

CO₂: Die unbequeme Wahrheit

Inzwischen gibt es bessere Technologien
als CO₂ für gewerbliche Kälteanlagen



GERINGER GWP
Opteon™ XL
Energieeffizient

Einführung

In den vergangenen 12 bis 18 Monaten wurden mehrere Artikel veröffentlicht, die **Zweifel an der Nachhaltigkeit** von CO₂ (R-744) als Kältemittel aufkommen lassen. Der Grund dafür ist seine inhärent schlechte Energieeffizienz.

Da liegt die Frage nahe, warum sich die Industrie für eine Technologie mit relativ hohen Gesamtemissionen entschieden hat, um die Vorgaben der Europäischen F-Gas-Verordnung zu erfüllen, und ob eventuell zunächst andere Technologien betrachtet werden sollten, um die Low-GWP-Lösung zu finden, die den niedrigsten Umwelteinfluss und das beste Preis-Leistungs-Verhältnis besitzt.

In Bezug auf die Treibhausgasemissionen ist offensichtlich, dass im Fall eines Austretens großer Mengen des Hoch-GWP-Kältemittels R-404 (GWP von 3922) CO₂ trotz seines höheren Energieverbrauchs im Vorteil ist. Bei der Entscheidung für CO₂ ist allerdings zu beachten, dass die Anlagen komplexer, teurer und weniger energieeffizient sind. **Dies führt zu höheren über 10 Jahre kumulierten Lebenszykluskosten. Da die europäische EU-F-Gas-Verordnung jedoch alleine auf die Reduktion des GWP-Werts des Kältemittels abzielt, schien CO₂ zunächst eine ideale Wahl.**



ABER IST SIE DAS WIRKLICH?

Welche Optionen waren ursprünglich verfügbar?

Der Einsatz von R-744 als Kältemittel ist nicht neu. Bereits während der Entwicklung von Kompressionskältemaschinen Ende des 19. Jahrhunderts standen Diethylether, Ammoniak und Kohlendioxid (R-744) als Kältemittel zur Diskussion. In der weiteren Entwicklung erwiesen sich die Brennbarkeit von Diethylether und die schlechte Energieeffizienz von R-744 als größere Hindernisse heraus als die geringe Brennbarkeit und Toxizität von Ammoniak. So nahm die Popularität von R-744 wieder ab.

Springen wir ans Ende des 20. Jahrhunderts, als Abkommen wie das Kyoto-Protokoll (1997) das Augenmerk auf den weltweiten Klimawandel und die dazu beitragenden Gase lenkten. Mit einem GWP von 1 schien R-744 die perfekte Lösung, und in der Folge wurden zahlreiche Forschungsprojekte ins Leben gerufen, die die oben genannten Defizite bei der Energieeffizienz lösen sollten.

Nach dem Ausstieg aus der Verwendung von FCKW Anfang der 1990er Jahre wurde R-404A zum bevorzugten Kältemittel in der Gewerbekälte - häufig in Anlagen mit unzureichenden Wartungsplänen und sehr hohen (> 15 %) jährlichen Leckageraten. Betrachtet man lediglich die Treibhausgasemissionen, wird schnell klar, dass diese hohen Leckageraten in Verbindung mit dem hohen GWP von R-404A (3922) den Vorteil der höheren Energieeffizienz im Vergleich zu CO₂ schnell wieder zunichtemachen (Abbildung 1).

Am Ende wurden transkritische R-744 Flashgas-Bypass- (FGB) oder Boosteranlagen zur am weitesten verbreiteten

Low-GWP-Technologie bei Neuanlagen im Lebensmitteleinzelhandel.

Der große Nachteil der R-744-Technologie ist aber, dass die Systeme komplexer und teurer sind und die schlechte Energieeffizienz zu höheren über 10 Jahre kumulierten Lebenszykluskosten führt (Lebenszykluskosten über 10 Jahre, [Abbildung 2](#)). Da der Fokus der aktuellen Regelungen aber auf der Reduktion des GWP des Kältemittels liegt, schien R-744 zunächst eine gute Wahl.

