

# Vergleichende Bewertung der Klimarelevanz von Kälteanlagen und -geräten für den Supermarkt

Vorstellung Abschlussbericht UBA Forschungsvorhaben 206 44 300  
Umweltbundesamt  
Dessau - 5. September 2008

Dipl.-Ing. Jan-Martin Rhiemeier  
Ecofys Germany GmbH, Nürnberg

# Überblick

1. Einführung
2. Methodik
3. TEWI-Analysen
4. Vermeidungskostenberechnung
5. Klimarelevanz des deutschen LEH
6. Zusammenfassung

## Projektziele

- Marktübersicht existierender Technologien
- Vergleich der Technologien mit besonderem Fokus auf deren Klimarelevanz und Kosten
- Aktuelle Informationen für Einzelhändler zu klimafreundlicher Kühltechnik
- Wissenschaftliche Hintergründe für den politischen Prozess zur aktuellen Diskussion um Kältemittel und Klimaschutz

## Projektteam

- Ecofys Germany GmbH,  
Jan-Martin Rhiemeier & Dr. Jochen Harnisch
- Hochschule für Technik und Wirtschaft Karlsruhe,  
Prof. Dr. Michael Kauffeld
- Öko-Recherche GmbH,  
Dr. André Leisewitz

## Projektteile

- Marktübersicht (Prof. Kauffeld)
  - Modelltechnologien
  - Technologiedatenblätter
- Bilanzierung und Bewertung (Ecofys)
  - TEWI Analyse
  - Vermeidungskosten
- Verbesserungspotentiale und Lösungsansätze (Öko-Recherche)
  - Energieeffizienz
  - Fördermöglichkeiten
- Int. Konferenz in Berlin 23.05.2007 ( Ecofys)

# Überblick: Bilanzierung & Bewertung

1. Einführung
2. Methodik
3. TEWI-Analysen
4. Vermeidungskostenberechnung
5. Klimarelevanz des deutschen LEH
6. Zusammenfassung

## Projektumfang

- Vorauswahl repräsentativer Ladenformate und Modelltechnologien
- Definition dreier Politikszenarios zur Abbildung unterschiedlicher Kältemittel-Leckagen
- TEWI-Analysen zur Evaluierung der Klimarelevanz verschiedener Modelltechnologien
- Darstellung von Unsicherheiten mittels Monte-Carlo Analyse
- Sensitivitätsanalyse
- Vermeidungskostenberechnung unterschiedlicher Maßnahmen

## Ladenformate\*

Laden-format	Verkaufs-fläche	Kühlmöbel NK	Kühlmöbel TK
Discounter	800 m <sup>2</sup>	22,5 m	40 m
Verbraucher markt	1.500 m <sup>2</sup>	50 m	40 m
SB-Warenhaus	6.000 m <sup>2</sup>	95 m	150 m

\*während eines Projekttreffens mit Einzelhandel und Kältehandwerk gemeinschaftlich ausgewählt



## Modelltechnologien (Discounter)\*

### Normalkühlung (NK)

- I. R404A Direktverdampfung (Referenztechnologie)
- II. R134a Direktverdampfung
- III. Indirekte Anlage R290 (Propan) und flüssigem Kälte­träger
- IV. R744 (CO<sub>2</sub>) Direktverdampfung

### Tiefkühlung (TK)

- I.-IV. Steckerfertige TK-Truhen mit R290

\* während eines Projekt­treffens mit Einzelhandel und Kältehandwerk gemeinschaftlich ausgewählt

## Modelltechnologien (Verbrauchermarkt /SB-Warenhaus)\*

- Ia. R404A Direktverdampfung NK/TK (Referenztechnologie)
- Ib. R134a Direktverdampfung NK & R404A TK
- IIa. R404A Direktverdampfung NK & R744 Kaskade TK
- IIb. R134a Direktverdampfung & R744 Kaskade TK
- III. Indirekte Anlage mit R717 (Ammoniak) und flüssigem Kälte Träger
- IVa. R717/R744 Kaskade mit NK Verteilung über verdampfendes R744
- IVb. R290/R744 Kaskade NK Verteilung über verdampfendes R744
- V. R744 Direktverdampfung NK/TK

\*während eines Projekttreffens mit Einzelhandel und Kältehandwerk gemeinschaftlich ausgewählt

## Politikszzenarien (Kältemittelverluste\*)

Szenario 1: Referenzsituation in 2006

-> **Verlustrate von 11.65 %**

Szenario 2: verbesserte Situation unter Einfluss der EU  
Verordnung (EG) Nr. 842/2006

-> **Verlustrate 6.15 %**

Szenario 3: hohe Anlagendichtigkeit entsprechend VDMA  
Standard 24243-1

-> **Verlustrate 2.65 %**

- Kältemittelverluste hier: Jährliche Verluste während des Betriebs inkl. Havarien  
+ Verluste bei Installation und Entsorgung

## Tatsächliche Kältemitteverluste

- Tatsächliche Kältemittelverluste einzelner Anlagen oftmals deutlich höher
- Dadurch möglicherweise auch durchschnittliche Emissionen höher
- Hauptgrund sind Totalverluste durch Havarien
- Verpflichtende Anlagenlogbücher werden Auskunft bieten

## Energieverbrauch

- Unterliegt großen Schwankungen
- Abhängig von:
  - Anlagenstandort
  - Kälteleistung
  - Verbraucherverhalten
  - Spez. Warenumsatz
  - Umgebungstemperatur
  - etc.

⇒ Erhebung empirischer Werte gewünscht

## Quellen aus dem Einzelhandel

Energieverbräuche und Kältemittelfüllmengen der Referenztechnologie (R404A Direktverdampfung) wurden freundlicherweise von den folgenden deutschen Einzelhändlern zur Verfügung gestellt:

- Aldi Süd
- Lidl
- Metro Group
- Rewe Group
- Tegut
- Tengelmann Group

## Gemittelter Energieverbrauch der R404A Referenzanlage

R404A Referenzanlage [kWh/m]	
	Mittel
Discounter (nur NK)	3.263
Verbrauchermarkt (NK+TK)	2.992
SB-Warenhaus (NK+TK)	3.292

## Energieverbrauch im Discounter

Energieverbrauch			
Auslegungs-variante	Verhältnis zu R404A	Energieverbrauch [kWh/m]	Unsicherheit [%]
I R404A dir. NK	0 %	3.263	+/- 17,5
II R134a dir. NK	-10 %	2.937	+/- 17,5
III ind. R290 NK	+10 %	3.589	+/- 17,5
IV dir. 744 NK	0%	3.263	+/- 17,5

