

# Solare Kühlung mit Absorptionskältemaschinen

Universität Stuttgart  
Institut für Thermodynamik und  
Wärmetechnik (ITW)  
Pfaffenwaldring 6  
70550 Stuttgart

## Vorstellung

- Studium Technische Gebäudeausrüstung (TU Dresden)
- Seit 2006 am ITW, Uni Stuttgart
- Forschungsprojekt: Entwicklung einer solar angetriebenen Absorptionskältemaschine (Promotion)
- Weitere Projekte am ITW zur solaren Kühlung

# Gliederung

## 1. Prozessgrundlagen

- Grundlagen der Kälteerzeugung
- Funktionsprinzip einer Absorptionskältemaschine
- Bewertung / Betriebsverhalten

## 2. Reale Anlagen

- Arbeitsstoffe
- Konstruktive Anforderungen
- Rückkühlung
- Anlagen zur solaren Kühlung

## 3. Solare Kühlung

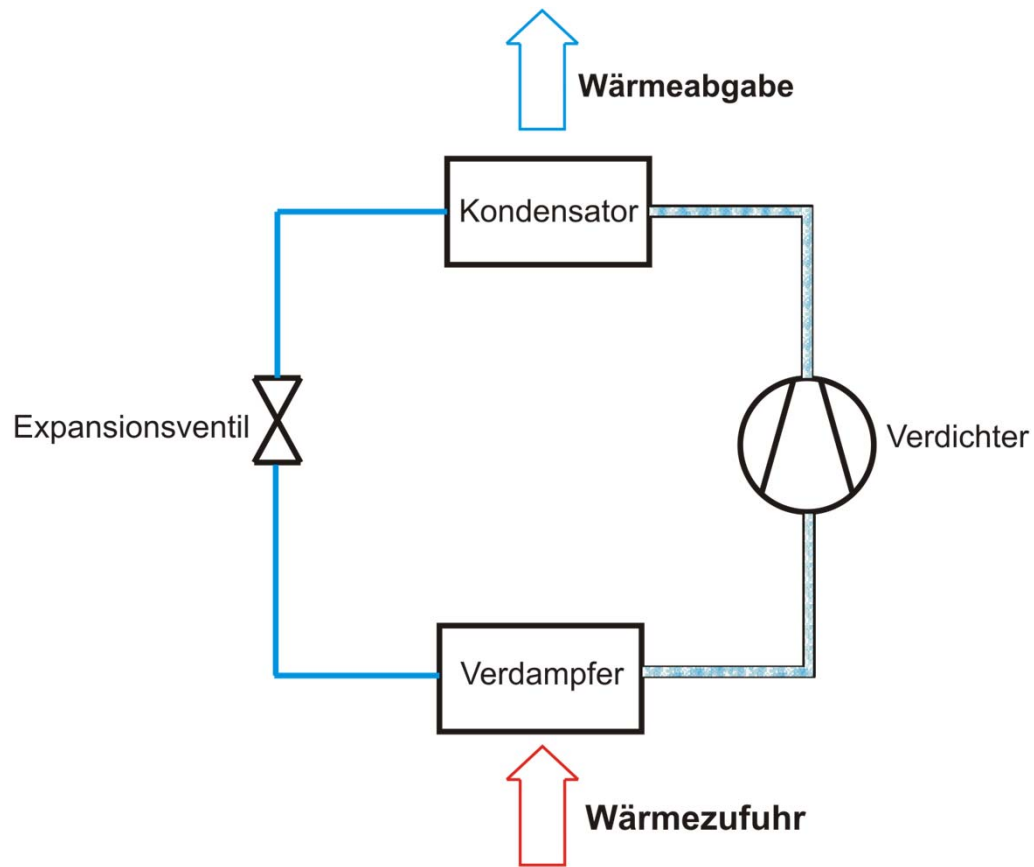
- Aufbau von Systemen
- Ausführungsbeispiele
- Bewertung

## 19. Jahrhundert

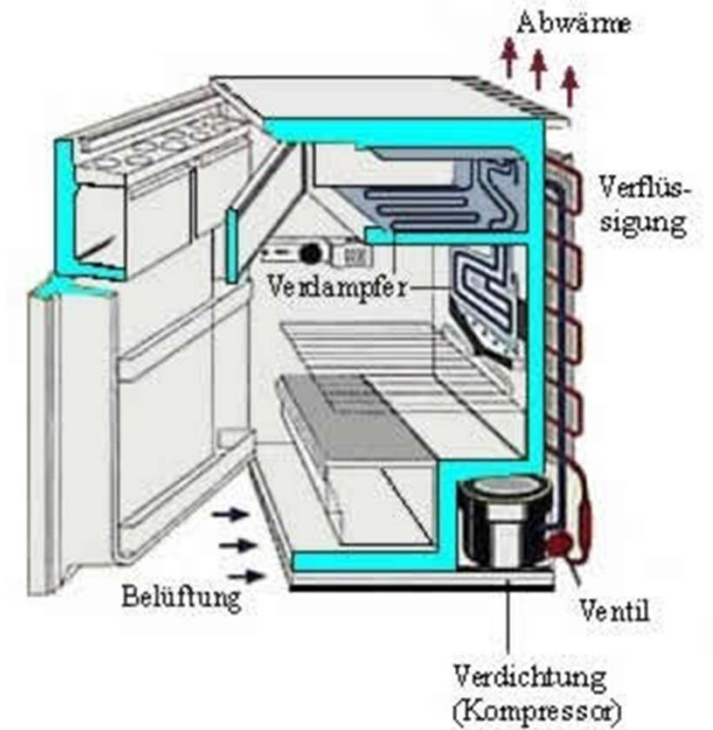


Eis-Ernte. Ausschnitt aus einem Bild von Carl Larsson  
(Carl Larsson: 'Bei uns auf dem Lande')

# Kompressionskältemaschine



— flüssig  
 — dampförmig



Tafel 5.3.1-1 Physikalische Daten von Kältemitteln\*)

Kältemittelgruppe		H-FCKW	H-FKW							Anorganische		Organische	
ASHRAE-Nummer		R22	R125	R134a	R404A	R407C	R410A	R507	R227ea	R717	R744	R290	R1270
Chemische Formel, bei Gemischen Anteile in Massen-%		CHCl F <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> HF <sub>5</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> F <sub>4</sub>	44 R125 4 R134a 52 R143a	23 R32 25 R125 52 R134a	50 R32 50 R125	50 R125 50 R143a	C <sub>3</sub> HF <sub>7</sub>	NH <sub>3</sub>	CO <sub>2</sub>	CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> CH <sub>3</sub>	CH <sub>3</sub> CH= CH <sub>2</sub>
Molmasse	kg/kmol	86,5	120,0	102	72	86,2	72,6	72,6	170	17	44	44,1	42,1
Normalsiedepunkt	°C	-40,8	-48,1	-26,3	-46,5	-43,7	-50,5	-46,5	-17,3	-33,3	-78,4	-42,1	-47,7
Temperaturleit (oder „glide“)	K	0	0	0	0,7	7,3	<0,2	0	0	0	0	0	0
Kritische Temperatur	°C	96	66	101	72	76	73	71	102	132	31,1	96,7	92,4
Kritischer Druck	kPa	4990	3630	4056	3730	4160	4960	3717	2930	11350	7380	4250	4670
Verflüssig.temper. bei 2600 kPa	°C	63	51	79	55	57	43	55	96	60	-11	70	61
Druck bei 0°C (p <sub>0</sub> )	kPa	498	672	293	601	460	804	620	203	429	3485	474	586
Druck bei 40°C (p <sub>c</sub> )	kPa	1527	2010	1017	1829	1740	2436	1861	711	1555	über-	1369	1652
p <sub>c</sub> - p <sub>0</sub>	kPa	1029	1338	724	1228	1280	1632	1241	508	1126	kri-	895	1127
p <sub>c</sub> / p <sub>0</sub>	-	3,1	3,0	3,5	3	3,1	3	3	3,5	3,6	tisch	2,89	2,8
Verdampfungswärme (101,3kPa)	kJ/kg	235	164	216	202	248	274	199	132	1368	fest	424	439
vol. Kälteleistung *)	kJ/m <sup>3</sup>	3433	3630	2156	3231	3096	5072	3576	1237	3800	-	2922	3540
innere Leistungszahl ε*)	-	5,8	5,3	5,8	4,9	5,4	5,5	5,3	4,7	6	-	5,7	5,7
ODP (auf R11 bezogen)	-	0,05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
GWP (auf CO <sub>2</sub> bezogen, 100a)**)	-	1900	3800	1600	4540	1980	2340	4600	3800	0	1	20	-
MAK-Wert	ppm	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	25	5000	2500	375

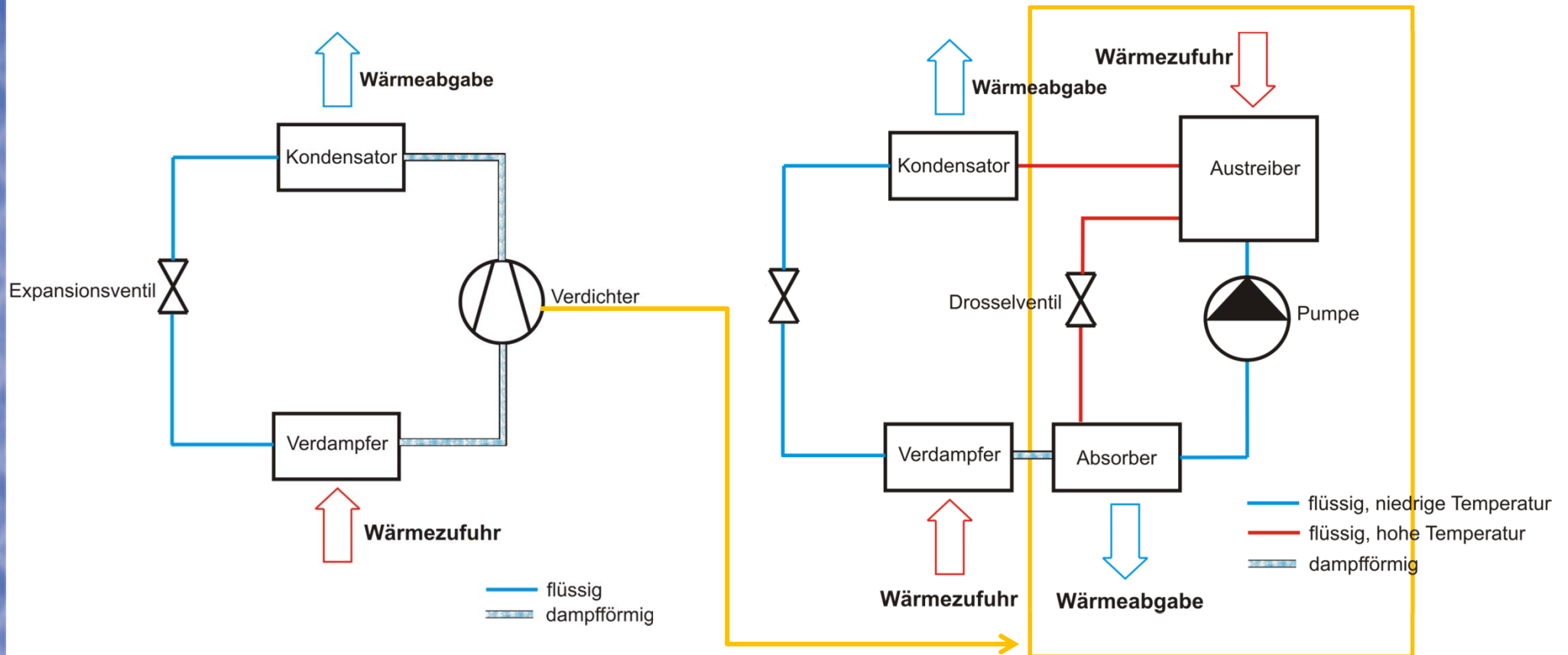
 \*) bei t<sub>0</sub>=0°C, t<sub>c</sub>=40°C, t<sub>u</sub>=35°C

\*\*) GWP-Werte ändern sich nach neuen wissenschaftlichen Erkenntnissen.