Die EU-F-Gas-Verordnung verbietet nach 2021 den Einsatz von Kältemitteln mit einem GWP >= 150 in gewerblichen Kälteanlagen mit mehrstufigem Verdichter mit einer Kälteleistung >= 40 kW. Wenn dann ab 2030, am Ende des EU-F-Gas-Phasedown, ein durchschnittlicher GWP von 400 erreicht werden muss. Daher ist auch der Einsatz von Kältemitteln mit verringertem GWP wie Opteon™ XP40 keine langfristig praktikable Lösung für neue Geräte im Rahmen der EU-F-Gas-Verordnung, denn, obwohl sie die über 10 Jahre kumulierten Lebenszykluskosten und Gesamtemissionen im Vergleich zu R-404A reduzieren können, verursachen sie bei einer jährlichen Leckagerate von 10 % immer noch höhere Gesamtemissionen als ein vergleichbares transkritisches R-744 FGB-System, auch in heißen Klimazonen ([Abbildung 1](#)).

Abbildung 1

Vergleich der über 10 Jahre kumulierten Gesamtemissionen (t CO₂-eq) für eine Kälteanlage mit R-404A (jährl. Leckagerate 10 %) und Opteon™ XP40 (jährl. Leckagerate 10 %) sowie einer transkritischen R-744 FGB-Anlage für einen normalgroßen Supermarkt (ca. 2.000 m² Verkaufsfläche, 160 kW Normalkühlung/30 kW Tiefkühlung) in verschiedenen Klimazonen

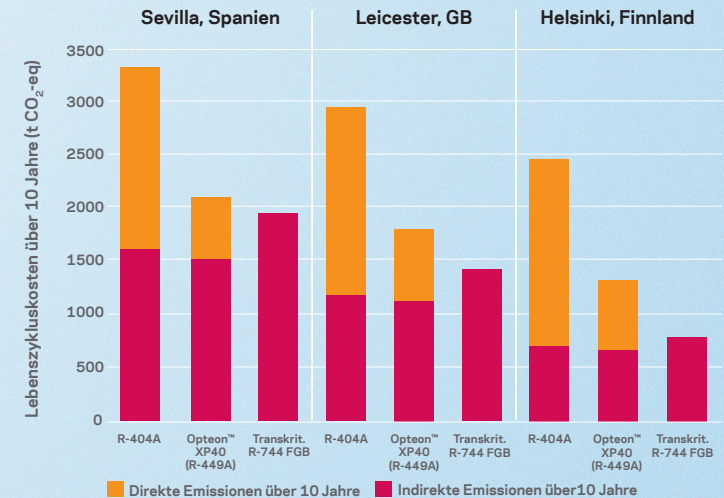
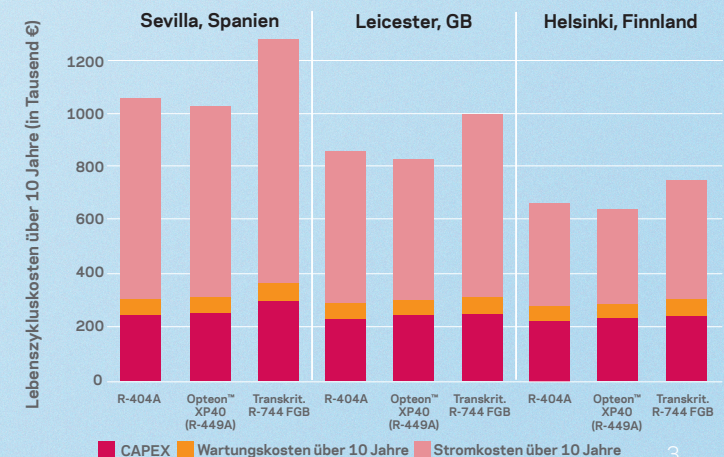


Abbildung 2

Vergleich der über 10 Jahre kumulierten Lebenszykluskosten für eine transkritische R-744 FGB-Anlage sowie Anlagen mit R-404A und Opteon™ XP40 für einen normalgroßen Supermarkt (ca. 2.000 m² Verkaufsfläche, 160 kW Normalkühlung/30 kW Tiefkühlung) in verschiedenen Klimazonen



Gibt es eine bessere Option als R-744?



