

# Ökoeffizienzbetrachtungen von Supermarkt-Kälteanlagen

Achim Diehlmann, Christoph Meurer und Rainer Jakobs, Hannover

*Zur Bewertung technischer Systeme müssen Informationen bestmöglich aufbereitet und zusammengefasst werden. Die dabei verwendeten Methoden sind häufig sehr komplex und in ihrer Aussage wenig transparent. Um die gemeinsame Bewertung von ökonomischen und ökologischen Aspekten zu erleichtern, ist das Konzept der Ökoeffizienz, das das Verhältnis von Wertschöpfung zu entstehenden Umweltlasten beschreibt, eine sinnvolle Alternative.*

Um den aktuellen Stand der Technologien zu beschreiben und lohnende Ziele künftiger Entwicklungen auszumachen, wurde die Ökoeffizienz-Methode auf unterschiedliche Konzepte der Erzeugung von Supermarktkälte angewendet. Die Daten zur Berechnung wurden von einem erfahrenen Begleitkreis zur Verfügung gestellt. Die Ergebnisse der Untersuchung bestätigen, dass die wesentlichen Umweltlasten von Supermarktkälteanlagen aus deren Betrieb resultieren. Bei den Lebenszykluskosten liegen die Hauptlasten im Bereich von Beschaffung und Energiekosten. Es konnte gezeigt werden, dass Systeme unter Verwendung des Kältemittels R134a in der Normalkälte und in der Ökoeffizienz den alternativen Anlagenkonzepten (R404A und HFKW freie Alternativen) in allen untersuchten Umweltwirkungskategorien überlegen sind. Die Steigerung der Ökoeffizienz durch Investition in optimierte Anlagentechnik und damit in minimierte Betriebskosten der Supermarktkälteanlagen konnte ebenfalls nachgewiesen werden.

## Einführung in das Thema

Zur Charakterisierung technischer Systeme müssen die in den unterschiedlichen Bewer-

tungsbereichen zur Verfügung stehenden Informationen bestmöglich aufbereitet und zu einer abschließenden Bewertung zusammengefasst werden. Die in den einzelnen Bereichen verwendeten Methoden sind dabei häufig sehr komplex und in ihrer Aussage wenig transparent. Bei der Technologiebewertung wie bei Investitionsentscheidungen müssen neben ökonomischen auch ökologische Aspekte berücksichtigt werden. In Bezug auf technische Systeme führt die Vermeidung von Umweltlasten vielfach zu hohen Kosten bzw. gehen geringe Kosten oft mit verstärkten Umweltauswirkungen einher. Während der Fokus in Unternehmen häufig auf den Bereich der Kosten gerichtet ist, werden diese z. B. in der Diskussion um die Minimierung aktueller Umweltprobleme oft vernachlässigt. Dies kann zu einem, aus volkswirtschaftlicher Sicht, uneffizienten Einsatz der vorhandenen Geldmittel, sowohl unter ökologischen als auch ökonomischen Gesichtspunkten, führen. Am Beispiel der Debatte um den Einsatz fluoriertes Gase als Kältemittel in Supermarktkälteanlagen könnte eine derart verkürzte Sichtweise bedeuten, dass die Verminderung treibhausrelevanter Emissionen zu Kosten erkaufte werden, die anderenorts für die gleiche Einsparung deutlich geringer gewesen wären bzw. bei gleichem Mitteleinsatz einen deutlich größeren Umweltvorteil erbracht hätte. Neben der Notwendigkeit, so wichtige Bereiche wie Ökonomie und Ökologie in die Entscheidungsfindung einfließen zu lassen, ist auch der betrachtete Zeithorizont von entscheidender Bedeutung. Es muss der gesamte Lebenszyklus eines Systems beachtet werden. Dies bedeutet z. B. aus ökonomischer Sicht, dass nicht nur die Investitionssumme berücksichtigt wird, sondern auch Betriebskosten und Entsorgungskosten in die Betrachtung einfließen müssen. Unterbleibt dieser lebenswegbezogene Ansatz, kann sich ein vermeintlich günstiges System über den Lebenszyklus in eine Kostenfalle verwandeln.

Eine Möglichkeit, ökonomische und ökologische Aspekte in einem Lebenszyklus-Ansatz gleichermaßen zu berücksichti-

## zu den Autoren

**Dr. Achim Diehlmann,**  
Umwelt und Sicherheit,  
Solvay Management Support GmbH,  
Hannover



**Dipl.-Ing. Christoph Meurer,**  
Leiter Anwendungstechnik Kältemittel,  
Solvay Fluor GmbH,  
Hannover



**Dr.-Ing. Rainer Jakobs,**  
Informationszentrum  
Wärmepumpen und Kältetechnik (IZW),  
Hannover



gen, bietet das Konzept der Ökoeffizienz. Es untersucht die Kosten mit Hilfe einer Lebenszykluskosten Analyse [1] und die ökologischen Auswirkungen eines Systems mittels der Ökobilanzmethode [2, 3, 4, 5]. Die Ergebnisse der Untersuchungen werden dann über das Konzept so aufbereitet, dass Entscheidungen leichter ge-

Als Vortrag gehalten anlässlich der Deutschen Kälte-Klima-Tagung 2005 des DKV am 18. November in Würzburg.

treffen werden können. Dieses Ökoeffizienz-Konzept wurde in einer Studie auf unterschiedliche Supermarktkältesysteme angewendet. Mit Hilfe des Ansatzes soll der aktuelle Stand der unterschiedlichen Technologien zur Erzeugung von Kälteleistung in Supermärkten dokumentiert werden. Weiterhin ermöglicht eine solche Betrachtung die Identifikation von Bereichen mit großem Optimierungspotenzial.

