

# Energieeffiziente Kühlung

Von natürlichen Kältemitteln bis zum  
kompletten Verzicht auf Kältemittel!

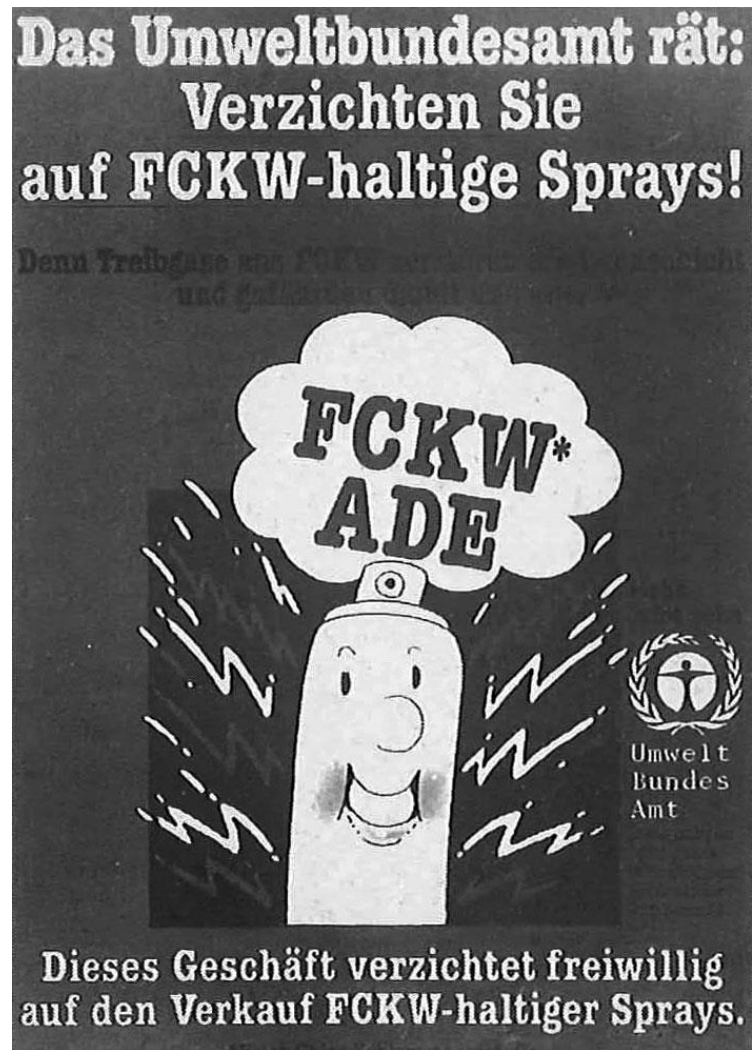


Dipl.-Ing. (FH) Jürgen Willing

Geschäftsführender  
Gesellschafter  
Tekloth GmbH

- Aktuelle gesetzliche Rahmenbedingungen
- Natürliche Kältemittel im Überblick
- Die Renaissance des CO<sub>2</sub>
- Kohlenwasserstoffe – brennbar, aber ...
- „Kältemittelfreie“ Anlagenkonzepte
- Zusammenfassung und Ausblick

- **Aktuelle gesetzliche Rahmenbedingungen**
- Natürliche Kältemittel im Überblick
- Die Renaissance des CO<sub>2</sub>
- Kohlenwasserstoffe – brennbar, aber ...
- „Kältemittelfreie“ Anlagenkonzepte
- Zusammenfassung und Ausblick