Neben der Reduktion der gesamten Treibhausgasemissionen enthält die Anforderungsliste des Einzelhandels an die neue Kältetechnologie die folgenden Punkte:

- **Vergleichbare Kälteleistung,**
- **Vergleichbare oder höhere Energieeffizienz,**
- **Vergleichbare Anlagenverfügbarkeit (Risikominimierung für den Handel),**
- **Vergleichbare oder geringere Gesamtbetriebskosten UND**
- **Idealerweise ähnlich einfache Installation und Wartung**

Obwohl der Einsatz von R-744 das primäre Ziel – die Reduktion der gesamten Treibhausgasemissionen – erreicht und eine vergleichbare Kälteleistung ermöglicht, bleiben die anderen Anforderungen unerfüllt.

Es gibt Verbesserungspotenzial bei der Auswahl der Technologie.

A2L-Kältemittelblends mit einem sehr niedrigen GWP wie Opteon™ XL20 und Opteon™ XL40 sind seit 2016 auf dem Markt verfügbar. Da der Fokus des Einzelhandels jedoch zunächst auf dem Retrofit bestehender Anlagen lag, um dem seit 2020 geltenden Serviceverbot für R-404A zuvorzukommen, gab es bisher nur wenig Gelegenheit, die Vorteile dieser Lösungen umfassend zu untersuchen.

Der erste kommerzielle Einsatz eines Produkts der Opteon™ XL Reihe in einer gewerblichen Kälteanwendung erfolgte im Oktober 2017: Der britische Kuchen- und Desserthersteller Park Cake Bakery installierte an seinem Standort Oldham ein Tiefkühlhaus mit Opteon™ XL40 als Kältemittel. Dies förderte den Bekanntheitsgrad dieser alternativen Technologie und weckte das Interesse des Einzelhandels für die Verwendung in gewerblichen Kälteanlagen. Da nun Anlagen und Komponenten für die Opteon™ XL Produkte verfügbar sind, wie Installationen bei den britischen Handelsunternehmen ASDA und Central England Co-op bewiesen haben, sind diese Kältemittel mit sehr niedrigem GWP eine praktikable Alternative für den Einzelhandel, die in Betracht gezogen werden sollte.

Eine von Wave Refrigeration durchgeführte und auf den praktischen Erfahrungen mit ASDA basierende Studie untersuchte den Einsatz der Opteon™ XL Produkte im Detail.

Der sehr niedrige GWP von Opteon™ XL20 und Opteon™ XL40 in Kombination mit den von verantwortungsvollen Einzelhändlern erreichten verbesserten jährlichen Leckageraten von < 5 % trägt dazu bei, die direkten, durch das Kältemittel verursachten Treibhausgasemissionen signifikant zu reduzieren. Zusammen mit der verbesserten Energieeffizienz der Opteon™ XL Kältemittel liegen die Gesamtemissionen für einen normalgroßen Supermarkt mit ca. 2.000 m² Verkaufsfläche an allen drei betrachteten Standorten (Helsinki 6 bis 8 %, Leicester 15 bis 17 %, Sevilla 18 bis 20 %) niedriger als bei einer vergleichbaren transkritischen R-744 FGB-Anlage (Abbildung 3).

Da nun eine alternative Technologie zur Verfügung steht, die vergleichbare oder geringere Gesamtemissionen verursacht als eine transkritische R-744 FGB-Anlage, wird der Kostenfaktor relevant und wichtig.

Der Einsatz der Opteon™ XL Kältemittel ergibt die geringsten Installations- und Anschaffungskosten (CAPEX) sowie Wartungskosten. Die bei weitem größten Kosteneinsparungen über einen Zeitraum von 10 Jahren resultieren aber aus dem verringerten Energieverbrauch (Abbildung 4), was signifikant reduzierte Lebenszykluskosten über 10 Jahre ermöglicht (Helsinki 8 bis 9 %, Leicester 14 %, Sevilla 17 bis 18 %).

Die Ergebnisse dieser Studie lassen keinen Zweifel daran, dass der Einsatz der Opteon™ XL Kältemittel alle Kriterien des Einzelhandels erfüllt und geringere Gesamtemissionen bei geringeren Kosten ermöglicht als transkritische R-744 FGB-Technologien.