Übersicht über die wichtigsten Kältemittel (Liste nicht vollständig und abschliessend)

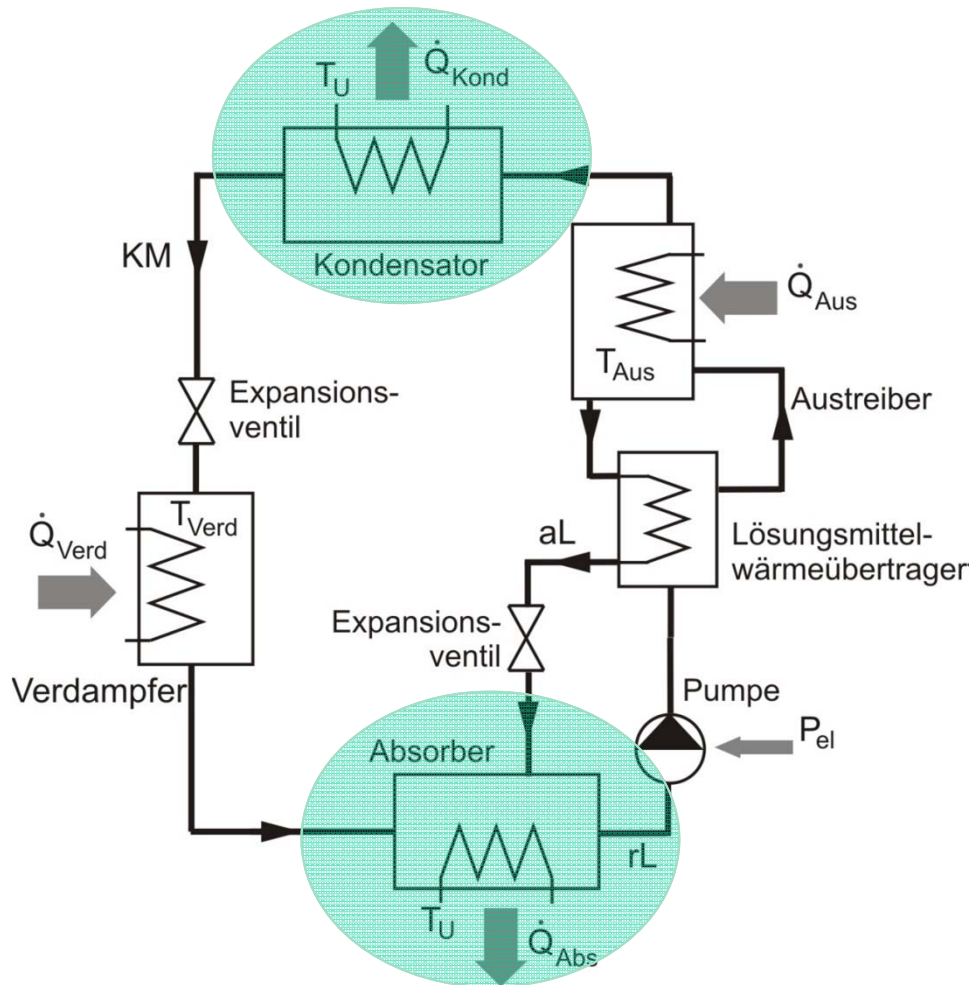
Ursprüngliche Kältemittel	Übergangs-/Service-Kältemittel	Mittel- und langfristige Kältemittel				
<p><b>FCKW</b></p> <p>(chlorhaltig halogeniert)</p>	<p><b>HFCKW / HFKW</b></p> <p>(teilweise chlorhaltig)</p>		<p><b>FKW / HFKW</b></p> <p>(chlorfrei)</p>		<p><b>natürlich</b> <small>(Brennbar)</small></p>	
	<p>Einstoff-Kältemittel</p>	<p>Gemische (Blends)</p>	<p>Einstoff-Kältemittel</p>	<p>Gemische (Blends)</p>	<p>Einstoff-Kältemittel</p>	<p>Gemische (Blends)</p>
<p>z.B. R11 R12 R502 R13B1</p>	<p>z.B. R22 R123 R124 R142b</p>	<p>Überwiegend R22-haltig R401A (MP 39) R402A (HP80) R402B (HP81)</p>	<p>z.B. R134a R125 R32 R143a R152a</p>	<p>z.B. R404A R407A/C R410A R417A <small>Isc 89</small> R413A <small>Isc 49</small> Isceon 29 Isceon 79</p>	<p>z.B. R717 NH<sub>3</sub> R290 <small>Propan</small> R1270 <small>Propylen</small> R600a <small>Isobutan</small> R170 <small>Ethan</small> R744 CO<sub>2</sub> R718 H<sub>2</sub>O</p>	<p>z.B. R290 + R600a  R290 + R170</p>
<p>Dürfen weiterbetrieben aber nicht mehr nachbefüllt werden Meldepflicht und Wartungsheft</p>	<p>Verbot für Neuanlagen Dürfen weiterbetrieben werden Meldepflicht und Wartungsheft</p>		<p>Erlaubt für Neuanlagen wenn keine Alternative mit natürlichen Kältemitteln besteht, Meldepflicht und Wartungsheft</p>		<p>Für Neuanlagen anzustreben Von der Stoffverordnung nicht betroffen da keine in der Luft stabile Stoffe</p>	

# Kompressionskältemaschine / Absorptionskältemaschine





# Betriebsverhalten Absorptionskältemaschine



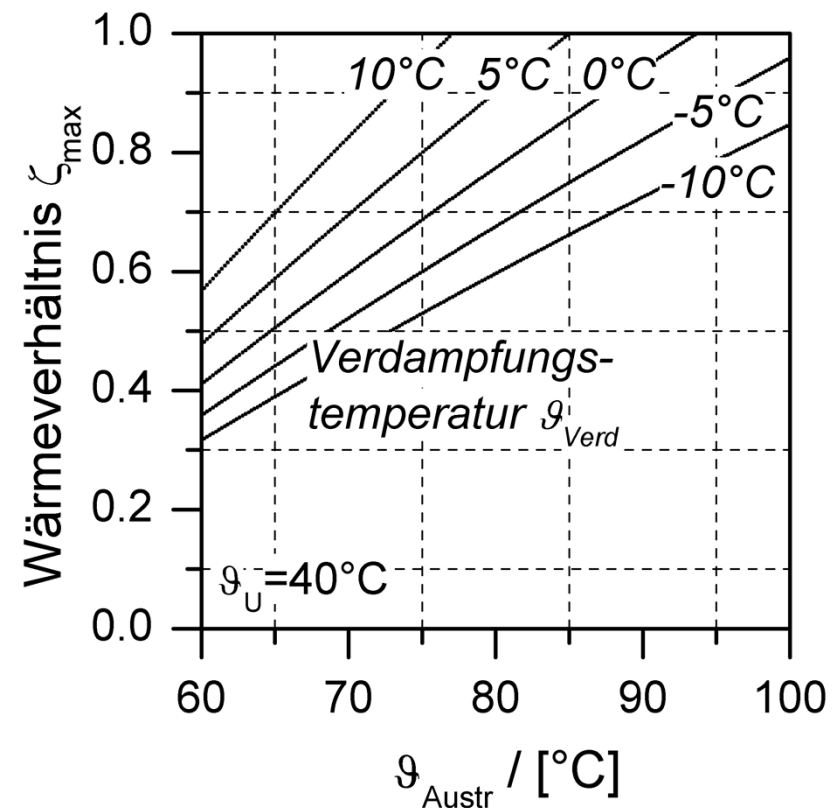
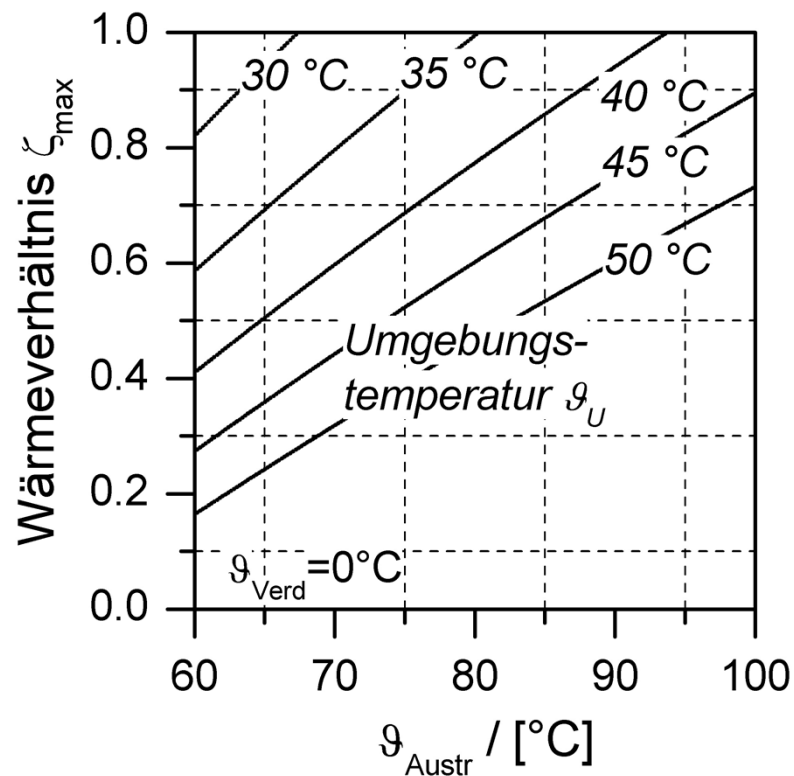
$$\zeta = \frac{\dot{Q}_{Verd}}{\dot{Q}_{Austr}}$$

=COP (Coefficient of Performance)

$$\zeta_{max} = \frac{T_{Verd}}{T_U - T_{Verd}} \cdot \frac{T_{Austr} - T_U}{T_{Austr}}$$

## Betriebsverhalten

$$\zeta_{max} = \frac{T_{Verd}}{T_U - T_{Verd}} \cdot \frac{T_{Austr} - T_U}{T_{Austr}}$$



## Reale Anlagen



Broad DFA-Einheit  
H<sub>2</sub>O-LiBr  
230 – 1700 kW

## Arbeitsstoffe

- 2 Arbeitsstoffpaare haben sich durchgesetzt:
  
- **1.) Ammoniak – Wasser**
  - Kältemittel: Ammoniak
  - Lösungsmittel: Wasser
  
- **2.) Wasser – Lithiumbromid (LiBr)**
  - Kältemittel: Wasser
  - Lösungsmittel: Lithiumbromid