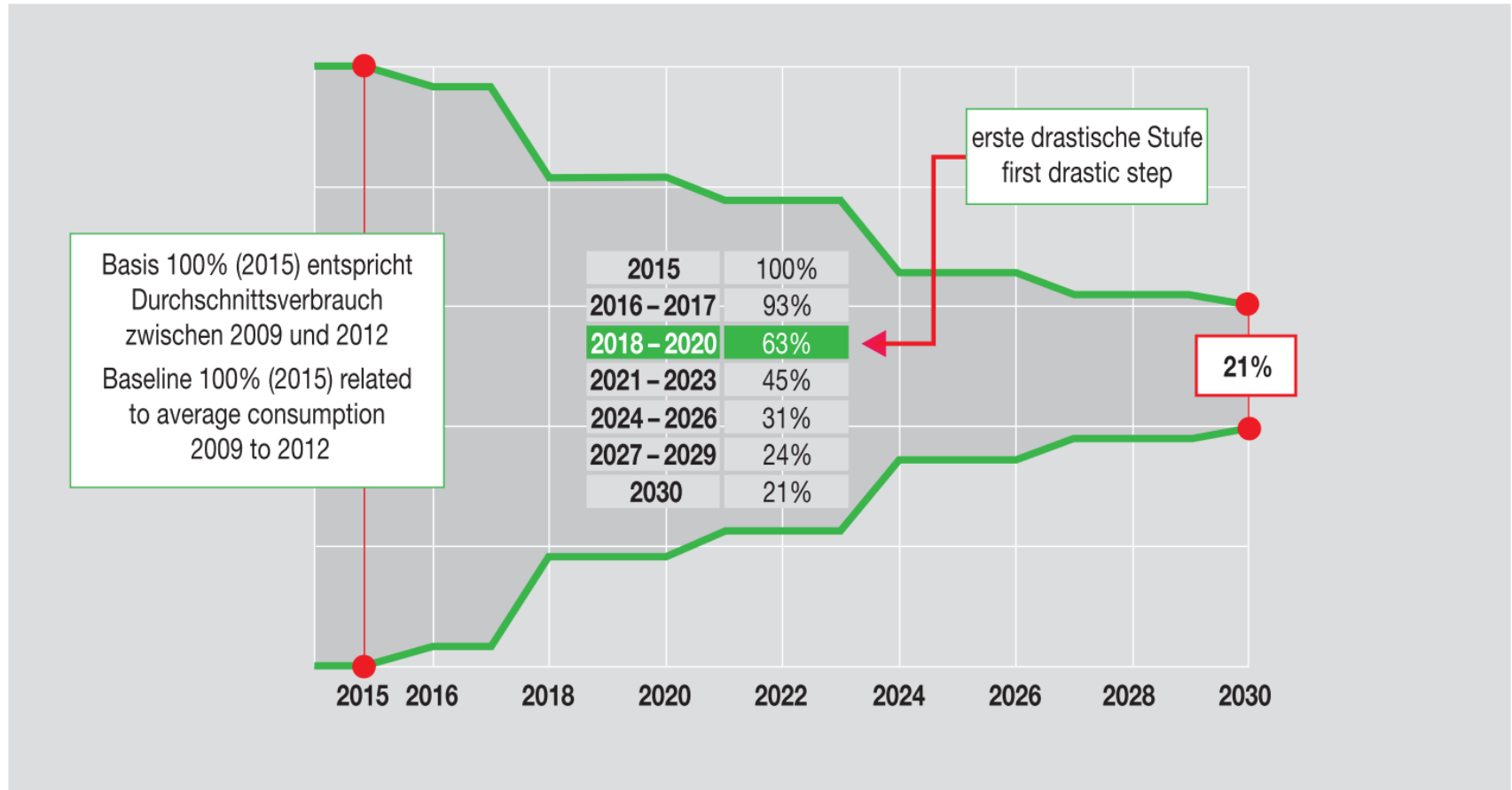


Plakat FCKW von 1978 [Quelle: <http://fuer-mensch-und-umwelt.de/1978/umweltzeichen-bringt-fckw-freie-spraydosen-voran/>]

- 1. Fassung der F-Gase Verordnung (2007) sieht deutlich Reduktion der F-Gase Emission
  - Verbesserte Anlagendichtheit (regelmäßige Dichtheitskontrolle)
  - Rückgewinnung von F-Gasen
  - Anforderungen an die Ausbildung
  - Zertifizierung des Personals
  - Berichterstattung der Kältemittelhersteller
  - Keine Verbote im Bereich der stationären Kälteanlagen
- Ergebnis: Tendenz war erkennbar, die definierten Ziele konnten aber nicht erreicht werden
- Revidierte Fassung (517/2014) trat am 09. Juni 2014 in Kraft und kommt ab 01. Januar in der gesamten EU zu Anwendung

- Verschärfung bisheriger Anforderungen
- Gestufte Reduzierung („Phase Down“) des Verbrauchs von fluorierten Treibhausgasen (F-Gase) um 79 % bis zum Jahr 2030
  - Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalent als Bemessungsgröße
- Quotensystem
- Maximal zulässiger GWP-Wert für eine Reihe von Anwendungen
- Vorschriften zur Emissionsminderung („Containment“), Dichtheitskontrollen und Kennzeichnung
- Mit F-Gasen vorgefüllte Systeme müssen im Quotensystem berücksichtigt werden

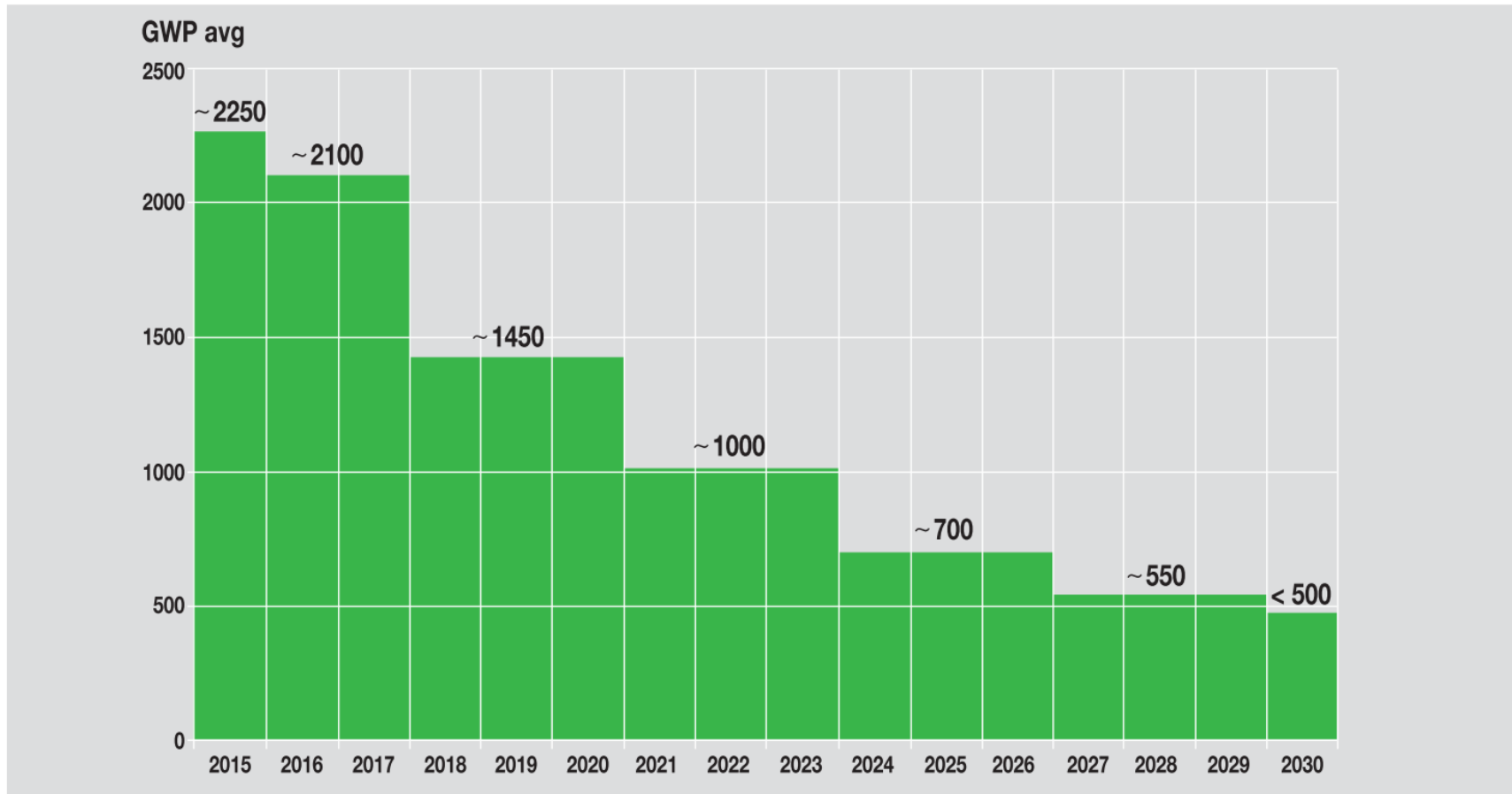
# „Phase Down“ von F-Gasen



Mengenbegrenzung („Phase Down“) bis 2030 [Quelle: Bitzer „Neue EU-F-Gase Verordnung“]

