Thermische Kälteerzeugung – Ein Beitrag zum Klimaschutz

Prof. Dr. Uli Jakob

Dr. Jakob energy research GmbH & Co. KG

12.01.2022

This project has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement **N° 847095**

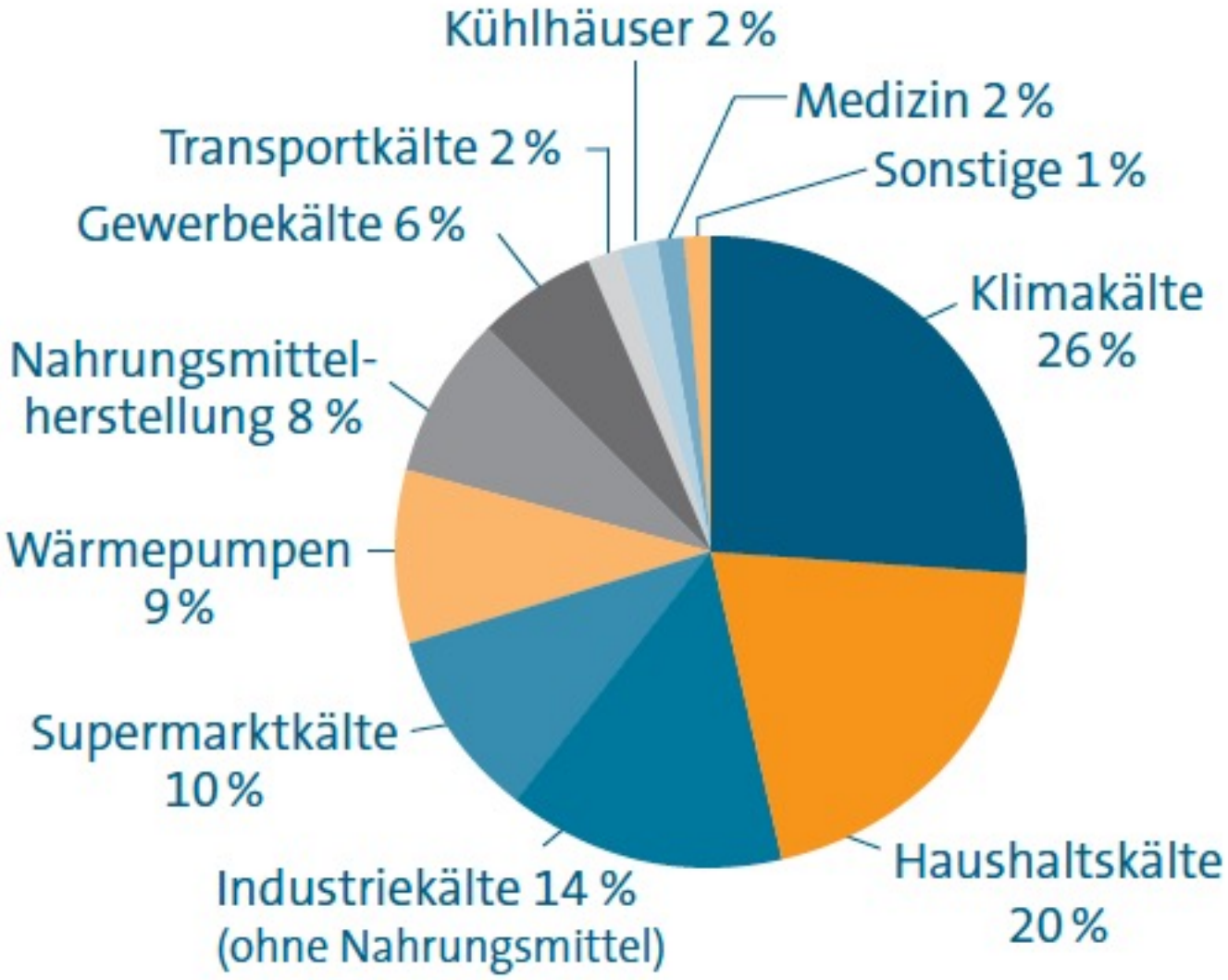
Hintergrund

Thermische Kälteerzeugung bietet die Möglichkeit den CO_2 Fußabdruck in der Produktion zu verringern und Klimaschutz direkt umzusetzen.

Im **Jahr 2017** war der **Endenergiebedarf** für **elektrisch betriebene Kältetechnik 73 TWh/a**.

Das sind **14% des gesamten deutschen Stromverbrauchs für Kältetechnik.**

Gesamtenergiebedarf Kältetechnik in Deutschland (2017)



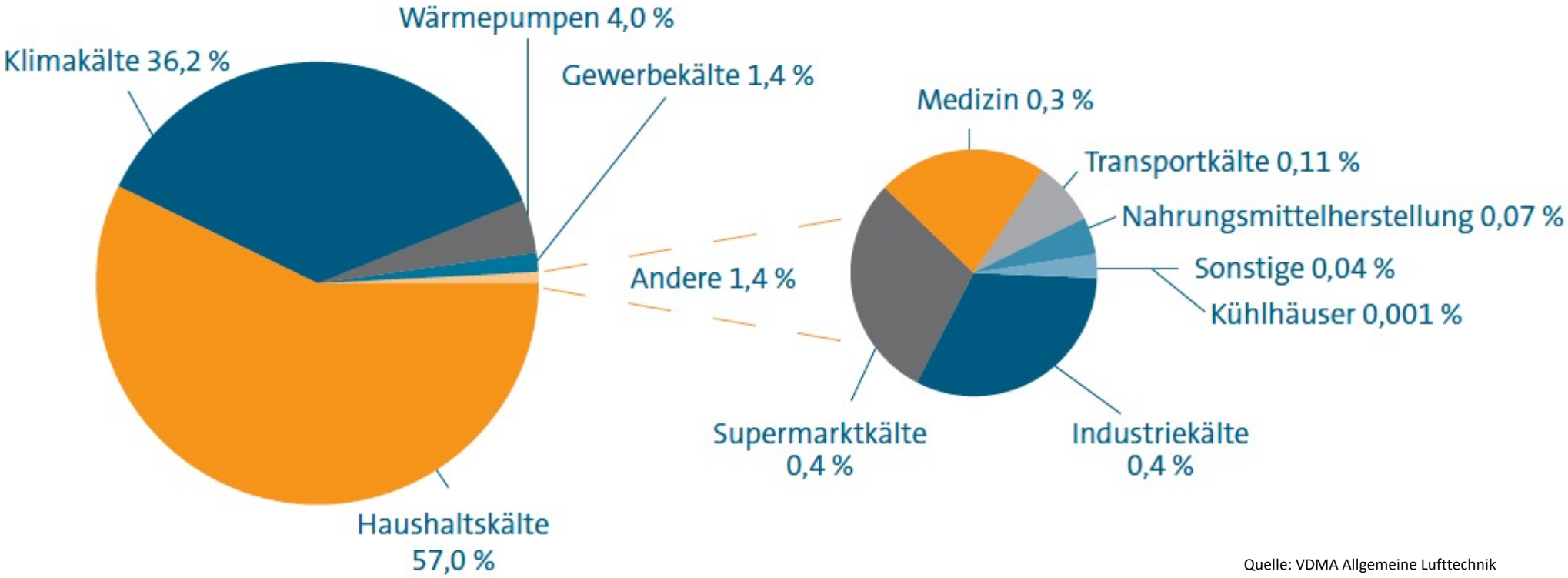
Quelle: VDMA Allgemeine Lufttechnik

© dr. jakob energy research GmbH & Co. KG

dr. jakob energy research

Anzahl der Kältesysteme in Deutschland (2017)

144 Mio. Kältesysteme



Quelle: VDMA Allgemeine Lufttechnik

© dr. jakob energy research GmbH & Co. KG

dr. jakob energy research

Problemfeld Kältetechnik

Hoher Stromverbrauch

Konventionelle elektrisch betriebene Kältemaschine

Für Erdklima problematische Kältemittel (Leckage Raten 5-15 %/a)

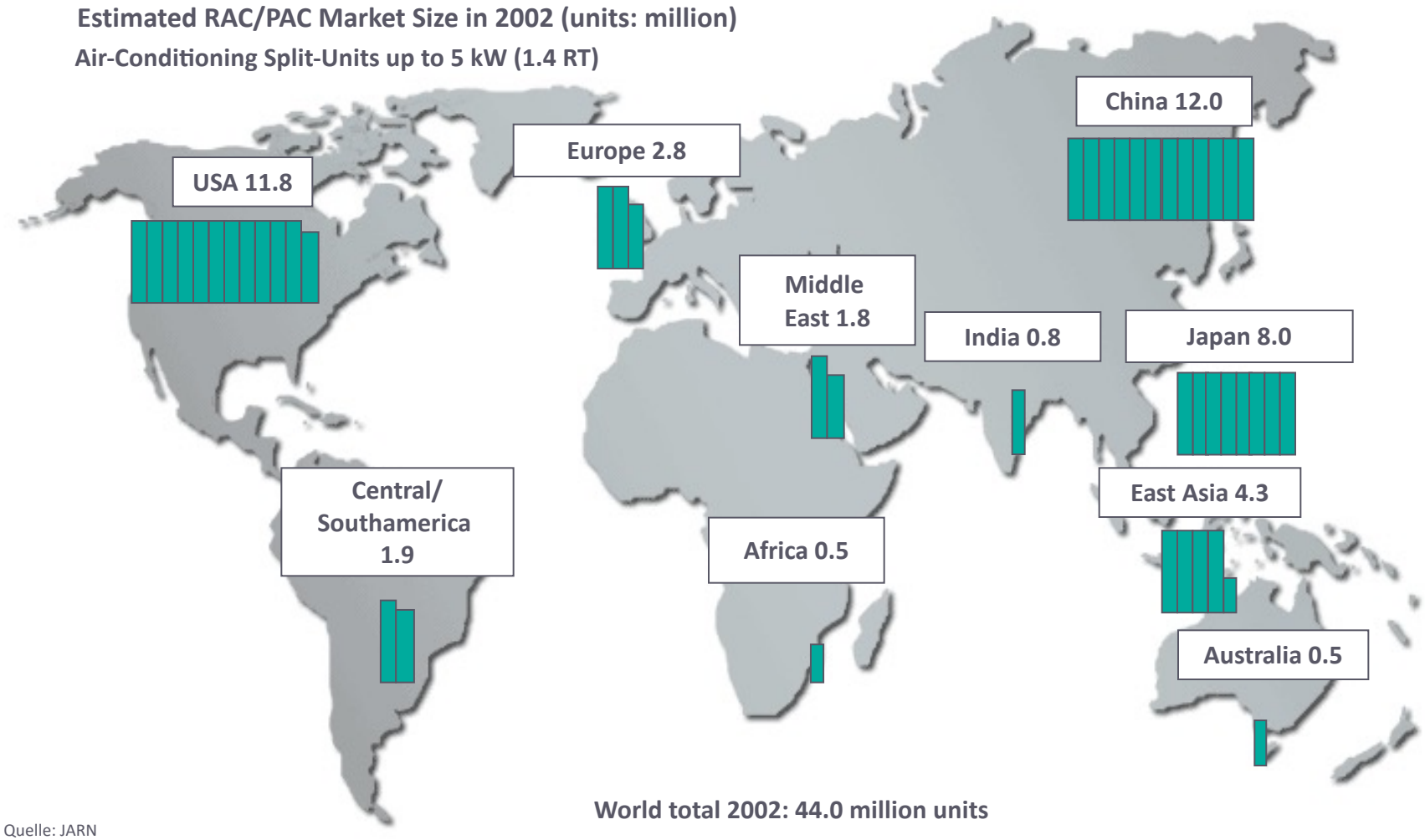
Black Out

Netzüberlastung

© dr. jakob energy research GmbH & Co. KG

dr. jakob energy research

Marktsituation konventionelle Kältetechnik weltweit (2002)