\*Energieverbrauch pro laufenden Meter Kühlmöbel normiert



## Energieverbrauch im Verbrauchermarkt

Modelltechnologie	Verhältnis zu R404A	Energie-Verbrauch [kWh/m]	Unsicherheit [%]
dir. R404A MT+LT	0 %	2.992	+/- 7,5
dir. R134a MT + R404A LT	-7 %	2.783	+/- 7,5
R404A MT + R744 LT	0 %	2.992	+/- 7,5
R134a MT + R744 LT	-7 %	2.783	+/- 7,5
ind. R717	+15 %	3.441	+/- 7,5
R717/R744 MT+LT	-13 %	2.603	+/- 12,5
R290/R744 MT+LT	0 %	2.992	+/- 12,5
dir. R744	0 %	2.992	+/- 7,5

\*Energieverbrauch pro laufenden Meter Kühlmöbel normiert

## Energieverbrauch im SB-Warenhaus

Aufgrund der schlechten Datenlage nur Auslegungsvarianten Ia, III, und V berücksichtigt.

Energieverbrauch			
Auslegungsvariante	Verhältnis zu R404A	Energieverbrauch [kWh/m]	Unsicherheit [%]
Ia dir. R404A	0 %	3.292	+/- 9,0
III indir. R717	+10 %	3.621	+4,5/-20,0
V dir. R744	0 %	3.292	+/- 9,0

\*Energieverbrauch pro laufenden Meter Kühlmöbel normiert

## Unsicherheitsbetrachtung

- Untersuchung der Unsicherheiten der Kältemittelverlusten durch Sensitivitätsanalysen
- Gesonderte Unsicherheitsbetrachtung der Inputparameter Energieverbrauch und Kältemittelfüllmenge
- Ermittlung der resultierenden Schwankungsbreiten mittels Monte Carlo Simulation
- Darstellung der Ergebnisse als Wahrscheinlichkeitsverteilung
- Einbeziehung der Unsicherheiten als Fehlerbalken in die Darstellung im Balkendiagramm

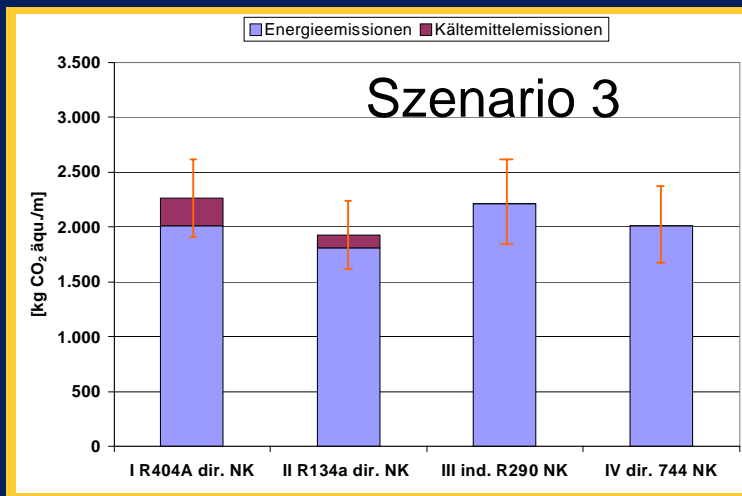
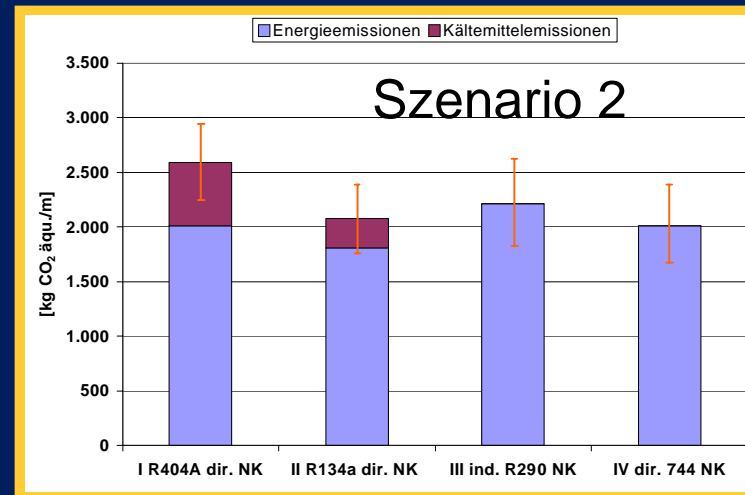
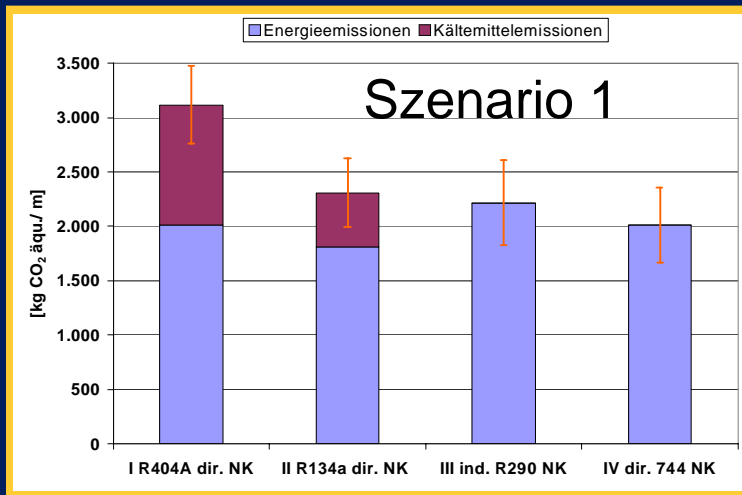
## Zusammenfassung: Methodik

- Definition von repräsentativen Ladenformaten und Modelltechnologien
- Abbildung unterschiedlicher Politikszenarios zur Dichtigkeit
- Energieverbräuche und Kältemittelfüllmengen der Referenzanlage basieren auf empirischen Daten
- Zusammenarbeit mit dem Einzelhandel
- Besondere Betrachtung der Unsicherheiten mittels Monte Carlo Simulation