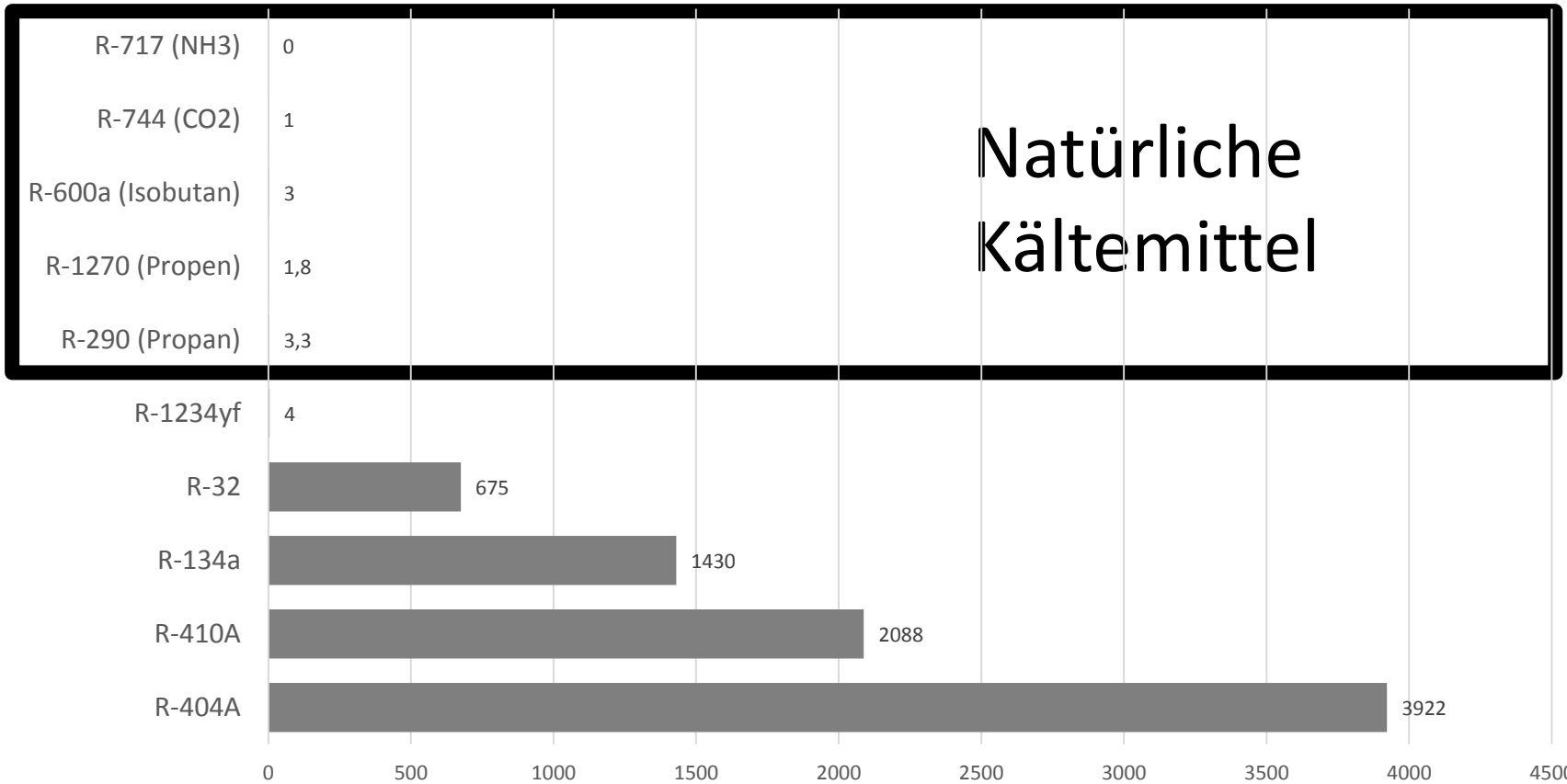


# „Phase Down“ von F-Gasen



Theoretische durchschnittliche GWP-Werte durch Mengenbegrenzung [Quelle: Bitzer „Neue EU-F-Gase Verordnung“]

## GWP-Wert (lt. Datenblätter Westfalen AG)



- Stationärer Bereich
  - Ab 2020 Verbot des Einsatzes von Kältemitteln mit einem GWP über 2500 oder 40 Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalent
  - Ausnahmen:
    - ✓ Militärische Anlagen
    - ✓ Lagertemperatur unter -50 °C
    - ✓ Bestandsanlagen können unter bestimmten Voraussetzungen bis 2030 mit Recycling-Kältemittel aufgefüllt werden