Abbildung 3

Vergleich der Gesamtemissionen über 10 Jahre (t CO₂-eq) von R-404A, Opteon™ XP40, Opteon™ XL40, Opteon™ XL20, R-744 mit FGB und der optimalen R-744-Technologie für einen normalgroßen Supermarkt in verschiedenen Klimazonen (jährliche Leckagerate 5 %)

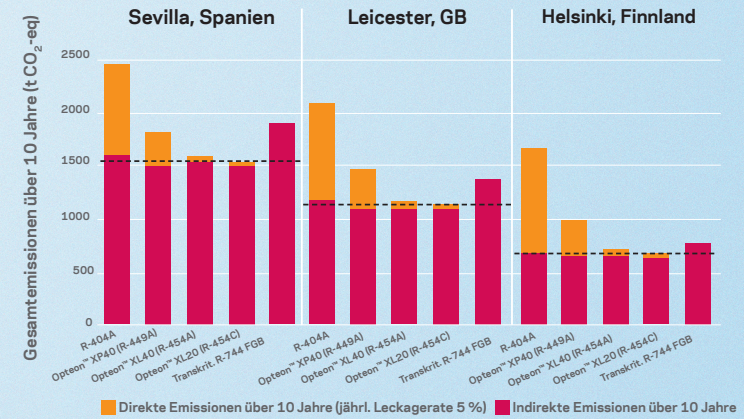
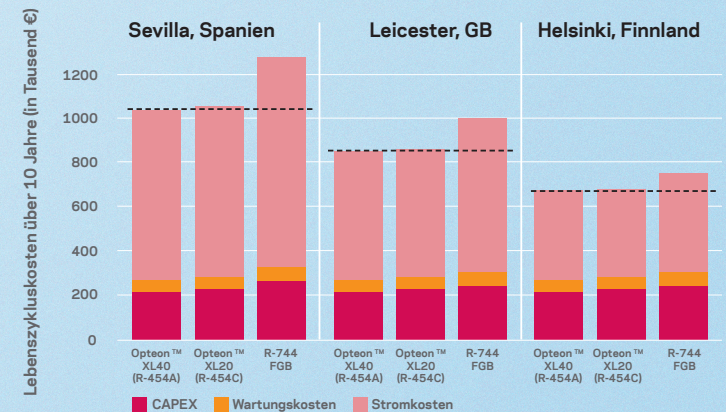


Abbildung 4

Vergleich der Lebenszykluskosten über 10 Jahre für Opteon™ XL40, Opteon™ XL20 und R-744 mit FGB für einen normalgroßen Supermarkt an verschiedenen Standorten



Welche anderen R-744-Technologien stehen zur Verfügung?

Obwohl transkritische R-744 FGB-Anlagen häufig anzutreffen sind, sind sie nicht die einzige verfügbare R-744-Technologie. Die inhärent schlechte Energieeffizienz von R-744-Anlagen in wärmeren Klimazonen führt zur Ziehung einer geographischen Grenzlinie, dem so genannten CO₂-Äquator, südlich derer der Einsatz von R-744 FGB-Systemen eine kostspielige Angelegenheit werden kann.

Daher wurde seit mehr als zehn Jahren versucht, die Energieeffizienz, vor allem an Standorten südlich des CO₂-Äquators, zu verbessern. So wurden die folgenden Modifikationen an der Systemkonfiguration vorgenommen:

- 1. Transkritische R-744 FGB-Anlage + innerer Wärmetauscher (IHX)**
- 2. Parallelverdichtung**
- 3. Parallelverdichtung+Ejektortechnologie**

Beim normalgroßen Supermarkt war die Ejektortechnologie an allen betrachteten Standorten die R-744-Technologie mit dem geringsten Energieverbrauch. In kälteren Klimazonen allerdings verringerte sich der Unterschied zwischen der R-744 FGB-Anlage und dem R-744-Ejektorsystem deutlich, so dass sich der zusätzliche Anschaffungs- und Installationsaufwand für diese Technologie möglicherweise nicht lohnen würde.

Die klimatischen Bedingungen und indirekten, aus dem Stromverbrauch resultierenden Emissionen haben einen erheblichen Einfluss auf die Gesamtemissionen, die sich aus dem Einsatz der verschiedenen Technologien ergeben. Ein häufig verwendetes Verfahren zur Ermittlung der kosteneffizientesten Technologie zur Reduktion des Umwelteinflusses einer Kälteanlage ist daher die Berechnung der CO₂-Vermeidungskosten über 10 Jahre, d. h. des Aufwands, der zur Vermeidung einer Tonne CO₂-Äquivalenten (t CO₂-eq) gegenüber einer Referenztechnologie erforderlich ist.