## Vergleich der Kältemittel

	Ammoniak (NH <sub>3</sub> )	Wasser (H <sub>2</sub> O)
Normalsiedepunkt (p=1 bar)	-33,3 °C	100°C
Siededruck (10 °C)	6,2 bar (abs)	0,012 bar (abs)
Kondensationsdruck (40 °C)	15,6 bar (abs)	0,074 bar (abs)
Dampfdichte (10 °C)	4,876 kg/m <sup>3</sup>	0,0094 kg/m <sup>3</sup>
Volumetrische Kälteleistung (10 °C)	5966 kJ/m <sup>3</sup>	23 kJ/m <sup>3</sup>

## Vergleich der Kältemittel

	Ammoniak (NH <sub>3</sub> )	Wasser (H <sub>2</sub> O)
Brennbarkeit	15 Vol.-% bis 34 Vol.-%	Nicht brennbar
Toxizität	Wahrnehmungsgrenze: 5 ppm MAK-Wert: 50 ppm Belästigungsschwelle: 250 ppm Erträglichkeitsgrenze: 500-1.000 ppm Vergiftungserscheinungen: 2.500 ppm Tödliche Konzentration: > 5.000 ppm	Nicht toxisch
Materialverträglichkeit	Ammoniak-Wasser: Buntmetalle, Alu ungeeignet Stahl nur mit Korrosionsinhibitor Edelstahl, Teflon – geeignet	LiBr in Verbindung mit Luft hohe Korrosionswirkung
Umweltverträglichkeit	ODP=0, GWP=0	ODP=0, GWP=0

## Anforderungen an die Absorptionskältemaschine

- 1. Ammoniak/Wasser
  - Dichtheit, keine Leckagen
  - Membranpumpe
  - Druckbeständigkeit bis ca. 30 bar
  
- 2. Wasser/LiBr
  - Dichtheit
  - Stabiles „Vakuum“
  - Geringe Druckverluste

# Absorptionskältemaschinen für die solare Kühlung

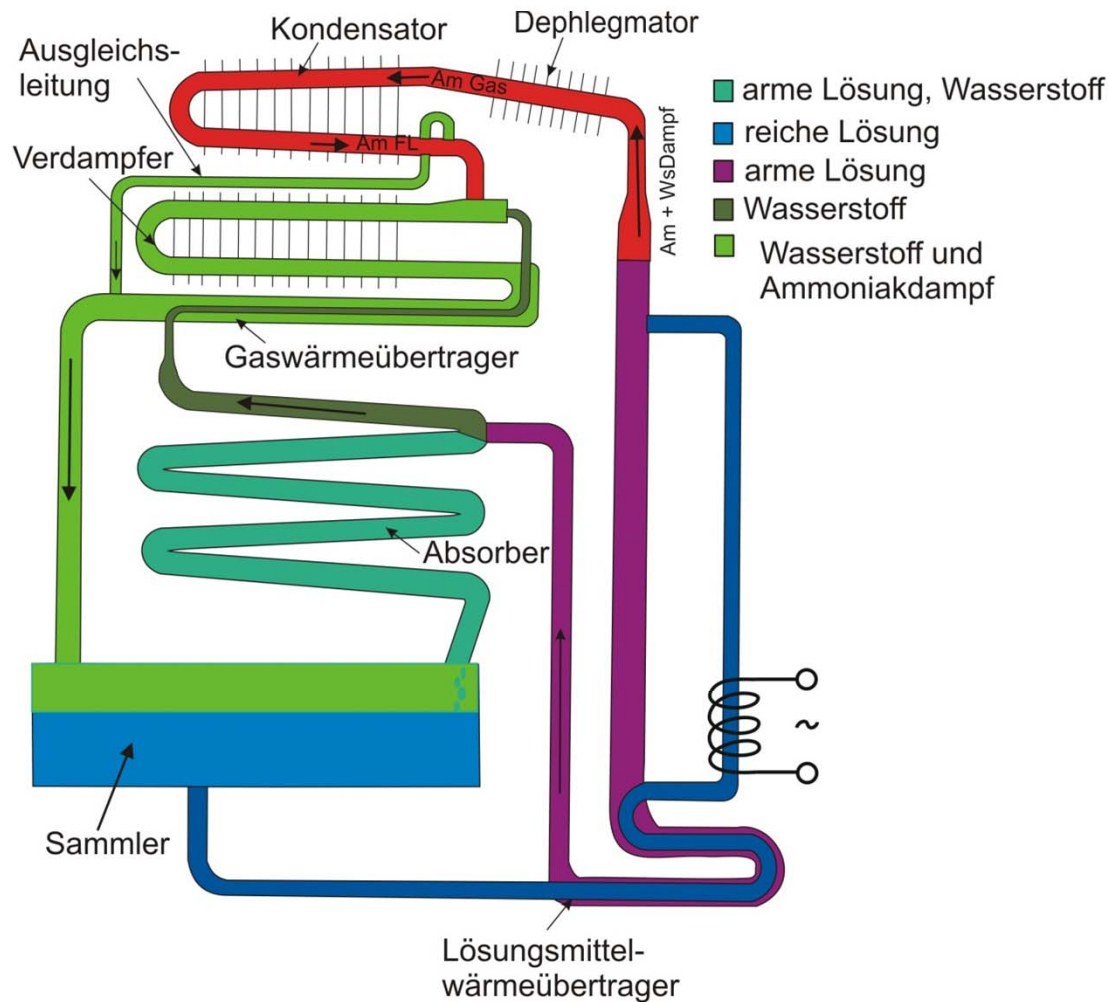
**ITW:**  $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$  (10 kW)

**EAW:**  $\text{H}_2\text{O}/\text{LiBr}$  (15 kW)

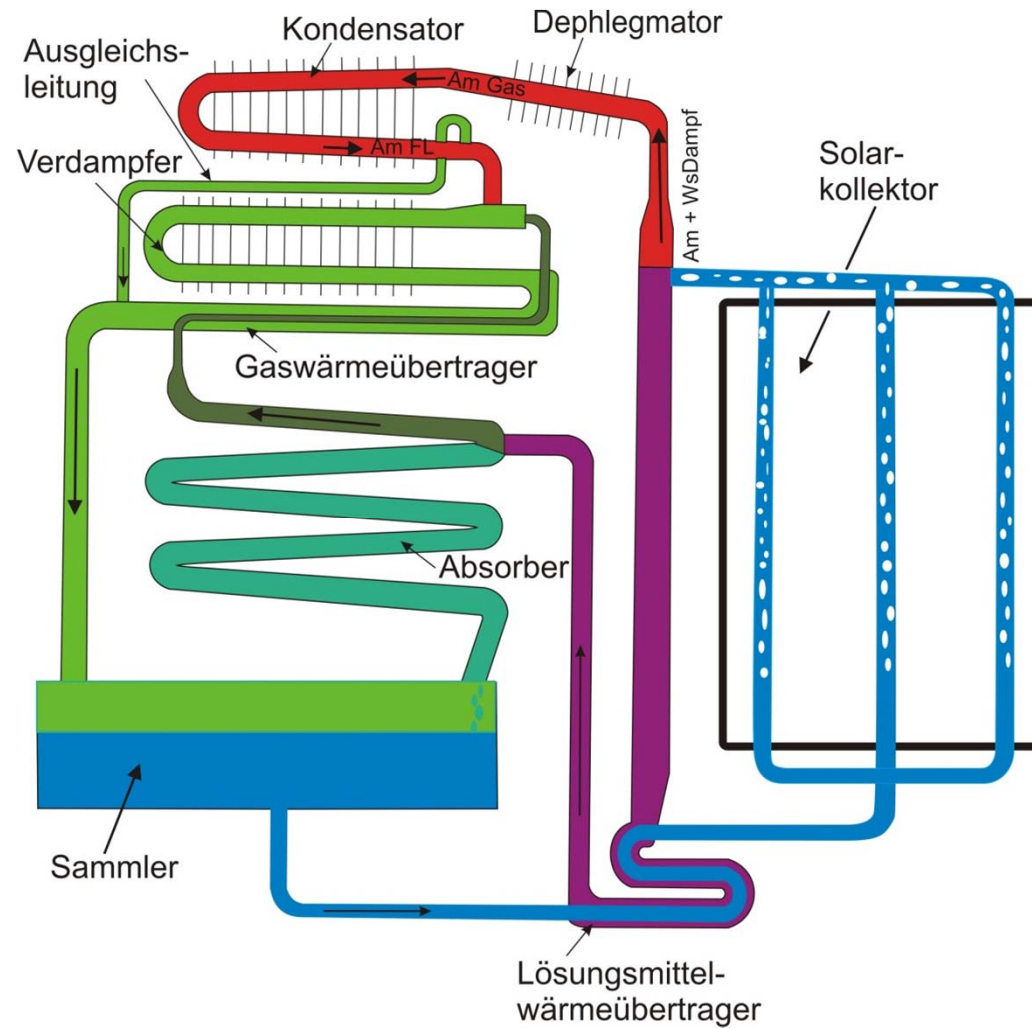




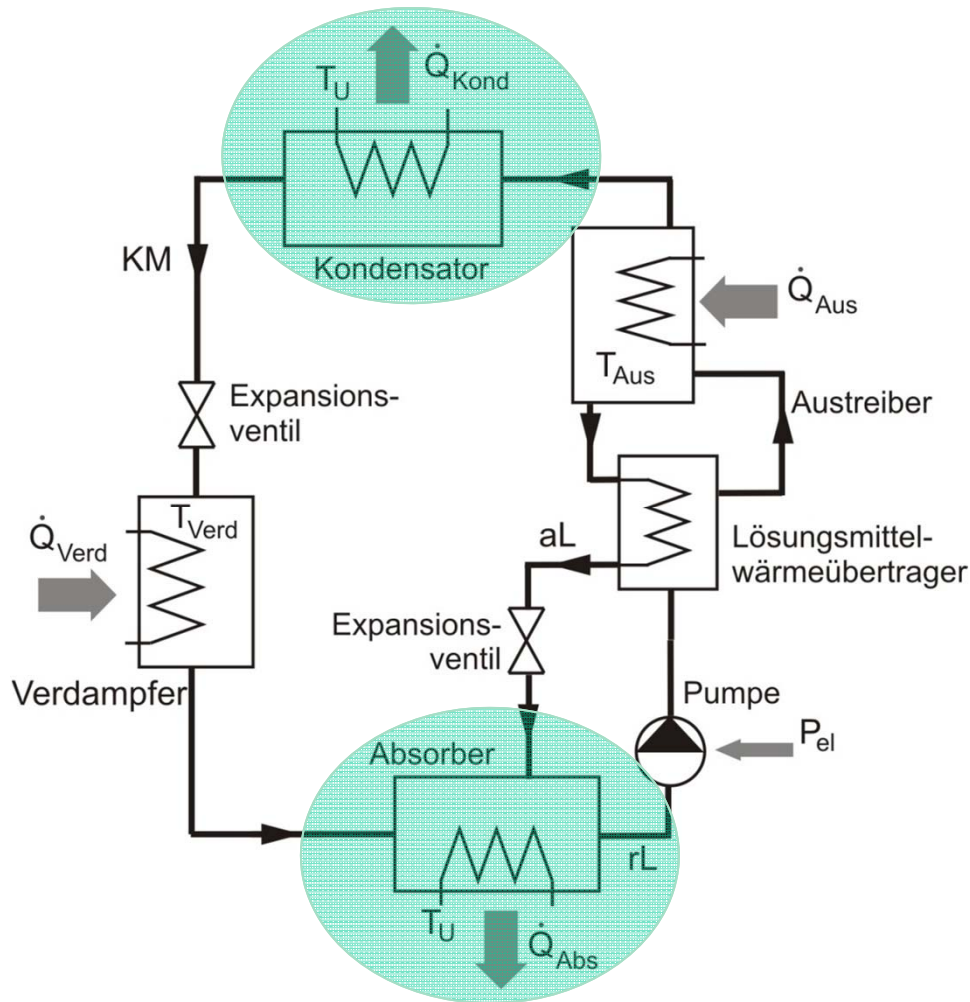
# Diffusions-Absorptions-Kältemaschine (NH<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O)