# Verwendungsbeschränkungen/Verbote

Erzeugnisse und Einrichtungen Products and Equipment	Zeitplan / Kältemittel-Optionen Timing / Refrigerant Options												
	KW/HCs	R744 (CO <sub>2</sub> )	R717 (NH <sub>3</sub> )	R404A/R507A	R417B/R422D	R134a	R407A/C/F	R410A	R417A/R427A	R32	HFO*	HFO/HFC Blends GWP < 150	HFO/HFC Blends GWP 150-1500
Kühlgeräte und Gefriergeräte für die gewerbliche Verwendung (hermetisch geschlossene Einrichtungen), die HFKW mit einem GWP ≥ 2500 enthalten – ab 2020 // HFKW mit GWP ≥ 150 – ab 2022  Refrigerators and freezers for commercial use (hermetically sealed equipment) that contain HFCs with GWP of 2500 or more – from 2020 // HFCs with a GWP of 150 or more – from 2022				2020	2020	2022	2022	2022	2022	2022			2022
Ortsfeste Kälteanlagen, die HFKW mit einem GWP ≥ 2500 enthalten oder zu ihrem Funktionieren benötigen, außer Einrichtungen, die für die Anwendung zur Kühlung von Produkten auf unter -50°C bestimmt sind  Stationary refrigeration equipment, that contains, or whose functioning relies upon, HFCs with GWP of 2500 or more except equipment intended for application designed to cool products to temperatures below -50°C						Indirekte Beschränkung durch „Phase-Down“ Indirect restrictions due to phase-down							
Mehrteilige zentralisierte Kälteanlagen für die gewerbliche Verwendung mit einer Nennleistung von 40 kW oder mehr, die fluorierte Treibhausgase mit einem GWP ≥ 150 enthalten oder zu ihrem Funktionieren benötigen, außer im primären Kältemittelkreislauf in Kaskadensystemen, in dem fluorierte Treibhausgase mit einem GWP < 1500 verwendet werden dürfen  Multipack centralised refrigeration systems for commercial use with a rated capacity of 40 kW or more that contain, or whose functioning relies upon, fluorinated greenhouse gases with GWP of 150 or more, except in the primary refrigerant circuit of cascade systems where fluorinated greenhouse gases with a GWP of less than 1500 may be used						Kaskade – Primärkreislauf Cascade – primary circuit					Kaskade – Primärkreislauf Cascade – primary circuit		Kaskade – Primärkreislauf Cascade – primary circuit

\* HFO (Hydro Fluoro Olefins) sind ungesättigte HFKW mit chemischer Doppelbindung. Bei Freisetzung in die Atmosphäre erfolgt ein rascher Zerfall des Moleküls innerhalb weniger Tage mit der Folge eines sehr geringen GWP.

\* HFO (Hydro Fluoro Olefins) are non-saturated HFCs with chemical double bond. When being released to the atmosphere, the molecule rapidly dissociates within a few days, resulting in a very low GWP.

Verwendungsverbote nach Produktgruppe und Kältemittel [Quelle: Bitzer „Neue EU-F-Gase Verordnung“]

- R134a und Gemisch-Alternativen
- R410A
- HFO
  - z.B. R1234yf
- Natürliche Kältemittel
  - Ammoniak (R717)
  - CO<sub>2</sub>
  - Kohlenwasserstoffe: Propan (R290), Propen (R1270)
- Langfristig einsetzbare Systemalternativen werden zu einem hohen Grad mit brennbaren Kältemitteln betrieben werden müssen

# Bewertung von Alternativen

Aktuelle Kältemittel Current Refrigerants		Alternativ-Kältemittel mit reduziertem GWP / Alternative refrigerants with reduced GWP Sicherheitsgruppe / Safety Group					
	GWP	A1		A2L		A3	
		Zusammensetzung Composition	GWP	Zusammensetzung Composition	GWP	Zusammensetzung Composition	GWP
<b>R404A</b>	3922	R407A	2107	R32/.../.../1234yf R32/.../.../1234yf/1234ze	ca. 300 – 400	R290 R1270	3 3
<b>R507A</b>	3985	(R407C)	1774				
(R22)	1810	R407F	1825				
		R32/.../.../1234yf	ca. 1300 – 1400				
		R32/.../.../1234yf/1234ze	ca. 1000 <sup>②</sup>				
<b>R410A</b>	2088	keine direkte Alternative verfügbar no direct alternative available		R32	ca. 400 – 500	R290 <sup>②</sup> R1270 <sup>②</sup>	3 3
				R32/1234yf			
				R32/1234yf/1234ze			
				R32/1234ze			
				R32/...			
<b>R134a<sup>①</sup></b>	1430	R134a/1234yf	ca. 600	R1234yf	4	R290 <sup>③</sup>	3
		R134a/1234yf/1234ze		R1234ze <sup>②</sup>	7		

① Der vergleichsweise geringe GWP (1430) von R134a erlaubt den Einsatz dieses Kältemittels noch auf längere Sicht

② Deutlich geringere volumetrische Kälteleistung als Referenz-Kältemittel

③ Höhere volumetrische Kälteleistung als Referenz-Kältemittel

① The relatively low GWP (1430) allows the use of this refrigerant also longer term

② Significantly lower volumetric refrigerating capacity than reference refrigerant

③ Higher volumetric refrigerating capacity than reference refrigerant

Kältemittel-Alternativen mit reduziertem Treibhauspotenzial [Quelle: Bitzer „Neue EU-F-Gase Verordnung“]

- Aktuelle gesetzliche Rahmenbedingungen
- **Natürliche Kältemittel im Überblick**
- Die Renaissance des CO<sub>2</sub>
- Kohlenwasserstoffe – brennbar, aber ...
- „Kältemittelfreie“ Anlagenkonzepte
- Zusammenfassung und Ausblick

# Wie alles begann ...

- Ammoniak
- Kohlenstoffdioxid
- Schwefeldioxid
- Methylchlorid
- Äthylchlorid
- Dimethyläther
- Propan

**PROPANE**

**“The Odorless Safety Refrigerant”**

PROPANE (C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>) possesses many points of superiority over Ammonia and other refrigerants.

It can be substituted for Ammonia in any compression plant without changing the apparatus.

At atmospheric pressure the boiling point is—49° F.

It is a neutral chemical, consequently no corrosive action occurs.

It is neither deleterious nor obnoxious and should occasion require, the engineer can work in its vapor without inconvenience.

**CAR LIGHTING AND POWER CO.**  
PROPANE DIVISION  
61 BROADWAY NEW YORK

SOLE DISTRIBUTORS OF  
PROPANE REFRIGERATING GAS FOR  
CARBIDE & CARBON CHEMICALS COB.

