

FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR UMWELT-, SICHERHEITS- UND ENERGIETECHNIK UMSICHT



FLX[®]Kälte

KÄLTETECHNIK IN DEUTSCHLAND

Steckbriefe zu Kältetechnologien



KÄLTETECHNIK IN DEUTSCHLAND

Steckbriefe zu Kältetechnologien

In der Reihe »Kältetechnik in Deutschland« werden Rechercheergebnisse aus dem Forschungsprojekt »Flexibilisierung von Kälteversorgungssystemen für den elektrischen Energieausgleich in Deutschland – FlexKaelte« zusammengefasst. Im Fokus des Projektes »FlexKaelte« steht die Frage, welchen Beitrag die Kälteversorgung zur Transformation der Energiesysteme leisten kann, wenn sie für den elektrischen Energieausgleich in Deutschland eingesetzt wird. Das Projekt wird unter dem Förderkennzeichen 03EI1007 vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie gefördert.

In der ersten Phase des Projekts wird eine Metastudie zu Umfang und Art der Kälteanwendungen in Deutschland durchgeführt. Die Rechercheergebnisse dieser ersten Projektphase sind in Steckbriefen zusammengefasst, die die einzelnen Kälteanwendungen und Kältetechnologien erfassen. Die vorliegende Veröffentlichung beinhaltet die Steckbriefe zu den Kältetechnologien.

Im weiteren Projektverlauf sollen mit Hilfe modellbasierter Szenarienrechnungen die heutige und künftige Flexibilität der Kälteversorgungssysteme technisch, wirtschaftlich und ökologisch bewertet werden.

Sprechen Sie uns an (Projektleitung):

Dr.-Ing Annedore Mittreiter
Abteilungsleiterin Energiesysteme

+49 208 8598-1373
annedore.mittreiter@umsicht.fraunhofer.de

Fraunhofer-Institut für Umwelt-,
Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT
Osterfelder Straße 3
46047 Oberhausen

Dana Laureen Laband
Abteilung Elektrochemische Energiespeicher

+49 208 8598-1590
dana.laband@umsicht.fraunhofer.de

Bitte zitieren Sie das Dokument folgendermaßen:

Schmidt, D.; Goetschkes, C.; Pollerberg, C.: Kältetechnik in Deutschland – Steckbriefe zu Kältetechnologien, Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT (Hrsg.), Oberhausen, 2020.

Bildnachweis Titelseite:
© shutterstock

© Fraunhofer UMSICHT

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Stand des Dokuments: Original vom Dezember 2020, aktualisiert im Juli 2023

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	4
Kälteerzeugung	5
Kompressionskältemaschinen	6
Absorptionskältemaschinen	10
Adsorptionskältemaschinen	14
Dampfstrahlkältemaschinen.....	16
Sorptionsgestützte Klimatisierung.....	18
Klimageräte	21
Kleingeräte – Haushaltskühl- und Gefrierschränke	24
Kältespeicherung	27
Sensible Kältespeicher	28
Latentkältespeicher.....	30
Literatur.....	34

Abkürzungsverzeichnis

AbKM	Absorptionskältemaschine
AbK	Absorberkühlschrank
AdKM	Adsorptionskältemaschine
COP	Coefficient of performance (dt.: Leistungszahl <i>bei Wärmepumpen</i>)
DAKM	Diffusionsabsorptionskältemaschine
DEC	Desiccant evaporative cooling (dt.: sorptionsgestützte Kühlung)
DSKM	Dampfstrahlkältemaschine
EER	Energy efficiency ratio (dt.: Leistungszahl <i>bei Kälteanlagen</i>)
KKM	Kompressionskältemaschine
KV	Kolbenverdichter
PCM	Phase change material (dt.: Phasenwechselmaterial)
SbV	Schraubenverdichter
SCOP	Seasonal coefficient of performance (dt.: Jahresarbeitszahl <i>bei Wärmepumpen</i>)
ScV	Scrollverdichter
SEER	Seasonal energy efficiency ratio (dt.: Jahresarbeitszahl <i>bei Kälteanlagen</i>)
TEK	Thermoelektrischer Kühlschrank
TV	Turboverdichter
VRF	Variable refrigerant flow (dt.: variabler Kältemittelstrom)

Kälteerzeugung

Die Kältetechnik ist essentiell für die Sicherstellung der Funktion und Sicherheit zahlreicher Prozesse, beispielsweise für die Aufrechterhaltung der Kühlketten in der Lebensmittel- und Pharmaindustrie. Weiterhin wird diese zur Raumklimatisierung und Wärmeabfuhr von Maschinen, Anlagen und der elektronischen Datenverarbeitung (EDV) eingesetzt und ist für die Kältebereitstellung in temperatursensitiven Produktionsprozessen notwendig. Das Anwendungsfeld der Kältetechnik ist daher breit gefächert.

Die Bereitstellung von Kälte erfolgt über Technologien, welche in ihrer Ausführung und Größe variieren. Grundsätzlich wird bei der Kälteerzeugung jedoch das gleiche Prinzip angewandt: An einer Stelle wird Wärme auf einem niedrigen Temperaturniveau abgeführt. Hier tritt der Kühlungseffekt, meist durch Verdampfung eines Kühlmittels, auf. An anderer Stelle wird die abgeführte Wärme auf einem höheren Temperaturniveau an die Umgebung wieder abgegeben. Um den Prozess aufrecht zu erhalten, muss Arbeit aufgewendet werden. Je nach Kälteanlagentyp wird diese Energie aus elektrischer Energie oder thermisch aus z.B. Abwärme bereitgestellt.

Die Effizienz einer Kältemaschine wird über eine Leistungszahl bewertet. Diese gibt das Verhältnis aus energetischem Nutzen zu Aufwand der Kältemaschine an und wird abhängig von der vorliegenden Kältemaschine unterschiedlich definiert.

Handelt es sich um elektrisch betriebene Kompressionskältemaschinen, wird von dem *energy efficiency ratio* (EER) gesprochen. Dieser wird als das Verhältnis der Kälteleistung (Nutzen) zu der dafür aufgewendeten elektrischen Arbeit (Aufwand) definiert. Die Kennzahl ist vergleichbar mit dem *coefficient of performance* (COP) bei Wärmepumpen, welcher das Verhältnis aus der Heizleistung zur aufgewendeten elektrischen Arbeit beschreibt. Werden die genutzten wie aufgewendeten Energiemengen für ein Jahr bilanziert und dividiert, spricht man von einer Jahresarbeitszahl, welche als *seasonal energy efficiency ratio* (SEER) für Kälteanlagen, bei Wärmepumpen entsprechend *seasonal coefficient of performance* (SCOP) bezeichnet werden.

Bei thermisch betriebenen Kälteanlagen wie Absorptionskältemaschinen wird als Effizienzkennzahl das Wärmeverhältnis ζ angegeben. Dieses gibt das Verhältnis der erbrachten Kälteleistung (Nutzen) und der zugeführten Wärmeleistung (Aufwand) an. Ein direkter Vergleich von Wärmeverhältnis mit EER erscheint jedoch nicht sinnvoll, da unterschiedliche Energieformen mit unterschiedlicher Wertigkeit genutzt werden.