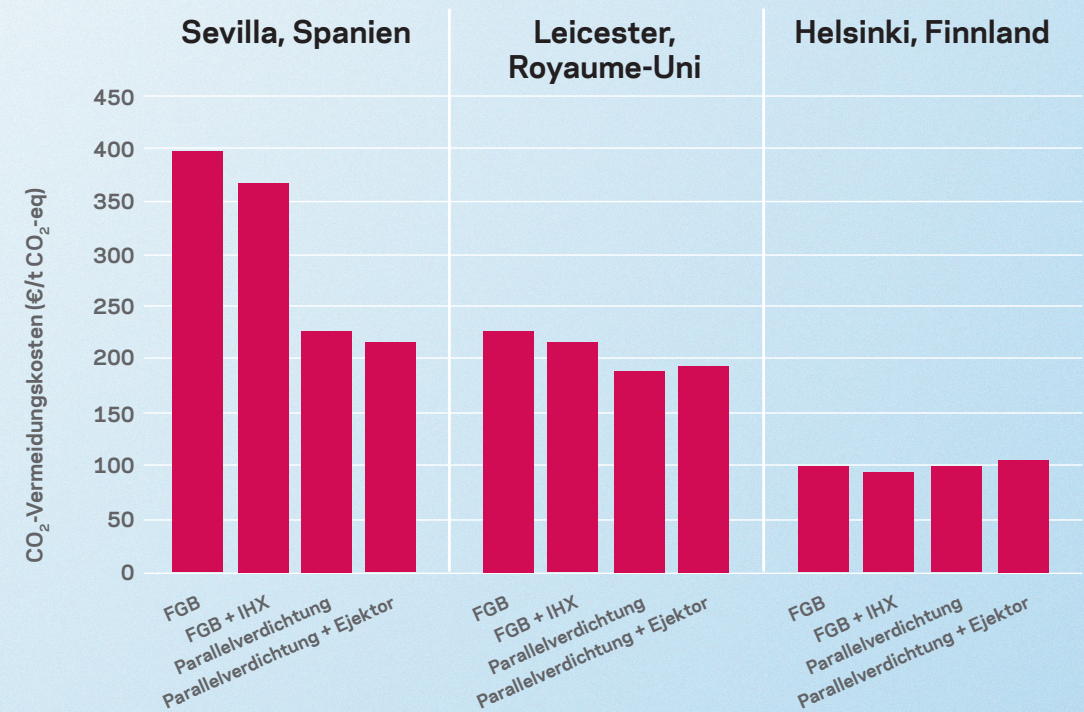
Zur Berechnung der relativen CO₂-Vermeidungskosten (angegeben €/t CO₂-eq) in wird die Differenz der über 10 Jahre kumulierten Lebenszykluskosten der alternativen Technologie (bezogen auf R-404A) durch die Differenz der über 10 Jahre kumulierten Gesamtemissionen der alternativen Technologie (bezogen auf R-404A, jährl. Leckagerate 5 %) dividiert.

Dieser Ansatz veranschaulicht nicht nur, welche Technologien die größten Reduktionen ermöglichen, sondern geben auch einen realistischen Hinweis darauf, welche Technologien das beste Preis-Leistungs-Verhältnis besitzen, um die Emissionen (oder den ökologischen Fußabdruck) um einen vorgegebenen Wert zu senken, der in diesem Fall mindestens äquivalent zur R-744 FGB-Technologie ist.

Eine solche Berechnung zeigt, dass für jeden Standort eine andere R-744-Technologie die optimale wäre, z. B. R-744 Ejektor-technologie für Sevilla, Parallelverdichtung für Leicester und FGB + IHX für Helsinki (Abbildung 5).