### Das Ökoeffizienz-Konzept

Ökoeffizienz ist ein Konzept zur Verminderung der Umweltbelastung und Kosten durch sinnvolle Nutzung von Ressourcen. Nach der Definition des World Business Council for Sustainable Development (WBCSD) [6] ist Ökoeffizienz erreicht, „wenn ressourcenschonende Produkte und Dienstleistungen, die menschliche Bedürfnisse befriedigen und einen Beitrag zur Lebensqualität leisten, zu wettbewerbsfähigen Preisen angeboten werden“. Ökoeffizienz ist der Quotient aus dem wirtschaftlichen Wert eines Produktes und den durch den Herstellungsvorgang auf die Umwelt ausgeübten Auswirkungen.

$$\text{Ökoeffizienz} = \frac{\text{wirtschaftlicher Wert eines Produktes}}{\text{Auswirkung auf die Umwelt}}$$

Nach dem Konzept ist ein Produkt oder eine Dienstleistung um so ökoeffizienter, je größer die Nutzeneinheit pro Umweltbelastung ist. Dabei werden die Untersuchungsgrenzen analog zur Ökobilanzierung „von der Wiege bis zur Bahre“ vom Herstellungsprozess über den Gebrauch/Nutzen bis hin zur Entsorgung gezogen. Die Verminderung der Material- und Energieintensität von Produkten und die Reduzierung der Emissionen und Abfälle sollen zusammen mit der Erhöhung der Recyclingfähigkeit von Produkten sowie dem maximalen Einsatz wieder verwendeter Materialien eine möglichst geringe Umweltbelastung bewirken. Aus der Sicht von Interessengruppen ermöglicht das Ökoeffizienzkonzept unterschiedliche Vorteile:

- Aus Kunden- oder Gesellschaftssicht: Höherer Kundennutzen bei gleich bleibender oder verringerter Umweltlast.
- Aus Unternehmenssicht: Höhere Gewinne bei gleich bleibender oder verringerter Umweltlast.
- Aus Umweltsicht: Geringere Umweltlasten bei Produkten mit gleicher Funktionalität.

Die berechnete Ökoeffizienz eines Produktes oder einer Dienstleistung trifft keine Aussage

Nr.	Verbundsatz Normalkälte	Verbundsatz Tiefkälte	Schaltungsart
1	R404A DX	R404A DX	2 getrennte Kreisläufe
2	R134a DX	R404A DX	2 getrennte Kreisläufe
3	R404A Sole	R404A DX	Reduzierte Füllmenge im Bereich Normalkälte durch Einsatz von Kälteträgern
4	R404A DX	R 744 DX	Kaskadenschaltung
5	R134a DX	R 744 DX	Kaskadenschaltung
6	R 717 Sole	R 744 DX	Kaskadenschaltung, Einsatz von Kälte Trägermedium aufgrund toxischer Eigenschaften von R 717

Tabelle 1 Ausgewählte Supermarktkältesysteme

	1) R404A/R404A	2) R134a/R404A	3) R404A Sole/R404A	4) R404A/R744 Kaskade	5) R134a/R744 Kaskade	6) R717 Sole/R744 Kaskade
Kältemittelfüllmenge (kg)						
R404A	330	110	200	270	-	-
R134a	-	200	-	-	245	-
Kohlendioxid	-	-	-	50	50	50
Ammoniak	-	-	-	-	-	15
Kälte Trägermedium (kg)	-	-	800	-	-	1600
Mittlerer Energieverbrauch (MWh/a)	224	213	248	228	212	240
Kältemittelverluste Befüllung (%)	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Kältemittelverluste Betrieb (% p.a.)	5	3/5	5	5	3	5
Kältemittelverluste Entsorgung (%)	10	10	10	10	10	10
Investitionskosten (%)	100	108	120	103	111	140
Energiekosten	0,1€/kWh, jährliche Steigerung 3%					
Wartungskosten (p.a.)	3,5 % der Anlageninvestition (ohne Möbel)					
Kapitalkosten (p.a.)	4%					

Tabelle 2 Betriebsparameter und Kostengrößen der Bilanzierung

Berücksichtigte Umweltwirkungen	
Treibhauspotential	GWP100 (global warming potential)
Versauerungspotential	AP (acidification potential)
Eutrophierungspotential	EP (eutrophication potential)
Ozonbildungspotential	POP (photochemical oxidation potential)

Tabelle 3 Berücksichtigte Umweltwirkungskategorien

über die generelle Nachhaltigkeit, sondern ist stets in Relation zu den verglichenen Produkten oder Dienstleistungen zu sehen.