Stock to Be Carried at the Following Points

ATLANTA, GA	DALLAS, TEXAS	PITTSBURGH, PA.
ALBANY, NY	DALVERNON, ILL.	PLAZANO, OHIO
BALTIMORE, MD.	DENVER, COLO.	SALT LAKE CITY, UTAH
BIRMINGHAM, ALA.	EL PASO, TEXAS	SAN FRANCISCO, CAL.
BOSTON, MASS.	EVANSTON, ILL.	SAN JOSE, CAL.
BROOKLYN, N. Y.	HOUSTON, TEXAS	SEATTLE, WASH.
BUFFALO, N. Y.	INDIANAPOLIS, IND.	SPRINGFIELD, MASS.
CANTON, OHIO	IRVING, TEXAS	ST. LOUIS, MO.
CHICAGO, ILL.	LAKE CHARLES, LA.	TAMPA, FLA.
CHARLESTON, S. C.	MINNEAPOLIS, MINN.	TOLDO, OHIO
CINCINNATI, OHIO	MINNEAPOLIS, MINN.	TULSA, OKLA.
CLEVELAND, OHIO	MINNEAPOLIS, MINN.	UTICA, N. Y.
COLUMBIA, MISS.	MIAMI, FLA.	WASHINGTON, D. C.
DAVENPORT, IOWA	MOBILE, ALA.	WICKLIFFE, OHIO
DENVER, COLO.	MONTGOMERY, ALA.	YOUNGSTOWN, OHIO
DES MOINES, IOWA	MURFREESBORO, TENN.	
DETROIT, MICHIGAN	OKLAHOMA CITY, OKLA.	
	OMAHA, NEB.	
	PHILADELPHIA, PA.	

Anzeige aus der amerikanischen Kältezeitschrift  
„Ice and Refrigeration“

Vom Dezember 1922

[Quelle: Fachzeitschrift KI, 06/07 2011]



... und heute!

- **Ammoniak**
- **Kohlenstoffdioxid**
- Schwefeldioxid
- Methylchlorid
- Äthylchlorid
- Dimethyläther
- **Propan**

- Die Anwendung natürlicher Kältemittel ...
  - ... ist besonders energieeffizient wenn:
    - ✓ Für Normalkühl- und Klimaanlageanwendungen Kohlenwasserstoffe wie Propan (R290), Propen (R 1270) oder Isobutan (R 600a) eingesetzt werden
    - ✓ Für Tiefkühlanwendungen CO<sub>2</sub> (R 744) in unterkritischer Prozessführung verwendet wird
  - ... ist besonders wirtschaftlich, wenn:
    - ✓ Eine integrierte Gebäude- und Anlagenplanung vorgenommen wird
    - ✓ Die vorhandene Abwärme sinnvoll genutzt wird
  - ... bietet eine Reihe weiterer Vorteile
    - ✓ Positives Image
    - ✓ Drastische Reduzierung des CO<sub>2</sub>-Ausstosses
    - ✓ Zukunftssicher

- Aktuelle gesetzliche Rahmenbedingungen
- Natürliche Kältemittel im Überblick
- **Die Renaissance des CO<sub>2</sub>**
- Kohlenwasserstoffe – brennbar, aber ...
- „Kältemittelfreie“ Anlagenkonzepte
- Zusammenfassung und Ausblick

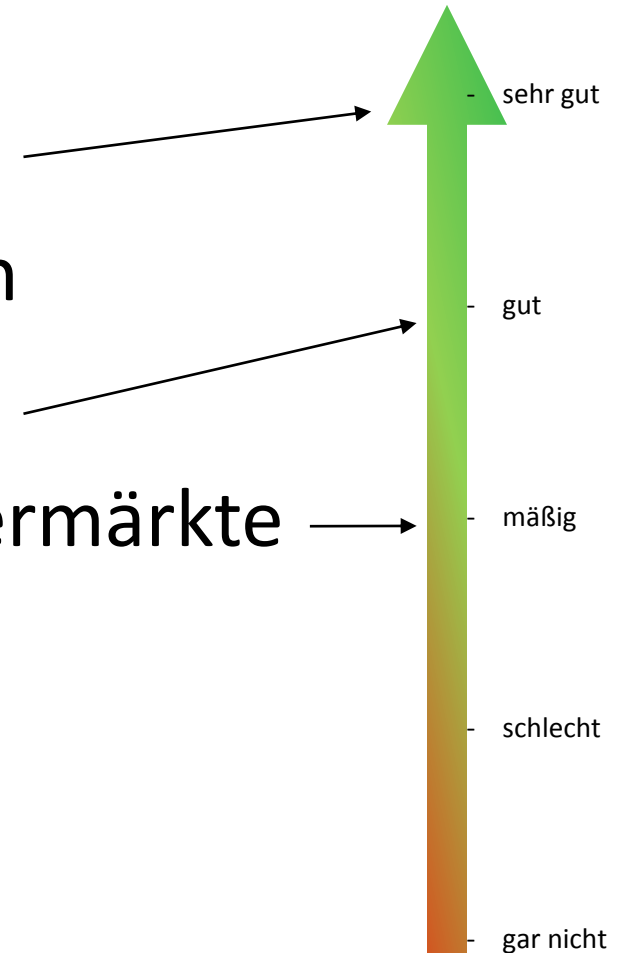
- 1867
  - Erstes britisches Patent für eine CO<sub>2</sub>-Kälteanlage an Thaddeus S. C. Lowe
- 1877
  - Verflüssigung und industrielle Nutzung von CO<sub>2</sub> in Deutschland
- 1881
  - C. Linde baut erste CO<sub>2</sub>-Kompressions-Kältemaschine Europas
- Anfang 20. Jahrhundert
  - Weitere Verbreitung des Kältemittels, insbesondere auf Schiffen
  - Mit der Einführung der FCKW („Sicherheitskältemittel“) ging die Akzeptanz zurück
- 1950
  - 60 % der Schiffs- und 10 % der Landkälteanlagen wird mit CO<sub>2</sub> betrieben

- Ökologisch
  - Natürliches Kältemittel
  - Kein Ozonabbaupotential
  - Minimales Treibhauspotential GWP=1
- Thermodynamisch
  - Sehr hohe volumetrische Kälteleistung
  - Guter COP bei Verflüssigungstemperaturen unter 0 °C
- Physikalisch
  - Kritischer Punkt bei 31 °C, 72 bar (absolut)
- Chemisch
  - Nicht brennbar (Feuerlöschmittel)
  - Gut verträglich mit Kupfer und Stahl
- Physiologisch
  - Nicht toxisch
  - Farblos, Geruchs- und Geschmacksneutral