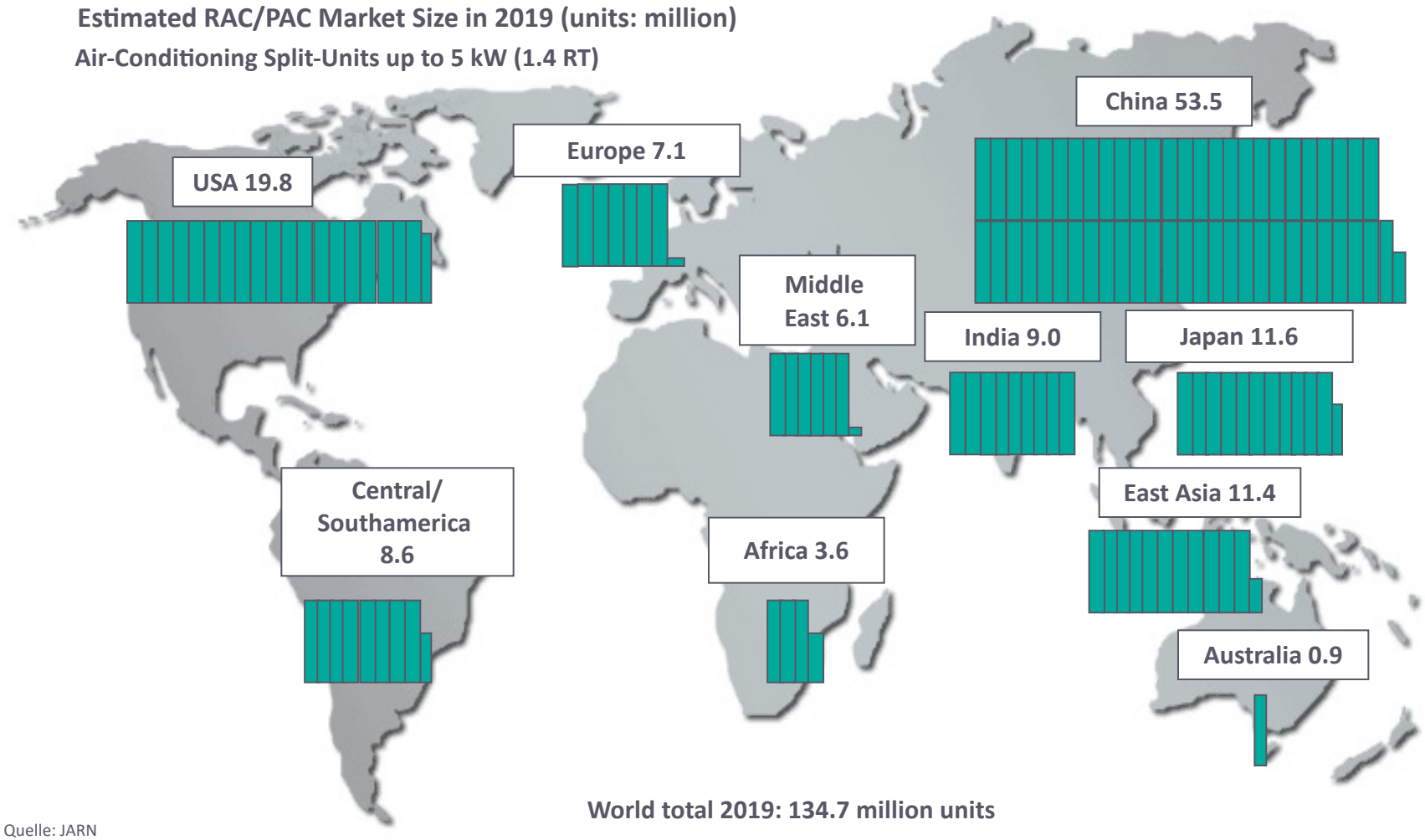


Quelle: JARN

© dr. jakob energy research GmbH & Co. KG

dr. jakob energy research

Marktsituation konventionelle Kältetechnik weltweit (2019)

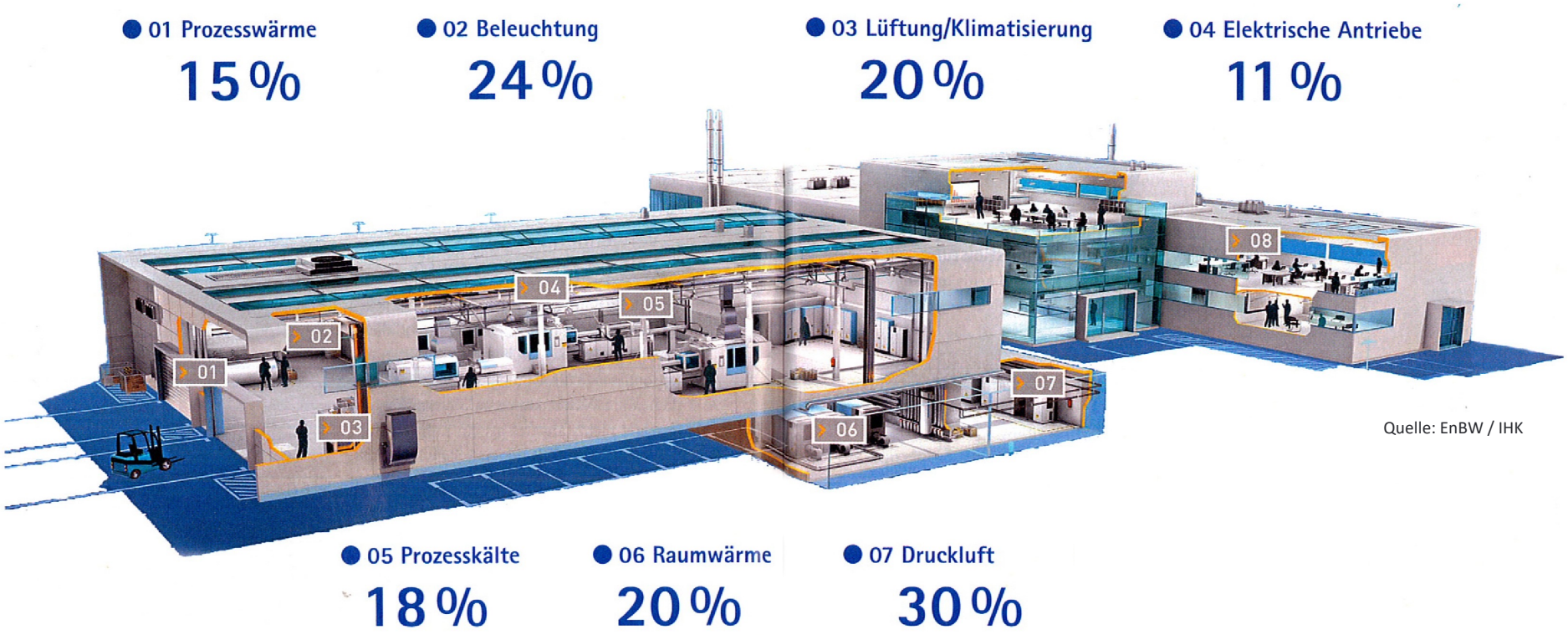


Quelle: JARN

© dr. jakob energy research GmbH & Co. KG

dr. jakob energy research

Energieeinsparpotential Fabrik

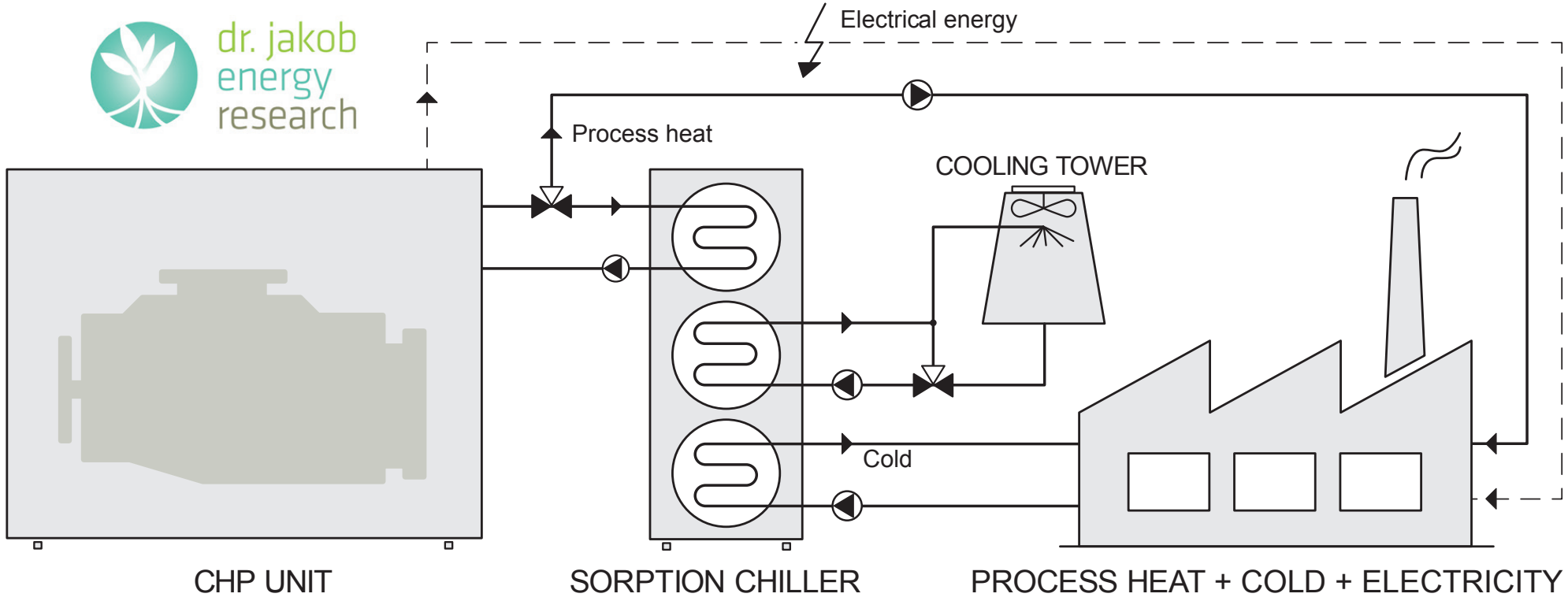


Quelle: EnBW / IHK

© dr. jakob energy research GmbH & Co. KG

dr. jakob energy research

Lösung thermische Kälteerzeugung / KWKK in der Industrie



CHPC SYSTEM FOR MANUFACTURING PROCESSES

Quelle: JER

© dr. jakob energy research GmbH & Co. KG

Kälteverfahren

- Kälteprozesse
  - Kaltdampfmaschine
    - Mechanischer Antrieb
      - Kompressionsprozess
    - Thermischer Antrieb
      - Absorptionsprozess
      - Adsorptionsprozess
      - Dampfstrahlprozess
  - Kaltgasmaschine
    - Mechanischer Antrieb
      - Joule Prozess
      - Stirling Prozess
    - Thermischer Antrieb
      - Vuilleumier Prozess

<u>Physikalischer Kälteeffekt:</u>
Verdampfen einer Flüssigkeit

<u>Physikalischer Kälteeffekt:</u>
Gasentspannung durch Volumenarbeit

© dr. jakob energy research GmbH & Co. KG

dr. jakob energy research

Historie mechanische und thermische Kälteprozesse

Kompressionskältemaschine
Jacob Perkins
1834

Absorptionskältemaschine
(NH_3/H_2O)
Ferdinand Carre
1859

Adsorptionskältemaschine
(SO_2/Silikagel)
E.B. Miller
1925

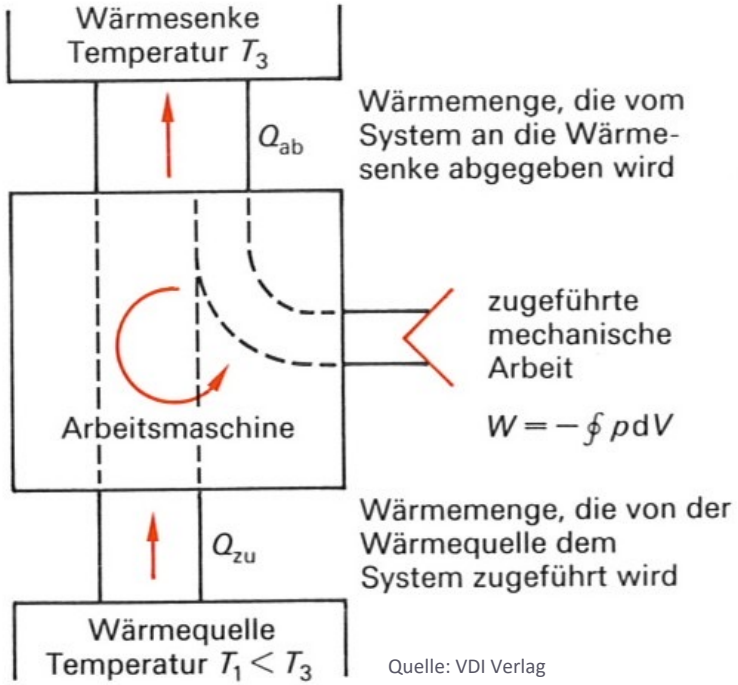
Absorptionskältemaschine
(H_2O/LiBr)
Carrier Corp.
1945

© dr. jakob energy research GmbH & Co. KG

dr. jakob energy research

Grundlage Kompressionskältemaschine (Linkslaufender Prozess)

- Wärme wird bei tiefer Temperatur aufgenommen und bei hoher Temperatur abgegeben
- Differenz von ab- und zugeführter Wärme wird als mechanische Arbeit zugeführt