### Die Methode der Ökobilanz

Die Methode der Ökobilanz („Life Cycle Assessment“) dient dem Vergleich der Umweltauswirkungen zweier oder mehre-

rer unterschiedlicher Produkte, Systeme oder Verfahren. Ökobilanzen zeichnen sich durch die Betrachtung des gesamten Lebenswegs von Produkten, Produktsystemen, Prozessen oder Dienstleistungen von der Herstellung über die Nutzung bis zur Verwertung/Beseitigung aus. Die Bilanzierung und Auswertung der Daten erfolgt dabei medienübergreifend für die Kompar-

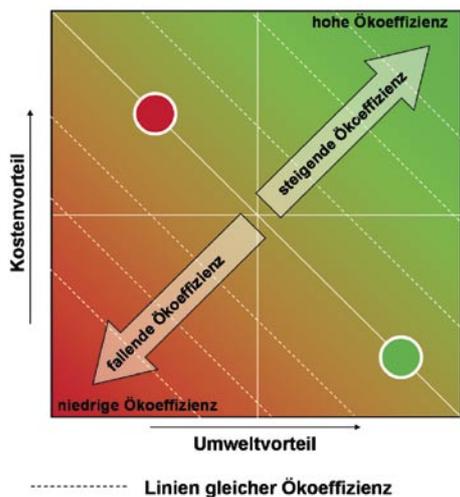


Bild 1 Ökoeffizienzportfolio – Beispielportfolio

timente Luft, Boden und Wasser. Bei der Bilanzierung werden in einem ersten Schritt in allen Lebenswegabschnitten die maßgeblichen Input- (Energie, Rohstoffe, Wasser) und Outputströme (Abwasser, Abfälle, Emissionen) erfasst und auf eine den Nutzen quantifizierende Größe (Nutzeneinheit) bezogen. In einem weiteren Schritt werden die erfassten Ströme unterschiedlichen Umweltwirkungen zugewiesen und die Ergebnisse in einem dritten Schritt ausgewertet.

### Lebenszykluskosten Analyse (LCCA)

Unter der Bezeichnung Lebenszykluskosten (Life Cycle Costing) werden die über den gesamten Lebenslauf eines Objekts oder Systems kumulierten Kosten verstanden. Die Grenzen der Betrachtung umfassen alle Schritte von der Herstellung über Nutzung bis zum Verbleib in der Umwelt am Ende des Lebenszyklus (für Produkte). Die Lebenszykluskostenanalyse hilft potente Kostentreiber zu ermitteln und ermöglicht damit Optimierungsmaßnahmen zielgerichtet anzusetzen.

### Untersuchungsdesign

Mit Hilfe des beschriebenen Ökoeffizienzansatzes wurden sechs unterschiedliche Supermarktkältesysteme nach dem Stand der Technik miteinander verglichen. Tabelle 1 zeigt die ausgewählten Systeme.

Um den wirtschaftlichen Wert bzw. die Umweltauswirkungen der untersuchten Supermarktkälteanlagen zu bestimmen, wurde für jedes System eine Lebenszykluskosten-Analyse und eine Ökobilanzierung durchgeführt. Die zur Berechnung der Bilanzen benötigten ökonomischen Größen und technischen Betriebsparameter (Tabel-

le 2) wurden vom Begleitkreis der Studie, der sich aus Komponenten-, Regeltechnik- und Kältemittelherstellern, Anlagenbauern und Supermarktbetreibern zusammensetzte, aufgrund ihrer langjährigen Erfahrung festgelegt. Zusätzlich zu den Berechnungen mit den festgelegten Standardparametern wurden in einer Sensitivitätsanalyse der Energieverbrauch und die jährlichen Kältemittelverluste variiert, um Schwachstellen zu identifizieren und mögliche Optimierungspotenziale für bestehende Anlagen und künftige Systeme aufzuzeigen.

Im Bereich der Ökobilanzierung wurden alle Stoff- und Energieströme ab der Gewinnung der Rohstoffe über die Herstellung der einzelnen Komponenten, den Aufbau der Verbundsätze und Rohrleitungen, den Betrieb der Supermarktkälteanlage bis hin zum Abbau und Recycling bei der Betrachtung ebenso berücksichtigt wie die im Untersuchungsrahmen entstehenden Abfälle und Emissionen. Von der Betrachtung ausgenommen wurde die Herstellung von Kühlmöbeln und Tiefkühltruhen, da sich diese Bauteile für die unterschiedlichen Varianten der Kältebereitstellung nur geringfügig unterscheiden und vergleichbare Kosten und Umweltlasten in der Ökoeffizienzbetrachtung zu keiner Ergebnisänderung führen. Bei der Auswertung der Sachbilanzdaten wurden verschiedene Umweltwirkungskategorien berücksichtigt (Tabelle 3), der Fokus der Untersuchung lag jedoch auf der Umweltwirkungskategorie „Beitrag zum Treibhauseffekt“. Im Bereich der Lebenszykluskosten-Analyse wurden Investitionskosten, Energie- und Wartungskosten sowie Kapitalkosten berücksichtigt.

Zur Bestimmung der Ökoeffizienz wurden die Ergebnisse der Lebenszykluskosten-Analyse und der Ökobilanz in den verschiedenen Umweltwirkungskategorien normiert. Dazu wurde aus allen untersuchten Systemen der Durchschnitt der Lebenszykluskosten bzw. der Umweltlasten in den unterschiedlichen Umweltwirkungskategorien gebildet. Die Einzelergebnisse wurden nun zum Durchschnitt ins Verhältnis gesetzt und die Werte in ein Ökoeffizienzportfolio transferiert (Bild 1). Das Ökoeffizienzportfolio dient dabei der graphischen Darstellung der Ökoeffizienz der untersuchten Produkte, Prozesse oder Dienstleistungen.