Die verschiedenen Kältetechnologien werden im Folgenden kurz erläutert. In ihrer Funktionsweise dargestellt, sowie werden weitere technisch relevante Kennzahlen angegeben.

Kompressionskältemaschinen

Kompressionskältemaschinen (KKM) sind elektrisch betriebene Kältemaschinen. Dieser Typ Kältemaschine besitzt den größten Marktanteil und wird am häufigsten in Kälteversorgungssystemen eingesetzt.

In einem linkdrehenden Kreisprozess erfährt ein Kältemittel nacheinander eine Aggregatzustandsänderung von flüssig zu gasförmig und umgekehrt. Bei der Verdampfung wird vom Kältemittel Verdampfungswärme aus der Umgebung aufgenommen und so der Kühleffekt erzeugt. [1]

Eine wesentliche Komponente der KKM ist der Kältemittelverdichter. Es werden verschiedene Verdichterbauarten eingesetzt, die die Betriebscharakteristik der Kompressionskältemaschine bestimmen. Zum Einsatz kommen Schrauben-, Turbo-, Kolben- und Scrollverdichter, welche in nachfolgender Tabelle näher erläutert werden.

Verdichtertyp	Funktionsweise [2]
TV Turboverdichter	Die Verdichtung erfolgt durch Beschleunigung des Gasstroms in einem Laufrad. Der Aufbau und das Betriebsverhalten sind vergleichbar mit einer Kreiselpumpe oder einem Radialventilator.
SbV Schraubenverdichter	<p>Es gibt hierbei zwei verschiedene Bauweisen:</p> <p><u>Zwei schrägverzahnte Rotoren (Twin-Screw)</u> Zwei parallel angeordnete Rotoren greifen mit ihrer Verzahnung ineinander. An der Einlassseite öffnet sich eine wendelförmige Zahnücke, die sich mit Sauggas füllt. Das Gegenprofil des zweiten Rotors schließt den Zahnückenraum. Durch weitere Rotation wandert der Zahneingriff von der Saug- zur Druckseite. Das eingeschlossene Volumen wird kleiner und das Gas verdichtet. Anschließend beginnt das Ausschleiben des verdichteten Gases durch eine Öffnung an der Austrittsseite.</p> <p><u>Ein schrägverzahnter Rotor (Single-Screw)</u> Angetrieben wird eine mit Nuten versehene Walze, welche einem Schneckenrad ähnelt. Zwei gegenüberliegende Zahnscheiben greifen in die Nuten ein verdichten so das eingeschlossene Gas.</p>
KV Kolbenverdichter	Die Verdichtung erfolgt mittels im Zylinder befindlichen hin- und hergehende Kolben in Verbindung mit Öffnungs- und Schließventilen.
ScV Scrollverdichter	Die Verdichtung erfolgt zwischen zwei Scheiben mit spiralförmig angeordneten Rippen, von denen eine feststeht und die andere kreisförmig exzentrisch oszilliert.

Funktionsweise

Das Kältemittel, welches den Verdampfer (1) durchströmt, nimmt Umgebungswärme auf und verdampft. Dadurch wird der gewünschte Kühleffekt erzielt. Anschließend wird das nun gasförmige Kältemittel durch den Verdichter (2) verdichtet und so auf ein höheres Temperatur- und Druckniveau gebracht. Nach diesem Prozessschritt gelangt das verdichtete Medium zum Verflüssiger (2). Dort führt das Kältemittel die Kondensationswärme an die Umgebung ab und verflüssigt sich somit wieder. Anschließend wird das Kältemittel mittels Expansionsorgan (4) auf den Verdampferdruck entspannt und strömt zurück in den Verdampfer. [3] Dieser Prozess ist in Abbildung 1 illustriert.

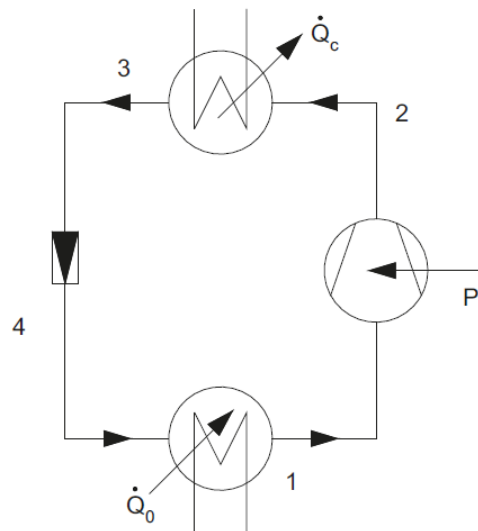


Abbildung 1: Funktionsweise einer Kompressionskältemaschine [3]

Typische Anwendungsbereiche

Gebäudekühlung, Normalkühlung, Tiefkühlung

Allgemeine Informationen			
Unterteilung verschiedene Modelle	<ul style="list-style-type: none"> • Hermetisches Gehäuse <i>Motor und Kompressor sind in einem gekapselten Gehäuse und in direktem Kontakt mit dem Kältemittel</i> • Halbhermetisches Gehäuse <i>Der Motor ist an das Verdichtergehäuse angeflanscht und kommt nicht direkt in Kontakt mit dem Kältemittel</i> • Offene <i>Der Verdichter wird über Getriebe oder Kupplung angetrieben</i> • Saugdampfgekühlte Verdichter • Luftgekühlte Verdichter • Wassergekühlte Verdichter 	[4]	
Komponenten	Kompressor, Verflüssiger, Entspannungsventil und Verdampfer	[2]	
Marktanteil / Verbreitung	90% aller Kältemaschinen sind KKM	[5;6]	
	Industrie und Gewerbe (n=22) 95%	[7]	
	Energieversorger, (Energie-) Dienstleister und Logistiker (n=20) 100%		
	Öffentliche Einrichtungen, Eigentümer, Immobilien (n=9) 89%		
<i>n: Anzahl der befragten Unternehmen</i>			
Lebensdauer	[a] 15	[7]	
Leistungsbereich	[kW]	[8]	
	TV		500 bis 8.000
	SbV		200 bis 2.000
	KV		10 bis 1.500
	ScV	10 bis 1.500	
Regelung	<ul style="list-style-type: none"> • Verdampferdruck-Regelung <i>Senkung des Saugdrucks am Verdichter</i> • Heißgas-Bypass <i>geregelter Strömungs-Kurzschluss zwischen Druck- und Saugleitung</i> • Zylinder-Abschaltung • Drehzahlregelung 	[4]	
Effizienzkennzahl <i>Energy Efficiency Ratio (EER)</i>	Luftgekühlt	2,5	[9]
	Wassergekühlt	3,5	
	Spannweite	3 bis 5	[10]