Quelle: VDI Verlag

- Energiebilanz $$Q_{ab} = Q_{zu} + W$$
- Leistungszahl (Nutzen/Aufwand) $$\varepsilon_K = \frac{Q_{zu}}{W} = \frac{\dot{Q}_{zu}}{P}$$
- Carnot-Leistungszahl $$\varepsilon_{K,C} = \frac{T_1}{T_3 - T_1}$$

© dr. jakob energy research GmbH & Co. KG

dr. jakob energy research

Global Warming Potential „künstliche Kältemittel“

- **GWP:** Global Warming Potential / Greenhouse Warming Potential:
  = Treibhauspotential, CO_2-Äquivalent

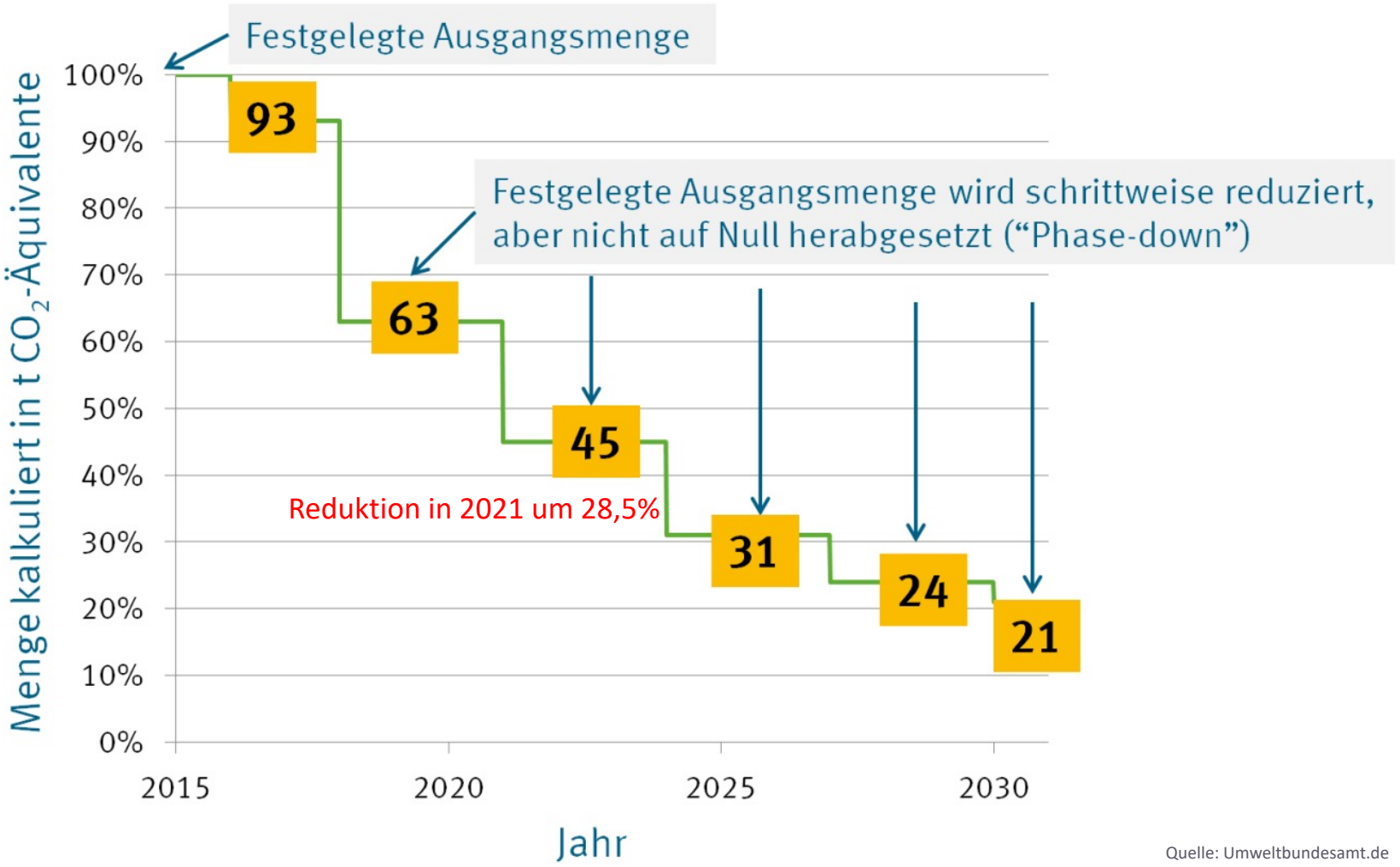
- **HCFC:** Hydrochlorofluorocarbons, auch H-FCKW (R22)
  - FCKW: Vollhalogenierte Fluor-Chlor-Kohlenwasserstoffe (Verbot in Neuanlagen)
  - H-FCKW: FCKW, die noch Wasserstoffatome enthalten (Verbot in Neuanlagen ab 2000)
    - Ozongefährdungspotential: 10% der FCKWs
    - Erwärmungspotential (GWP): 1900 CO_2 äquivalent auf 100 Jahre

- **HFC:** Hydrofluorocarbons, auch (H)FKW (R134a, R410A)
  - Fluorierte Kohlenwasserstoffe ohne Chloratome
  - Kein Ozongefährdungspotential
  - Erwärmungspotential (GWP): 1500 – 4500 CO_2 Äquivalent auf 100 Jahre

- **HFO:** 2,3,3,3-Tetrafluorpropen (R1234yf)
  - chemische Verbindung aus Stoffgruppen der Alkene und organischen Fluorverbindungen
  - Kein Ozongefährdungspotential
  - Erwärmungspotential (GWP): 4 CO_2 Äquivalent auf 100 Jahre

© dr. jakob energy research GmbH & Co. KG

F-Gase-Verordnung



Quelle: Umweltbundesamt.de

© dr. jakob energy research GmbH & Co. KG

dr. jakob energy research

Global Warming Potential „natürliche Kältemittel“

- **GWP:** Global Warming Potential / Greenhouse Warming Potential:
  = Treibhauspotential, CO_2-Äquivalent