Die Ergebnisse aus der Normierung der Ökobilanzierungsauswertung bilden im Koordinatensystem die x-Werte, während die Normierungsergebnisse aus der Lebenszykluskostenanalyse die zugehörigen y-Werte bilden. Die aus den Koordinaten

gebildeten Punkte werden dann in ein umgekehrt skaliertes Koordinatensystem übertragen. Je weiter rechts der das untersuchte System repräsentierende Punkt auf der x-Achse liegt, desto geringer ist seine Umweltauswirkung, je weiter oben er auf der y-Achse liegt, desto geringer sind seine Lebenszykluskosten. Diese Vorgehensweise hat zur Folge, dass ein System umso ökoeffizienter ist, je weiter es im rechten oberen Quadranten liegt. Umgekehrt ist die Ökoeffizienz eines Systems umso geringer, je weiter der Punkt im linken unteren Quadranten liegt. Die im Koordinatensystem eingezeichneten Diagonalen repräsentieren Linien gleicher Ökoeffizienz. Dies bedeutet, dass Prozesse, die sich sowohl in den Lebenszykluskosten als auch in den Umweltlasten unterscheiden, die gleiche Ökoeffizienz haben können. Die Arbeitsschritte zur Bestimmung der Ökoeffizienz von Systemen zeigt Bild 2.

### Ergebnisse – Berechnung Standardparameter

Unter Berücksichtigung der angenommenen Anlagenparameter wurden die Stoff- und Energieströme des Untersuchungssystems berechnet und deren Wirkung auf die Umwelt in den unterschiedlichen Wirkungskategorien mittels der CML-Methode [7,8] bestimmt (Bild 3). Ebenso wurden die Lebenszykluskosten berechnet. Hier wurden wie beschrieben Investitionskosten, Kosten für Energieverbrauch und Wartung aber auch Kapitalkosten in die Kalkulation einbezogen.

Die Ergebnisse zeigen, dass die bei der untersuchten Supermarktklasse von 100 kW (1000–1500m<sup>2</sup> Verkaufsfläche) vorherrschende R404A/R404A Technologie über den gesamten Lebenszyklus den größten Anteil treibhauswirksamer Emissionen besitzt. In dieser Kategorie die geringsten Beiträge zum Treibhauseffekt verzeichnete die R134a/R744 Technologie in Kaskadenschaltung gefolgt vom Ammoniak/CO<sub>2</sub> System in Kaskadenschaltung und der R134a/R404A Variante. Ein anderes Bild zeigt sich bei der Betrachtung der Lebenszykluskosten (Bild 4). Hier schneidet die R717/R744 Anlage in Kaskadenschaltung mit deutlichem Abstand am schlechtesten ab, weist also die größten Lebenszykluskosten auf. Mit wenig Abstand folgt die R404A/R404A Anlage unter Verwendung eines sekundären Kälteübermittlers, die neben hohen Lebenszykluskosten auch einen hohen Beitrag zum Treibhauseffekt leistet. Alle anderen untersuchten Anlagenversionen liegen in Hinblick auf die Lebens-

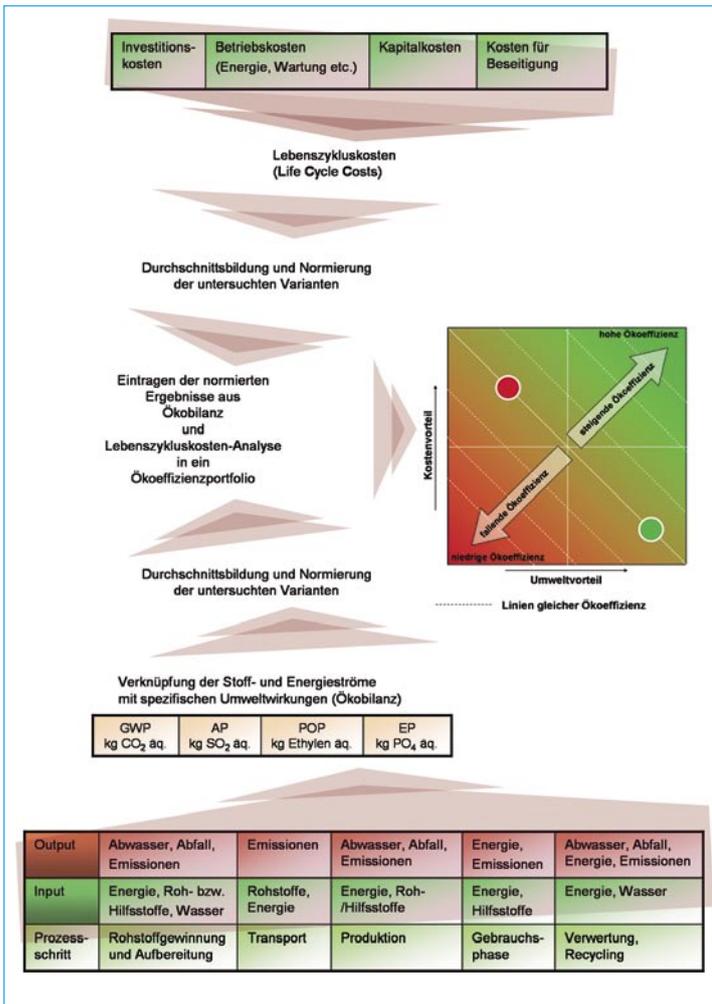


Bild 2 Arbeitsschritte bei der Ökoeffizienzanalyse

zykluskosten in einem engen Bereich zusammen, wobei die Anlagenkombination R134a/R404A die geringsten Kosten über den gesamten Lebenszyklus aufweist.

Die Ergebnisse der Auswertung in den untersuchten Umweltwirkungskategorien (hier Kategorie GWP) und der LCCA-Ergebnisse werden nach dem Normierungsschritt in ein Ökoeffizienzportfolio übertragen. Bild 5 zeigt die Ergebnisse der Ökoeffizienzauswertung.