## Direkt solar angetrieben (ITW)

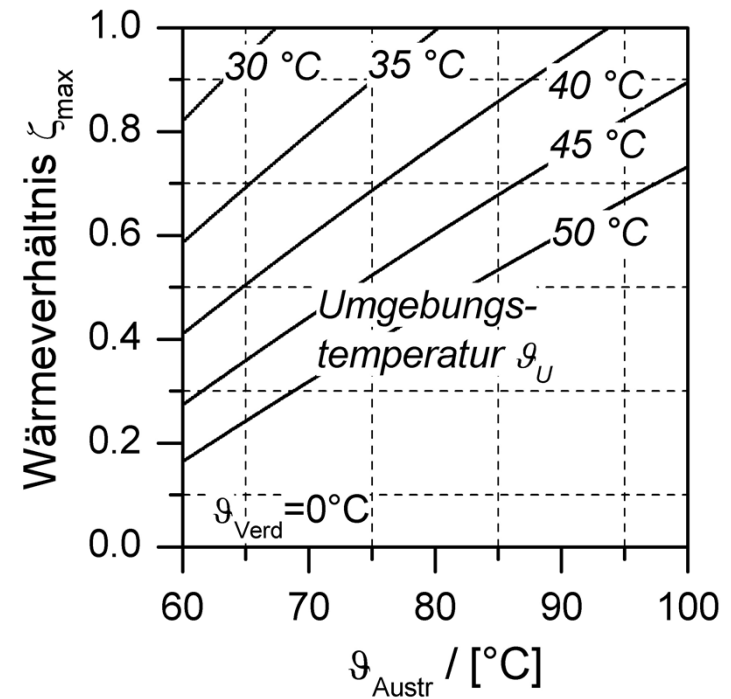


# Rückkühlung



$$\dot{Q}_{zu} = \dot{Q}_{ab}$$

$$\dot{Q}_{Austr} + \dot{Q}_{Verd} + P_{Pump} = \dot{Q}_{Kond} + \dot{Q}_{Abs}$$

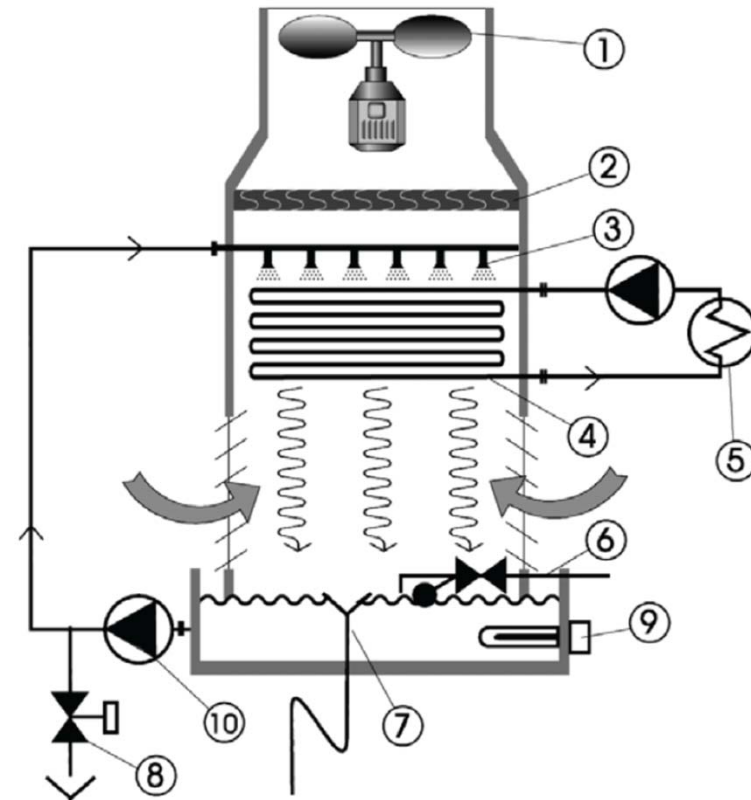
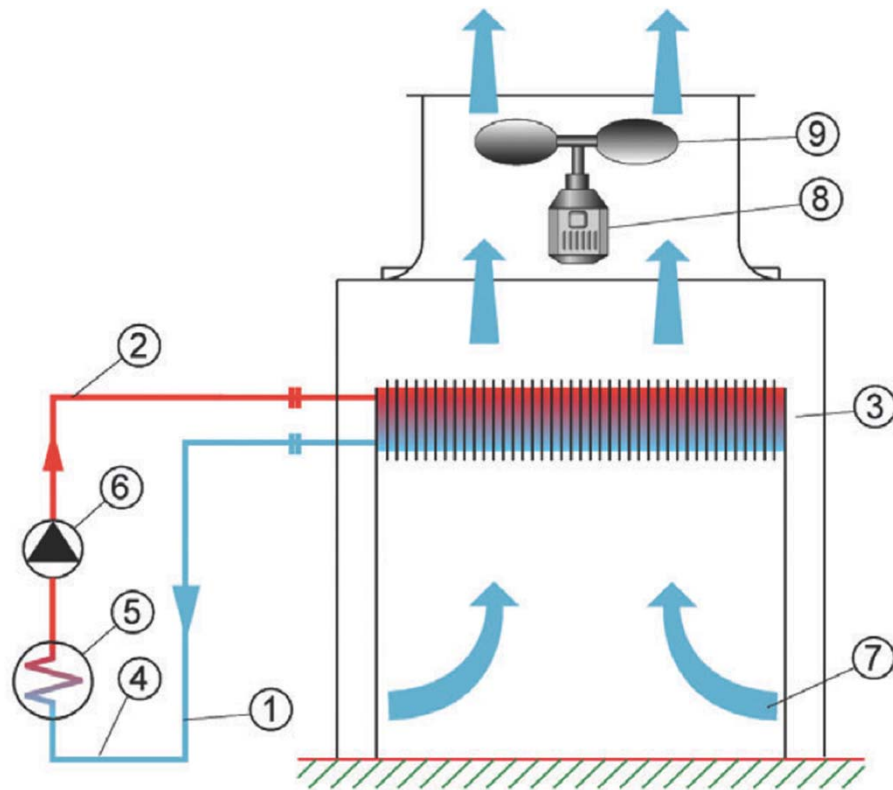


## Rückkühlung

- Meerwasser / Flusswasser
- Schwimmbad
- Erdsonde
  
- Nasskühler (Verdunstungskühlturm)
- Trockenkühler

# Trockenkühler / Nasskühler

www.itw.uni-stuttgart.de



Raetz, Michael: Hybridkühler - Individuelle Problemlösungen für den Kunden. In: Kälte Klima Aktuell. Seite: 42-46

Quellen

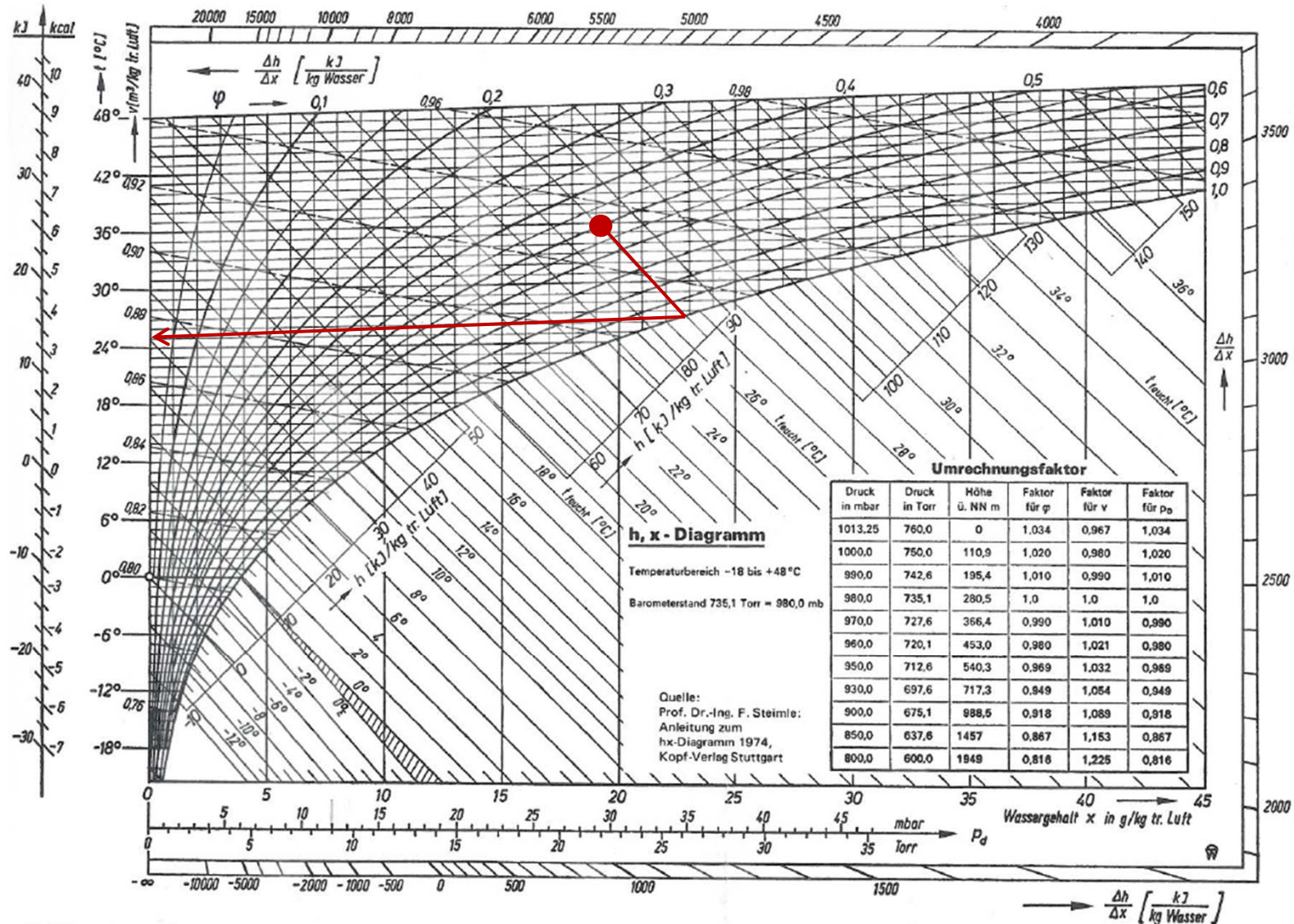
Dierks, Gert: Rückkühlsysteme im Kältekreislauf. In: Kälte Klima Aktuell. Seite: 8-19