- **Propan (R290):** GWP → 3

- **Isobutan (R600a):** GWP → 3

- **CO_2 (R744):** GWP → 1

- **Ammoniak (R717):** GWP → 0

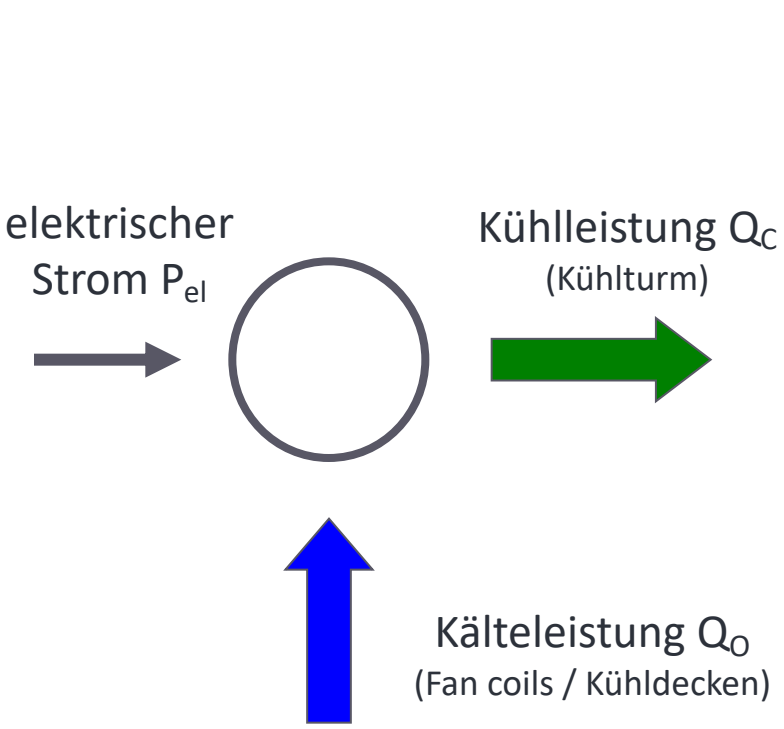
- **Wasser (R718):** GWP → 0

© dr. jakob energy research GmbH & Co. KG

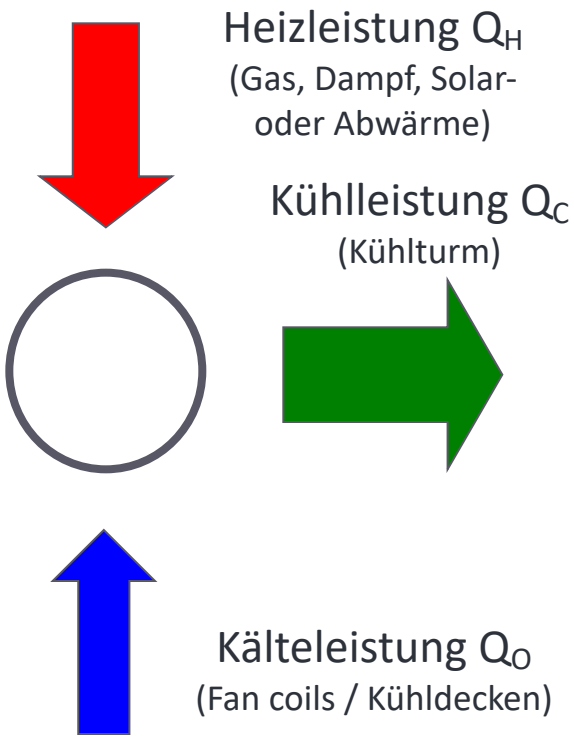
dr. jakob energy research

Schema Kälteprozesse

elektrisch betriebene
Kompressionskältemaschine



thermisch betriebene
Ab-/Adsorptionskältemaschine

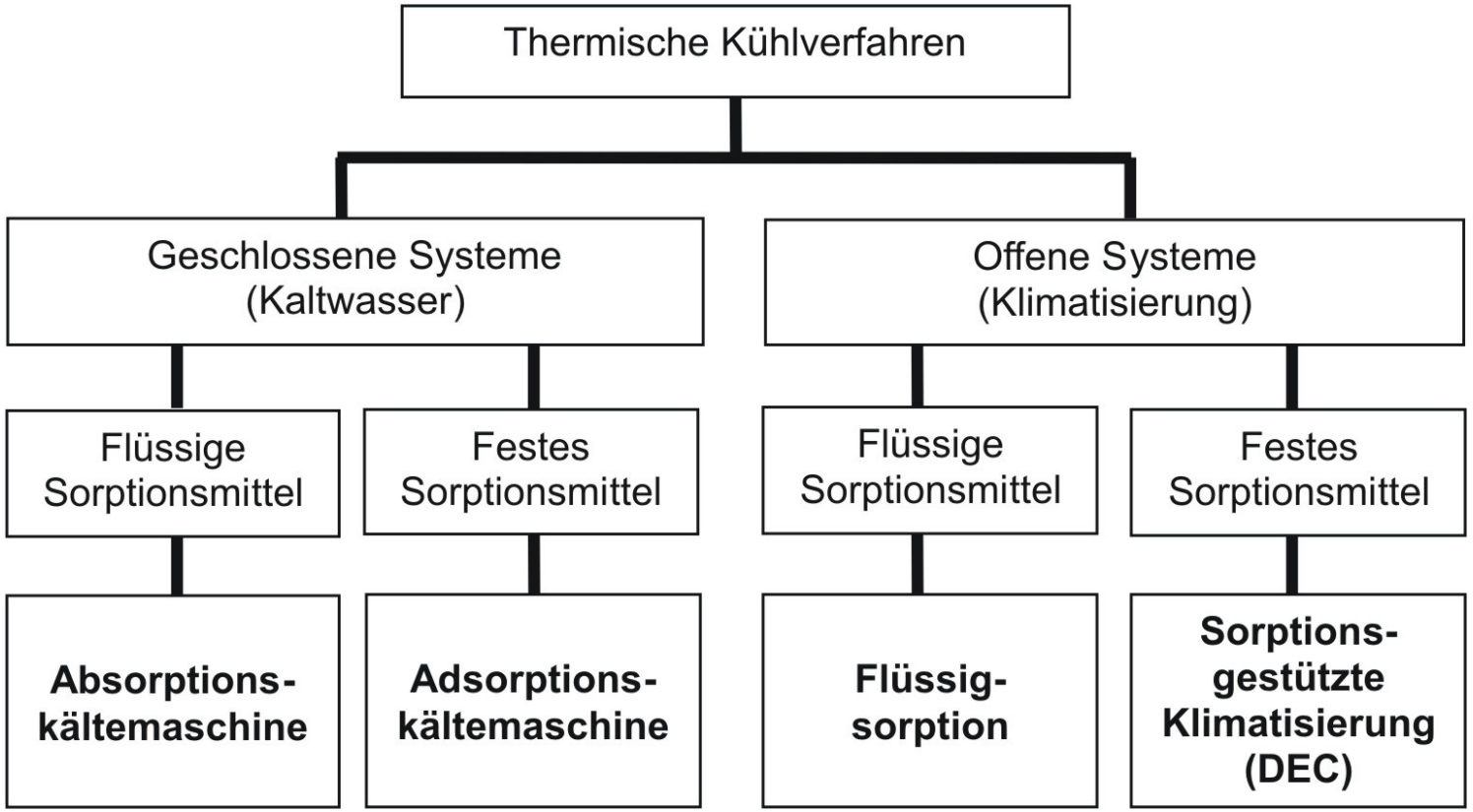


Quelle: JER

© dr. jakob energy research GmbH & Co. KG

dr. jakob energy research

Thermische Kälteverfahren

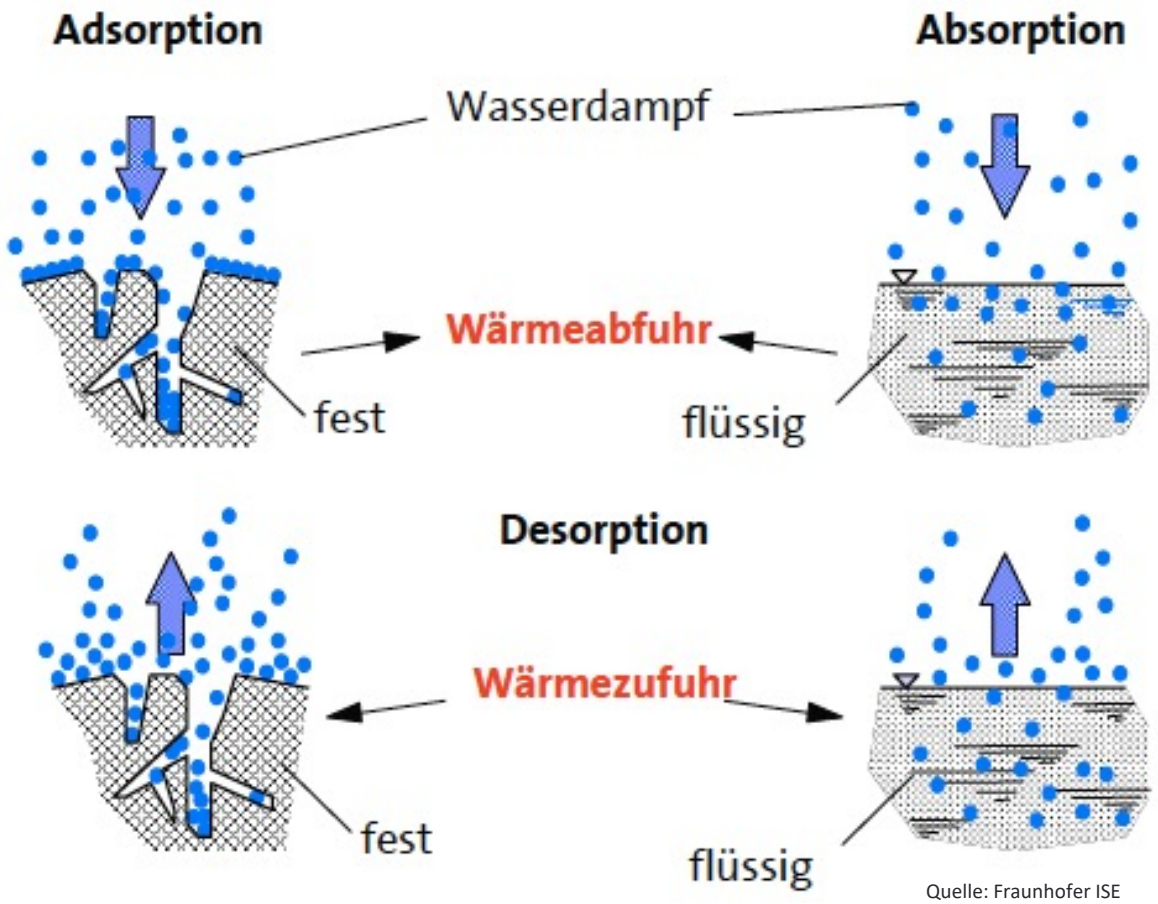


Quelle: JER

© dr. jakob energy research GmbH & Co. KG

dr. jakob energy research

Sorptionsmechanismen

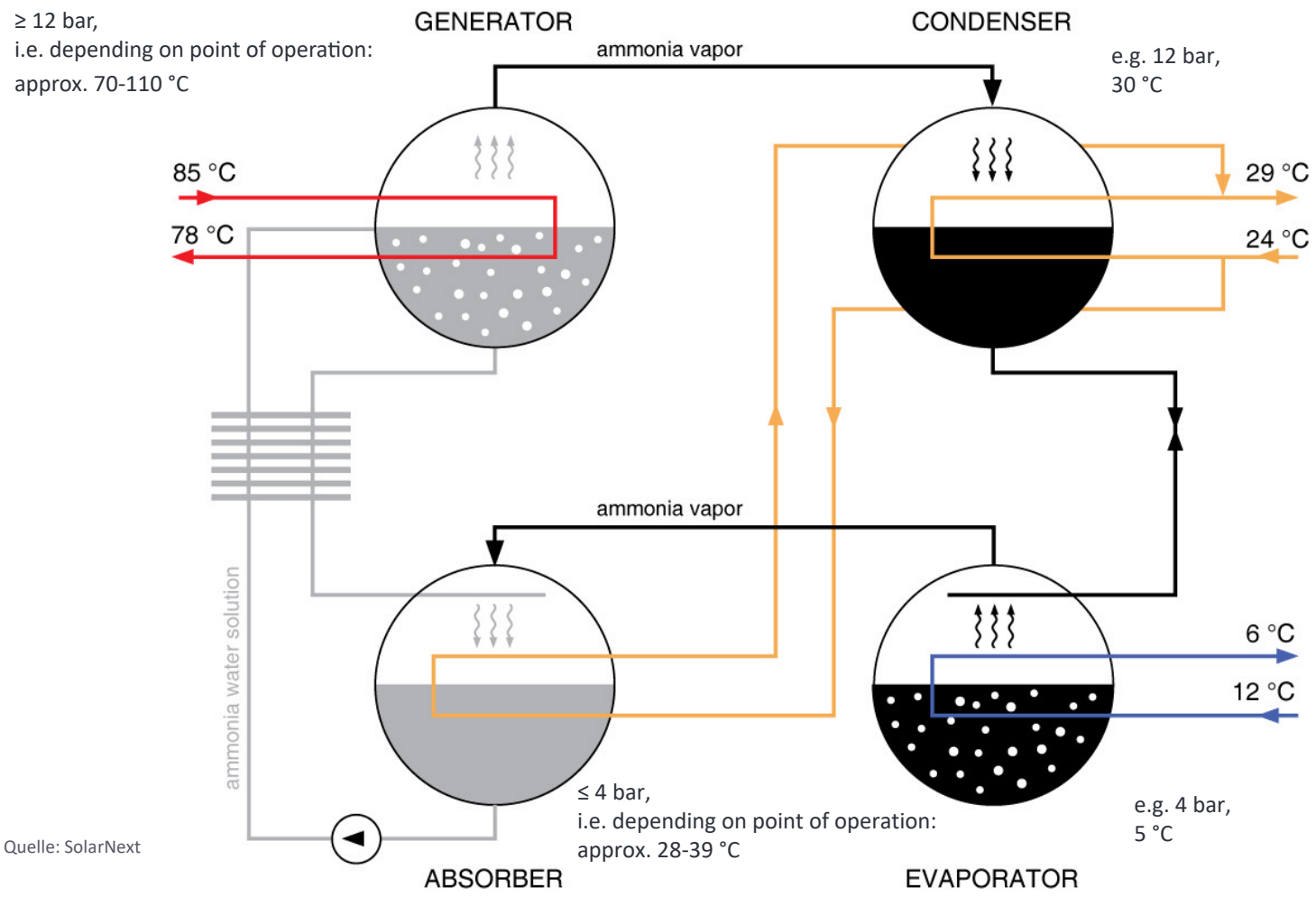


Quelle: Fraunhofer ISE

© dr. jakob energy research GmbH & Co. KG

dr. jakob energy research

Funktionsprinzip Absorptionskältemaschine (Ammoniak/Wasser)

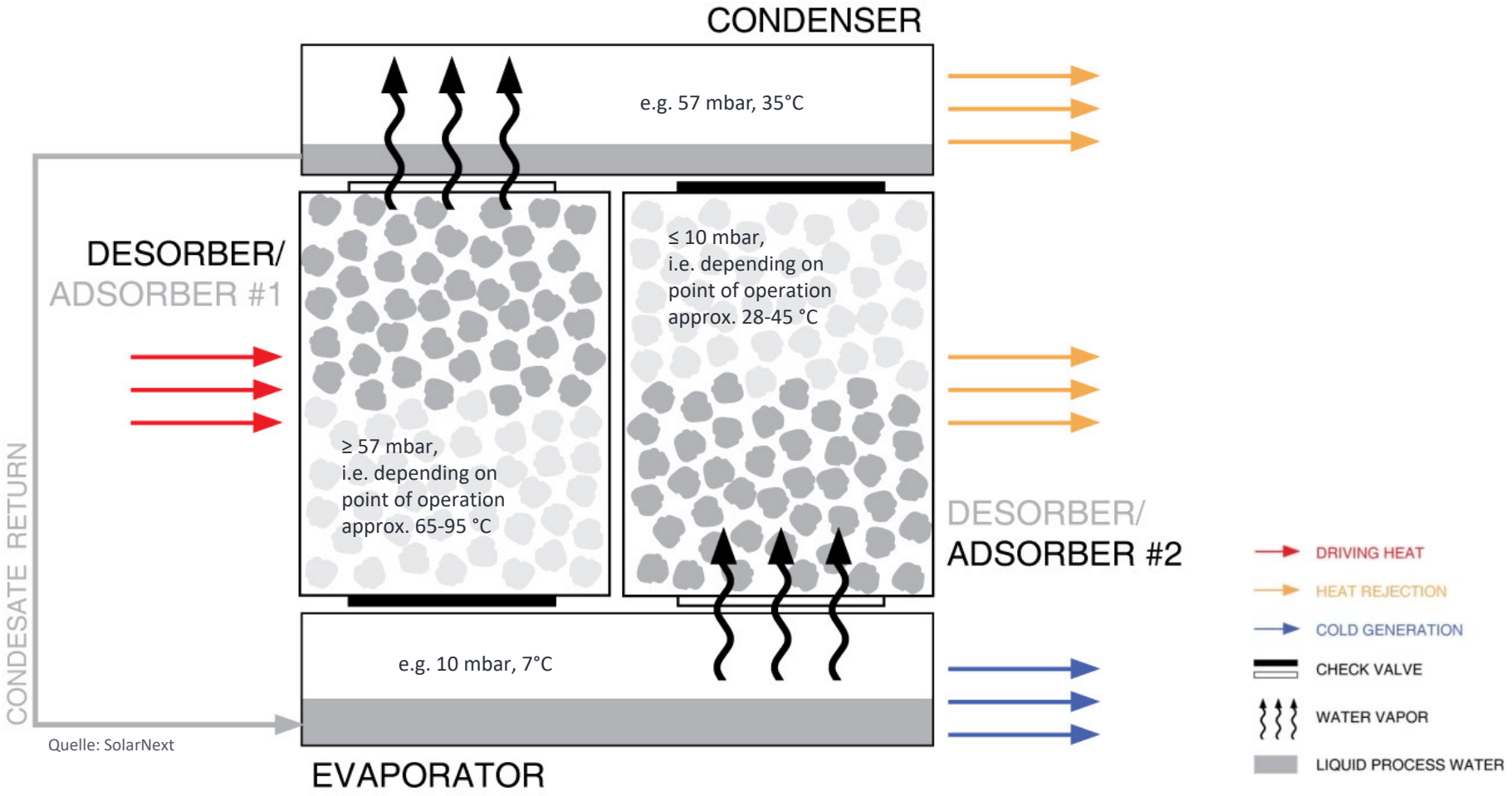


Quelle: SolarNext

© dr. jakob energy research GmbH & Co. KG

dr. jakob energy research

Funktionsprinzip Adsorptionskältemaschine (Wasser/Silikagel)



Quelle: SolarNext

© dr. jakob energy research GmbH & Co. KG

dr. jakob energy research

Übersicht Rückkühltechnologien für Ab- und Adsorptionskälte

Rückkühltechniken

- Verdunstungskühlung
- Trockenkühlung
- Hybridkühlung
- Adiabatische Kühlung
- Rückkühlung über Grundwasser
- Rückkühlung über Erdsonden