Die Anlagenkombination mit der größten Ökoeffizienz der untersuchten Anlagen ist das R134a/R744 System in Kaskadenschaltung. In der Ökoeffizienzbetrachtung an zweiter Stelle steht das R134a/R404A System. Erst an dritte Stelle folgt das mit einer relativ positiven Umweltperformance aber sehr hohen Lebenszykluskosten ausgestattete R717/R744 System in Kaskadenschaltung. Das Supermarkt-Standardsystem R404A/R404A hat unter der Annahme der vom Begleitkreis bestimmten Parameter im Vergleich zu den Alternativanlagen nur eine geringe Ökoeffizienz.

### Ergebnisse – Sensitivitätsanalyse

Wie angesprochen wurden in der Studie auch Sensitivitätsanalysen durchgeführt, in der die wesentlichen Parameter Anlagenenergieverbrauch und Kältemittelverluste variiert wurden. In einer ersten Parametervariation wurde angenommen, dass sich die jährlichen HFKW-Kältemittelverluste von 5% bzw. 3% der Kältemittelfüllmenge auf einen Wert von jährlich 2% reduzieren lassen. Bild 6 zeigt die Ökoeffizienz der untersuchten Systeme.

Es zeigt sich deutlich, dass bei verminderten Kältemittelverlusten sich die Systeme in ihrer Umweltlast annähern. Die Verringerung der Verluste führt dazu, dass die im Vergleich zur R717/R744 Kaskade in der Ökoeffizienz vorher schlechteren Systeme R404A/R404A und R404A/R744 nun eine höhere Ökoeffizienz als die Variante mit „natürlichen“ Kältemitteln aufweisen. Die höchste Ökoeffizienz weist weiterhin die Variante R134a/R744 in Kaskadenschaltung auf.

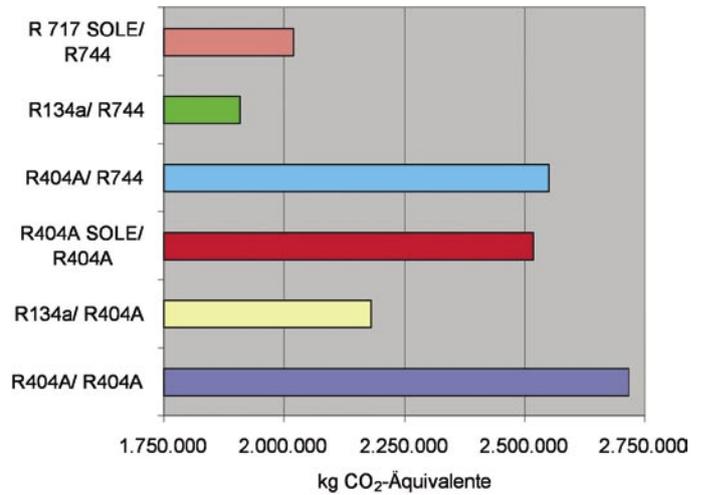


Bild 3 Wirkungsauswertung GWP

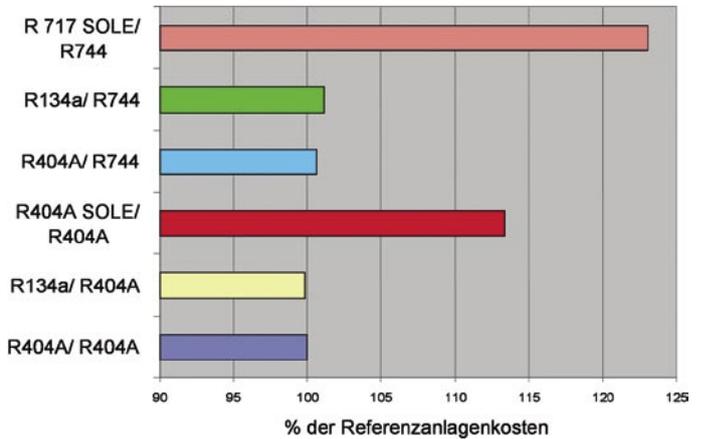


Bild 4 Ergebnisse Lebenszykluskosten-Analyse

In weiteren Parametervariationen wurden nun jeweils nur einzelne Anlagenvarianten einem Optimierungsszenario unterworfen, während der Rest der untersuchten Systeme mit den vom Begleitkreis festgelegten Standardparametern berechnet wurde. Für die Referenztechnologie R404A/R404A wurde angenommen, dass ein um 20% reduzierter Energieverbrauch bei 15% höheren Investitionskosten für optimierte Technologie erreicht werden kann. Weiterhin wurde ein jährlicher Kältemittelverlust in Höhe von 2% der Kältemittelfüllmenge angesetzt (Bild 7).

Die Optimierung der Referenztechnologie führt im Vergleich zu den untersuchten Alternativen zu einer erheblichen Steigerung der Ökoeffizienz. Unter der Annahme eines reduzierten Energieverbrauchs und reduzierter Kältemittelverluste erreicht das R404A/R404A System die höchste Ökoeffizienz der untersuchten Anlagenvarianten. Dabei weist die Technologie über den gesamten Lebenszyklus nicht nur den geringsten Beitrag zum Treibhauseffekt

auf, sondern trotz der zusätzlichen Investition auch die deutlich geringsten Lebenszykluskosten. Diese günstige Kostensituation lässt sich auf die Einsparungen im Bereich der Energiekosten zurückführen. Neben der Referenztechnologie weist die R134a/R744 Technologie in Kaskadenschaltung weiterhin eine hohe Ökoeffizienz auf. Unter den getroffenen Annahmen sinkt jedoch die Ökoeffizienz der Ammoniak/CO<sub>2</sub> Technologie. Sie ist nun vergleichbar mit den Ergebnissen der R404A/R744 Technologie.