Sonstiges					
Mindestlaufzeit	[min]	TV	20	[2]	
		SbV	10		
		KV	bis 50 m ³ /h		3
			> 50 m ³ /h		5
		ScV	k.A.		
Empfohlene maximale Anzahl der Einschaltungen	[1/h]	TV	1	[2]	
		SbV	3		
		KV	bis 50 m ³ /h		8
			> 50 m ³ /h		6
		ScV	k.A.		
System-Investitionskosten	[€/kWh _{th}]	75 bis 125		[11]	

Absorptionskältemaschinen

Ein wesentlicher Unterschied zur Kompressionskälteanlage ist, dass Absorptionskältemaschinen (AbKM) durch Wärme betrieben werden. Die Verdichtung des Kältemittels erfolgt hierbei nicht über einen elektrisch betriebenen Verdichter, sondern thermisch über einen Sorptionsprozess. AbKM nutzen hierfür ein Kältemittel und ein Lösungsmittel, so dass zwei Arbeitsstoffe als Arbeitsstoffpaar eingesetzt werden. Der Kälteprozess besteht aus zwei ineinander verschalteten Kreisläufen (Kältemittel- und Lösungsmittelkreislauf). Die thermische Verdichtung erfolgt mit Hilfe des Lösungsmittelkreislaufs. In der Praxis haben sich zwei Arbeitsstoffpaare etabliert:

Bezeichnung	Kältemittel		Lösungsmittel
LiBr-AbKM	Wasser (H ₂ O)	–	Lithium-Bromid-Lösung (LiBr-Lsg.)
NH ₃ /H ₂ O-AbKM	Ammoniak (NH ₃)	–	Wasser (H ₂ O)

Funktionsweise am Beispiel einer LiBr-AbKM [10]

Die Funktionsweise einer Absorptionskältemaschine ist in Abbildung 2 dargestellt.

Die Verdampfung des flüssigen Kältemittels Wasser erfolgt im Schritt 1. An dieser Stelle entsteht der Kühleffekt durch die Aufnahme von Wärme. Im Absorber (2) wird der Wasserdampf von einer konzentrierten LiBr-Lösung absorbiert und es entsteht eine kältemittelreiche Lösung, da die Konzentration an LiBr dabei sinkt.

Die Beförderung der nun kältemittelreichen Lösung erfolgt mittels einer Pumpe in den Austreiber im Schritt 3. Im Austreiber wird unter erhöhtem Druck und externer Wärmezufuhr das Kältemittel aus dem Absorptionsmittel ausgetrieben, wodurch die LiBr-Lösung wieder konzentriert wird.

Diese nun kältemittelarme Lösung wird im Schritt 7 mittels Expansionsventil wieder auf den Absorberdruck entspannt und in den Absorber eingespeist. Gleichzeitig strömt das dampfförmige Kältemittel in den Kondensator und kondensiert unter Wärmeabgabe im Schritt 5.

Das flüssige Kältemittel wird schließlich im Schritt 6 mittels Expansionsventil auf Verdampferdruck entspannt und strömt zurück in den Verdampfer.

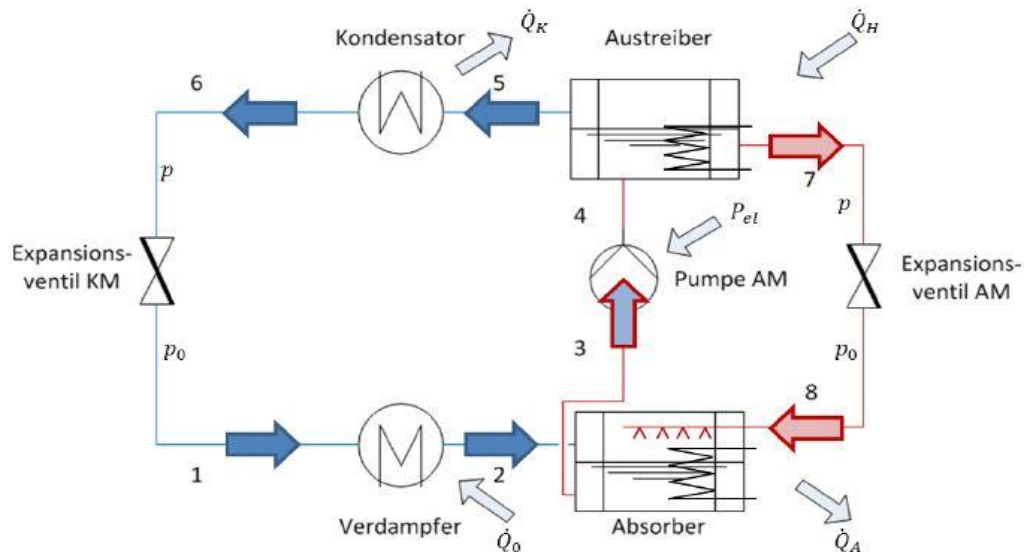


Abbildung 2: Funktionsweise einer Absorptionskältemaschine [12]

Typische Anwendungsbereiche [13]

LiBr-AbKM

- Klimaanlage von Büro-, Kauf- oder Krankenhäusern, Hotels, Spinnstofffabriken
- Wasserkühlung für chemische Industrie und Verfahrenstechnik
- Fernkältezentralen für Universitäten und Satellitenstädte, Flughäfen

NH₃/H₂O-AbKM

- Betriebe mit Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung, wie Brauereien und Zuckerfabriken
- Chemische Industrie (Sole-, Gas-, Produktkühlung, verfahrenstechnische Abwärme/Kältekopplung)
- Raffinerien
- Chemiefaserwerke
- Nahrungsmittelfabriken (Schokolade, Eiscreme)
- Gefriertrocknung (Kaffee, Tee, Molkereiprodukte)
- Kühlhäuser
- Schlachthöfe
- Gefriertunnel (Fisch, Geflügel)
- Windkanäle (Auto)
- Fernkältezentralen
- Wärmepumpen (Gewächshäuser, Eisbahnen)

Allgemeine Informationen			
Unterteilung verschiedene Modelle	Unterteilung in unterschiedliche Arbeitsstoffpaare H ₂ O/LiBr und NH ₃ /H ₂ O		
Komponenten	Verdampfer, Absorber, Austreiber, Verflüssiger, 2 Expansionsventile, Pumpe	[10;12]	
Marktanteil / Verbreitung	Industrie und Gewerbe (n=22)	14%	
	Energieversorger, (Energie-)Dienstleister und Logistiker (n=20)	15%	
	Öffentliche Einrichtungen, Eigentümer Immobilien (n=9)	33%	
	<i>n: Anzahl der befragten Unternehmen</i>		
Lebensdauer	[a]	20	
Leistungsbereich	[kW]	H ₂ O/LiBr	100 bis 6.000
		NH ₃ /H ₂ O	10 bis 100
			100 bis 6.000
			180 bis 5.300
		H ₂ O /LiBr	15 bis 20.500
		NH ₃ /H ₂ O	10 bis 1.000
Regelung	<p><u>LiBr-AbKM</u> Leistungsregelung durch Änderung der Lösungskonzentration im Absorber bzw. der Verdampfungstemperatur durch</p> <ul style="list-style-type: none"> • Bypass-Regelung der armen LiBr-Lösung mittels Dreiwegeventil am Austreiber vorbei zurück zum Absorber. • Heizmitteldrosselung • kombinierte Regelung (zunächst Drosselung des Heizmittels, danach des Lösungsumlaufs) <p><u>NH₃/H₂O-AbKM</u> stufenlos regelbar zwischen 25% und 100% (ggf. auch 10% der Nennlast möglich), Teillast auch im Dauerbetrieb möglich, zusätzlich besteht die Möglichkeit zum Nulllastbetrieb</p>		