Kühlgrenz-  
temperatur

Umgebungsluft-  
temperatur

Feuchtkugel-  
temperatur

# Feuchtkugeltemperatur



Mollier-h, x - Diagramm  
für feuchte Luft unterschiedlicher Drücke

## Trockenkühler / Nasskühler





## Trockenkühler / Nasskühler

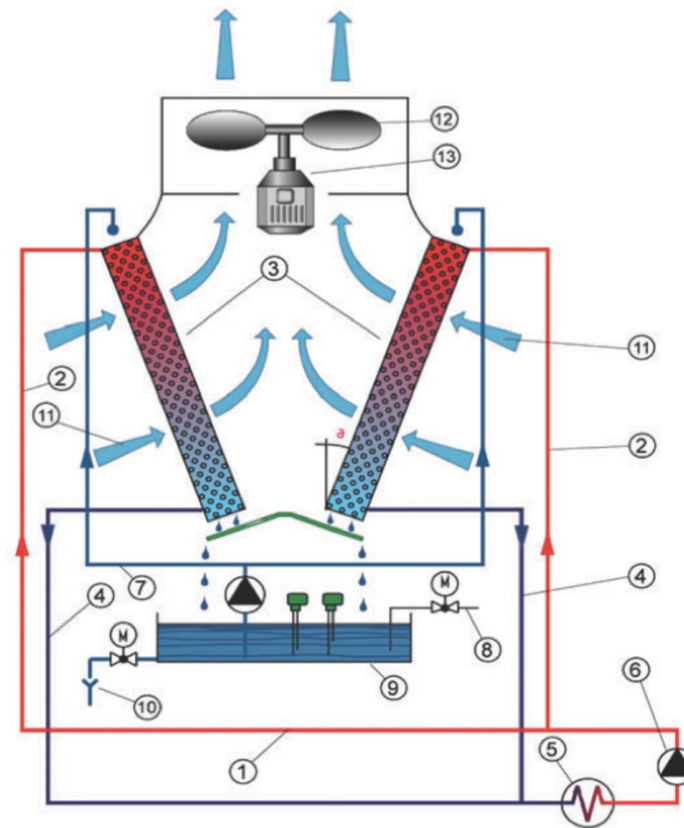
- Hohe Rückkühltemperaturen
- ⇒ Hohe Heiztemperaturen  
am Austreiber
- Hoher Energiebedarf
- + Kein Wasserverbrauch
- + niedriger Wartungsaufwand

- + Niedrige Rückkühltemperatur
- + niedrige Energiekosten
- Hoher Wasserverbrauch
- Hygienische Probleme  
(Legionellen, etc.)
- Hoher Wartungsaufwand
- Wasseraufbereitung





# Hybridkühler



## Vergleich Absorptionskältemaschinen

### Wasser/ Lithiumbromid

- Kältemittel: Wasser
- Verdampfertemperatur  $\geq 5 - 6 \text{ }^\circ\text{C}$
- Heiztemperatur:  $80 - 110 \text{ }^\circ\text{C}$
- COP:  $0,7 - 0,8$
- Kälteerzeugung bei Unterdruck ( $\sim 2 \text{ mbar}$ )
- + Hoher COP bei niedrigen Antriebstemperaturen
- + Wasser als Kältemittel unbedenklich
- Hoher Aufwand zur Vakuumerhaltung
- Korrosion bei Inertgaseintritt
- Kristallisation bei hohen Temperaturen
- Hohe Anforderung an Rückkühlung

### Ammoniak/ Wasser

- Kältemittel: Ammoniak
- Verdampfertemperatur  $-40 \text{ }^\circ\text{C}$  bis  $20 \text{ }^\circ\text{C}$
- Heiztemperatur:  $80 - 110 \text{ }^\circ\text{C}$
- COP:  $0,6 - 0,7$
- Kälteerzeugung bei Überdruck ( $\sim 4 \text{ bar}$ )
- + Niedrige Verdampfungstemperaturen  
=> Eiszeugung möglich
- + Keine Korrosions- bzw. Kristallisationsproblematik
- + Höhere Rückkühlungstemp. möglich
- Hohe Anforderungen an Sicherheit

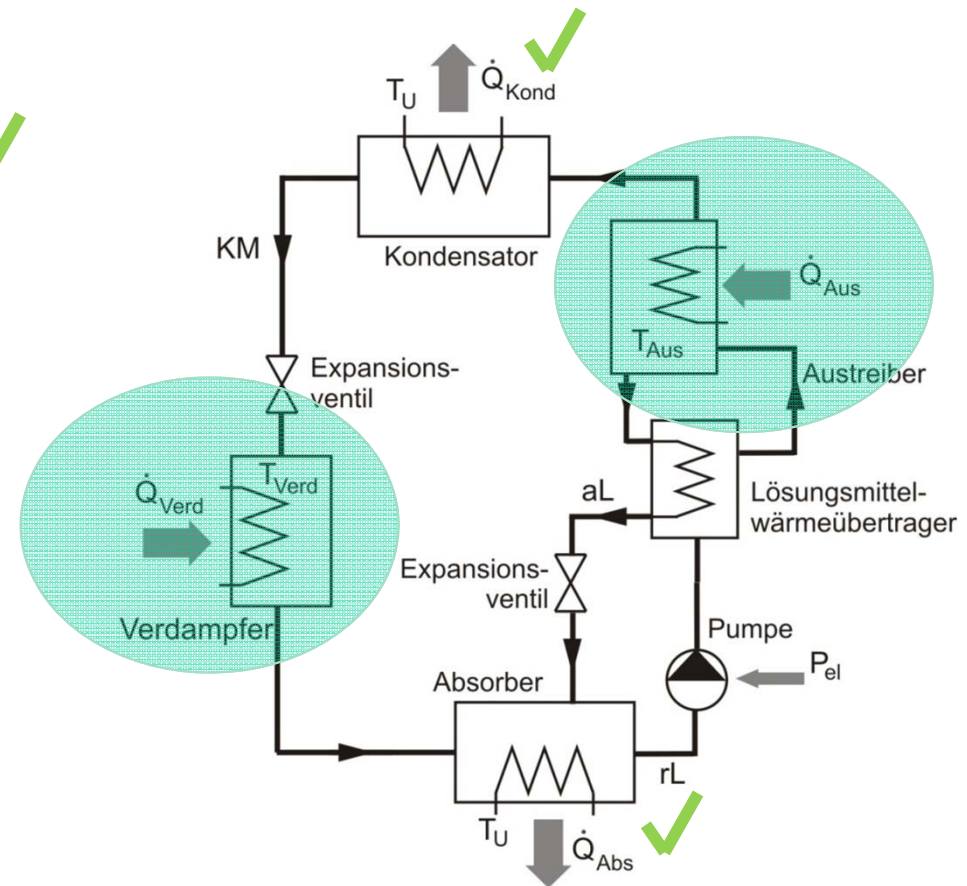
# Kristallisation

Kristallisationsgefahr:

- Bei zunehmender Rückkühltemperatur
- Bei hoher Austreibertemperatur

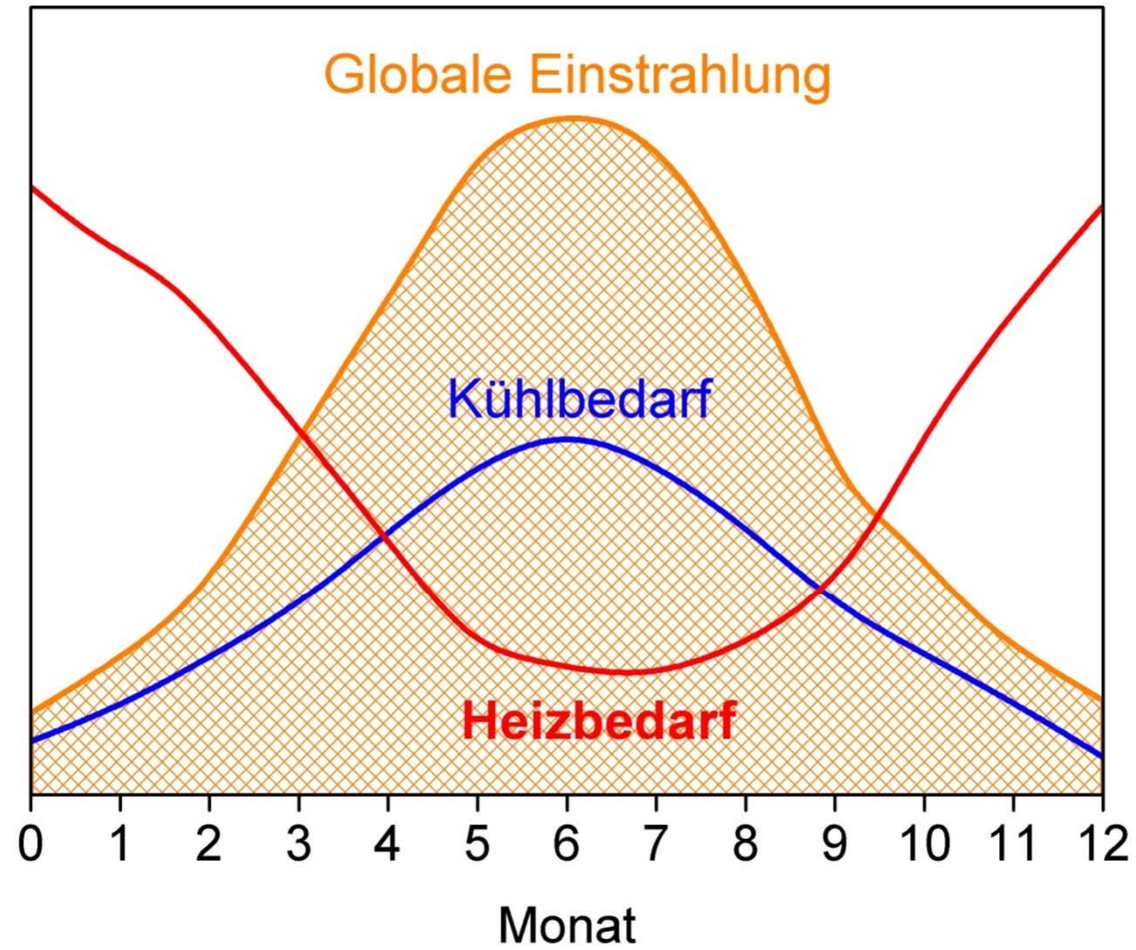
## Zusammenfassung

- Kälteprozesse ✓
- Absorptionskälteprozess ✓
- Kältemittel ✓
- Kältemaschinen ✓
- Rückkühlung ✓