Abbildung 5

CO₂-Vermeidungskosten verschiedener R-744-Technologien zur Bestimmung der optimalen Technologie für jeden Standort



$$\text{Relative CO}_2\text{-Vermeidungskosten} = \frac{(LCC_{\text{Alt}} - LCC_{\text{R-404A}})}{(\text{Emissionen}_{\text{R-404A}} - \text{Emissionen}_{\text{Alt}})}$$

Im heißen Klima Sevillas (Spanien) ist die Leistungsverbesserung bei Einsatz eines Ejektorsystems im Vergleich zu einer herkömmlichen R-744 FGB-Anlage in einem normalgroßen Supermarkt signifikant (5 % geringere Lebenszykluskosten über 10 Jahre und 9 % geringere Gesamtemissionen über 10 Jahre). Diese Werte verblassen jedoch im Vergleich mit den Opteon™ XL Kältemitteltechnologien, die eine Reduktion der Lebenszykluskosten über 10 Jahre um 17 bis 18 % (Abbildung 6) und eine Senkung der Gesamtemissionen über 10 Jahre um 18 bis 20 % (Abbildung 7) im Vergleich zu einem herkömmlichen R-744 FGB-System ermöglichen.

Im moderaten Klima von Leicester (Großbritannien) ist der Leistungsvorteil bei Einsatz der Parallelverdichtung im Vergleich mit einem herkömmlichen R-744 FGB-System noch geringer (2 % geringere Lebenszykluskosten über 10 Jahre und 4 % geringere Gesamtemissionen über 10 Jahre). Hier ermöglichen die Opteon™ XL Kältemitteltechnologien immer noch eine ganz erhebliche Reduktion (14 % geringere Lebenszykluskosten über 10 Jahre und 15 bis 17 % geringere Gesamtemissionen über 10 Jahre) im Vergleich zu einem herkömmlichen R-744 FGB-System.

Dieser Trend setzt sich fort am kühlen Standort im finnischen Helsinki, der zudem mit geringen Energiekosten und geringen indirekten Emissionen aufwartet. Hier bringt der Einsatz der R-744 FGB-Technologie mit innerem Wärmetauscher (IHX) gegenüber der herkömmlichen R-744 FGB-Technologie eine Verbesserung von 1 % oder weniger. Im Vergleich dazu ermöglichen die Opteon™ XL Kältemitteltechnologien eine Reduktion der über 10 Jahre kumulierten Emissionen um 6 bis 8 % sowie eine Senkung der Lebenszykluskosten über 10 Jahre von 8 bis 9 % im Vergleich zu einem herkömmlichen R-744 FGB-System.

Abbildung 6

Vergleich der über 10 Jahre kumulierten Lebenszykluskosten von R-744 FGB- und der optimalen R-744-Technologie mit Opteon™ XL Kältemitteltechnologien für einen normalgroßen Supermarkt an verschiedenen Standorten

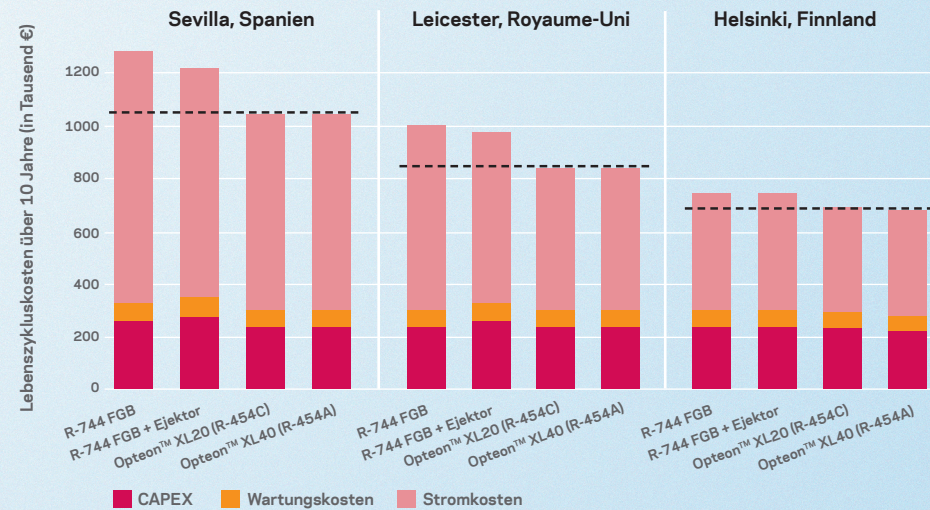
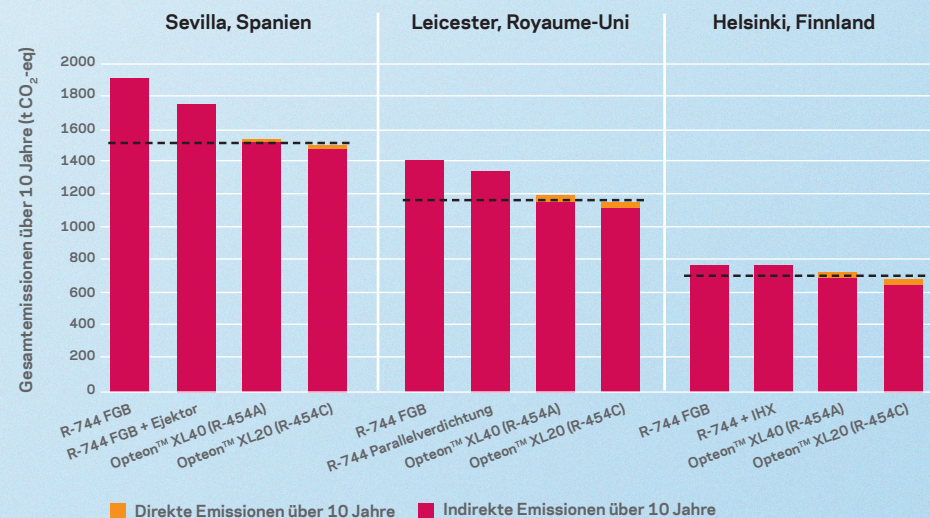


