wirksamkeit der Fördermaßnahmen zu evaluieren, wird seit Mai 2022 eine Feldstudie durchgeführt. In Rahmen dieser Feldstudie werden geförderte Anlagen bewertet und ihre Betriebsweise in einem

Benchmark Verfahren mit Messungen nicht geförderter Bestandsanlagen, die seit 2006 durchgeführt wurden, ins Verhältnis gesetzt. Systematisch wurden alle Anlagen je nach Konstruktion und Funktionsweise mit allen

für die Effizienz notwendigen Betriebspunkten messtechnisch erfasst. In diesem Messverfahren wurden mittels des CoolTool DiaGnostics Messsystems neben den Verflüssigungs- und Verdampfungsdrücken bei komplexeren Anlagenbauformen auch weitere Werte, wie der Mitteldruck bzw. Parallelverdichtungsdruck erfasst. Äquivalent zu den gemessenen Drücken errechnet das Messsystem die dazugehörigen Temperaturen. Um die Grundlagen für die in Echtzeit ablaufenden Berechnungen und Analysen zu vervollständigen, werden ebenfalls bis zu zehn Temperaturen, wie beispielsweise die Kältemittel-Flüssigkeitstemperatur, die Saugstutzentemperatur, die Verdichtungsendtemperatur und mehrere Überhitzungstemperaturen erfasst. Dies hat sich insbesondere bei transkritischen CO<sub>2</sub>-Kreisläufen als notwendig erwiesen, individuell je nach Systemausführung neben der Gaskühleraustrittstemperatur auch die Zwischenstufen messtechnisch zu erfassen.

Da die reine Betrachtung von Messdaten keine belastbare Grundlage für die Bewertung der Effizienz einer Kälteanlage darstellt, wurden zusätzlich noch nutzungsspezifische Bedingungen, wie beispielsweise Nutztemperaturen und Lastprofile sowie anlagenspezifische Randbedingungen, wie beispielsweise Umgebungstemperaturen, Wartungszustand und Thermografie-Aufnahmen erfasst. Da aufgrund von unterschiedlichen Einsatzbereichen nicht ohne Weiteres ein gesamteinheitlicher Vergleich gezogen werden konnte, wurden die betrachteten Anlagen in



Anlagenmessung an einer CO<sub>2</sub>-Booster Anlage in einem Supermarkt

Bild: CoolTool Technology GmbH

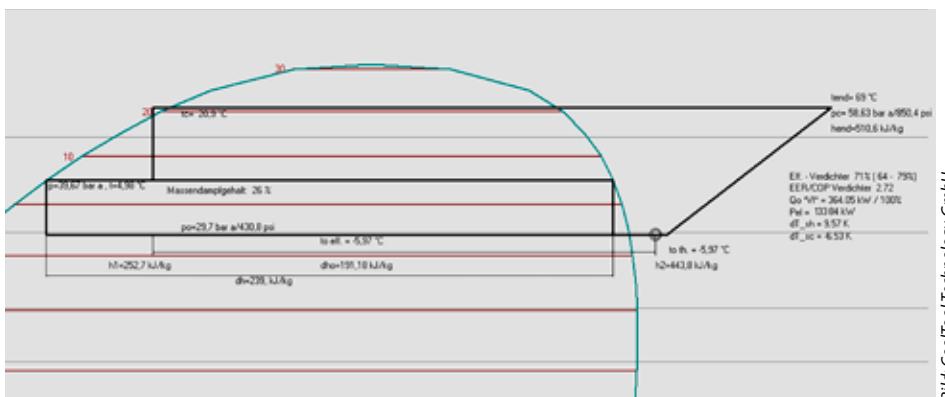


Bild: CoolTool Technology GmbH

Live-Darstellung des gemessenen Kältekreislaufes mit Auswertungen in Echtzeit mit dem CoolTool DiaGnostics Messsystem