Neben der Referenztechnologie wurde auch für die Anlagenvariante R134a/R404A eine Parametervariation durchgeführt. Die Veränderungen in der Ökoeffizienz dieser Anlagenvariante fallen im Vergleich zur Parametervariation der Referenztechnologie deutlich stärker aus. Auch hier wurde eine Energieverbrauchsreduktion um 20% bei um 15% erhöhten Investitionskosten angenommen. Ebenso wurde ein jährlicher Kältemittelverlust von 2% der Anlagenfüllmenge für die Berechnungen angesetzt (Bild 8).

Die optimierte Technologie R134a/R404A weist hinsichtlich der Ökoeffizienz einen deutlichen Vorsprung gegenüber den untersuchten Alternativen auf. Sowohl aus ökologischer als auch aus ökonomischer Sicht ist diese Variante unter den angenommenen Parametern vorteilhaft.

### **Potenziale der Energieverbrauchsoptimierung**

Bei der Prüfung der Sensitivität der Ergebnisse hinsichtlich des Energieverbrauchs wurde von einer Reduktion des Energieverbrauchs durch technische und organisatorische Optimierungen ausgegangen, ohne auf spezifische Maßnahmen einzugehen. Zur Vervollständigung soll der vorliegende Beitrag nachfolgend um einige technische und organisatorische Mängel und um Vorschläge zu deren Vermeidung ergänzt werden:

- Zu niedrige Verdampfungstemperaturen (Kühlmöbel- bzw. Kühlraumtemperaturen) zu hohe Verflüssigungstemperaturen.

**Vorschlag zur Vermeidung:** Beachtung der vom Bundesinstitut für Risikobewertung (BfR) empfohlenen Kühlgut-Lagertemperaturen. Installation intelligenter Regelungskonzepte. Einbau elektronischer Expansionsventile. Damit Anpassung der Verflüssigungstemperaturen auf geringere Umgebungstemperaturen.

- Zu hohe Einlagerungstemperaturen (hervorgerufen durch ungekühlte Zwischenlagerung des Kühlgutes, z.B. vor dem Supermarkt).

**Vorschlag zur Vermeidung:** Abriss der Kühlkette vermeiden. Die Waren sollten ohne Zwischenlagerung direkt ins Kühllager oder zum Kühlmöbel gebracht werden. Die Anlieferungstemperatur muss der Kühlmöbeltemperatur entsprechen.

- Erhöhte Beleuchtungsdauern/ zu hohe Lichtleistungen.

**Vorschlag zur Vermeidung:** Einsatz energiesparender Lampen. Lampenanzahl reduzieren durch Einsatz von Reflektoren. Einsatz von Bewegungsmeldern. Merklliche Energieeinsparungen lassen sich durch Infrarotstrahlen reflektierende

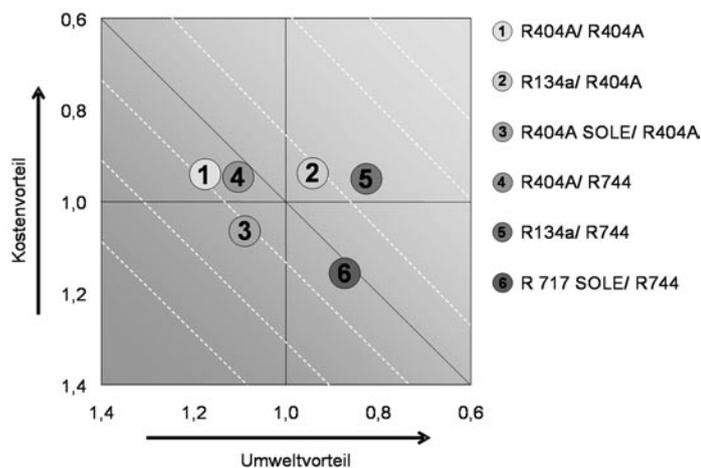


Bild 5 Ökoeffizienz der untersuchten Anlagen hinsichtlich GWP – Berechnung mit Standardparametern

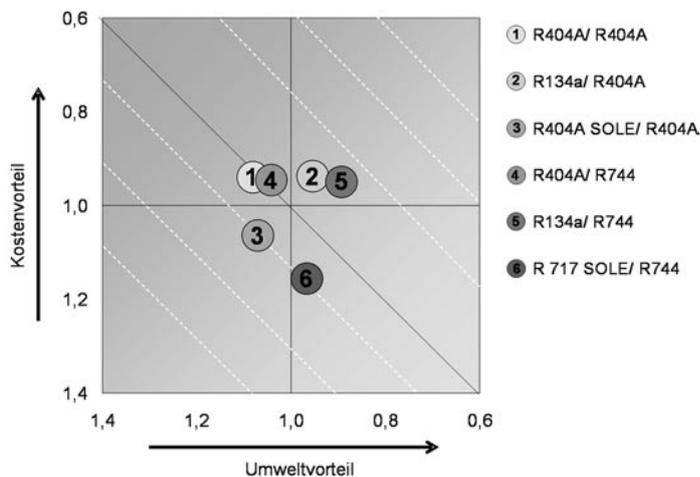


Bild 6 Ökoeffizienz der untersuchten Anlagen hinsichtlich GWP bei jährlich 2% Kältemittelverlust