# Überblick

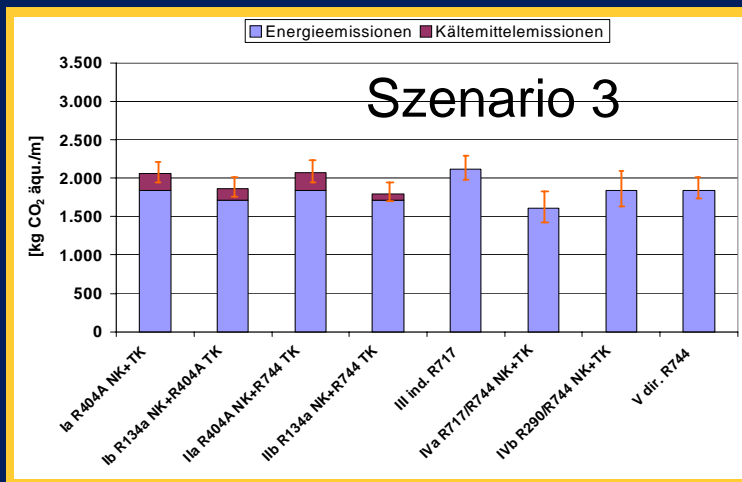
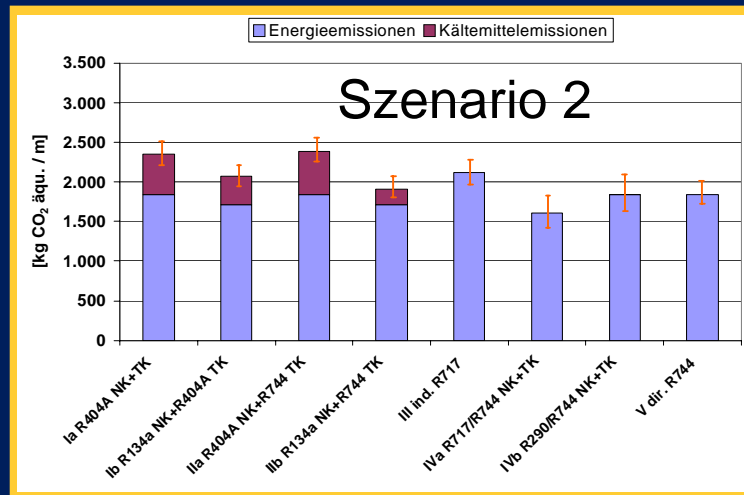
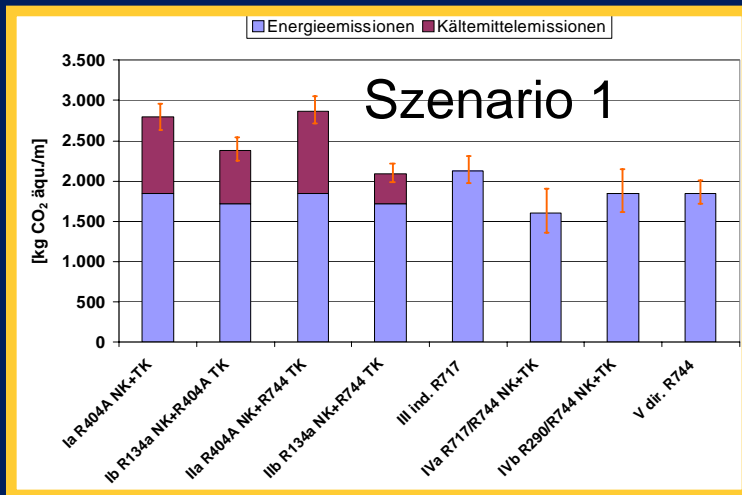
1. Einführung
2. Methodik
3. TEWI-Analysen
4. Vermeidungskostenberechnung
5. Klimarelevanz des deutschen LEH
6. Zusammenfassung

# Ergebnisse: TEWI-Analyse im Discounter

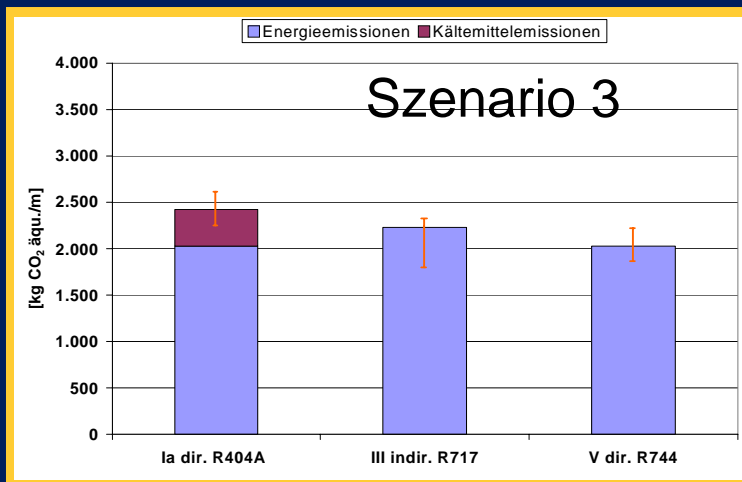
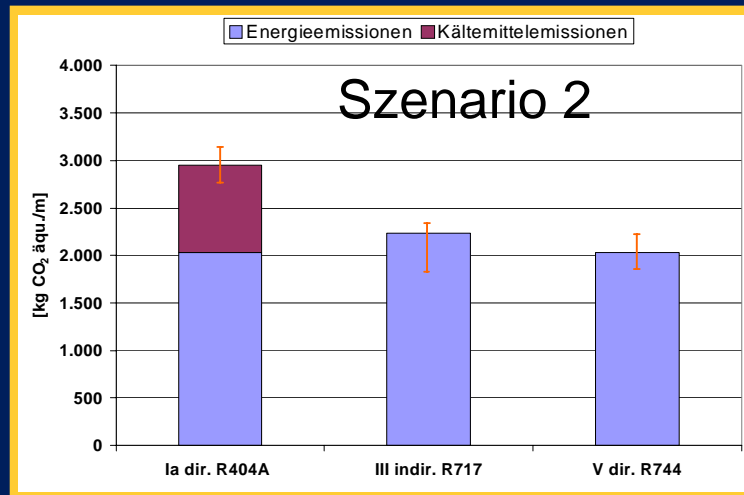
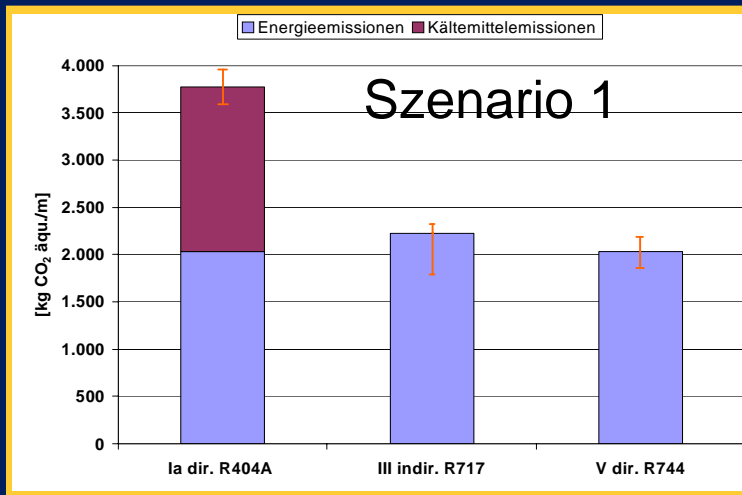


Nur NK, da TK über steckerfertige Truhen bereitgestellt wird.