© dr. jakob energy research GmbH & Co. KG

dr. jakob energy research

Übersicht Rückkühltechnologien für Ab- und Adsorptionskälte

Rückkühltechniken

- Verdunstungskühlung
- Trockenkühlung
- Hybridkühlung
- Adiabatische Kühlung
- Rückkühlung über Grundwasser
- Rückkühlung über Erdsonden

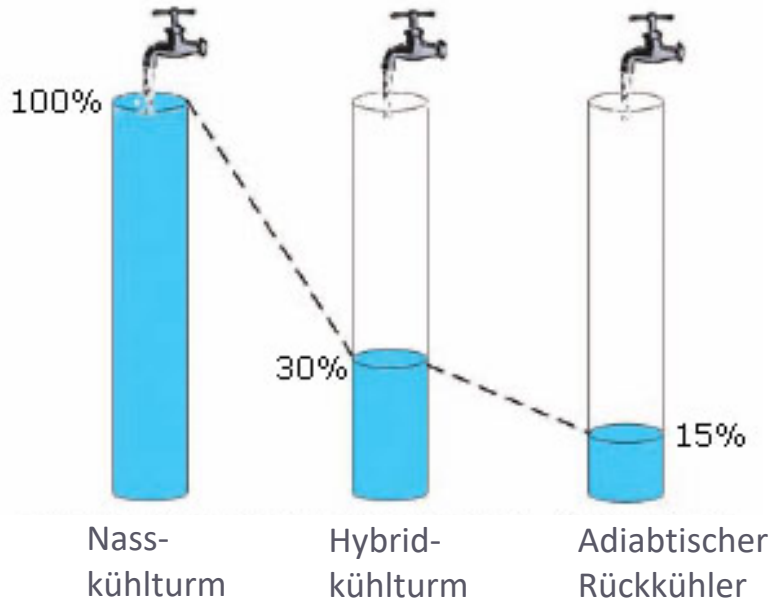
Wasserverbrauch Rückkühlung

- Pilotsystem Fa. Hightex in Rimsting/Chiemsee

  Nasskühlturm Axima EWK ca. Q_C = 38 kW

  Verbrauch: 50 l/h Verdunstung

  50 l/h Abschlämmung



© dr. jakob energy research GmbH & Co. KG

dr. jakob energy research

Entwicklungen / Potentiale Ab- und Adsorptionskälte

Verfahrenstechnische Potenziale

- Double-Effect/Single-Effect Absorptionskältemaschine Antriebsenergie Hochtemperaturgenerator mittels Gas und Niedertemperaturgenerator mittels Ab- oder Solarwärme
- Triple-Effect Absorptionskältemaschine großer Leistung aus Japan, COP größer 1,5
- Double-Stage Adsorptionskältemaschine kleiner Leistung aus China, COP größer 1
- Ab- und Adsorptions-Kompressions-Kaskadenkälteanlage
  Nutzung geringer Abwärmetemperaturen zur Erzeugung von tiefen Kältetemperaturen (z.B. –30°C), längere Laufzeiten der Kompressionskälteanlage, niedrige Verdichtungsendtemperaturen führen zu Elektroenergieeinsparungen bis 50% gegenüber konventioneller Kompressionskälteanlage

Arbeitsstoffpaar

- Ionic Liquids bei Absorptionskältemaschinen
- H_2O/Zeolith Adsorptionskältemaschinen mittlerer und großer Leistung

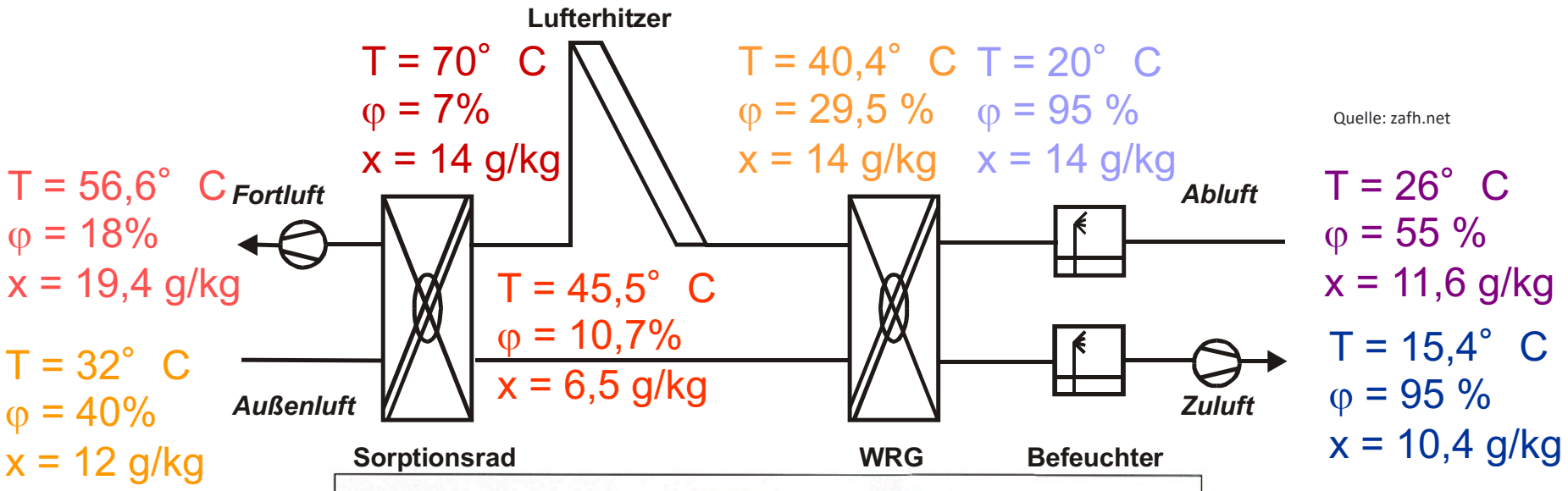
Quelle: Fahrenheit

Quelle: ILK Dresden

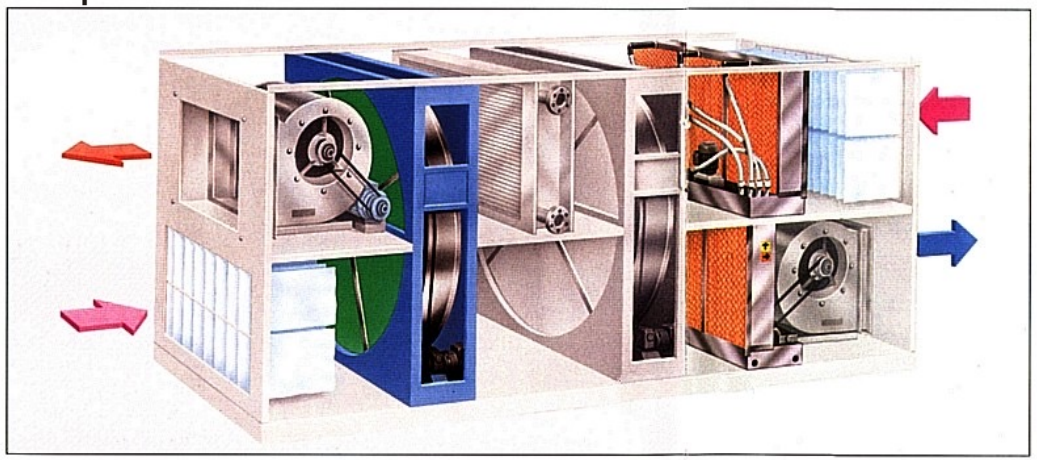
© dr. jakob energy research GmbH & Co. KG

dr. jakob energy research

Funktionsprinzip DEC-Systeme (Desiccant and Evaporative Cooling)



Quelle: zafh.net



Quelle: Munters

Hersteller

- Klingenburg
- Munters
- Robatherm
- Wolf Geisenfeld

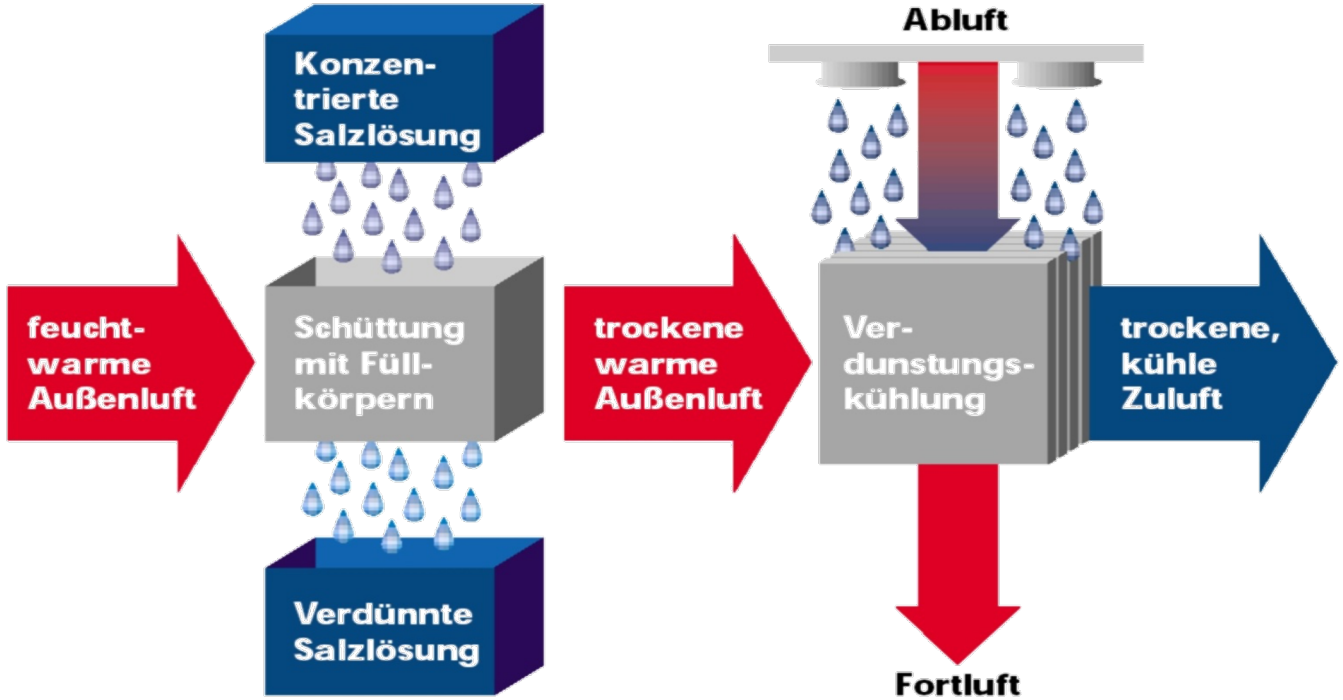
© dr. jakob energy research GmbH & Co. KG

dr. jakob energy research

Funktionsprinzip Flüssigsorption

Wässrige LiCl- oder $CaCl_2$-Lösungen als Sorptionsmittel

Vorteile:
- Abfuhr von Sorptionswärme
- Verlustfreie Speicherung mit hohen Speicherdichten
- hohe Entfeuchtungsleistung



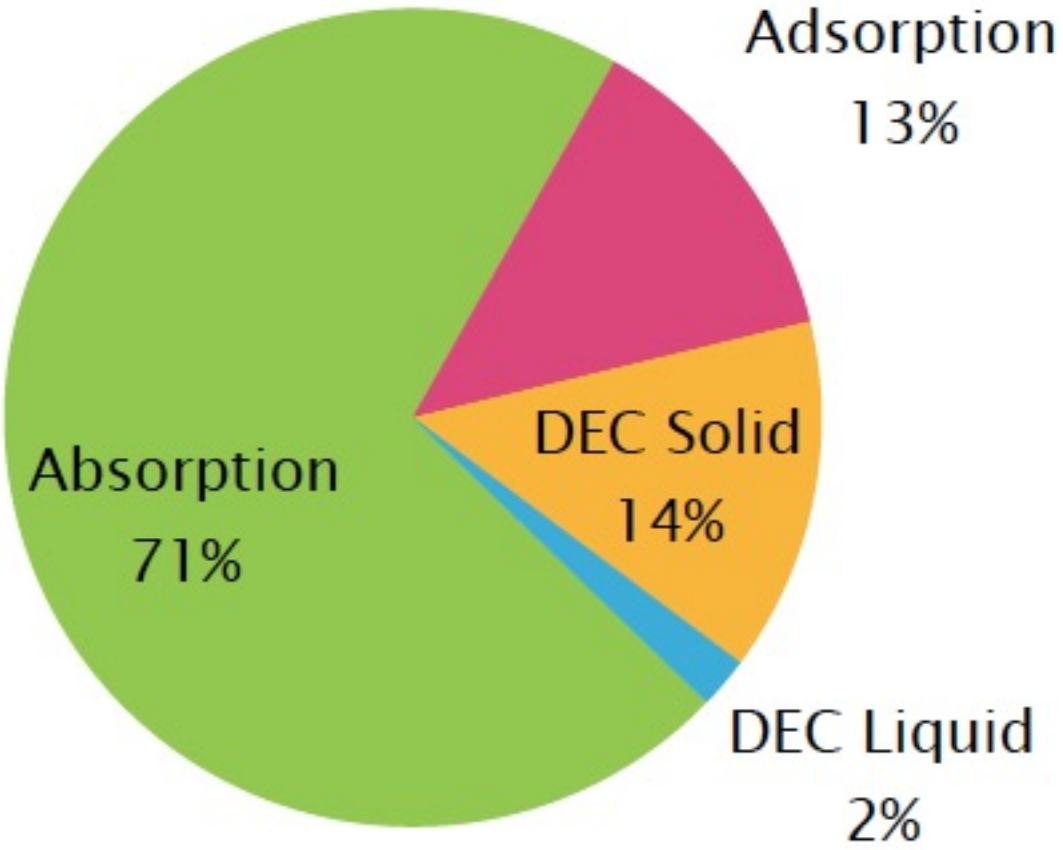
Quelle: Menerga

Hersteller
- AIL Research
- Imtech Drygenic (ehem. Kathabar)
- L-DCS Technology
- Menerga