Effizienzkennzahl Wärmeverhältnis ζ	H ₂ O /LiBr	einstufig	0,7 bis 0,8	[10]	
		zweistufig	1,1 bis 1,2		
	NH ₃ /H ₂ O		0,3 bis 0,6		
	H ₂ O /LiBr	einstufig	0,55 bis 0,8		[11]
		zweistufig	0,9 bis 1,2		
	NH ₃ /H ₂ O		0,3 bis 0,7		
			0,6 bis 1,0	[7]	
			0,55 bis 0,65	[11]	

Sonstiges					
Minimallast	[%]	H ₂ O /LiBr	einstufig	10 bis 20	[14]
			zweistufig	10 bis 50	
		NH ₃ /H ₂ O		10 bis 20	
Anfahrzeit	[min]	H ₂ O /LiBr	Kaltstart	720	[11;14]
			Warmstart	5 bis 30	
		NH ₃ /H ₂ O		k.A.	
Kältetemperaturbereich	[°C]	H ₂ O /LiBr	einstufig	6 bis 20	[15]
			zweistufig		
		NH ₃ /H ₂ O		-30 bis +20	
Heiztemperaturbereich	[°C]	H ₂ O /LiBr	einstufig	80 bis 100	[15]
			zweistufig	130 bis 160	
		NH ₃ /H ₂ O		100 bis 180	
Kühlwassertemperaturbereich	[°C]	H ₂ O /LiBr	einstufig	30 bis 50	[15]
			zweistufig		
		NH ₃ /H ₂ O		30 bis 50	
System-Investitionskosten	[€/kWh _{th}]			250 bis 350	[11]

Adsorptionskältemaschinen

Adsorptionskältemaschinen (AdKM) sind thermisch betriebene Kältemaschinen. Sie nutzen ein festes Sorptionsmittel, wie z.B. Aktivkohle, Zeolith oder Silikagel, um mit Hilfe eines sorptiven Prozesses ein Kältemittel zu verdichten. Das Sorptionsmittel befindet sich in einem Apparat, der als Absorber und Desorber im zeitlichen Wechsel fungiert. [1]

Funktionsweise

Bei der AdKM handelt es sich um eine diskontinuierliche Kältemaschine, bei der der Kälteprozess in zwei Phasen erfolgt, welche nachfolgend beschrieben und in Abbildung 3 dargestellt werden [1]. Der Aufbau der AdKM ist gekennzeichnet durch zwei Adsorberkammern (1, 2), einem Kondensator (3) und einem Verdampfer (4).

Phase 1: Adsorptionsprozess

Im Verdampfer wird Wasser im Vakuum bei niedriger Temperatur verdampft. Die für die Verdampfung notwendige Verdampfungswärme erzeugt den Kühleffekt. Der entstandene Wasserdampf strömt zum Sorptionsmittel und wird in einer Adsorberkammer adsorbiert. Dabei wird Wärme abgegeben, die als Adsorptionswärme abgeführt werden muss. Dies erfolgt über einen separaten Kühlkreislauf. Das Sorptionsmittel wird zunehmend mit dem Wasserdampf beladen. Bei gesättigtem Sorptionsmittel stoppt der Prozess und das Sorptionsmittel muss wieder regeneriert werden.

Phase 2: Desorptionsprozess

Die Regeneration des Sorptionsmittels nach dem Adsorptionsprozess wird als Desorptionsprozess bezeichnet. Die Kammer fungiert nun als Desorber, in dem das an das Sorptionsmittel angelagerte Wasser unter Wärmezufuhr ausgetrieben wird. Der ausgetriebene Wasserdampf strömt in den Kondensator und wird dort wieder verflüssigt, bevor er zurück in den Verdampfer strömt.

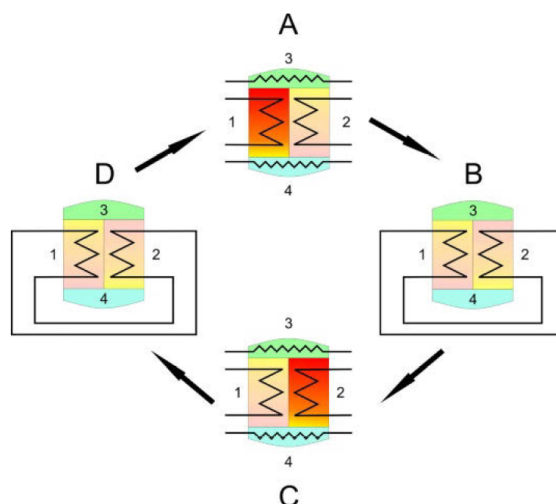


Abbildung 3: Funktionsweise einer Adsorptionskältemaschine [1]

In Abbildung 3 sind die einzelnen Schritte eines Adsorptionskälteprozesses veranschaulicht. Im Schritt A findet der Adsorptionsprozess in Kammer 2 statt, während parallel in Kammer 1 unter Wärmezufuhr die Desorption abläuft. Wenn der Sättigungszustand in der Adsorberkammer erreicht ist, beginnt die Umschaltphase (B). Anschließend findet der Adsorptionsprozess in Kammer 1 und der Desorptionsprozess in Kammer 2 statt (C), bis der Sättigungszustand wieder erreicht wird und erneut umgeschaltet werden muss (D). Durch den Aufbau der AdKM mit zwei Adsorberkammern und dem Umschalten von Adsorptions- zu Desorptionsbetrieb wird eine kontinuierliche Bereitstellung von Kälte durch jeweils eine Adsorberkammer erzielt.

Typische Anwendungsbereiche

Klimatisierung

Allgemeine Informationen			
Unterteilung verschiedene Modelle	k.A.		
Komponenten	Verdampfer, Austreiber, Sammler und Verflüssiger		[9]
Marktanteil / Verbreitung	Industrie und Gewerbe (n=22)	5%	[7]
	Energieversorger, (Energie-)Dienstleister und Logistiker (n=20)	15%	
	Öffentliche Einrichtungen, Eigentümer Immobilien (n=9)	11%	
	<i>n: Anzahl der befragten Unternehmen</i>		
Lebensdauer	[a]	k.A.	
Leistungsbereich	[kW]	10 bis 1.000	[9]
		70 bis 350	[15]
Regelung	k.A.		
Effizienzkennzahl Wärmeverhältnis ζ	0,8		[9]
	0,4 bis 0,6		[7;14]
	0,4 bis 0,7		[11]

Sonstiges			
Kältetemperaturbereich	[°C]	6 bis 20	[15]
Heiztemperaturbereich	[°C]	55 bis 100	[15]
Kühlwassertemperaturbereich	[°C]	25 bis 35	[15]

Dampfstrahlkältemaschinen

Dampfstrahlkältemaschinen (DSKM) zählen zu den thermisch angetriebene Kältemaschinen, bei denen Dampf als Treibmittel dient [3].