# Ergebnisse: TEWI-Analyse im Verbrauchermarkt

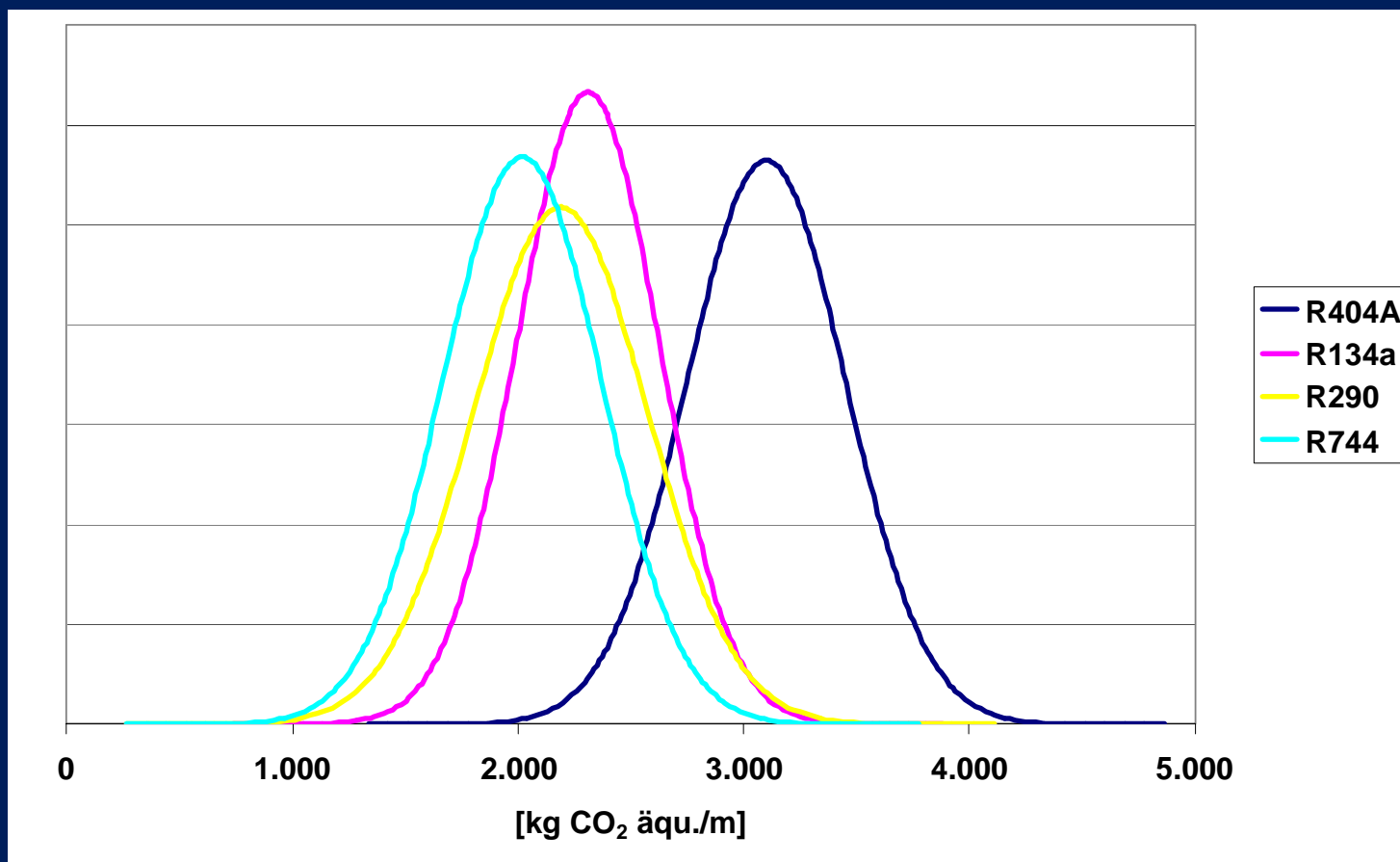


# Ergebnisse: TEWI-Analyse im SB-Warenhaus