- Minimaler Treibhauseffekt
- Energieeffizient ( $t_c < 0 \text{ °C}$ )
- Hohe volumetrische Kälteleistung
- Sehr preisgünstig, einfach zu beschaffen
- Sehr hoher Wärmeübertragungswert
- Kleinere Rohrleitungen, KM-Pumpen
- Direktverdampfung möglich
- Nicht brennbar
- Hoher MAK-Wert

- Hohe Drücke bei Umgebungstemperatur
- Schwierig zu detektieren, kein Warneffekt
- Hohe Kosten für Komponenten
- Beschränkte Verfügbarkeit der Komponenten

- Untere Temperaturstufe von Kaskadenanlagen z. B. für TK in Supermärkten und Kühlhäusern
- Warmwasser-Wärmepumpen
- Transkritische Anlagen für Supermärkte





- Tiefkühlung in Supermärkten
- Industriekälte bei Tiefkühlhäusern

<b>Kältemittel</b>	<b>R-744</b>	<b>R-134a</b>	<b>R-404A</b>	<b>R-717</b>
Verdampfungswärme -35°C	312,68	220,10	195,40	1372,59
Verdampfungswärme -10°C	258,29	204,39	177,08	1294,77
Verdampfungswärme 0°C	231,05	197,20	168,88	1260,66
Spez. Volumen -25°C	34,13	295,0	212,6	1272,42
Spez. Volumen 0°C	15,35	104,0	48,56	437,4
Spez. Volumen +10°C	11,43	72,5	35,12	302,95

Spezifische Enthalpiedifferenzen (in kJ/kg und spez. Volumen (in dm<sup>3</sup>/kg bei 10 K Überhitzung [Quelle: Westfalen AG])

- Aktuelle gesetzliche Rahmenbedingungen
- Natürliche Kältemittel im Überblick
- Die Renaissance des CO<sub>2</sub>
- **Kohlenwasserstoffe – brennbar, aber ...**
- „Kältemittelfreie“ Anlagenkonzepte
- Zusammenfassung und Ausblick

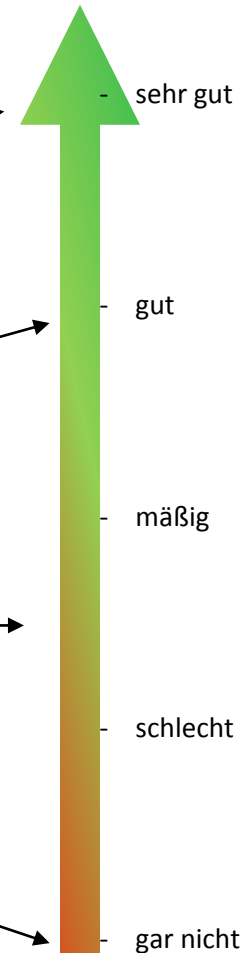
- Kohlenwasserstoffe fanden in den zwanziger Jahren des vorigen Jahrhunderts große Verbreitung
- Mit der Einführung der FCKW ging die Akzeptanz für hochentzündliche Kältemittel zurück
- Aus der Notwendigkeit Alternativen zu den umweltrelevanten (H-)FCKW zu finden sind die Kohlenwasserstoffe als Kältemittel wieder interessant
- Kohlenwasserstoffe kennzeichnen sich als Reinstoff-Kältemittel, durch eine hohe Umweltverträglichkeit und gute thermodynamische Eigenschaften aus
- In praktischer Anwendung ist ein hoher Reinheitsgrad erforderlich
- Brennbarkeit und Explosionsgefahr müssen berücksichtigt werden

- Ökologisch
  - Natürliches Kältemittel
  - Kein Ozonabbaupotential
  - Minimales Treibhauspotential GWP=1
- Thermodynamisch
  - Für hohe Verflüssigungstemperaturen geeignet
  - Guter COP
- Physikalisch
  - Guter Wärmeübergang
- Chemisch
  - Brennbar, explosiv
  - Gut verträglich mit Kupfer (und Stahl)
- Physiologisch
  - Nicht toxisch

- Minimaler Treibhauseffekt
- Sehr preisgünstig
- Hohe volumetrische Kälteleistung
- Einfach zu beschaffen
- Sehr hoher Wärmeübertragungswert

- Brennbar
- Beschränkungen bei Füllmengen
- Ex-Schutz/Eigensicherheit für Schaltschrank

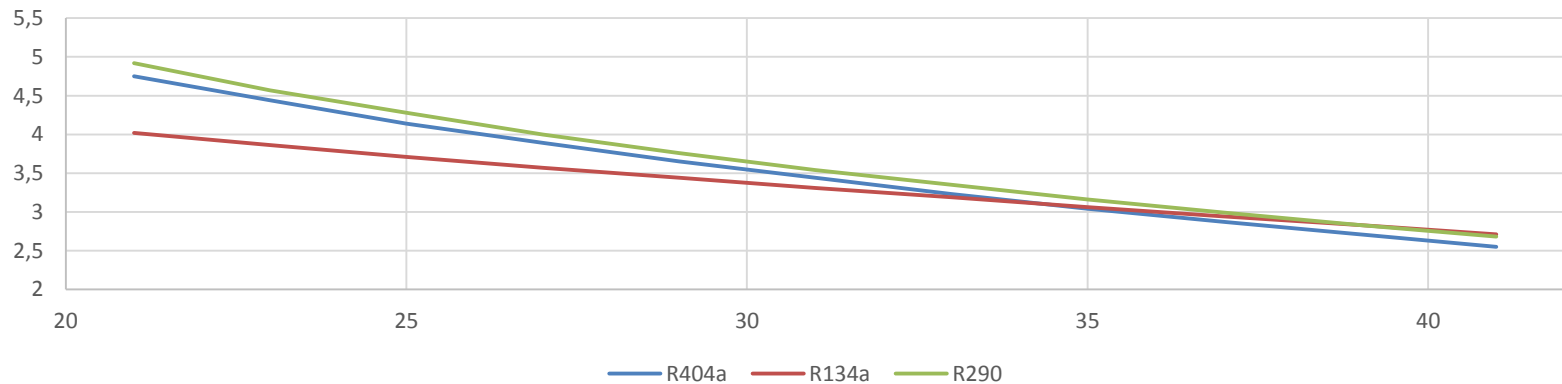
- Anlagen mit sehr kleinen Füllmengen (Kühlschränke), große Kälteleistungen bei Turbo-KM (ex-geschützt, Raffinerien)
- Im Freien aufgestellte Anlagen mit Sekundärkreisläufen
- Anlagen in Untergeschossen
- Direktverdampfung in öffentlich zugänglichen Räumen