© dr. jakob energy research GmbH & Co. KG

dr. jakob energy research

Aufteilung Sorptionstechnologien (Stand 2009)



Quellen: EURAC, Tecsol

© dr. jakob energy research GmbH & Co. KG

dr. jakob energy research

Vergleich verfügbare geschlossene Verfahren

Typ	Kompressionskälte	Absorptionskälte	Adsorptionskälte
Antrieb	Elektroenergie	Wärmeenergie (65 – 180°C)	Wärmeenergie (45 – 95°C)
Leistungszahl (KKM COP_{el}, AKM COP_{th})	1,5 – 2 (kleine Leistung) 3 – 5 (mittlere und große Leistung)	0,6 – 0,8 (Single-Effect) 1,1 – 1,4 (Double-Effect) 1,5 – 1,7 (Triple-Effect)	0,4 – 0,7
Spezifische Kühlturmleistung (Q_c/Q_O)	1,3 – 1,7	1,6 – 2,7	2,4 – 3,5
Kälteleistung	50 W – 5 MW	50 W – 5 MW (NH_3) 10 kW – 20 MW (H_2O)	7 kW – 500 kW
Kältemittel	H-FCKW (R22) (ODP=0,055, GWP=1500) H-FKW (R134a, R410A) (ODP=0, GWP=1300-1725) NH_3 (R717) (ODP=0, GWP=0) CO_2 (R744) (ODP=0, GWP=1)	NH_3 (R717), H_2O (R718) (ODP=0, GWP=0)	H_2O (R718) (ODP=0, GWP=0)

ODP = Ozonzerstörungspotential (Bezug R11 = 1)

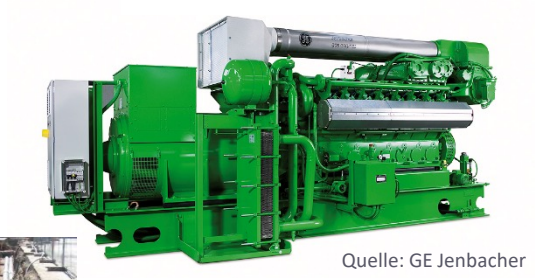
GWP (Global Warming Potential) = Treibhauspotenzial im Verhältnis zu 1kg CO_2 (Zeithorizont 100 Jahre)

© dr. jakob energy research GmbH & Co. KG

dr. jakob energy research

Wärmequellen thermische Kälteerzeugung

BHKW Abwärme



Quelle: GE Jenbacher

Quelle: wikipedia

Fernwärme

Prozesswärme

Quelle: dena

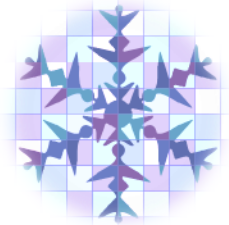
Solarthermie

Quelle: Festo

Kompressor-Abwärme

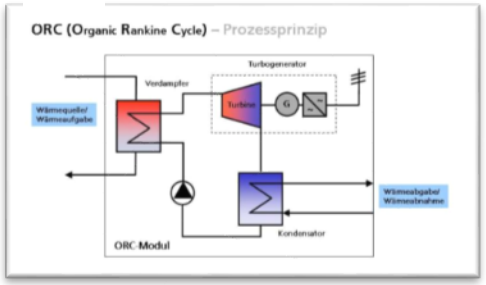
Quelle: Kaeser

Adsorption and absorption technology



K Ä L T E

Abwärme aus ORC-Anlagen

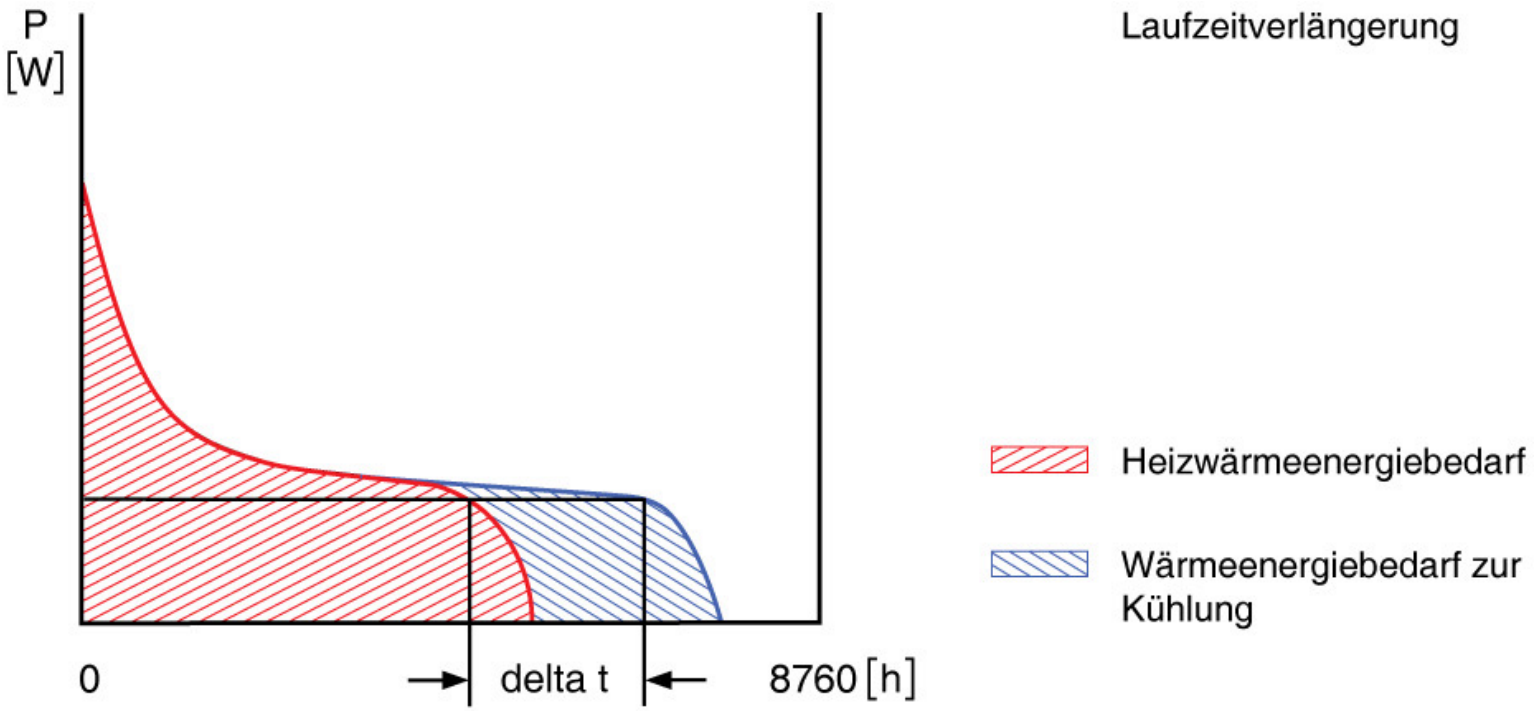


Quelle: Fraunhofer UMISCHT

© dr. jakob energy research GmbH & Co. KG

dr. jakob energy research

Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung – Laufzeitverlängerung BHKW

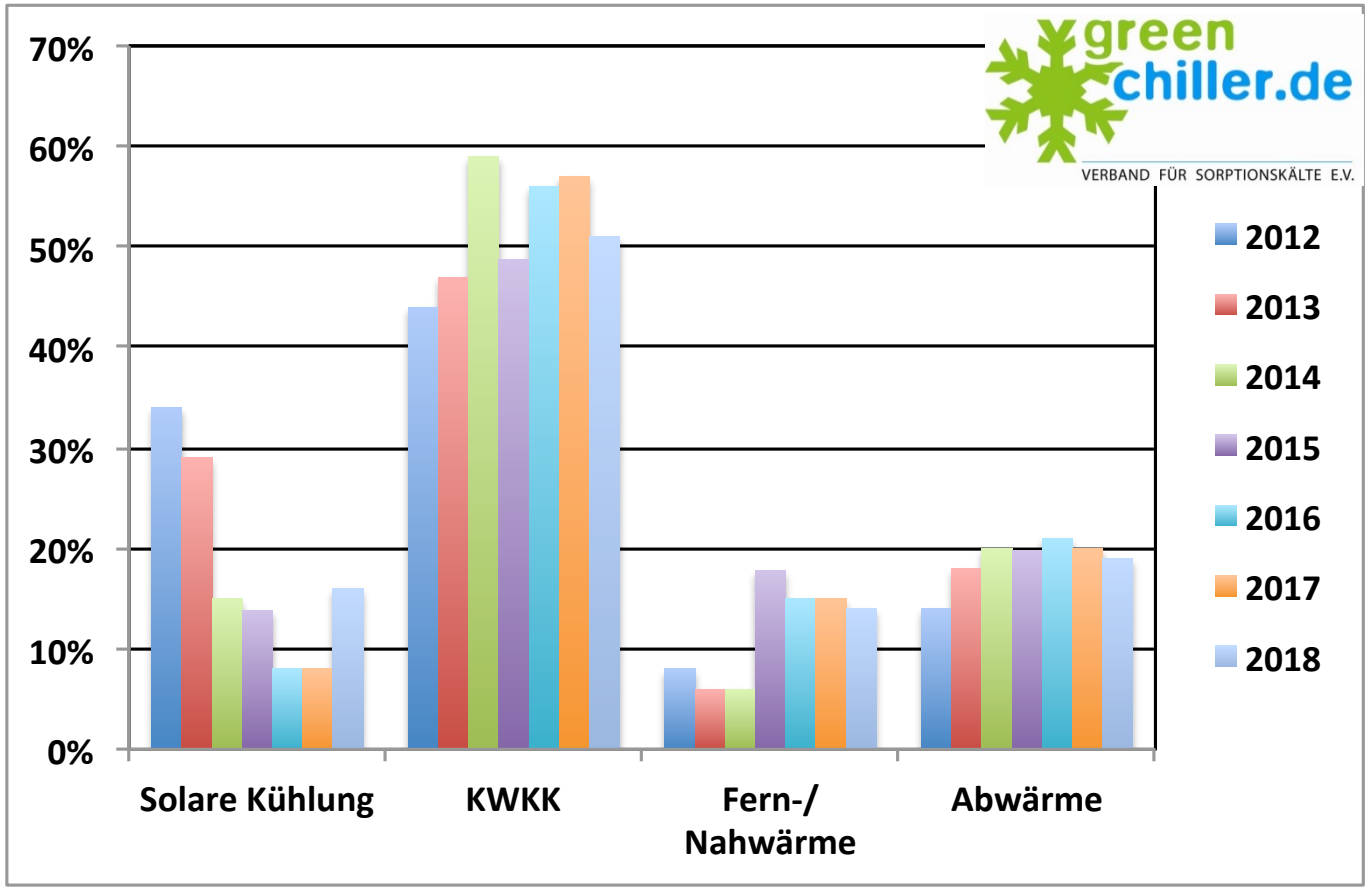


Quelle: SolarNext

© dr. jakob energy research GmbH & Co. KG

dr. jakob energy research

Marktentwicklung Anteil Wärmequellen (2012-2018)



Quelle: Green Chiller

- **Anteile Wärmequellen/ Anwendungen (2018):**
  16 % Solare Kühlung,
  51 % KWKK,
  14 % Fern-/Nahwärme,
  19 % Abwärmenutzung

© dr. jakob energy research GmbH & Co. KG

dr. jakob energy research

Ad- und Absorptionskältemaschinen (kleine bis mittlere Leistung)