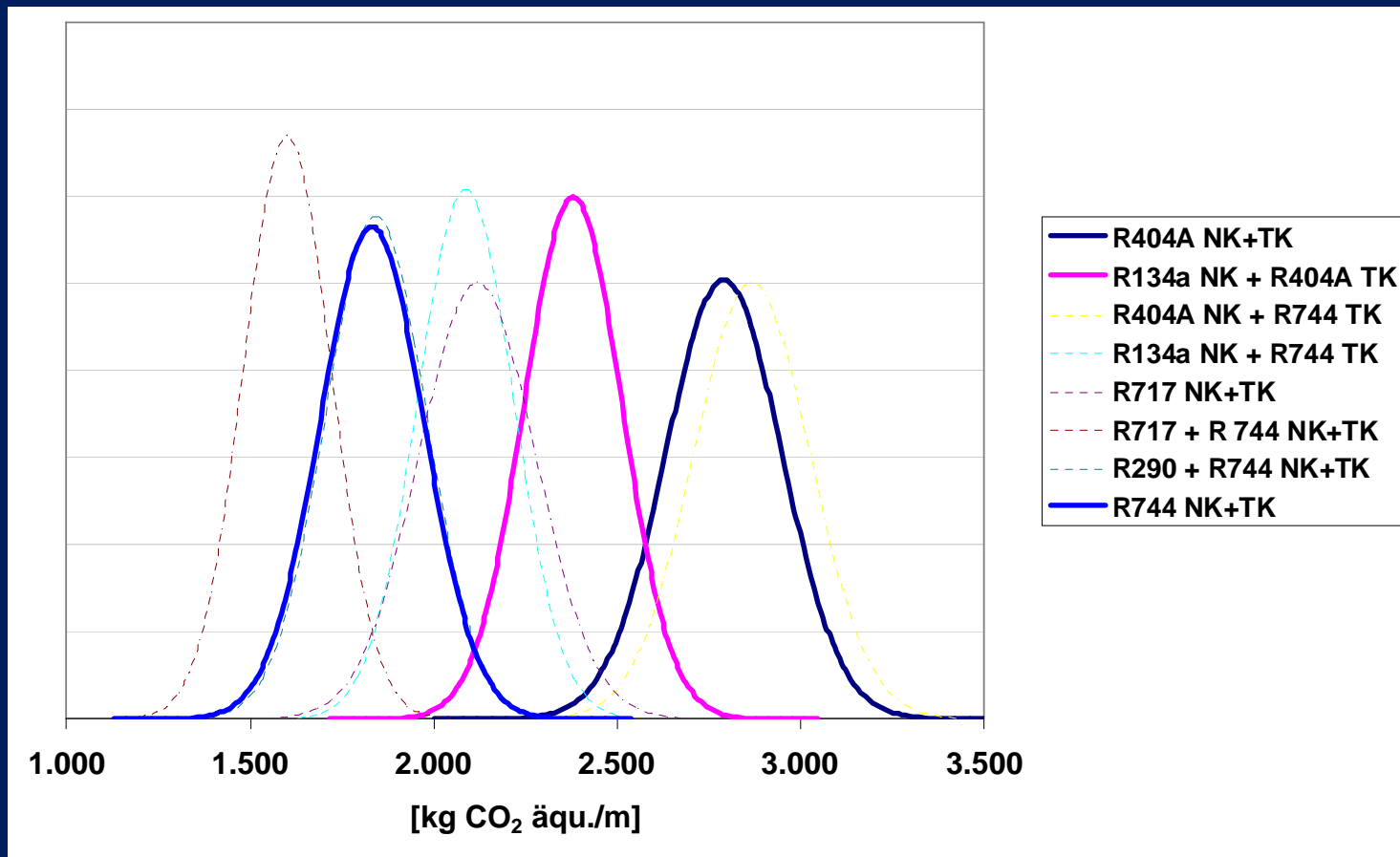




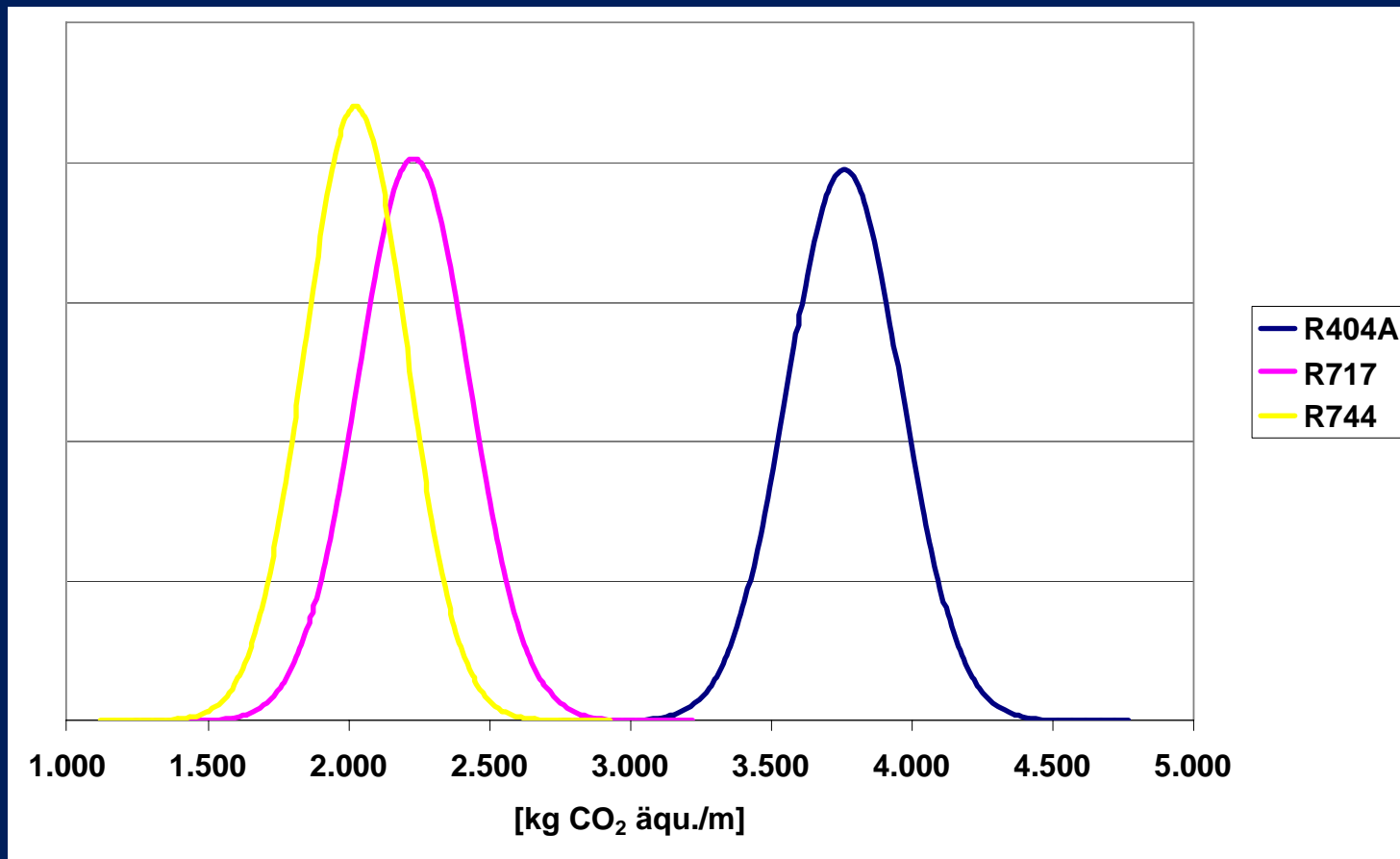
## TEWI-Analyse Discounter ( Unsicherheitsbetrachtung Referenzsituation 11,65 % )