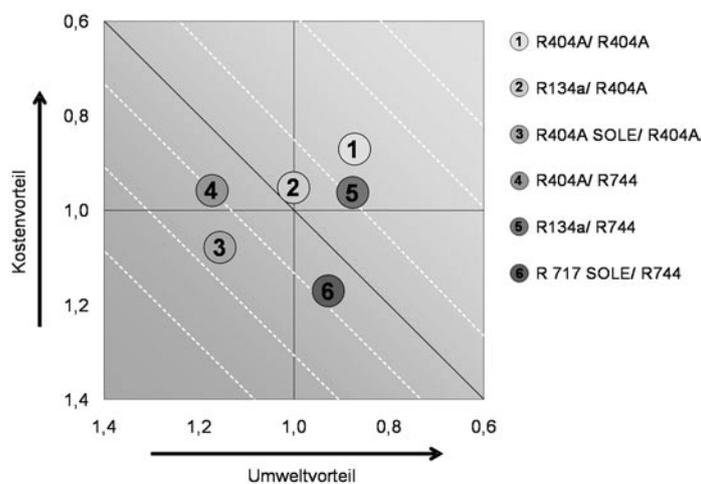


Bild 7 Ökoeffizienz der untersuchten Anlagen hinsichtlich GWP-R404A/R404A optimiert

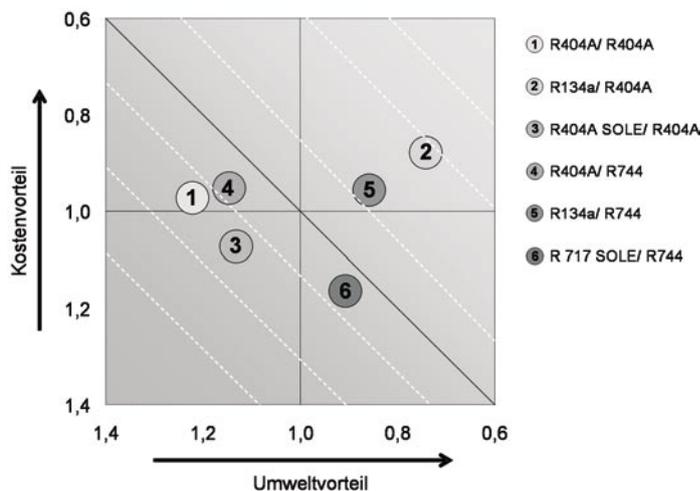


Bild 8 Ökoeffizienz der untersuchten Anlagen hinsichtlich GWP-R134a/R404A optimiert

Schirme und Baldachine erzielen. Gruppweise Aufstellung von Kühlmöbeln und dadurch Schaffung kühlerer Zonen.

- Zu lange/zu häufige Tor- bzw. Türöffnungsintervalle bei Belieferung/ unzureichende Dämmung und Undichten bei Toren.

**Vorschlag zur Vermeidung:** Abhilfe durch den Einsatz von Schleusen, Schnellluftotoren, aufblasbaren Abdichtungen. Die Übergänge vom Lkw zum Kühllager sollten abgedichtet werden.

- Überfüllung von Kühlmöbeln/ Verdampfer-Luftgitter durch Kühlgut verbaut.

**Vorschlag zur Vermeidung:** Werden die max. Stapelhöhen bei Kühltruhen und Inseln nicht berücksichtigt, kommt es zu einer Unterbrechung des Kaltluftschleiers. Die max. Stapelhöhen sollten unbedingt eingehalten werden. Außerdem muss bei der Beladung darauf geachtet werden, die Luftkanäle nicht mit dem Kühlgut zu blockieren.

- Keine Tag- und Nachtdeckungen bei Kühlmöbeln.

**Vorschlag zur Vermeidung:** Transparente Glasschiebeabdeckungen sowie isolierte Nachtdeckungen minimieren das Eindringen von Umgebungsluft und reduzieren den Einfluss der Infrarotstrahlung.

- Zu kleine Verflüssiger.

**Vorschlag zur Vermeidung:** Durch den Einbau größerer Verflüssiger lässt sich die treibende Temperaturdifferenz optimieren. Durch den Einsatz von gelöteten „micro channel“ Wärmeübertragern können zusätzliche Vorteile erzielt werden wie besserer Wärmeübergang bei gleichzeitiger Reduzierung der Kältemittelmenge.

## Diskussion

Die Untersuchung der Standardvarianten von Supermarktkälteanlagen und die durchgeführten Sensitivitätsanalysen zeigen, dass der Energieverbrauch von Kälteanlagen einen wesentlichen Faktor im Bereich der Umweltlasten (Beitrag zum Treibhauspotenzial) darstellt. Im Bereich der Lebenszykluskosten konnte der Energieverbrauch ebenfalls als wichtiger Kostentreiber identifiziert werden. Vor diesem Hintergrund muss der Steigerung der Energieeffizienz des bestehenden Anlagenparks und künftiger Neuanlagen durch Optimierungsmaßnahmen bei Anlagentechnik und Organisation höchste Priorität beigemessen werden. Dadurch lassen sich Umweltlasten wirksam minimieren und hohe Steigerungen der Betriebskosten bei

künftig steigenden Energiepreisen verhindern. Ergänzend zu energieverbrauchsenkenden Maßnahmen muss auch die Minimierung der Verluste von Kältemitteln weiter vorangetrieben werden. Auch dadurch können die Umweltlasten gesenkt und damit die Ökoeffizienz der Anlage gesteigert werden. Neben den treibhausrelevanten Emissionen ist der Energieverbrauch über die Herstellung der Energie im Kraftwerk auch für die Beiträge zum Versauerungspotenzial, zum Eutrophierungspotenzial und photochemischen Ozonbildungspotenzial verantwortlich. Hier sind vor allem Technologien mit hohem Energieverbrauch nachteilig.