- Brennbare Kältemittel sind unter folgenden Voraussetzungen problemlos einsetzbar:
  - Verwendung von sekundärseitigen Kälte-trägerkreisläufen
  - Verwendung werksgefertigter Kompaktanlagen oder Chillern
  - Verwendung von Primärkreisläufen außerhalb des Gebäudes oder in überwachten Bereichen
  - Einsatz von geschultem Fachpersonal
- Ein integraler Planungsansatz
  - ermöglicht eine optimale Ausnutzung der Abwärme
  - führt zu einer deutlichen Reduzierung der Life-Cycle-Kosten



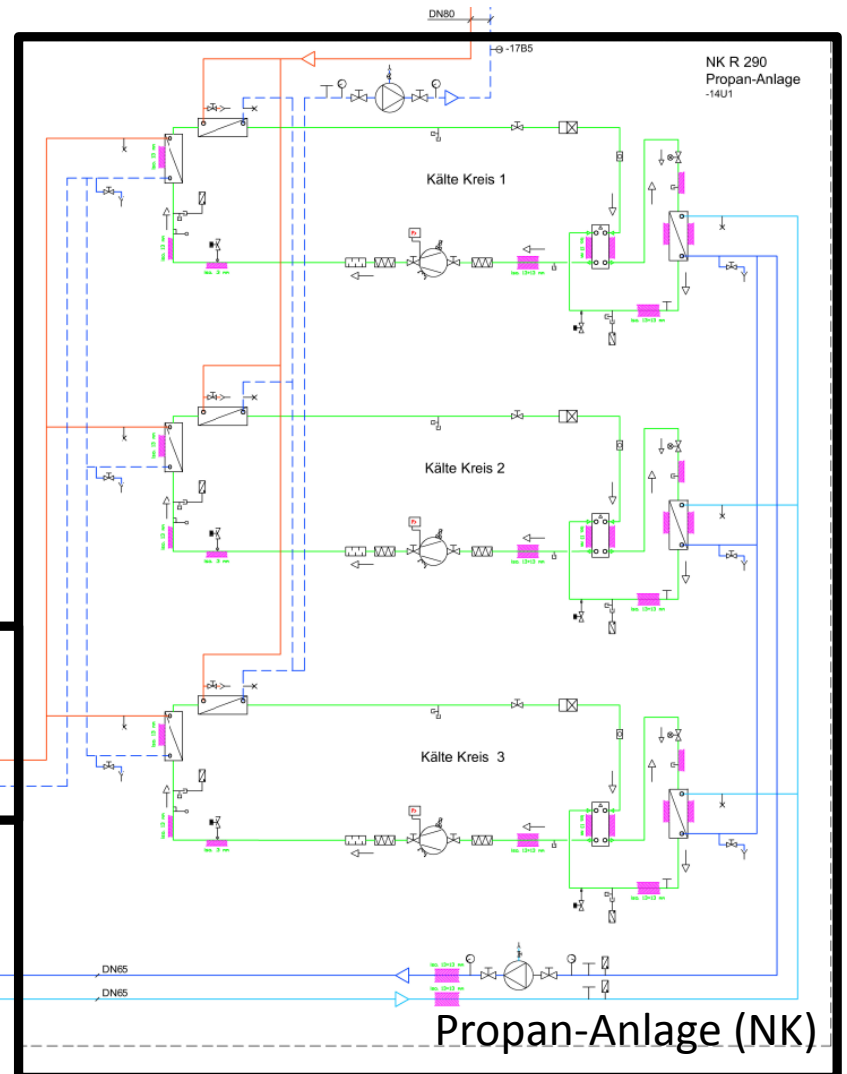
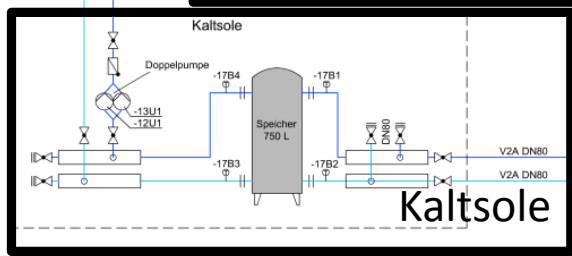
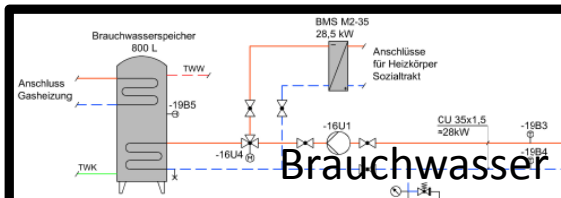
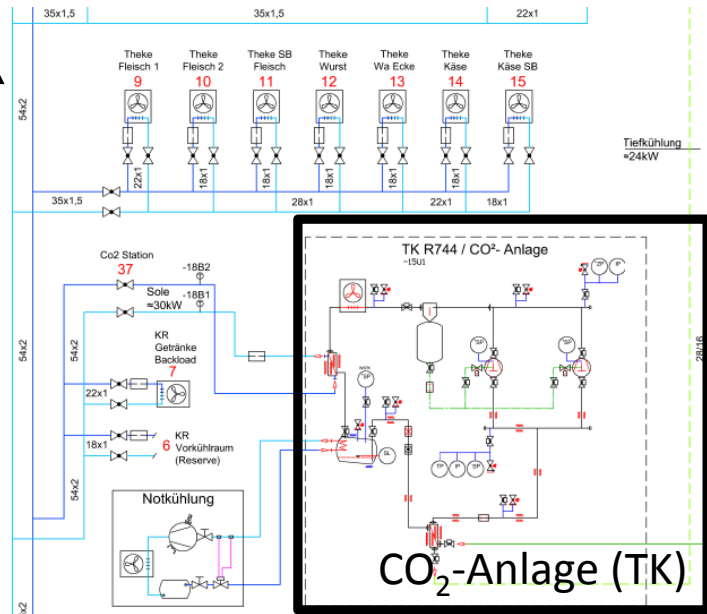
- Steckerfertige Kühl- und Tiefkühlschränke
- Gewerbliche Kompakt-Kühlgeräte
- Kaltwassersätze und Wärmepumpen mit Sekundärkreislauf zur Klimatisierung
- Energetischer Vergleich (mit realen Verdichter COP's in Abhängigkeit der Verflüssigungstemperatur)