## TEWI-Analyse Verbrauchermarkt ( Unsicherheitsbetrachtung Referenzsituation 11,65 % )



## TEWI-Analyse SB-Warenhaus ( Unsicherheitsbetrachtung Referenzsituation 11,65 % )



## Zusammenfassung: TEWI-Analysen

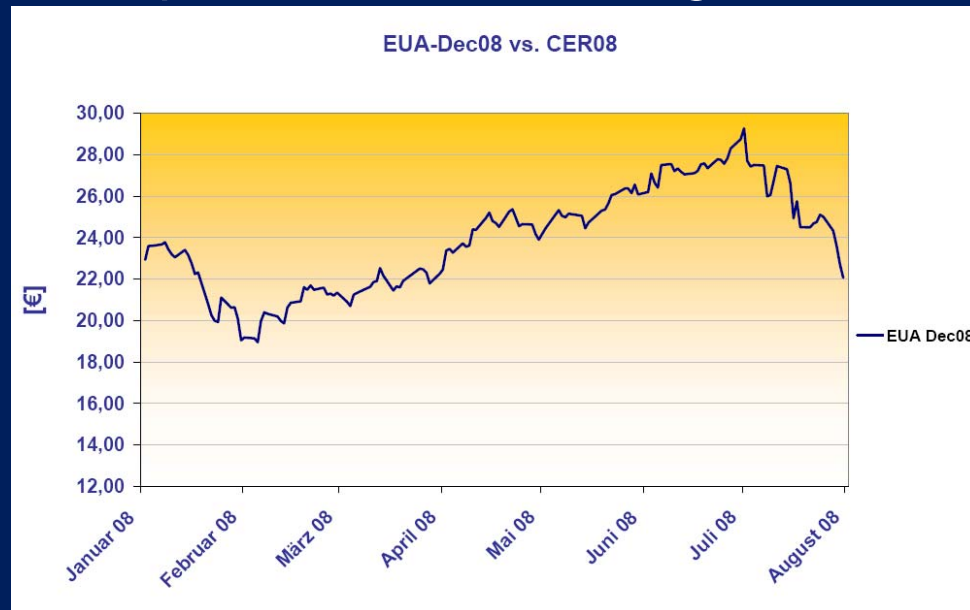
- Bei zunehmender Anlagendichtigkeit nähern sich herkömmlicher Technologie und Modelltechnologien mit natürlichen Kältemitteln an
- Bei hohen jährlichen Kältemittelverlusten sind die Alternativtechnologien mit natürlichen Kältemitteln signifikant überlegen
- Trotz der gegebenen Unsicherheiten schwanken TEWI-Werte nur innerhalb gewisser Bandbreiten
- Reihung der Leistungsfähigkeit daher i.d.R. ohne Einschränkungen möglich

# Überblick

1. Einführung
2. Methodik
3. TEWI-Analysen
4. Vermeidungskostenberechnung
5. Klimarelevanz des deutschen LEH
6. Zusammenfassung

## Vermeidungskosten

- Kosten pro Tonne vermiedenem CO<sub>2</sub>-Äquivalent
- Maß für Kosteneffizienz von Maßnahmen
- Vermeidungskosten für Anlagenlebensdauer von 10 Jahren annualisiert
- Zum Vergleich: CO<sub>2</sub> Marktpreis im EU-ERH liegt derzeit oberhalb € 20



## Kostenbewertung

- Für die 3 Politikszenarios + 1 Übergangsszenario

### Übergangsszenario

- 4 Jahre in Szenario 2 & 6 Jahre in Szenario 3
- HFKW müssen beim Übergang von Szenario 2 zu Szenario 3 nachgerüstet werden  $\Rightarrow$  Erhöhung der Anlagendichtigkeit
- Zusätzliche Kosten für die Nachrüstung von Bestandsanlagen

## Vermeidungskosten für R744 Anlagen [€/t CO<sub>2</sub>]

	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3	Übergangs- szenario
Discounter	<b>90</b>	<b>124</b>	<b>-164</b>	<b>-24</b>
Verbraucher markt	<b>116</b>	<b>178</b>	<b>16</b>	<b>7</b>
SB- Warenhaus	<b>60</b>	<b>90</b>	<b>10</b>	<b>6</b>



# Ergebnisübersicht

		Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3
<b>Discounter</b>				
I	Referenzanlage	B-	B-	B-
II	R134a dir. NK	A+	A+	B+
III	ind. R290 NK	A-	A-	B++
IV	dir. 744 NK	A-	A-	B++
<b>Verbrauchermarkt</b>				
Ia	Referenzanlage	B-	B-	B-
Ib	R134a NK+R404A TK	A-	A-	A-
IIa	R404A NK+R744 TK	B-	B-	B-
IIb	R134a NK+R744 TK	A-	A-	A-
III	ind. R717	A-	A-	B-
IVa	R717/R744 NK+TK	A-	A-	A++
IVb	R290/R744 NK+TK	A-	A-	A++
V	dir. R744	A-	A-	A+
<b>SB-Warenhaus</b>				
I	Referenzanlage	B-	B-	B-
III	ind. R717	A-	A-	B-
V	dir. R744	A-	A-	A++