Weiterhin zeigen die Ergebnisse der Studie, dass die Entscheidungsfindung aufgrund rein ökologischer Betrachtungen zu Fehleinschätzungen führen kann. Dies gilt sowohl für Betrachtungen mit ausschließlichem Stoffbezug als auch für solche, die die Stoffanwendung bereits berücksichtigen, wie die Ökobilanz. So würde, einen ausschließlich stoffbezogenen Ansatz angenommen, der Einsatz der Variante R 134a/R 744 in Kaskadenschaltung aufgrund der Verwendung von fluorierten Kohlenwasserstoffen mit hohem spezifi-

schen Treibhauspotenzial beschränkt werden, obwohl dieser Typ sowohl aus ökonomischer als auch aus ökologischer Sicht die besten Eigenschaften aufweist. Eine Entscheidung auf der Grundlage der Ökobilanzergebnisse würde neben der Variante R 134a/R 744 Kaskade auch das System R 717 Sole/R 744 Kaskade favorisieren, obwohl diese geringeren Umweltlasten zu Kosten erkaufte werden, die, investiert in andere Technologien, in deutlich höheren Einsparungen resultieren würden. Vor diesem Hintergrund sollten die Ergebnisse von Ökoeffizienzbetrachtungen bei der Entscheidungsfindung künftig deutlich stärker berücksichtigt werden.

Wenn auch die Ergebnisse aus Ökobilanzen nicht zur alleinigen Entscheidungsfindung herangezogen werden sollen, so zeigen sie doch deutliche Schwachstellen der jeweils untersuchten Prozesse auf. Für die untersuchten Supermarktkälteanlagen zeigen die unter Berücksichtigung der Standardparameter erzielten Ökobilanzergebnisse, dass die Referenztechnologie R 404A NK/ R 404A TK die höchsten treibhauswirksamen Emissionen aufweist. Ein Kältemittelwechsel von R 404A zu R 134a im Bereich der Normal-Kälte hilft, den Anteil dieser Emissionen deutlich zu senken. Zusätzlich könnten aufgrund der Eigenschaften des R 134a Verbundsatzes die Kältemittellemissionen und der Energieverbrauch der Anlage gesenkt werden. Für die bestehenden Supermarktkälteanlagen, die zum größten Teil der Variante R 404A/R 404A entsprechen, zeigen die Ergebnisse der Studie, dass eine Nachrüstung des Anlagenparks z. B. mit intelligenter Regeltechnik hilft, deren Ökoeffizienz zu steigern. Können zusätzlich noch die Kältemittelverluste reduziert werden, kann die Kälteanlagenvariante R 404A/R 404A zur ökoeffizientesten Variante werden.

Können künftig Energieeffizienz vergrößert und Kältemittelverluste minimiert werden, dann weist die Technologie R 134a/R 404A großes Potenzial auf. Die Ergebnisse zeigen, dass bereits eine höhere Energieeffizienz diese Technologie zur ökoeffizientesten Variante der untersuchten Anlagen macht. Eine Reduktion der Kältemittelverluste würde diesen Vorsprung noch verstärken. ■

### Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei den Mitgliedern des Begleitkreises für die zur Verfügung gestellten Daten und die Abschätzung der Betriebsparameter von Supermarktkälteanlagen:

S. Haaf, Linde Kältetechnik GmbH & Co. KG, R. Schmidt und J. Egenolf, REWE-Zentral AG, G. Franz und H. Wendelborn, Danfoss GmbH, K.H. Michelbrink und T. Heidfeld TEKO Gesellschaft für Kältetechnik mbH, U. Schuberth, AVA AG, D. Lorenzen, Emerson Retail Services Europe, E. Preisegger, Solvay Fluor GmbH.

### Literatur

- [1] IEC 60300-3-3 (2005). Dependability management – Part 3-3: Application guide – Life cycle costing
- [2] ISO/EN/DIN 14040 (1997). Umweltmanagement, Ökobilanz, Prinzipien und allgemeine Anforderungen. Berlin: Deutsches Institut für Normung e. V.
- [3] ISO/EN/DIN 14041 (1998). Umweltmanagement, Produkt-Ökobilanz, Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens sowie Sachbilanz. Berlin: Deutsches Institut für Normung e. V.
- [4] ISO/EN/DIN 14042 (2000). Umweltmanagement, Ökobilanz, Wirkungsabschätzung. Berlin: Deutsches Institut für Normung e. V.
- [5] ISO/EN/DIN 14043 (2000). Umweltmanagement, Ökobilanz, Auswertung. Berlin: Deutsches Institut für Normung e. V.
- [6] <http://www.wbcscd.ch>
- [7] Guinée J.B. et al. (2000). An operational guide to LCA. Part 1: LCA in perspective. Leiden University, NL-Leiden.
- [8] Guinée J.B. et al. (2000). Characterisation factors of CML. Version 1.00, Leiden: CML, Januar 2001. <http://www.leidenuniv.nl/interfac/cml/lca2/index.html>