drei verschiedene Temperaturbereiche eingeteilt. Die Nutztemperaturen im AC-Temperaturbereich (Air-Conditioning) lagen zwischen +7 °C und +22 °C. Durch die hohe Spreizung der Nutztemperaturen, bedingt durch eine zu geringe Anzahl an Kreisläufen für eine genauere Einteilung, ist ein direkter Vergleich zwischen den Kältemitteln diffizil. In diesem Bereich wurden insgesamt 17 Messungen ausgeführt. Die verwendeten Kältemittel waren R134a, R290, R449A, R513A, R717 und R744. Die Vergleichbarkeit der Kältemittel im NK-Bereich (Normalkühlung) ist mit einer Nutztemperatur von 0 °C bis +4 °C deutlich einfacher. Hier wurden 22 Messungen mit den Kältemitteln R134a, R290, R449A, R717, R744 und R1270 ausgeführt. Im TK-Bereich (Tiefkühlung) mit einer Nutztemperatur von -20 °C bis -23 °C wurden nur die Kältemittel R449A und R744 vorgefunden. Insgesamt wurden in diesem Temperaturbereich 16 Messungen ausgeführt.

Der zu erwartende Gesamtenergiebedarf der Anlagen wurde unter Berücksichtigung der individuellen Funktions-, Betriebs- und Regelweise mit allen relevanten Bauteilen wie Lüftern und Pumpen, aber auch unter

dem Einfluss der Betriebsweise der Wärmeübertrager sowie der aufgenommenen nutzungs- und anlagenspezifischen Randbedingungen in einem Standardverfahren mehrfach simuliert. Um eine Vergleichbarkeit zwischen den nicht geförderten Bestandsanlagen („War“-Anlagen), den vorgefundenen geförderten Kälteanlagen („Ist“-Anlagen) und den nach Förderrichtlinie optimal ausgeführten Anlagen („Soll“-Anlagen) zu vereinfachen, wurde in den Energiesimulationen zusätzlich zu dem Jahresgesamtenergiebedarf die Jahresarbeitszahl (SEPR-Wert) ermittelt. Damit konnten durch das Benchmark Verfahren direkte Vergleiche zu Bestandsanlagen, aber auch zu technisch optimalen Anlagenkonzepten und -konstruktionen im Sinne der Förderrichtlinie gemacht werden.

Anders als in der Ökodesign-Richtlinie (2009/125/EG) wurden die SEPR-Werte durch die CoolTool Energiesimulationssoftware jedoch nicht nur an vier Betriebspunkten, sondern an insgesamt 288 Betriebspunkten bestimmt, was die Genauigkeit der Ergebnisse deutlich erhöht. Die 288 Betriebspunkte entsprechen den Ergebnissen zu jeder vollen Stunde eines Referenztags

in jedem Monat. Um die Genauigkeit weiter zu erhöhen, wurden die Umgebungstemperaturen ebenfalls anhand von Wetterdaten der vergangenen Jahre an nahegelegenen Referenzstandorten angepasst.

Auf Basis des Jahres-Gesamtenergiebedarfs der Anlage wurde zusätzlich die äquivalente indirekte CO<sub>2</sub>-Emission ermittelt. Als Berechnungsgrundlage diente hier die spezifische CO<sub>2</sub>-Emission pro Kilowattstunde des Strommixes in Deutschland aus dem Jahr 2022 [0,42 kg CO<sub>2</sub>/kWh]. Für den Vergleich der Kältemittel in den verschiedenen Nutztemperaturbereichen wurde demnach nicht nur die Jahresarbeitszahl, sondern auch die Gesamtemission der jeweiligen Anlage (TEWI-Wert) bestehend aus der indirekten und der direkten CO<sub>2</sub>-Emission verwendet.

Die Ergebnisse, insbesondere der Vergleich der Gesamtemissionen, geben direkt verwertbare qualitative, aber auch quantitative Werte, wie wirksam die Förderrichtlinie war. So konnte die jährliche Gesamtemission durch die geförderten Anlagen im Vergleich zu den Bestandsanlagen von 13.323 t CO<sub>2</sub>-Äq/a auf 8.604 t CO<sub>2</sub>-Äq/a reduziert werden, was einer Einsparung von etwa 35 % entspricht. Waren die Anlagen nach heutiger Förderrichtlinie „optimal“ ausgeführt worden, hätten sich die Gesamtemissionen um 51,29 % auf etwa 6.489 t CO<sub>2</sub>-Äq/a reduziert lassen.