Funktionsweise

Der unter Druck stehende Treibdampf wird in der Treibstrahldüse eines Strahlverdichters entspannt, wodurch sich die Geschwindigkeit des Treibdampfes erhöht. Hierbei wird potentielle Energie in kinetische Energie gewandelt. Der Treibdampf strömt in die Mischkammer des Strahlverdichters.

Aus dem Verdampfer, in dem durch die Verdampfung von Kältemittel der Kühleffekt erzeugt wird, strömt Kältemitteldampf ebenfalls in die Mischkammer des Strahlverdichters. Dort treffen Treibdampf und Kältemitteldampf aufeinander, mischen sich und strömen als Mischdampf in den Diffusor.

Im Diffusor wird die kinetische Energie des Mischdampfes wieder in potenzielle Energie gewandelt, was zur Zunahme des statischen Drucks führt. [3]

Anschließend strömt der Mischdampf in den Kondensator und wird verflüssigt. Der Druck im Verdampfer ist niedriger als der Druck im Kondensator, so dass das Kältemittel mit dem Treibmittel im Strahlverdichter verdichtet wird. Das Kondensat strömt zurück in den Verdampfer bzw. wird zur Treibdampferzeugung rückgespeist.

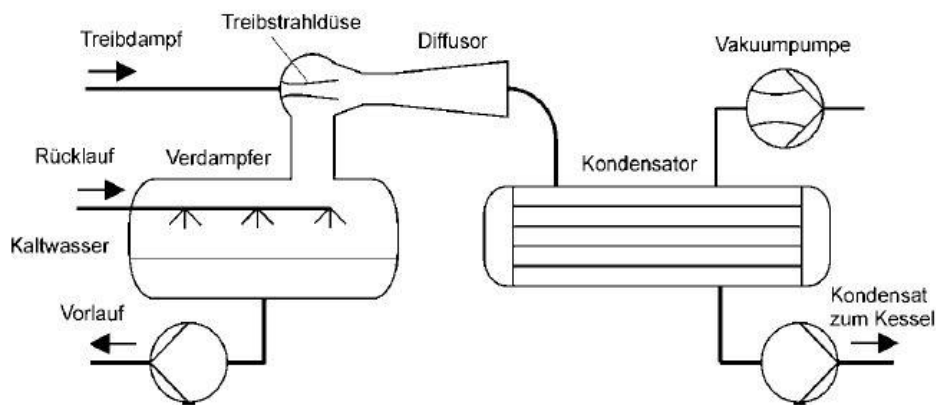


Abbildung 4: Aufbau einer Dampfstrahlkältemaschine [2]

Typische Anwendungsbereiche [16]

- Zellstoffindustrie
- Lebensmittelindustrie
- Chemische Industrie
- Stahlindustrie
- Klimatisierung

Allgemeine Informationen				
Unterteilung verschiedene Modelle	k.A.			
Komponenten	Dampfstrahlverdichter (Treibdüse, Mischkammer, Diffusor), Verdampfer, Kondensator, Verflüssiger			[3]
Marktanteil / Verbreitung	k.A.			
Lebensdauer	[a]	k.A.		
Leistungsbereich	[kW _{th}]	35 bis 3.500		[11]
		Zellstoffindustrie	407 bis 3.721	[16]
		Lebensmittelindustrie	262 bis 5.232	
		Chemische Industrie	40 bis 58.140	
		Stahlindustrie	6 bis 1.500	
		Klimatisierung	280 bis 18.140	
		Sonstige Industrie	29 bis 21.350	
Regelung, Regelbereich	[%]	Zu- und Abschalten von Strahlverdichtern	0 bis 100	[16]
		Bypassregelung	0 bis 100	
		Drosselregelung (Leistungsanpassung über Verdampfungstemperatur- und Saugdruckänderung)	50 bis 100	
		Absenkung Kaltwassertemperatur	50 bis 100	
		Düsennadelregelung (Treibdampfregelung)	85 bis 100	
Effizienzkennzahl <i>Wärmeverhältnis</i> ζ	0,3 bis 0,55			[2]
	0,1 bis 0,5			[3]

Sorptionsgestützte Klimatisierung

Bei der sorptionsgestützten Klimatisierung handelt es sich um ein offenes System. Dabei erfolgt die Gebäudeklimatisierung über eine Lüftungsanlage, bei der eine Konditionierung der Zuluft erfolgt. Das Sorptionsmittel kann in fester oder flüssiger Form vorliegen. Bei dieser Variante der Gebäudeklimatisierung steht das Kältemittel im direkten Kontakt mit der Atmosphäre, weshalb diese Systeme als offene Systeme bezeichnet werden. [11] Bei der sorptionsgestützten Klimatisierung wird durch Trocknung der Zuluft und anschließender adiabaten Befeuchtung ein Kühlungseffekt in der Zuluft erzielt.

Funktionsweise

DEC-Anlage mit festem Sorptionsmittel

Bei der Desiccant evaporative cooling (DEC)-Anlage wird ein Sorptionsrotor eingesetzt, welcher mit einem Trägermaterial als Sorptionsmittel zur Entfeuchtung der Außenluft, versehen ist. Als Trägermaterial wird meist Silicagel oder Lithiumchlorid eingesetzt. [11] Die Funktionsweise ist in Abbildung 5 dargestellt.

Die gefilterte Außenluft wird in den Sorptionsregenerator geleitet, in dem die Luft getrocknet und somit entfeuchtet wird (1). Bei dem Regenerator handelt es sich um einen Sorptionsrotor, welcher auf der einen Seite von der Zuluft und von der anderen Seite von der Abluft durchströmt wird. Während der langsamen Drehung des Rotors, absorbiert das dort enthaltene Trägermaterial die von der Außenluft eingetragene Feuchtigkeit und wird auf der anderen Seite wieder durch die zuvor erhitzte Abluft (5) regeneriert. Durch die Entfeuchtung der Zuluft wird in der Matrix Adsorptionswärme freigesetzt, wodurch die Temperatur der Zuluft erhöht wird.

Die warme, getrocknete Zuluft (1) wird im nächsten Schritt durch einen Rotationswärmeübertrager geleitet. Dort wird die Luft durch die im Gegenstrom geführte kalte Abluft vorgekühlt (2). Bevor die Luft in den Raum eingetragen wird, wird in einem geregelten Verdunstungskühler die Zulufttemperatur durch adiabate Befeuchtung weiter gesenkt und gleichzeitig die gewünschte Luftfeuchtigkeit eingestellt.