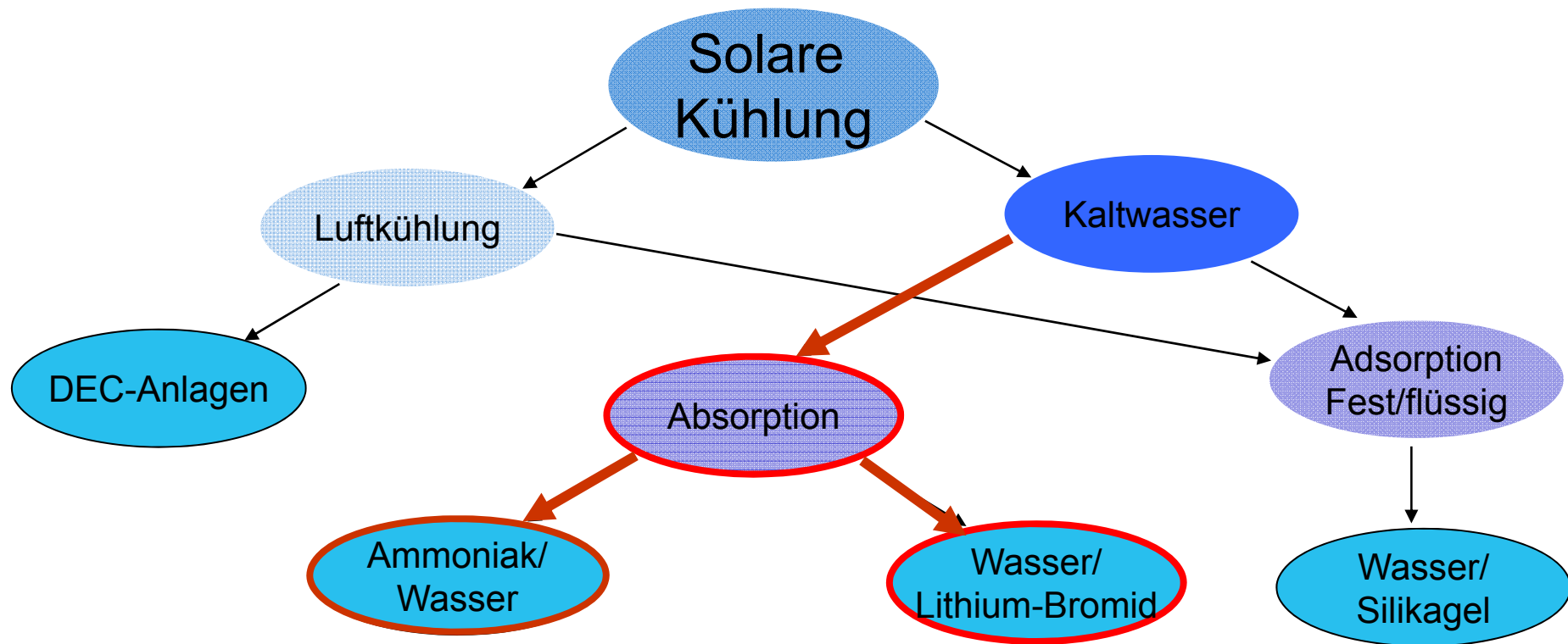








# Möglichkeiten der solaren Kühlung





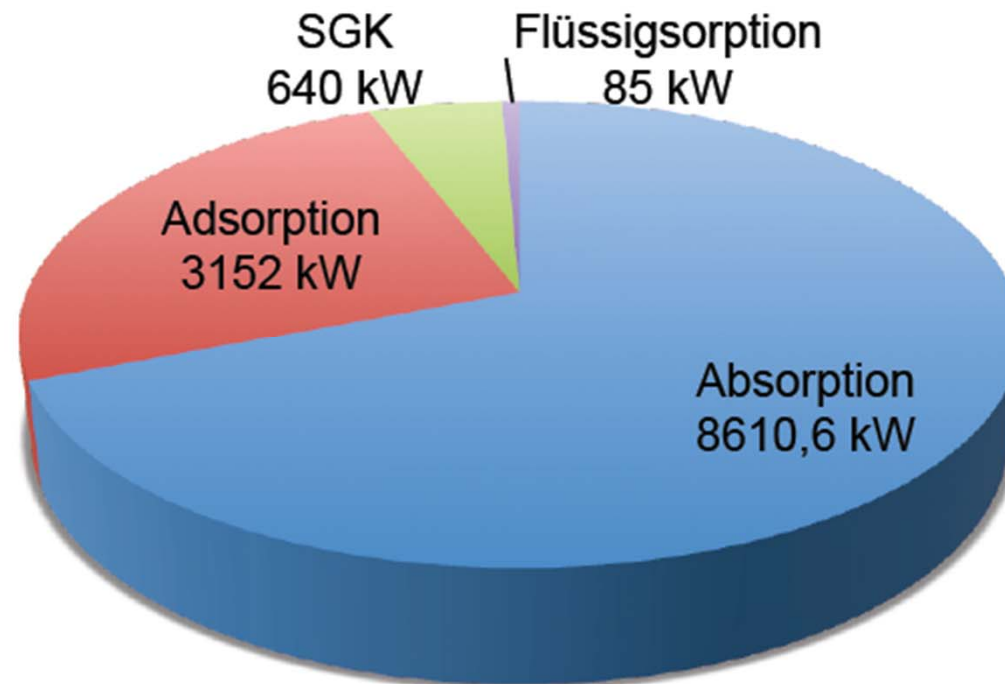


Photovoltaik

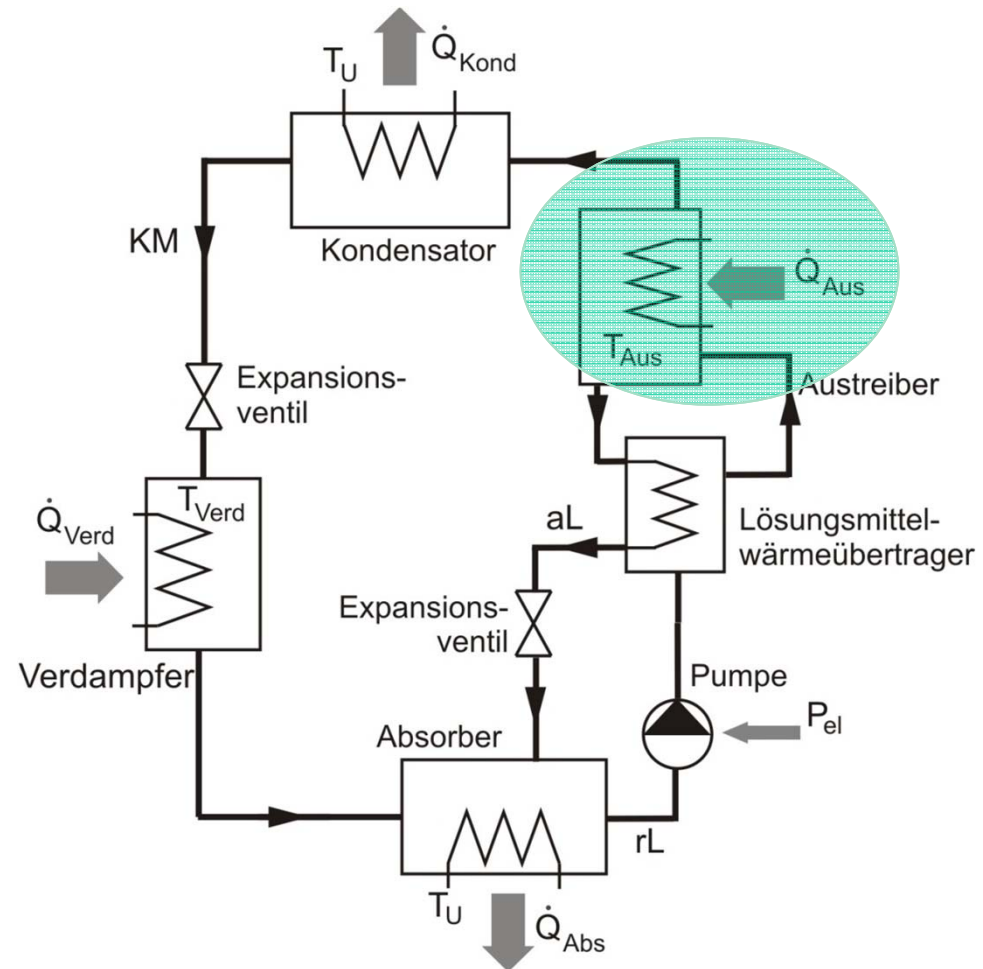


Solarthermische Kraftwerke

## Angewandte Verfahren (Europa)



# Antriebswärme



# Thermische Solarkollektoren

$3\text{m}^2 / \text{kW}_{\text{Kälte}}$

www.itw.uni-stuttgart.de



Flachkollektor

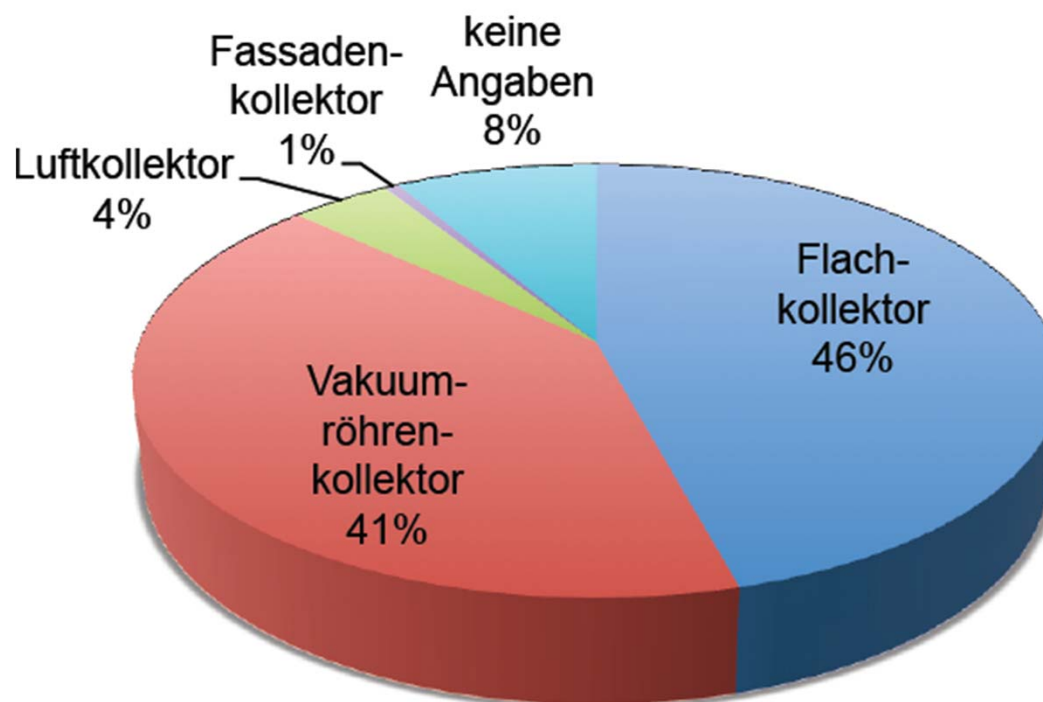


Vakuumröhren-  
kollektor



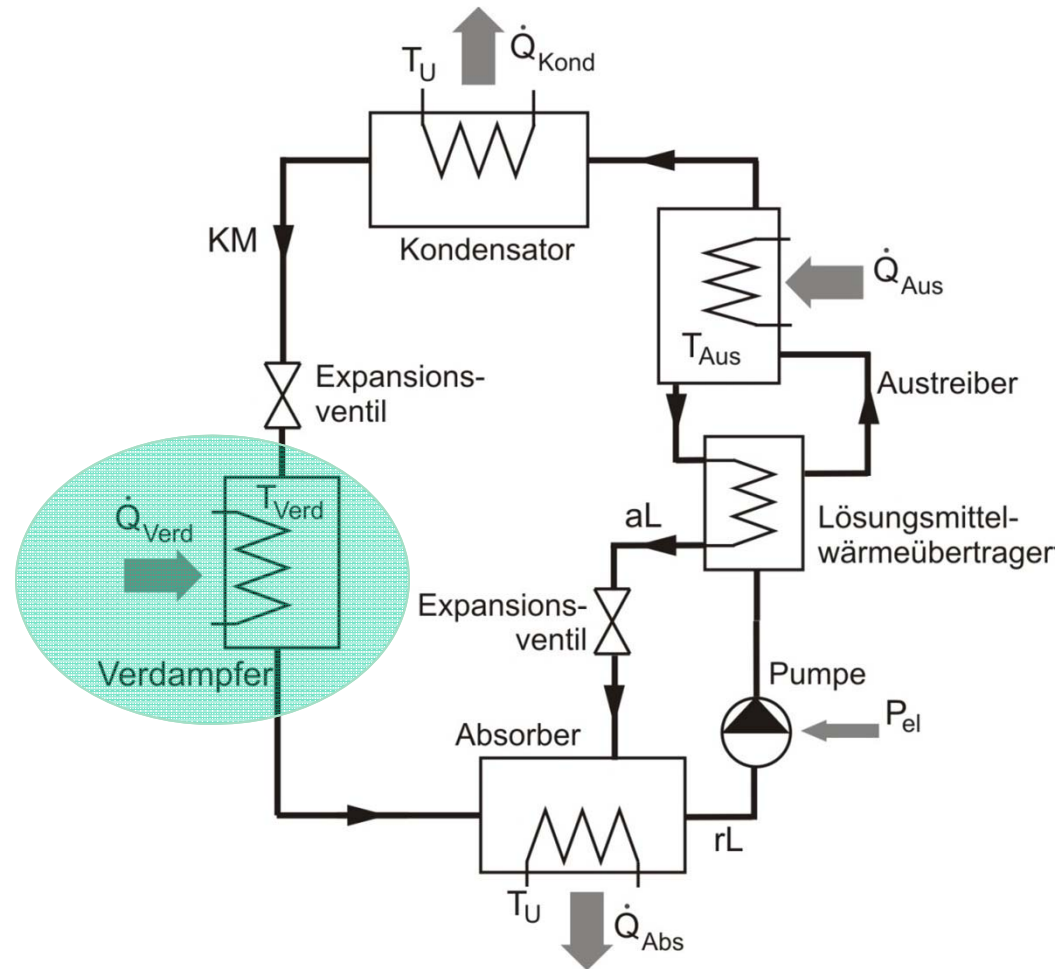