Die Differenz zwischen den „Ist“- und „Soll“-Anlagen liegt jedoch nicht in minderwertiger oder falscher Anlagentechnik begründet, sondern spiegelte in den meisten Fällen eine wenig optimierte Regel- und Steuerungstechnik wider. Häufig führten zu niedrig gewählte/eingestellte Verdampfungstemperaturen und zu hohe Verflüssigungstemperaturen zu einem ineffizienten Anlagenbetrieb. Oder – bedingt

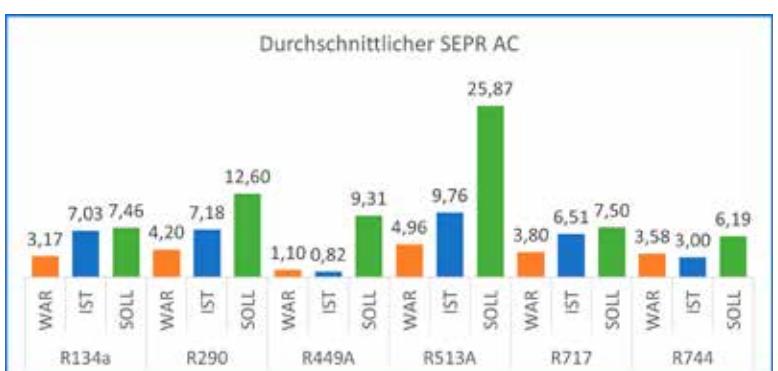


Bild: CoolTool Technology GmbH



Durchschnittlicher SEPR-Wert im NK-Bereich

Durchschnittlicher SEPR-Wert im AC-Bereich – relevant ist der Vergleich nur innerhalb der Kältemittel zwischen „WAR“, „IST“ und „SOLL“



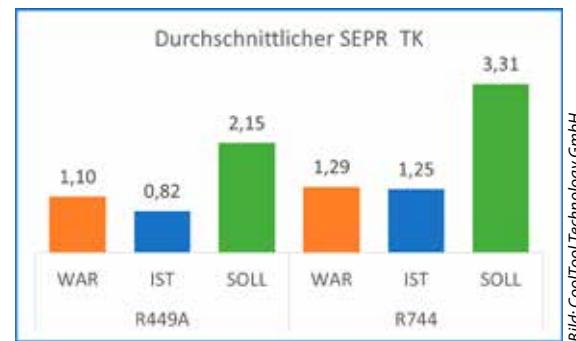
Druckverluste verschiedener Kältemittel im selben Verdampfer

durch die Einsatzgrenzen der Verdichter – das gewählte Kältemittel war für den Anwendungsfall ungeeignet. Auch zu klein dimensionierte Bauteile wie Wärmeübertrager waren ein nicht unwesentlicher Parameter für einen wenig effizienten Anlagenbetrieb. Bei der Betrachtung der durchschnittlichen SEPR-Werte der verwendeten Kältemittel in den einzelnen Temperaturbereichen lässt sich klar erkennen, in welchen Bereichen noch großes Optimierungspotential steckt. Wie bei der Benennung der Temperaturbereiche bereits beschrieben, ist der direkte Vergleich der Kältemittel im AC-Bereich aufgrund der großen Nutztemperaturspreizung nicht ohne Weiteres möglich. Jedoch zeigen die Kältemittel für sich selbst betrachtet, wie effizient die installierte Anlagentechnik arbeitet. Mit einer Jahresarbeitszahl von 9,76 könnte man beispielsweise annehmen das die R513A-Anlage eine energieoptimierte Anlage darstellt. Jedoch hätte man den SEPR-Wert der Anlage bei richtiger Konzeptierung und Verwendung eines Freikühlers und des Kältemittels R290 auf eine Jahresarbeitszahl von 25,87 bringen können. Dass die durchschnittlichen SEPR-Werte der Kältemittel R449A und R744 deutlich unter den Jahresarbeitszahlen der optimal ausgeführten Anlagen liegen und sich noch unter dem SEPR-Wert von vergleichbaren Altanlagen befindet, lässt darauf schließen, dass sich diese Kältemittel aus energetischer Sicht wenig für die Verwendung in diesem Temperaturbereich eignen.