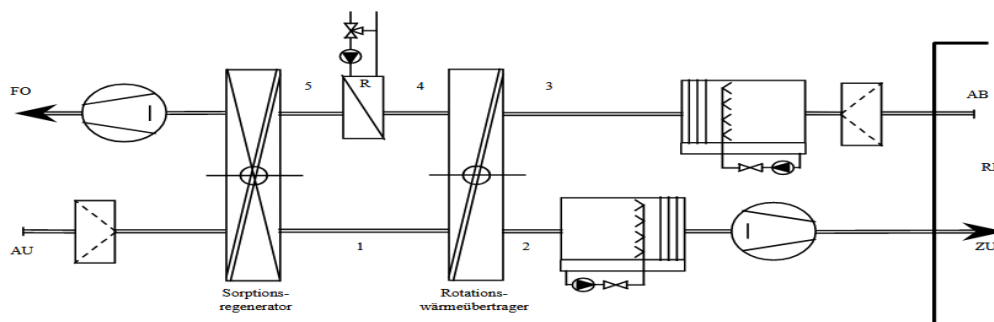


Abbildung 5: Funktionsweise einer DEC-Anlage [17]

Im Abluftstrom ist ein Verdunstungskühler vorgeschaltet, welcher die Abluft annähernd am Sättigungszustand adiabatisch befeuchtet und dadurch kühlt (3). Im Wärmeübertrager gibt die warme Zuluft auf diese Weise Wärme an die nun kühlere Abluft ab (4).

Zur Regeneration im Sorptionsregenerator wird die Abluft in einem Erhitzer auf die notwendige Regenerationstemperatur erwärmt (5) und durchströmt schließlich den Sorptionsregenerator, bevor sie als Fortluft an die Umgebung abgegeben wird. [17]

DEC-Anlage mit flüssigem Sorptionsmittel [11]

Die Außenluft wird im Absorber durch eine Füllkörperkolonne geleitet, welche kontinuierlich mit einer konzentrierten Salzlösung, meist eine Lithiumchlorid-Lösung, besprüht wird. Die durchströmende Zuluft wird entfeuchtet, indem der Wasserdampf von der Salzlösung aufgenommen wird. Der Regenerationsprozess der Lösung findet in einem separaten Regenerator statt.

Anschließend wird Zuluft durch indirekte Verdunstungskühlung gekühlt und dem Gebäude zugeführt. Der Effekt der Verdunstungskühlung findet im Abluftstrom, also nicht direkt im Zuluftstrom statt. Die Abluft wird befeuchtet, wodurch der Kühleffekt erzielt wird. Die so gekühlte Abluft wird zur Kühlung der Zuluft genutzt.

Die konzentrierte Lösung erwärmt sich durch die Absorption des Wasserdampfes und muss gekühlt werden. Gleichzeitig findet eine Verdünnung der Salzlösung statt. Durch einen Wärmeübertrager kann die Absorptionswärme an Umlaufwasser abgegeben werden. Im Regenerator wird durch externe Wärmezufuhr die Salzlösung regeneriert. Das Wasser wird dabei aus der Salzlösung wieder ausgetrieben und die Konzentration der Lösung erhöht (*nicht in Abbildung 6 dargestellt*).

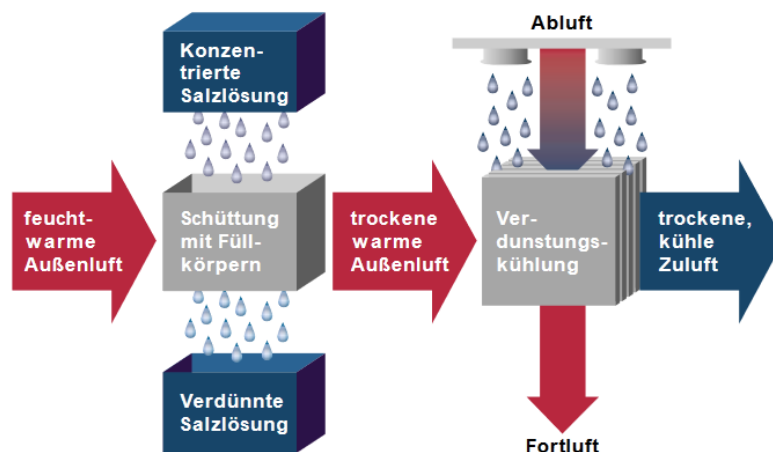


Abbildung 6: Funktionsweise einer Anlage mit flüssigem Sorptionsmittel [11]

Typische Anwendungsbereiche

Klimatisierung

Allgemeine Informationen			
Unterteilung verschiedene Modelle	Feststoffsorption – Sorptionsrotor (DEC) und Festbettverfahren Flüssigsorption (Lithiumchlorid)		[11]
Komponenten	Feststoffsorption - DEC	Sorptionsregenerator, Wärmeübertrager, Verdunstungskühler (Befeuchter), Luftherhitzer	[11;17]
	Flüssigsorption	Wärmeübertrager und Verdunstungskühler (Befeuchter), Wasserpumpe, Regenerator, Salzlösungskühler/ -erhitzer, Absorber (Entfeuchter), Lösungspumpe	
Marktanteil / Verbreitung	k.A.		
Lebensdauer	[a]	k.A.	
Leistungsbereich	[kW]	6 bis 300	[15]
Regelung	k.A.		
Effizienzkennzahl <i>Wärmeverhältnis ζ</i>	0,5 bis 0,7		[11]
	0,5 bis 1,0		[18]

Sonstiges				
Kältetemperaturbereich	[°C]	Feststoffsorption - DEC	16 bis 20	[15;18]
		Flüssiges Sorptionsmittel	k.A.	
Heiztemperaturbereich	[°C]	Feststoffsorption - DEC	55 bis 100	[15;18]
			50 bis 95	[11]
		Flüssiges Sorptionsmittel	k.A.	
Kühlwassertemperatur- bereich	[°C]	Feststoffsorption - DEC	Nicht erforderlich	[15;18]
		Flüssiges Sorptionsmittel	k.A.	

Klimageräte

Unter Klimageräte fallen elektrisch angetriebene Kompressionskältemaschinen in eher kleineren Leistungsbereichen, die dezentral zur Raumkühlung eingesetzt werden. [1] Der Begriff „Klima“ wird bei diesen Geräten als Synonym für Raumkühlung genutzt und bedingt hier nicht zwingend eine Klimatisierung des Raumes. Einige Anlagen können wahlweise Kälte und Wärme bereitstellen.