## KLIMABILANZ:

A: Signifikant der Referenzanlage überlegen

B: Kein signifikanter Unterschied zur Referenzanlage

C: Signifikant der Referenzanlage unterlegen

## KOSTENWIRKSAMKEIT:

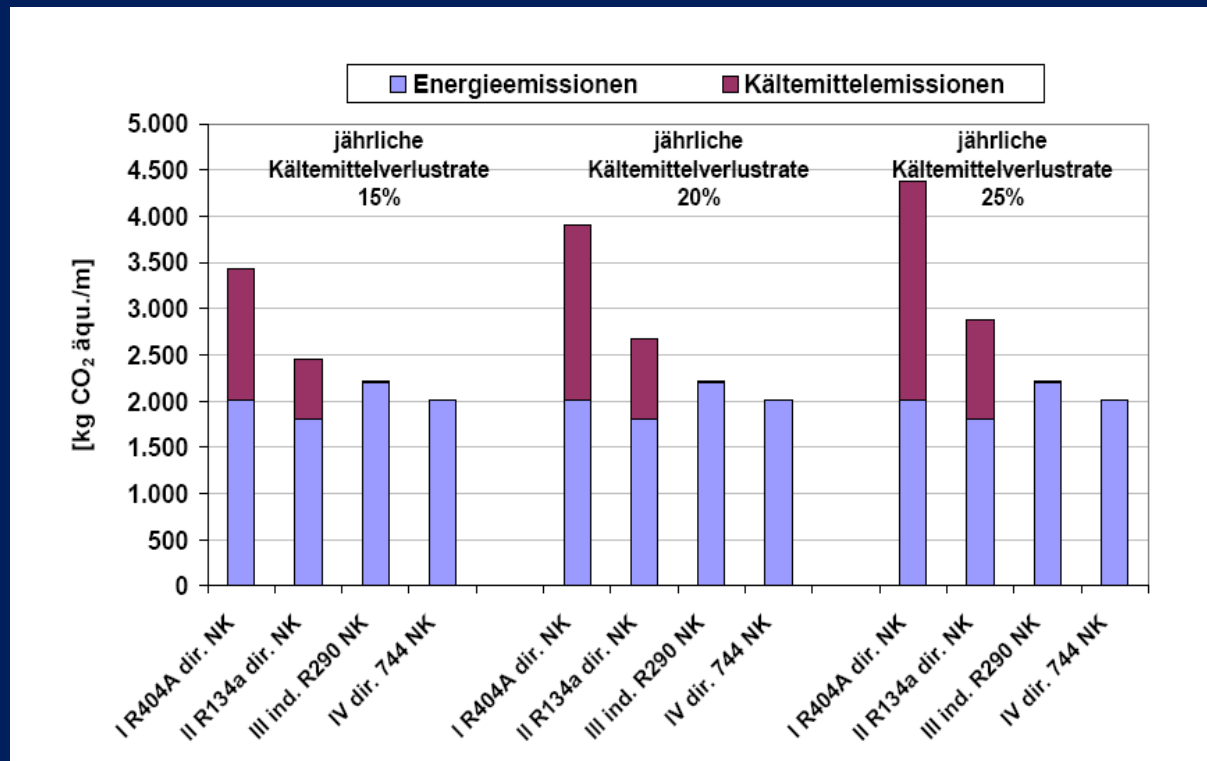
++ : Negative Vermeidungskosten

+ : Vermeidungskosten  $\leq 50$  € pro t CO<sub>2</sub> Äquivalent

- : Vermeidungskosten  $> 50$  € pro t CO<sub>2</sub> Äquivalent

## Sensitivitätsanalyse

Abhängigkeit der Vermeidungskosten vom jährlichen Kältemittelverlust



## Sensitivitätsanalyse

Höherer jährlicher Kältemittelverlust führt zu deutlich höheren direkten Emissionen

	<b>Szenario 1 (11.65 %)</b>	<b>15%</b>	<b>20%</b>	<b>25%</b>
Discounter	<b>90</b>	70	38	18
Verbraucher markt	<b>116</b>	90	55	2
SB- Warenhaus	<b>60</b>	43	26	1

## Zusammenfassung: Vermeidungskosten

- Vermeidungskosten für natürliche Kältemittel zunächst oft vergleichsweise hoch
- Mit zunehmenden politischen Dichtigkeitsanforderungen an Anlagen mit HFKW verringern sich i.d.R. die Vermeidungskosten
- Bei sehr hohen jährlichen Kältemittelverlusten sind Vermeidungskosten aufgrund des größeren Vermeidungspotentials deutlich geringer

# Überblick

1. Methodik
2. TEWI-Analysen
3. Vermeidungskostenberechnung
4. Klimarelevanz des deutschen LEH
5. Zusammenfassung

## Abschätzung der Klimarelevanz des LEH aus errechneten TEWI-Werten

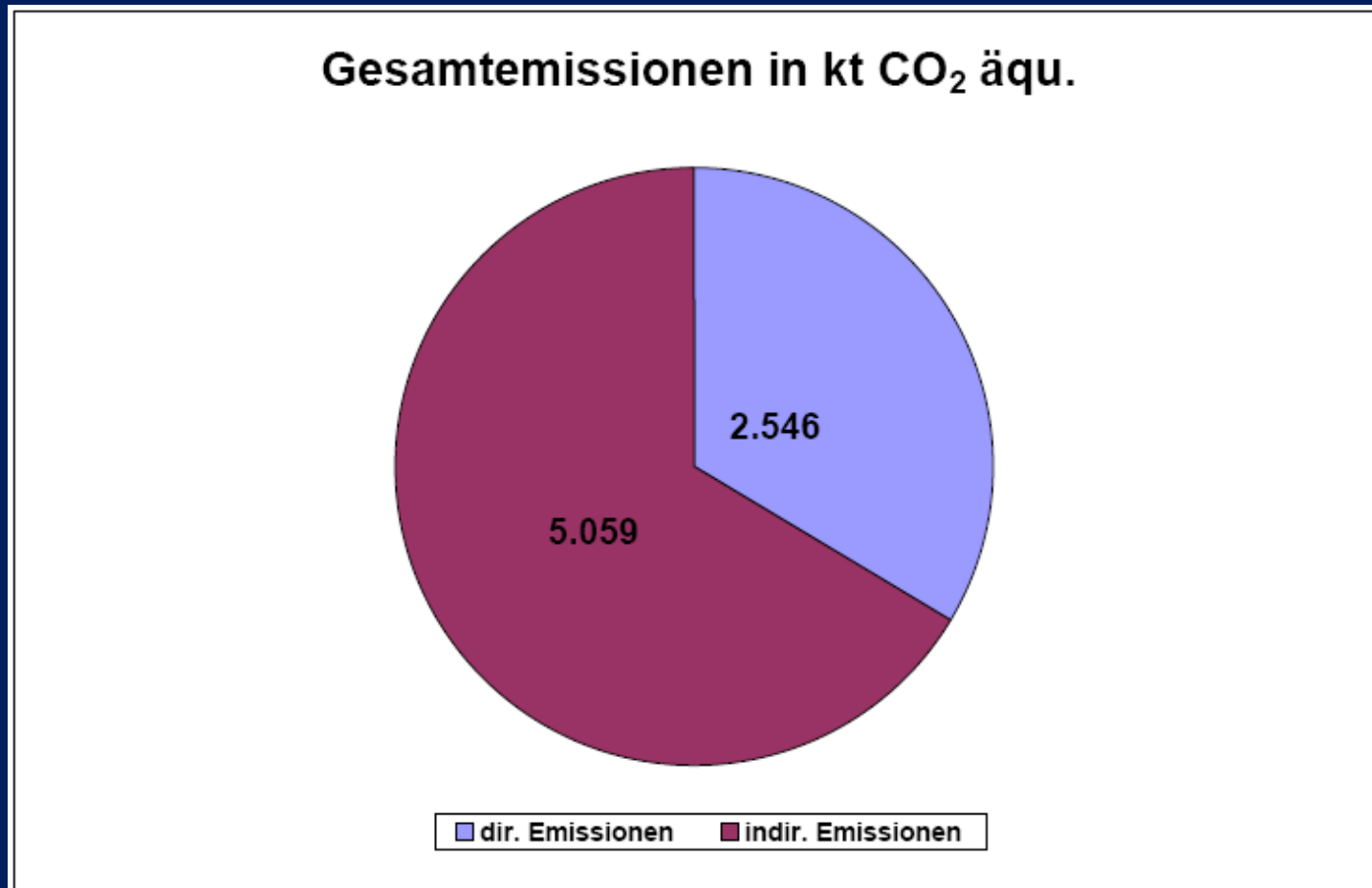
- Hochrechnung der Ergebnisse der TEWI Analysen auf gesamten LEH durch:
  - Normierung der Emissionen pro Markt auf m<sup>2</sup> Verkaufsfläche
  - Annahme: vollständige Umstellung von H-FCKW auf H-FKW
  - Anwendung auf aktuelle Strukturdaten des EHI
- Abschätzung der Emissionen für kleine Märkte
  - Quelle direkte Emissionen Erhebung [Schwarz2005]
  - Quelle indirekte Emissionen Erhebung [Schwarz2005] und Energiekennzahlen [Kruse2002]