Parabolrinnen-  
kollektor

## Eingesetzte Kollektoren

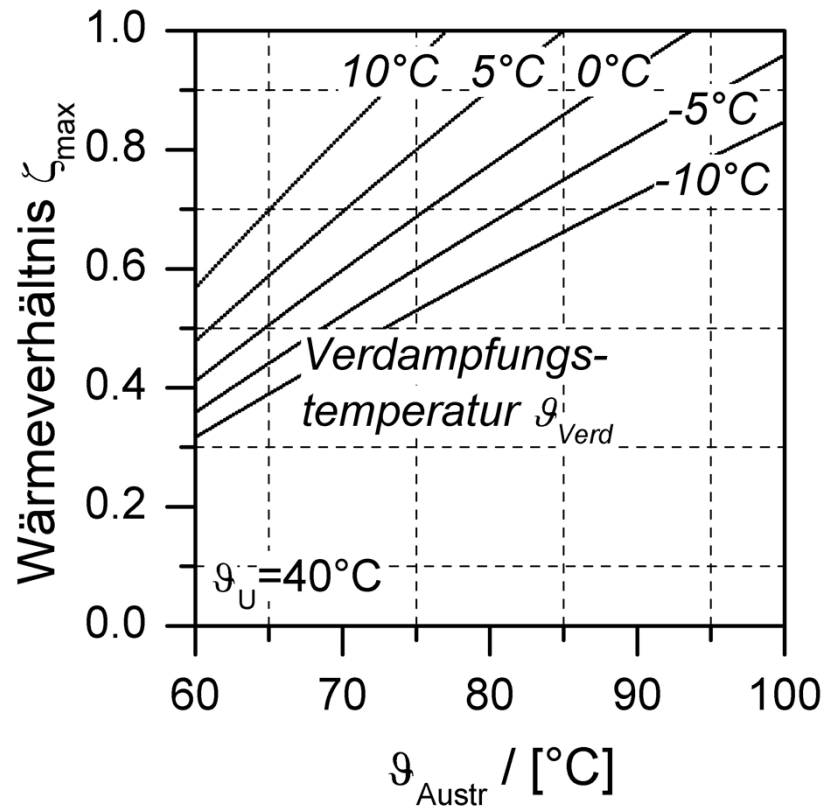


Quelle: Übersicht zum Bestand an solaren Klimatisierungsanlagen in Europa und Ausblick auf die zukünftige Marktentwicklung dieser Technologie, Bachelor-Arbeit, ITW, Universität Stuttgart 2010

# Nutzbare Kälteleistung



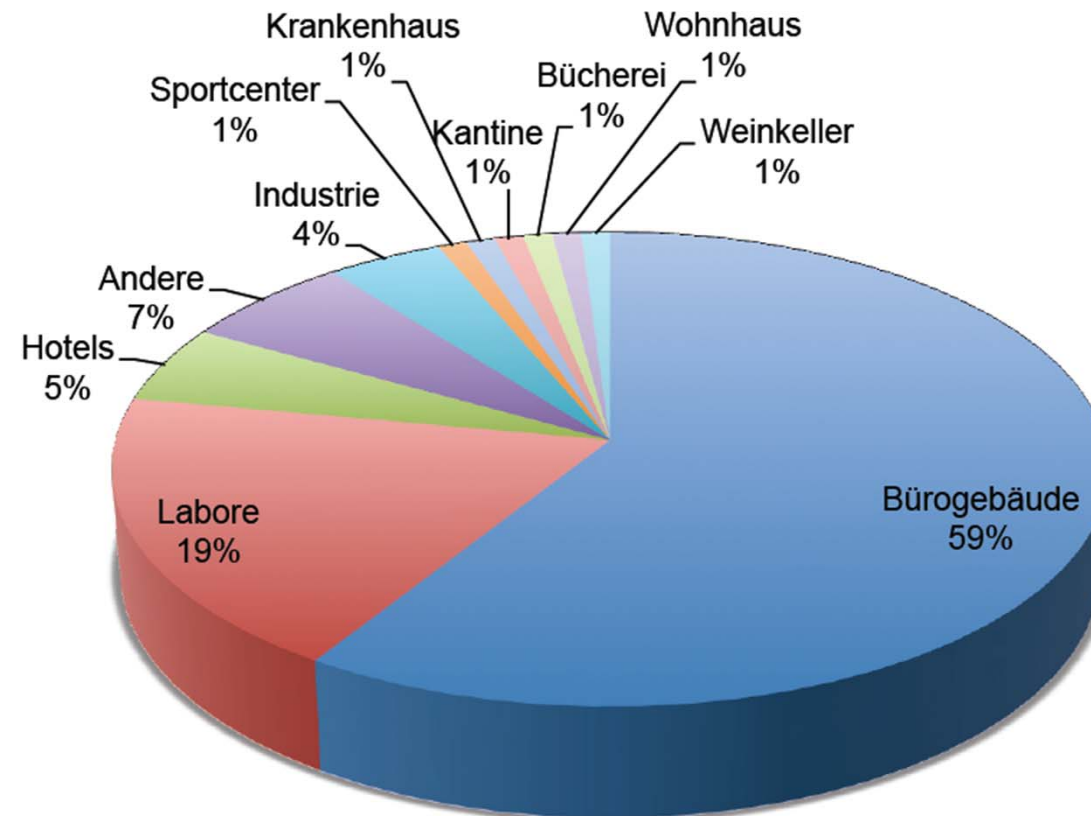
## Kälteverbraucher



Flächenkühlung  
(Decke, Boden, Wand)

Entfeuchtung schwer möglich

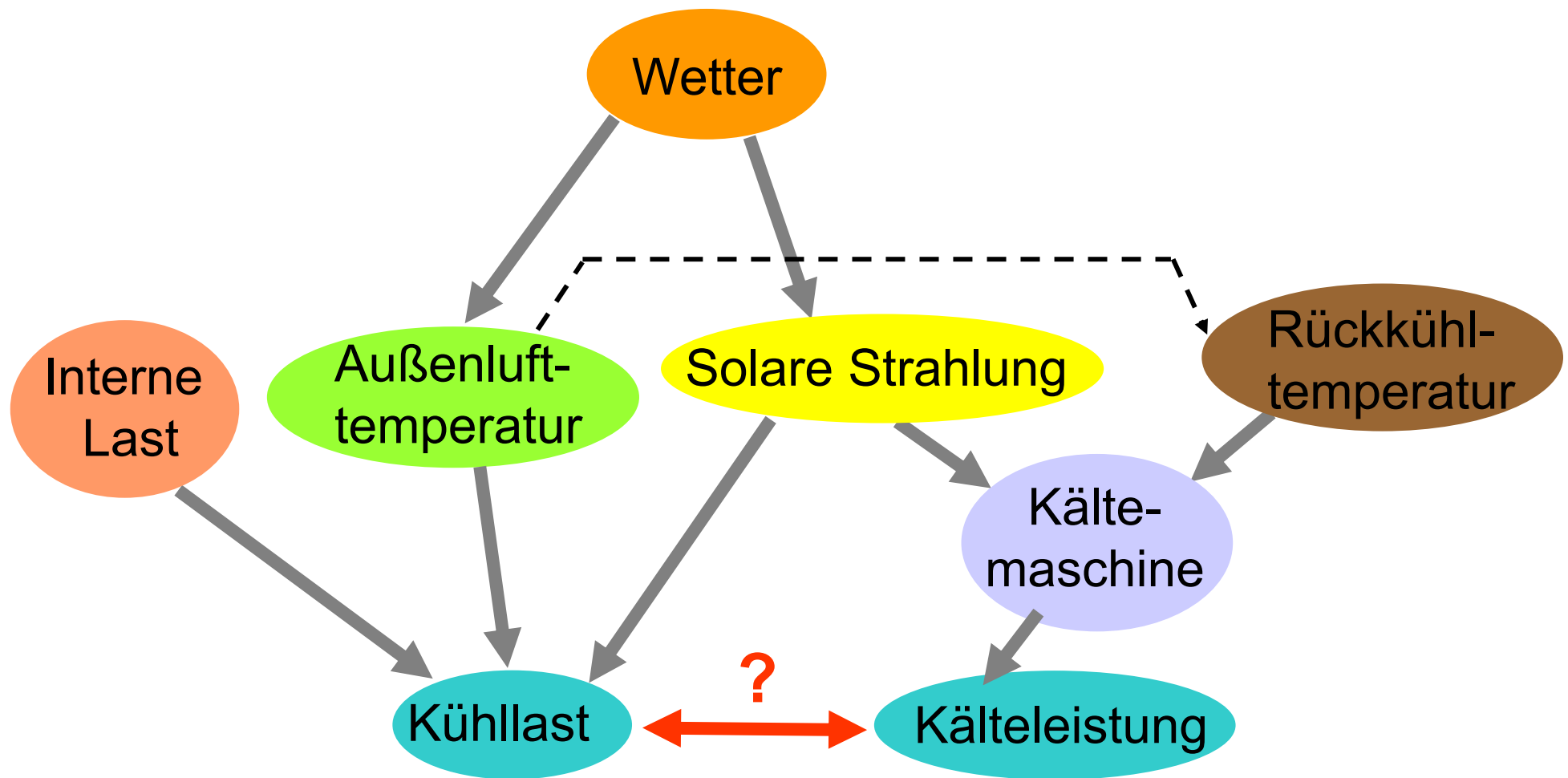
## Was wird gekühlt?