Bei kleiner Spreizung der Nutztemperatur lassen sich Kältemittel auch direkt untereinander vergleichen. So kann man im Temperaturbereich der Normalkühlung gut erkennen, wie effizient die unterschiedlichen Anlagen mit den verschiedenen Kältemitteln arbeiten. Erkennbar ist, dass die natürlichen Kältemittel effizienter als die fluorierten Kältemittel laufen.

Dies liegt daran, dass der Druckverlust und die Wärmeübertragungseigenschaften innerhalb der Wärmeübertrager bei natürlichen Kältemitteln deutlich günstiger sind als bei F-Gasen. Durch den erhöhten Druckverlust und geringere Wärmeübertragung sinkt bei halogenierten Kältemitteln die Verdampfungstemperatur am Saugstutzen des Verdichters und daraus resultiert ein erhöhter Energiebedarf der Anlage. Im Vorfeld der Auswertung wurde dies durch eine Simulation der Druckverluste verschiedener Kältemittel in demselben Verdampfer ermittelt. So verhält sich das Kältemittel R744, wenn man den Druckverlust betrachtet, im Wärmeübertrager am besten. Unter Berücksichtigung des Druckverlustes, der Wärmeübertragung im Verdampfer und der Einsatzgrenzen lässt sich insgesamt bestätigen, dass das Kältemittel R717 (Ammoniak) aus energetischer Sicht das beste Kältemittel ist. Dies wurde auch durch die Feldstudie bestätigt.

Den Vorteil des geringen Druckverlustes konnten einige der gemessenen CO<sub>2</sub>-Anlagen im Normalkühlbereich nicht ausbauen,



Durchschnittlicher SEPR-Wert im TK-Bereich

da die Verdampfungstemperaturen sehr häufig für den Nutzbereich zu tief eingestellt waren. Hierzu muss man allerdings auch anmerken, dass einige der untersuchten CO<sub>2</sub>-Anlagen ebenfalls eine sehr hohe Energieeffizienz aufgrund niedrig gewählter Verflüssigungstemperaturen und hohen Verdampfungstemperaturen aufwiesen. Auch Anlagen, die außerhalb der Einsatzgrenzen der Verdichter lagen oder bei niedrigen Umgebungstemperaturen in den Grenzbereich regelten, wurden vorgefunden. Teilweise wurden hier die Verdichter bereits mehrfach erneuert.

Bei den 16 Messungen im Tiefkühlbereich wurden nur die Kältemittel R449A und R744 vorgefunden. Auch in diesem Temperaturbereich wurden bei beiden Kältemitteln häufig für den Anwendungsbereich zu niedrige Verdampfungstemperaturen (-36 °C) festgestellt, aber auch dass einige der Anlagen in einem guten Bereich eingeregelt waren.

Unter Betrachtung der Ergebnisse der Benchmark-Tabelle lässt sich für die Evaluation der Wirksamkeit der Förderrichtlinie festhalten, dass die Ziele der Richtlinie weitestgehend erfüllt werden. Eine Gesamtemissionsreduzierung um 35 % ist ein Schritt in eine gute Richtung. Durch Anpassung und Überarbeitung der Förderrichtlinien sowie anlagenspezifisch klar definierter Einstellparameter kann die Förderung in Zukunft allerdings noch deutlich effektiver werden.

Gründe für geringere Energieeffizienz untersuchter Anlagen	IK	GK	SM	AC
Anlage / Kältemittel ungeeignet für Temperaturbereich	-	4	-	3
Läuft mehr als 10 % außerhalb des optimalen Bereichs durch unzureichende Regelung / falsche Einstellung durch Service-Personal	13	8	15	9
Falsch dimensionierte Komponenten z.B. Wärmeübertrager	5	4	5	3
Keine getrennten Kreisläufe für unterschiedliche Temperaturen	-	3	4	2
Anlage oder Komponenten defekt oder ohne Funktion	-	1	2	2

Systematischer Überblick über die vorgefundenen Gründe für geringere Effizienz (IK = Industriekälte, GK = Gewerbekälte, SM = Supermarktkälte, AC = Klima- / Pluskühlung)