Es gibt verschiedene Klimagerätetypen – Single- sowie Multi-Split-Geräte, VRF-Systeme und Mono-Block-Geräte, die im Folgenden erläutert werden:

Klimatisierungstyp	Beschreibung
Mono-Block-Geräte	Alle Komponenten (Wärmeaufnahme und Wärmeabgabe) befinden sich in einem Gerät. Die Wärmeabgabe ist z.B. über ein Fenster möglich. Es sind dickere Luftleitungen als bei Split-Geräten notwendig. [19]
Single-Split-Geräte	Single-Split-Geräte sind Geräte, bei denen ein einzelnes Außengerät mit einem einzelnen Innengerät gekoppelt ist [20].
Multi-Split-Geräte	Mehrere - bis zu 5 - Innengeräte sind an ein Außengerät angeschlossen. Das Expansionsventil befindet sich meist zur Regelung der einzelnen Innengeräte an der Außeneinheit. Die Regelung ist allerdings nicht so genau möglich wie es bei VRF möglich ist. Insgesamt sind sie bis zu 30 % energiesparender als Single-Split-Geräte [20].
Variable refrigerant flow (VRF)-Systeme	<p>VRF-Systeme sind Multi-Split-Systeme mit Direktverdampfung, welche den Kältemittelstrom verändern können. Diese Systeme besitzen mindestens einen Verdichte, meist sauggasgekühlte hermetische Doppelrollkolben oder Scrollverdichter, mit variabler Leistung.</p> <p>Das Kältemittel wird über Rohrleitungen auf mehrere Inneneinheiten verteilt. Die Inneneinheiten - bis zu 52 [20] - besitzen jeweils eine eigene Zonen-Temperaturregelung. Expansionsventil befindet sich an bzw. in der Inneneinheit [13].</p> <p>VRF-Systeme sind Multiraumklimatisierungsgeräte mit einem zentralen Außengerät und mehreren Raum-Innengeräten. Innen- und Außengerät sind im Gegensatz zu Multi-Split-Geräte über den <u>Kältemittelkreislauf</u> und regelungstechnisch über eine Bus-Leitung verbunden [320].</p> <p>Leistungsspektrum: 12 bis 80 kW Nennleistung (mehr über Zusammenschaltung realisierbar). [13]</p>
Gas-VRF-Multi-Split-Geräte	Die VRF-Systeme sind auch als Gas-VRF-Multi-Split-Anlage zur Bereitstellung von Wärme und Kälte umsetzbar. Dabei handelt es sich um eine gasmotorisch betriebene Außeneinheit. [13]

Funktionsweise

Die Funktionsweise entspricht einer Kompressionskälteanlage (KKM) (Siehe *Kompressionskältemaschinen*, S.6).

Split-Geräte sind durch die räumlich getrennte Anordnung der Komponenten der KKM charakterisiert. In der Inneneinheit, welche innerhalb des Gebäudes installiert ist, befindet sich der Verdampfer. Die warme Raumluft wird direkt an dem Verdampfer vorbeigeführt. Das Kältemittel im Verdampfer entzieht der Raumluft Wärme und verdampft dabei. Der Ventilator der Inneneinheit übernimmt die Aufgabe der Luftumwälzung im Raum. [21]

Das gasförmige Kältemittel gelangt anschließend in die Außeneinheit, welche sich außerhalb des Gebäudes befindet. Die Außeneinheit besteht aus dem Verdichter und dem Verflüssiger, die das Kältemittel verdichtet und verflüssigt. Die Kondensationswärme des Verflüssigers wird direkt an die Umgebung abgeführt. [21]

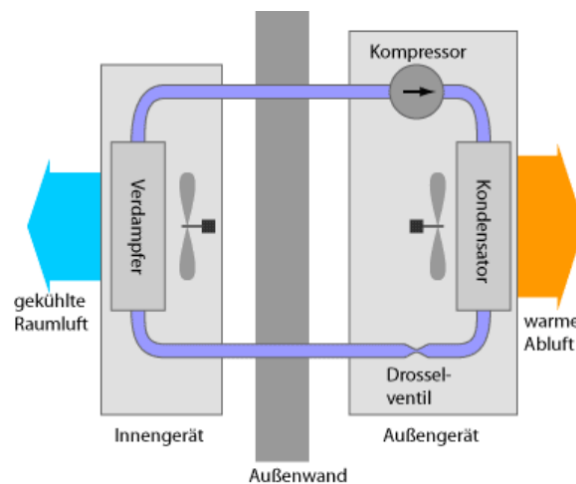


Abbildung 7: Schema einer Split-Anlage [21]

Typische Anwendungsbereiche

Gebäudekühlung, Gebäudebeheizung [13]

VRE: Hauptsächlich kommerzielle Anwendungen, wie Hotels / Restaurants, Büro- und Verwaltungsgebäude, Kundenzentren, Ladenlokale, Supermärkte, Krankenhäuser und Gewerbebetriebe [13]

Multi-Split: Ein- und Mehrfamilien-Häuser, kleinere Läden oder Arztpraxen [20]

Außentemperaturbereich bei Kühlung: -15 bis +45 °C [13]

Außentemperaturbereich bei Wärmepumpen / Heizbetrieb: -25 bis +20 °C [13]

Allgemeine Informationen				
Unterteilung verschiedene Modelle	Innengeräte: <ul style="list-style-type: none"> • Zwischendeckenmodell • Wandmodell • Kassettenmodell Außengerät: <ul style="list-style-type: none"> • Kompaktform • Quaderform 		[13]	
Komponenten	Kompressor, Verflüssiger, Expansionsventil, Verdampfer, Ventilator		[22]	
Marktanteil / Verbreitung	Jährlich werden etwa 10.000 bis 12.000 Außeneinheiten in Deutschland installiert.		[13]	
Lebensdauer	[a]	k.A.		
Leistungsbereich	[kW]	Inneneinheit (Kälteleistung)	1 bis 30	[13]
		Außeneinheit: kompakt (Nennleistung)	12 bis 33	[13]
		Außeneinheit: quaderförmig (Nennleistung)	22 bis 80	[13]
		Spezifisch	80 W/m ²	[22]
Regelung	<ul style="list-style-type: none"> • Raumtemperatur • Luftvolumenstrom • Bei Wärmeverschiebung: Betriebsmodus 		[13]	
Effizienzkennzahl <i>Leistungszahl ε</i>	Kühlbetrieb (EER)	$\epsilon_c > 4,5$	[13]	
	Heizbetrieb (COP)	$\epsilon_H > 5,0$		
Effizienzkennzahl <i>Heizzahl</i>	<i>nur bei gasbetriebenen VRF-Systemen</i>		1,4	[13]

Sonstiges				
Investitionskosten	[€/m ²]	120 bis 300		[22]
Mindesteffizienz nach europäischer Ökodesign-Richtlinie 2009/125/EG	Ab 01.01.2018	SEER	4,6	[13]
		SCOP	3,4	
	Ab 01.01.2021	SEER	4,8	
		SCOP	3,5	

Kleingeräte – Haushaltskühl- und Gefrierschränke

In Haushaltskühlschränken werden in der Regel elektrisch betriebene Kompressionskältemaschinen eingesetzt. In kleinen Geräten, wie beispielweise Minibars oder Camping-Kühlschränken, kommen auch Diffusionsabsorptionskältemaschinen (DAKM) und Peltierelemente zum Einsatz. Letztere haben den Vorteil, dass sie geräuscharm sind und dementsprechend bevorzugt in Schlafräumen der Hotellerie und im Campingbereich eingesetzt werden. Insbesondere Diffusionsabsorptionskältemaschinen besitzen ferner den Vorteil, dass sie elektrisch oder thermisch mit Gas betrieben werden können, weshalb sie im Campingbereich bevorzugt eingesetzt werden.