Fahrenheit
eCoo & Zeo
Wasser / Silikagel
Wasser / Zeolith

Quelle: Fahrenheit

SolabCool
SolabChiller
Wasser / Silikagel

Quelle: SolabCool

Pink
PC19
Ammoniak / Wasser

Quelle: Pink

Kälteleistungsbereich:	2,5 kW	bis	90 kW
Heiztemperaturen:	55°C	bis	95°C
Kaltwassertemperaturen:	6°C	bis	18°C
COP th:	0,6	bis	0,7

kein Anspruch auf Vollständigkeit

© dr. jakob energy research GmbH & Co. KG

dr. jakob energy research

Absorptionskältemaschinen (mittlere bis große Leistung)

EAW
Wegracal Maral & SE
Wasser / Lithiumbromid

Quelle: EAW

Thermax
5G & L5
Wasser / LiBr

Quelle: Thermax

AGO
congelo®
Ammoniak / Wasser

Quelle: AGO

Kälteleistungsbereich	15 kW	bis	1.000 kW
Heiztemperaturen:	70°C	bis	105°C
Glykol-/Kaltwassertemperaturen:	-10°C	bis	18°C
COP th:	0,5	bis	0,75

kein Anspruch auf Vollständigkeit

© dr. jakob energy research GmbH & Co. KG

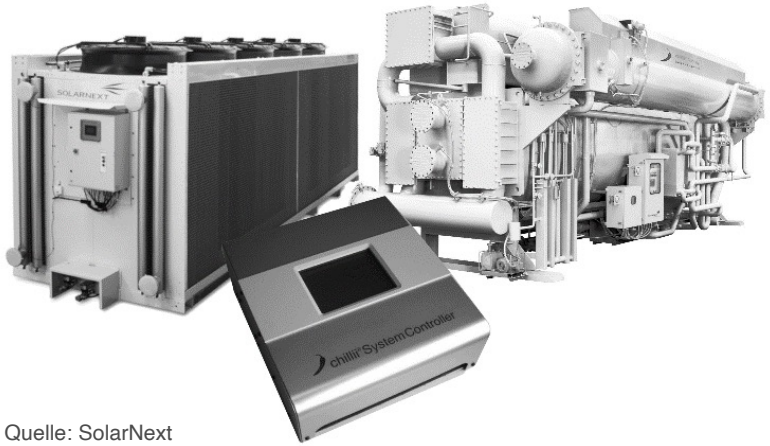
dr. jakob energy research

Standardisierte Cooling Kits (mittlere bis große Leistung)

chillii® Cooling Kit HLC
Wasser / Lithiumbromid

Quelle: SolarNext

chillii® Cooling Kit SLC
Dampf / Lithiumbromid



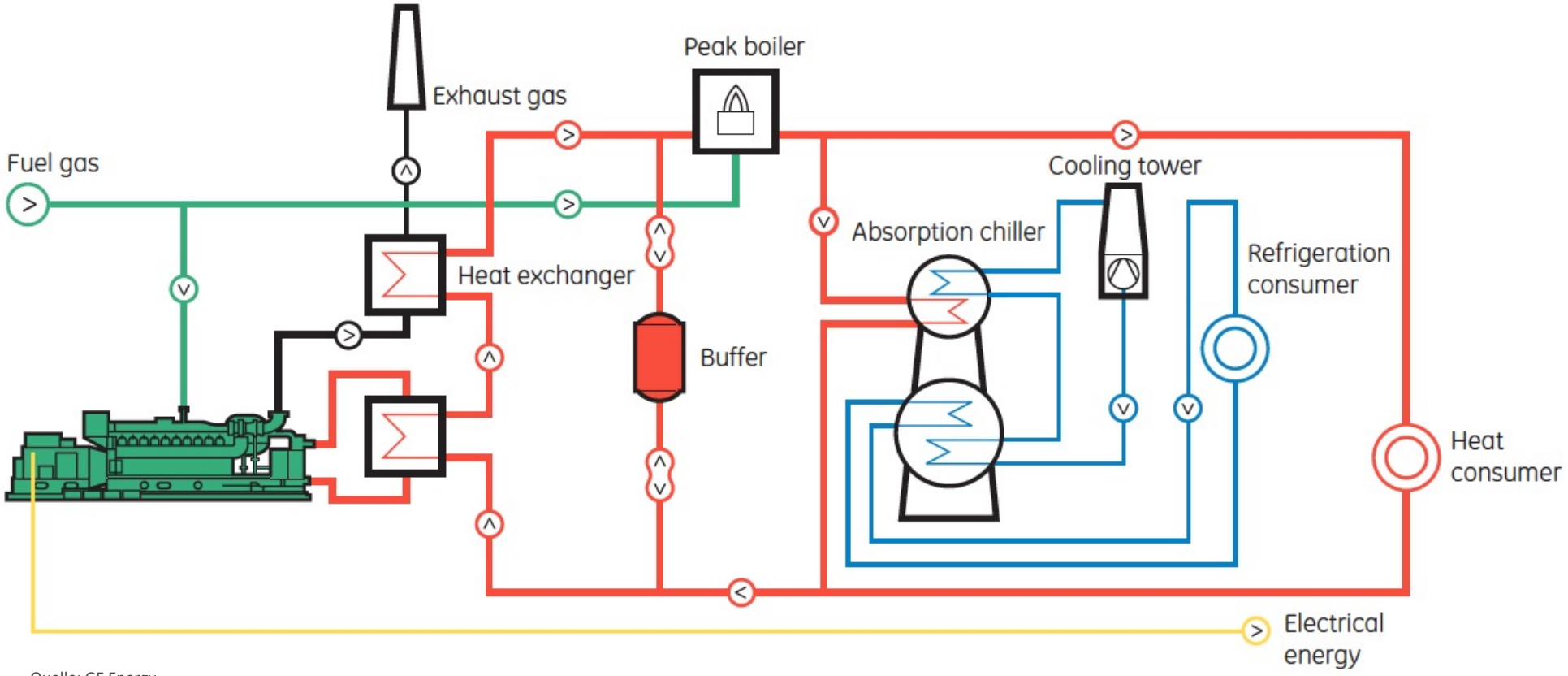
Quelle: SolarNext

Kälteleistungsbereich	100 kW	bis	4.500 kW
Heiztemperaturen:	65°C	bis	240°C
Glykol-/Kaltwassertemperaturen:	-10°C	bis	18°C
COP th:	0,6	bis	1,50

© dr. jakob energy research GmbH & Co. KG

dr. jakob energy research

Funktionsprinzip Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung (KWKK)

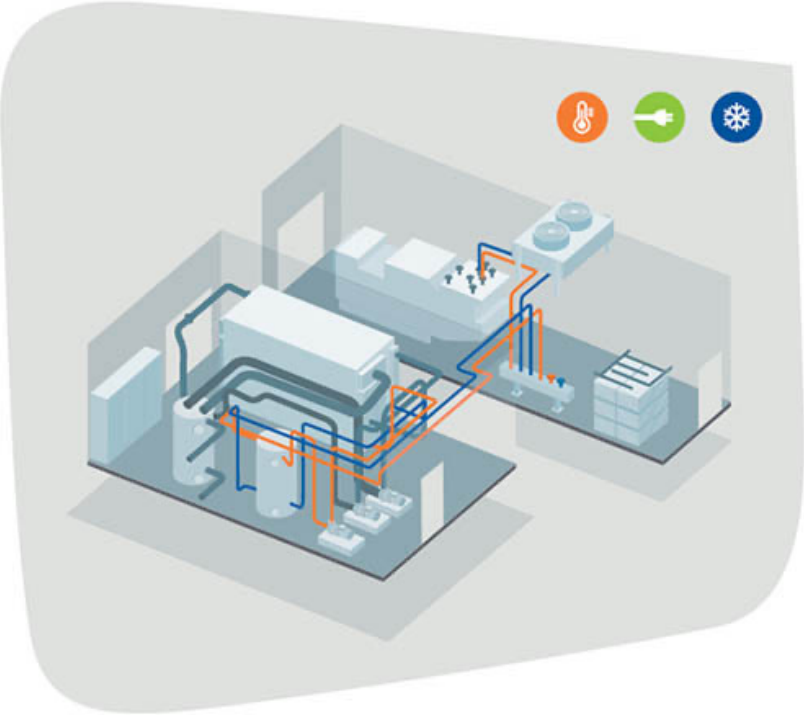


Quelle: GE Energy

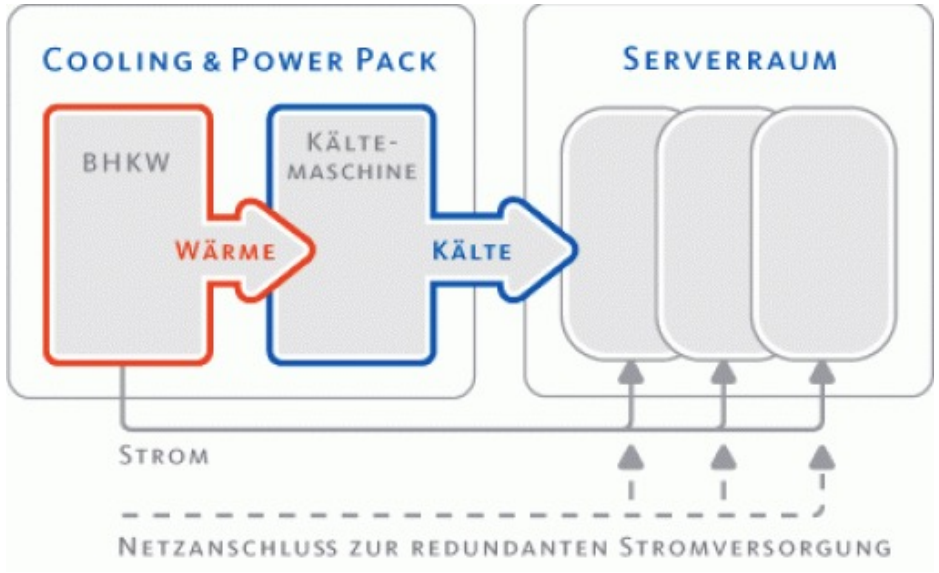
© dr. jakob energy research GmbH & Co. KG

dr. jakob energy research

Container and Cooling & Power Pack solutions



Quelle: Johnson Controls



Quelle: InvenSor

Cooling & Power Pack:

70% of energy cost savings in server cooling

© dr. jakob energy research GmbH & Co. KG

dr. jakob energy research

Anwendungsbereiche für thermische Kälteerzeugung

Klimatisierung

- Wohngebäude
- Bürogebäude
- Banken
- Hotels
- Einzelhandel
- Bäckereien
- Einkaufszentren
- Rechenzentren
- Fabrikhallen

© dr. jakob energy research GmbH & Co. KG

dr. jakob energy research

Anwendungsbereiche für thermische Kälteerzeugung

Klimatisierung

- Wohngebäude
- Bürogebäude
- Banken
- Hotels
- Einzelhandel
- Bäckereien
- Einkaufszentren
- Rechenzentren
- Fabrikhallen