Abbildung 7

Vergleich der über 10 Jahre kumulierten Gesamtemissionen von R-744 FGB- und der optimalen R-744-Technologie mit Opteon™ XL Kältemitteltechnologien für einen normalgroßen Supermarkt an verschiedenen Standorten (jährl. Leckagerate 5 %)



Mit Hilfe dieser optimierten R-744-Technologien lassen sich die CO₂-Vermeidungskosten im Vergleich zur herkömmlichen R-744 FGB-Technologie zwar senken, bei Einsatz einer Opteon™ XL Kältemitteltechnologie liegen die Vermeidungskosten an allen Standorten jedoch um mehr als 70 % niedriger (Abbildung 8).

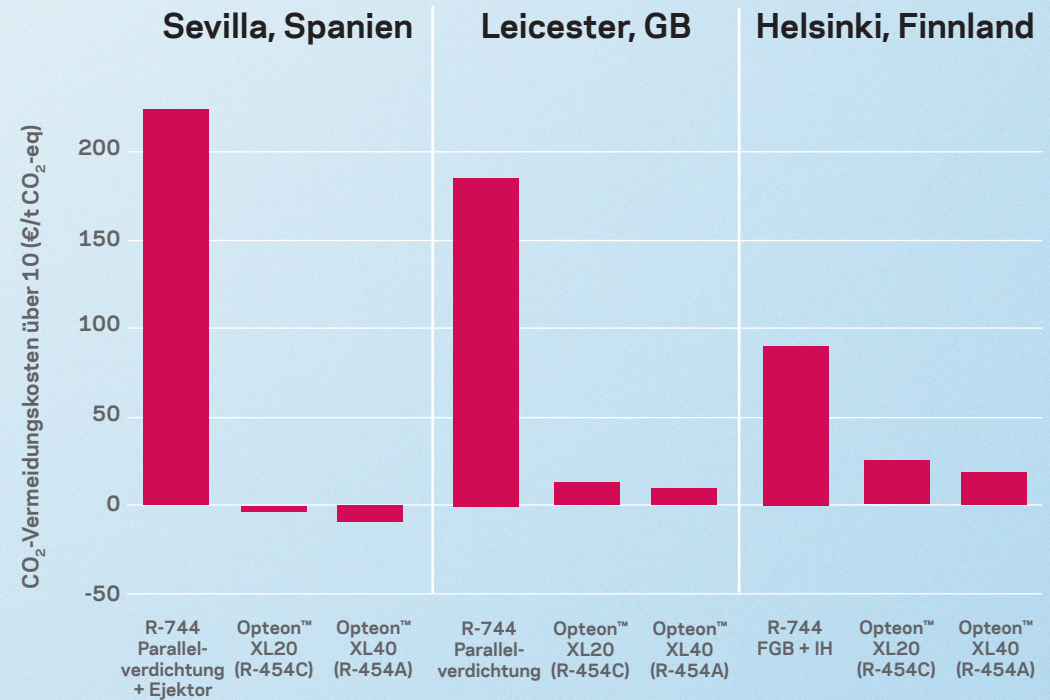
Im heißen Klima Sevillas bringt der Einsatz von Opteon™ XL Kältemitteln nicht nur eine Reduktion der Gesamtemissionen, sondern ermöglicht dies sogar bei geringeren über 10 Jahre kumulierten Kosten bezogen auf den Weiterbetrieb mit R-404A ohne Reduktion der Emissionen. Dies bedeutet negative CO₂-Vermeidungskosten von -3 bis -10 € pro t CO₂-eq.