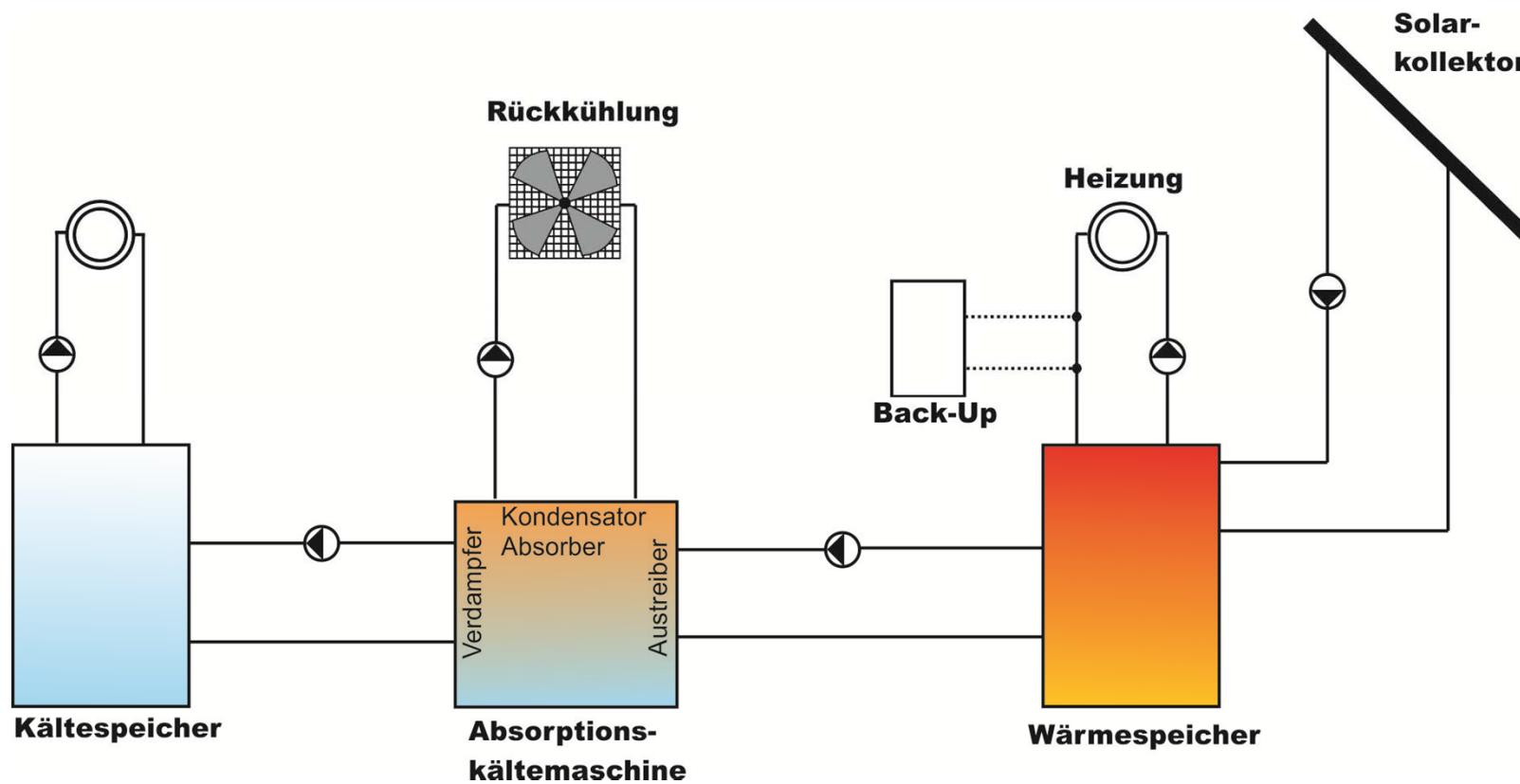
Quelle: Übersicht zum Bestand an solaren Klimatisierungsanlagen in Europa und Ausblick auf die zukünftige Marktentwicklung dieser Technologie, Bachelor-Arbeit, ITW, Universität Stuttgart 2010



# System



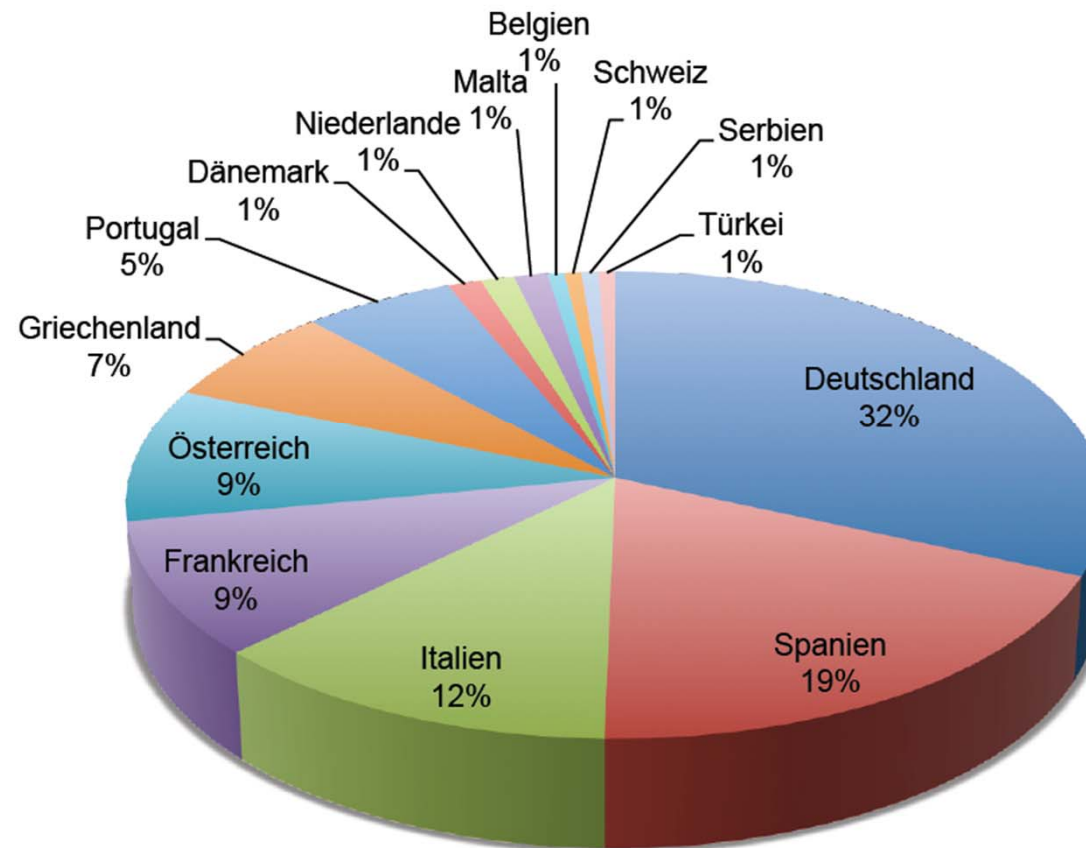
# System zur solaren Kühlung



## ITW-Entwicklung



## Verteilung in Europa

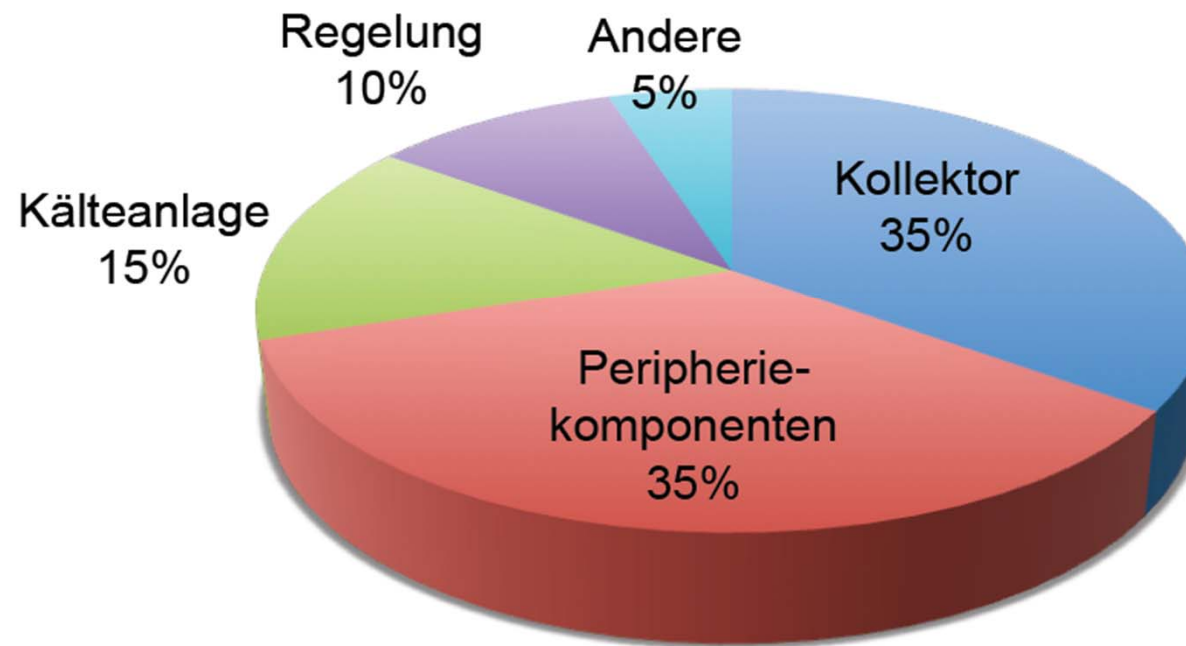


Quelle: Übersicht zum Bestand an solaren Klimatisierungsanlagen in Europa und Ausblick auf die zukünftige Marktentwicklung dieser Technologie, Bachelor-Arbeit, ITW, Universität Stuttgart 2010

## Pro / Contra Solare Kühlung beim aktuellen Entwicklungsstand

PRO	CONTRA
Geringer Primärenergiebedarf	Hohe Investitionskosten
Geringe Betriebskosten	Hoher Regelungsaufwand
Nutzung zur Heizung – Vielfältige Nutzung	100% Komfort nur bei enormen Aufwand
Vermeidung von Stagnation im Kollektorfeld	Höhere Störanfälligkeit (viele „Kinderkrankheiten“)
Geringe CO <sub>2</sub> -Emissionen	Träge, lange Startzeiten
Nutzung der Solarstrahlung	Hoher Platzbedarf

## Kostenverteilung



Meyer, Jens-Peter; Jakob, Uli: Was solare Kühlung kostet - das Rococo-Projekt.

In: Sonne Wind & Wärme. 2008, 2, Seite: 83-90

## Wirtschaftlichkeit?



- Weitere Erprobung im Feld und Messtechnische Begleitung

- Serienfertigung, Standardisierung

- Forschung zur Optimierung der Systeme

- steigende Energiepreise

- Kombinierte Nutzung Kälte- und Wärmeversorgung (Wärmepumpe)

## Ausblick und Zusammenfassung

- Weitere Forschungsbemühungen noch erforderlich
- Durch weltweit steigende Nachfrage und Stromkostenzunahme wird Absorptionskältetechnologie zunehmend konkurrenzfähig zu Kompressionssystemen
- Großes Potential zur Einsparung von Primärenergie und CO<sub>2</sub>-Emissionen