## Struktur des deutschen LEH in 2006

	Anzahl	Gesamtverkaufs- fläche [Tsd. m²]	Verkaufsfläche je Markt [m²]
<b>Discounter</b>	14.745	6.050	682
<b>Verbrauchermärkte</b>	8.430	6.650	789
<b>SB-Warenhäuser</b>	2.995	10.050	2.020
<b>Kleine Geschäfte (<math>&lt; 400 \text{ m}^2</math>)</b>	32.740	6.080	186

Quelle: EHI Retail Institut, Köln 2007

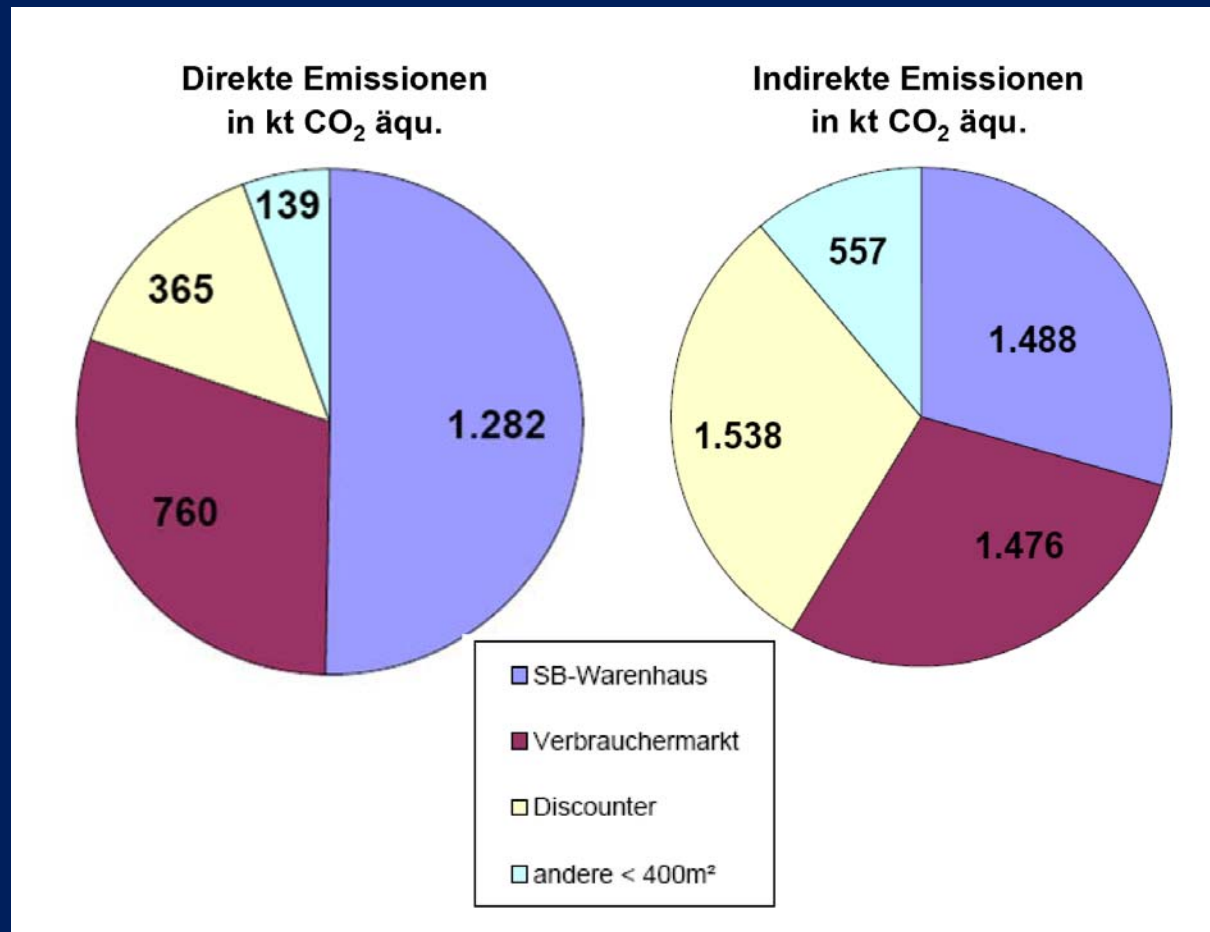
## Emissionen des LEH (1)\*



\* Annahme: Vollständige Durchdringung mit HFKW



## Emissionen des LEH (2)



## Zusammenfassung: Klimarelevanz des LEH

- Direkte und indirekte Emissionen aus kältetechnischen Anlagen im dt. LEH liegen bei ca. 7,5 Mio. t jährlich
- Entspricht in etwa dem Anteil der Bewohner Frankfurts am Treibhausgasausstoß der BRD
- Rund ein Drittel stammen aus der Verwendung von HFKW als Kältemittel

# Überblick

1. Einführung
2. Methodik
3. TEWI-Analysen
4. Vermeidungskostenberechnung
5. Klimarelevanz des deutschen LEH
6. Zusammenfassung

## Zusammenfassung (1)

- Umfassender Überblick der Klimarelevanz verschiedener kältetechnischer Anlagenkonzepte
- Berechnungen beruhen auf einer breiten empirischen Datenbasis
- Detaillierte Unsicherheitsbetrachtung mittels Sensitivitätsanalysen und Monte Carlo Simulationen
- Berechnung von Vermeidungskosten für Alternativtechnologien in unterschiedlichen Politikszenarioszenarien

## Zusammenfassung (2)

- Es existieren zahlreiche Alternativtechnologien, um herkömmliche Anlagen mit HFKW zu ersetzen
- Unter Einbeziehung aller Unsicherheiten bieten Anlagen mit natürlichen Kältemitteln in den meisten Fällen die umweltfreundlichere Lösung
- Vermeidungskosten sind technologiespezifisch und abhängig von den Politikszenerarien
- CO<sub>2</sub>-Technologie wurde in Bezug auf Klimafreundlichkeit und Kosteneffizienz als die beste Alternativtechnologie identifiziert

# Vielen Dank!

**Kontakt:**

Dipl.-Ing. Jan-Martin Rhiemeier  
Ecofys Germany GmbH  
Landgrabenstrasse 94  
90443 Nürnberg  
Tel.: +49 911 994358-10  
E-mail: [j.rhiemeier@ecofys.de](mailto:j.rhiemeier@ecofys.de)