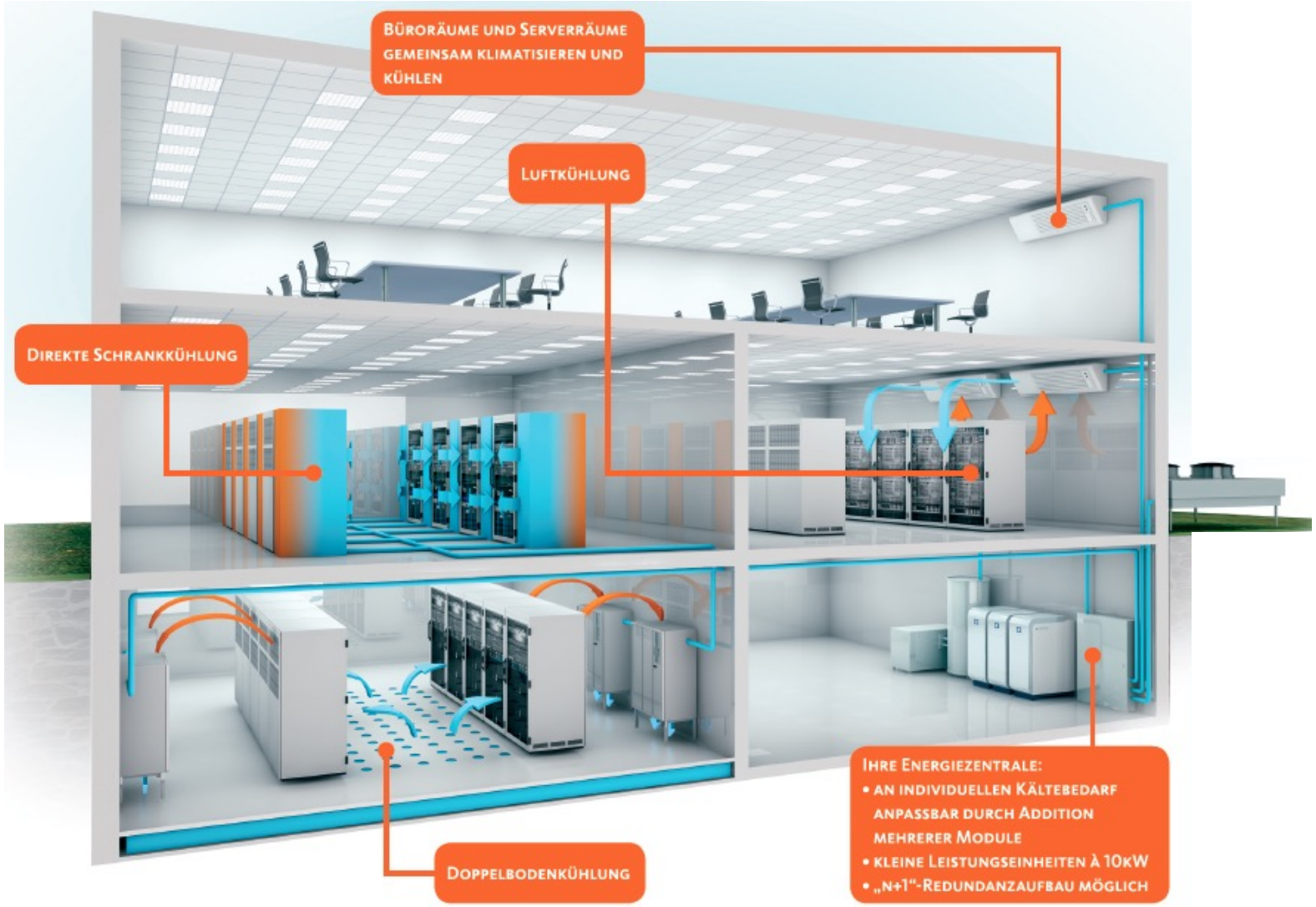
Prozesskälte

- Bäckereien
- Metzgereien
- Milchkühlung
- Weinkühlung
- Fischindustrie
- Biogasanlage
- Galvanikbetriebe
- Maschinen- / Werkzeugkühlung
- etc.

© dr. jakob energy research GmbH & Co. KG

dr. jakob energy research

Anwendung Rechenzentrum

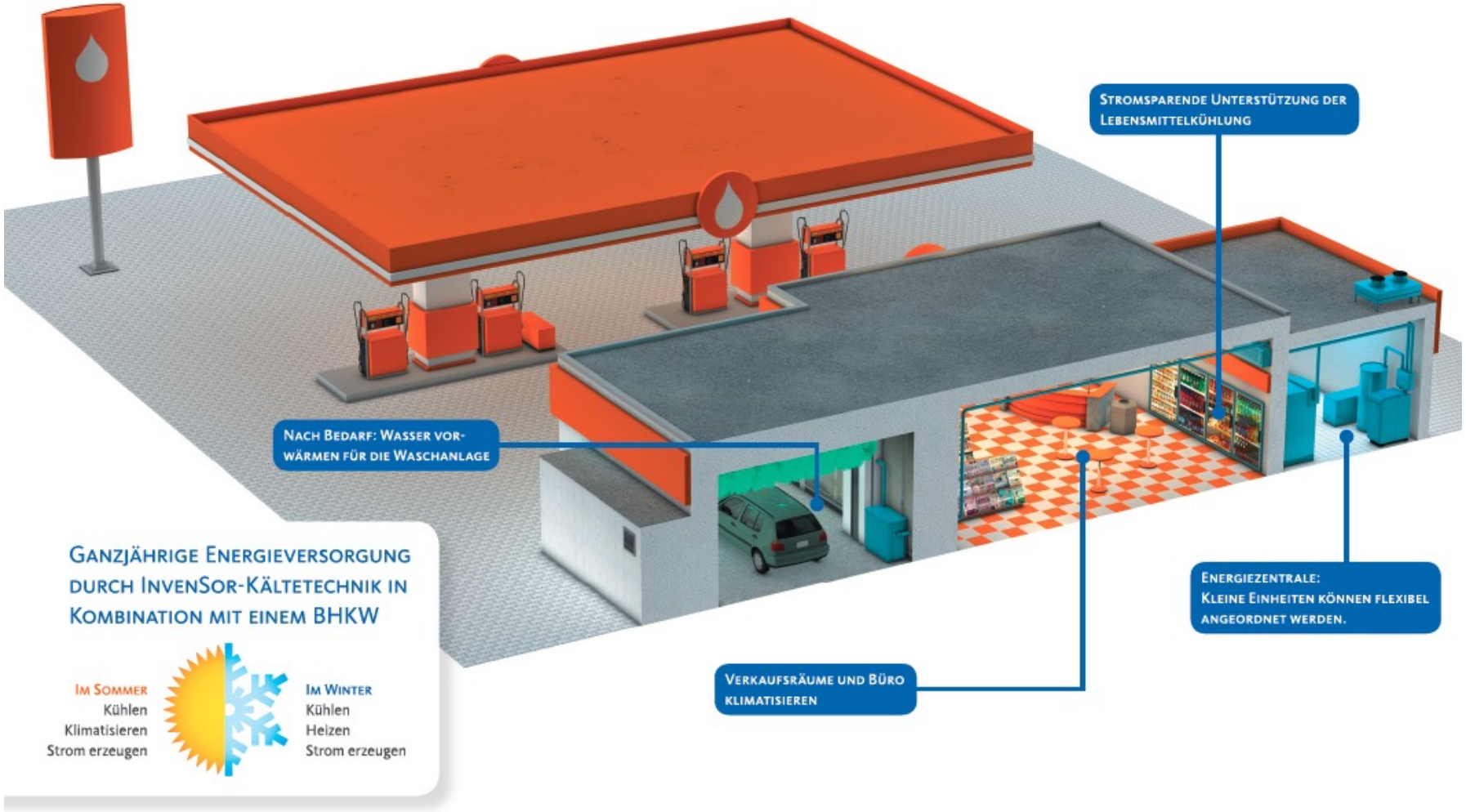


Quelle: InvenSor

© dr. jakob energy research GmbH & Co. KG

dr. jakob energy research

Anwendung Tankstelle



Quelle: InvenSor

© dr. jakob energy research GmbH & Co. KG

dr. jakob energy research

Anwendung Kleingewerbe (Metzgerei, Bäckerei, Blumenladen)

Ganzjährige Energieversorgung durch InvenSor-Kältetechnik in Kombination mit einem BHKW

Im Sommer	Im Winter
Kühlen	Kühlen
Klimatisieren	Heizen
Strom erzeugen	Strom erzeugen

Beispiel Wohnraum: Komfortable Raumtemperatur in Privaträumen

Beispiel Produktion: Gute Arbeitsbedingungen und optimale Temperaturen für die Herstellung und Lagerung

Verkaufsräume klimatisieren: Sie haben die Wahl aus einer Vielzahl von zuverlässigen Kühlsystemen

Ihre Energiezentrale: Platzsparende Kombination der Kältemaschine mit kleinen BHKW-Einheiten

Quelle: InvenSor

© dr. jakob energy research GmbH & Co. KG

dr. jakob energy research

Beispiel Industrie

Tri-Generation Application (**Electrical installation technology manufacturer**, Germany, Container solution with 174 kW_c and CHP unit with 250 kW_{el})

Quellen: InvenSor

© dr. jakob energy research GmbH & Co. KG

dr. jakob energy research

Beispiel Großhandel Gewerbe

Tri-Generation Application (**Wholesaler and retailer for the duty-free industry**, Germany, Absorption chiller 54 kW_c and CHP units with 3x 50 kW_{el})

Quellen: EAW

© dr. jakob energy research GmbH & Co. KG

dr. jakob energy research

Beispiel Büro- und Geschäftshaus

Tri-Generation Application (**Commercial building with shops and offices**, Germany, Adsorption chiller 10 kW_c and CHP unit with 5.5 kW_{el})

Quellen: JER

© dr. jakob energy research GmbH & Co. KG

dr. jakob energy research

Beispiel Landwirtschaft

Tri-Generation Application (**Turkey production farm**, Germany, Absorption chiller 70 kW_c and biogas CHP unit with 250 kW_{el})

Quellen: SolarNext

© dr. jakob energy research GmbH & Co. KG

dr. jakob energy research

Kosten thermische Kälteerzeugung / KWKK

Systemkomponenten:

- Blockheizkraftwerk (BHKW)
- Ab- oder Adsorptionskältemaschine
- Pufferspeicher
- Rohrleitungen, Wärmetauscher, Isolierung, etc.
- MSR-Technik
- Hydraulische Einbindung in den jeweiligen Prozess

Spezifische Kosten (netto):

• BHKW (verschiedene Technologien)	2.000 – 4.000 EUR/kW_{el}
• Cooling Kit	700 – 3.000 EUR/kW_r

Quelle: SOLEM Consulting

© dr. jakob energy research GmbH & Co. KG

dr. jakob energy research

Förderung von Ab- und Adsorptionskälte in Deutschland

- **BAFA** fördert seit **Januar 2019** nur noch Kälte- und Klimaanlagen **mit natürlichen Kältemitteln** (Propan, Propen, Isobutan, Gemisch Ammoniak-Dimethylether, Ammoniak, CO_2, Wasser).
- **Förderbereich für Sorptionskälte** von **5 kW bis 600 kW** Kälteleistung erweitert und erstmalig Temperatur-Tripel (Eintrittstemperaturen T_0 15° C, T_C 27° C, T_H 85° C) zur Berechnung der Förderhöhe eingeführt (**max. 50% der förderfähigen Ausgaben**).
- Zusätzlich werden u.a. Rückkühler sowie Warm- und Kaltwasserspeicher gefördert und Pauschalen für die Kombination mit Anlagen zur Erzeugung von regulativen Energien gewährt.
- **Antragsberechtigt sind Unternehmen**, gemeinnützige Organisationen, Kommunen, kommunale Gebietskörperschaften, Zweckverbände und Eigenbetriebe, Hochschulen und Schulen, Krankenhäuser sowie kirchliche Einrichtungen, unabhängig von der Gewinnerzielungsabsicht.
- **Förderrechner:** https://www.klimaschutz.de/förderrechner

© dr. jakob energy research GmbH & Co. KG
dr. jakob energy research

Fazit thermische Kälteerzeugung

- Thermisch angetriebene Kältemaschinen sind eine **umweltfreundliche Alternative** zu strombetriebenen Technologien

© dr. jakob energy research GmbH & Co. KG

dr. jakob energy research

Fazit thermische Kälteerzeugung

- Thermisch angetriebene Kältemaschinen sind eine **umweltfreundliche Alternative** zu strombetriebenen Technologien

Aktiver Klimaschutz

- Energieeinsparung / hohe Energieeffizienz
- Reduzierung der CO_2-Emissionen
- Reduzierung des globalen Erwärmungspotentials (GWP)
- keine umweltschädlichen Kältemittel

sondern

Wasser oder Ammoniak
als Kältemittel

Kostenersparnis

- Senkung der Strom- und Betriebskosten (>75 % Stromkosteneinsparung im Vergleich zur Kompressionskälte)
- Ersparnis teurer Stromleistungspreise / Peak Shaving
- Laufzeitverlängerung des BHKW (hierdurch höhere Wirtschaftlichkeit)
- Geringere Unterhaltungskosten, längere Lebensdauer, geringere Gesamtkosten

Kostenersparnis bei gleichzeitiger Verbesserung der Energie- und Umweltbilanz

© dr. jakob energy research GmbH & Co. KG

dr. jakob energy research

Links

- **BAFA „Förderung von Kälte- und Klimaanlagen“** für gewerbliche Nutzer (https://www.bafa.de/DE/Energie/Energieeffizienz/Klima_Kaeltetechnik/klima_kaeltetechnik_node.html)

- **VDMA Einheitsblatt 24247-9:2022-01 „Energieeffizienz von Kälteanlagen – Teil 9: Sorptionskälteanlagen“** (https://www.vdma.org/viewer/-/v2article/render/15527187)

- **BMWi Industrie-Energieforschung „Energieeffiziente Wärme- und Kältetechnologien“** (https://www.industrie-energieforschung.de/forschen/warme-kaelte)

- **ASUE Broschüre „KWKK – Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung“** (https://asue.de/blockheizkraftwerke/broschueren/310478_kwkk_-_kraft-waerme-kaelte-kopplung)

- **dena „Projekt Leuchtturm Abwärme“** (YouTube Video) (https://www.dena.de/themen-projekte/projekte/energiesysteme/leuchtturm-abwaerme/)

© dr. jakob energy research GmbH & Co. KG

dr. jakob energy research

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Projekt Partner:

Prof. Dr. Uli Jakob, JER
uli.jakob@drjakobenergyresearch.de

Medienarbeit:

Sabine Alexandre-Klein, ESCI
sak@esci.eu

This project has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement **N° 847095**