Dies ist ein Vorteil gegenüber den optimierten R-744-Technologien. So liegen die CO₂-Vermeidungskosten für Sevilla mit der R-744 Ejektortechnologie bei 218 € pro t CO₂-eq.

Im moderaten Klima von Leicester sind die CO₂-Vermeidungskosten mit den Opteon™ XL Kältemitteln um 92 bis 96 % niedriger im Vergleich zu R-744 mit Parallelverdichtung, und sogar in Helsinki mit seiner emissionsarmen und kostengünstigen Stomerzeugung liegen die CO₂-Vermeidungskosten bei Einsatz von Opteon™ XL Kältemitteln um 73 bis 83 % niedriger als bei Verwendung eines transkritischen R-744 FGB-Systems mit innerem Wärmetauscher (IHX).

Abbildung 8

CO₂-Vermeidungskosten (in €/t CO₂-eq) über 10 Jahre (bezogen auf R-404A, jährl. Leckagerate 5 %) in einem normalgroßen Supermarkt für die optimale R-744-Technologie an verschiedenen Standorten und Opteon™ XL Kältemitteltechnologien (jährl. Leckagerate 5 %)



Unbequem oder nicht, die Wahrheit ist...

Mit seinem sehr niedrigen direkte GWP schien R-744 zunächst eine gute Wahl als Ersatz für die mit hohen Emissionen verbundene R-404A-Technologie. Auf Grund der inhärenten geringen Energieeffizienz und der Komplexität von R-744-Systemen blieben viele Fragezeichen, ob diese Technologie wirklich die beste Wahl ist.

Der Einsatz der Opteon™ XL20 und Opteon™ XL40 Kältemittel mit sehr niedrigem GWP hat sich sowohl in normalgroßen als auch in kleinen Supermärkten als praktikable Alternative zu R-404A und R-744 erwiesen. Erfahrungen aus der Praxis haben gezeigt, dass diese Kältemittel im Vergleich zu R-404A eine verbesserte Energieeffizienz besitzen, bei vergleichbaren Anlagenkosten, ähnlich einfacher Installation und Wartung sowie ähnlich hoher Zuverlässigkeit. Und all dies bei den niedrigsten über 10 Jahre kumulierten Gesamtemissionen aller derzeit verwendeten Low-GWP-Alternativen.

In Bezug auf die CO₂-Vermeidungskosten hat sich gezeigt, dass der Einsatz von Opteon™ XL Kältemitteln mit Abstand die derzeit kosteneffizienteste Technologie ist, um den ökologischen Fußabdruck einer Kälteanlagen zu reduzieren. Die Höhe der Kosten variiert stark in Abhängigkeit von Standort und Ladengröße

Die Ergebnisse variieren stark je nach Standort und Ladengröße und reichen von mehr als 70 % niedrigeren CO₂-Vermeidungskosten (im Vergleich zur optimalen R-744-Technologie) im kühlen Helsinki bis zu mehr als 100 % geringeren CO₂-Vermeidungskosten (im Vergleich zur optimalen R-744-Technologie) für einen normalgroßen Supermarkt im heißen Klima von Sevilla.

Wenn Sie also eine R-404A Alternative mit sehr niedrigem GWP suchen, die folgende Kriterien erfüllt:

- **Vergleichbare Kälteleistung,**
- **Vergleichbare oder höhere Energieeffizienz,**
- **Vergleichbare Anlagenverfügbarkeit (Risikominimierung für den Handel),**
- **Vergleichbare oder geringere Gesamtbetriebskosten UND**
- **Idealerweise ähnlich einfache Installation und Wartung de possession (TCO);**

Wählen Sie Opteon™ XL Kältemittel, warum etwas anderes verwenden?