Fabr. Bock, halbhermetische Kolbenkompressoren,  $T_0 = -8 \text{ °C}$ ,  $T_{0h} = 20 \text{ °C}$ ,  $dT_{0h} = 100 \text{ %}$  [Quelle: Secon, BockVAP 9.0]

# Anwendungsbeispiel

zu den Kälte-Verbrauchern



- Aktuelle gesetzliche Rahmenbedingungen
- Natürliche Kältemittel im Überblick
- Die Renaissance des CO<sub>2</sub>
- Kohlenwasserstoffe – brennbar, aber ...
- **„Kältemittelfreie“ Anlagenkonzepte**
- Zusammenfassung und Ausblick

- Natürliche Wärme- und Kältequellen nutzen
  - Brunnenkühlung
- Vorhandene Abwärme nutzen
  - Prozesswärme
  - Absorptionskältemaschine mit Wasser als Kältemittel
- Potential der freien Kühlung ausschöpfen
  - SEHS



Neubau eines Bürogebäudes in Bochum

## Nachhaltig wandelbar

Unter dem Titel „Blue Office“ entstand am östlichen Rand des Technologie-Quartiers in Querenburg ein zukunftsweisendes Bürogebäude mit energieeffizientem Gesamtkonzept. Hierfür waren Problemlösungen wie Wärmepumpen, Lüftungsgeräte und Kühldecken interessant, die sich durch ihren Wirkungsgrad und ihre Möglichkeiten von anderen abheben.

**Architekt:**  
Thomas Schmidt,  
Schürmann Spannel AG,  
Bochum

Auf dem ehemaligen Gelände der Zeche Mansfeld entstand in den letzten Jahren das Bochumer Technologiequartier. Schwerpunkt des Areals ist der Wissens- und Technologietransfer zwischen Hochschulen und der Wirtschaft. Der Standort des Quartiers bietet durch seine Verkehrsanbindung, die Nähe zur Innen-

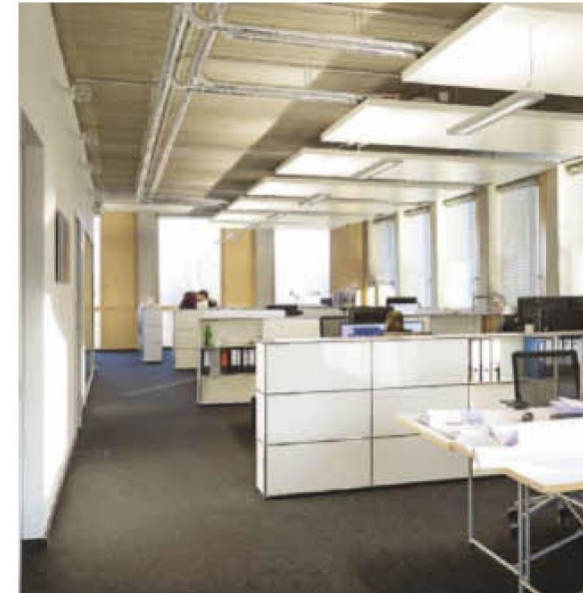
stadt und die Verbindung zu vorhandenem Forschungspotenzial herausragende Qualitäten für technologieorientierte Unternehmen. Als das größte integrale Planungsbüro im Ruhrgebiet umfasst SSP Architekten- und Ingenieurleistungen, Städtebau/Gebietsentwicklung, Projektsteuerung, Gutachten, Life-Cycle-Bera-

tung und Gebäudemanagement.

**Der charakteristische Planungsprozess des Büros beruht darauf, Architekten, Stadtplaner, Haustechnikingenieure, Sachverständige und Immobilienökonominnen in die Projekt-konzeption und -planung von Gebäuden einzubinden.**



„Blue Office“ ist ein zukunftsweisendes Bürogebäude am östlichen Rand des Technologie-Quartiers in Querenburg.  
Bild: Jörg Hempel, Aachen



[Quelle: bba 7-8 (2014)]

- Serverroom Energysaving and Heatrecovery System
- Funktionsweise
  - Direkte freie Kühlung
  - Versorgung der Serverräume mit Zuluft aus nicht oder geringbeheizten Bereichen
  - Raumtemperaturabhängige Luftvolumenstromregelung
- Ziel
  - Reduzierung der Betriebskosten
  - Nutzung der Serverraumabwärme zur Beheizung anderer Bereiche
  - Hohe Betriebssicherheit gewährleisten





- Aktuelle gesetzliche Rahmenbedingungen
- Natürliche Kältemittel im Überblick
- Die Renaissance des CO<sub>2</sub>
- Kohlenwasserstoffe – brennbar, aber ...
- „Kältemittelfreie“ Anlagenkonzepte
- **Zusammenfassung und Ausblick**

- Drastisches „Phase Down“ des Verbrauchs von F-Gasen
- Mehr als 150 Jahre Erfahrung im Umgang mit natürlichen Kältemitteln
- Natürliche Kältemittel können nachhaltig und langfristig eingesetzt werden (geringer GWP)
- Eine integrale Gebäude- und Anlagenplanung ist elementar

- Die Kältebranche wird einen enormen Umbruch erfahren
- Langfristig einsetzbare Systemalternativen werden zu einem hohen Grad mit brennbaren Kältemitteln betrieben werden müssen
- Risiken sind kalkulierbar und beherrschbar

Vielen Dank  
für Ihre  
Aufmerksamkeit!