Funktionsweise

Kühlschrank mit einer KKM:

Das Funktionsprinzip entspricht dem einer Kompressionskältemaschine (Siehe auch *Kompressionskältemaschinen*, S.4)

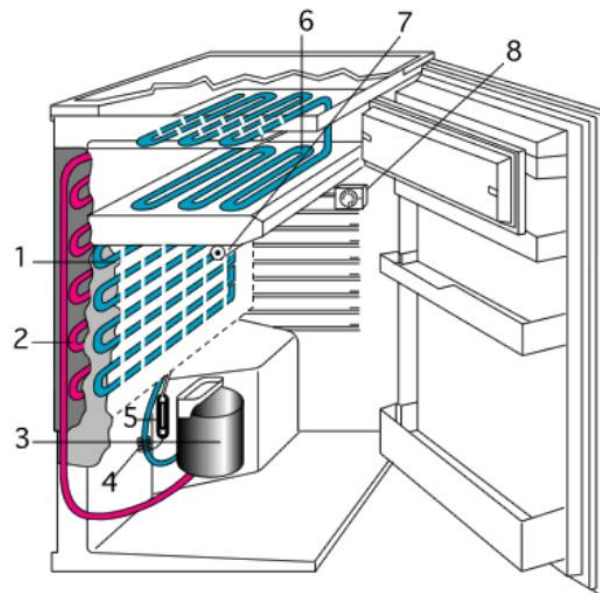


Abbildung 8: Aufbau und Kältemittelkreislauf eines Kühlschranks [23]

In Abbildung 8 wird ein Kühlschrank mit integriertem Gefrierfach (6) dargestellt. Durch das Kältemittel, welches den Verdampfer (1) durchströmt, wird dem Innenraum Wärme entzogen. Das Kältemittel verdampft und wird anschließend im Kompressor (3) verdichtet und so auf ein höheres Temperaturniveau gebracht. Mit dem Verflüssiger (2), welcher sich auf der Rückseite des Kühlschranks befindet, wird das Kältemittel kondensiert. Das wieder verflüssigte Kältemittel wird anschließend mittels Drosselorgan (4), ein Kapillarrohr, wieder entspannt und in den Verdampfer zurückgeführt. [23]

In der Abbildung sind zusätzlich noch eine Trockenpatrone (5) zur Feuchtigkeitsentfernung aus dem Kältemittel sowie ein Temperaturfühler (7) und die Temperatureinstellung (8) dargestellt, welche zur Regelung der Temperatur im Kühlschrank notwendig sind.

Kühlschrank mit einer DAKM:

Kühlschränke mit dem Sorptionsprinzip werden vorwiegend als Kleingeräte in Büros, Hotelzimmer oder beim Camping aufgrund der geräuscharmen Betriebsweise eingesetzt. Der Betrieb der Kühlschränke mit DAKM ist sowohl mit Strom als auch mit Flüssiggas oder Petroleum möglich, was eine Nutzung in Regionen ohne Stromversorgung ermöglicht. Als Arbeitsstoffpaar haben sich vorrangig Ammoniak und Wasser etabliert. [23]

Das Funktionsprinzip entspricht im Grundprinzip einer AbKM (Siehe *Absorptionskältemaschinen*, S.10). Der wesentliche Unterschied liegt darin, dass beim Diffusionsabsorptionskälteprozess im gesamten System ein einheitlicher Druck vorliegt. Zudem ist im System ein Hilfsgaskreislauf integriert. Dieses Hilfsgas, meist Wasserstoff oder Helium, senkt dabei den Verdampfungspartialdruck des Kältemittels, um die Verdampfung des Kältemittels und damit den zu erzielenden Kühleffekt zu ermöglichen. [23;24]

Thermoelektrischer Kühlschrank (TEK):

In Kleinstanwendungen, bei denen geringe Kälteleistungen benötigt werden, werden Peltier-Elemente eingesetzt. Durch anliegenden Gleichstrom und Ausnutzung des Peltier-Effektes, kühlt eine Seite der Elemente ab, während sich die andere Seite erwärmt. Dieses System bietet durch die Lageunabhängigkeit des Kühlsystems, Geräuschs- und Erschütterungsfreiheit sowie exakte Temperaturregelung für verschiedene Anwendungen, wie beispielsweise zur Sensorkühlung, Vorteile. [3] Da diese Art der Kälteerzeugung auf Anwendungen mit geringen Kälteleistungen, wie beispielsweise Kühlboxen, beschränkt ist, ist die thermoelektrische Erzeugung von untergeordneter Bedeutung.

Typische Anwendungsbereiche

Normalkühlung und Tiefkühlung in Haushalten sowie mobile Kleinstanwendungen in Kühlboxen

Allgemeine Informationen			
Unterteilung verschiedene Modelle	Kompressor- und Absorberkühlschrank Thermoelektrischer Kühlschrank/ Kühlbox		
Komponenten	KKM	Kompressor, Verflüssiger, Entspannungsventil und Verdampfer	[23]
	DAKM	Austreiber, Kondensator, Verdampfer, Gaswärmetauscher, Absorber, Lösungsmittelwärmetauscher	[23]
	TEK	Peltier-Elemente	[3]
Marktanteil / Verbreitung	KKM	k.A.	
	DAKM	5 %	[13]
	TEK	k.A.	
Lebensdauer	[a]	15	[25]
Leistungsbereich	[kW]	bis 1	[13]
Regelung	Zweipunktregelung durch Thermostat		[23]
Effizienzkennzahl	k.A.		

Sonstiges			
Verdichtertyp <i>bei Kompressor- kühlschränken</i>	Hubkolbenverdichter		[13]
Verdampfungs- temperaturbereich	[°C]	-30 bis +5	[13]

Kältespeicherung

Relevanz Speichernutzung

Speichertechnologien werden zur zeitlichen Entkopplung zwischen Kälteerzeugung und Kältebedarf eingesetzt.

Der Einsatz von Speichertechnologien bietet zudem eine Möglichkeit Versorgungssysteme netzdienlich zu betreiben. Im Kältesektor werden vorrangig Eis- und Kaltwasserspeicher verwendet. Dabei wird, neben der üblichen betriebstechnischen Nutzung solcher Speicher, zusätzlich Überschussstrom aus dem Netz bezogen und dem Netz so eine zusätzliche Kapazität geboten. Dieser zusätzliche Freiheitsgrad durch den thermischen Speicher erhöht die Flexibilität des Versorgungssystems.

Speichersysteme

Zur Kältespeicherung werden sensible und Latentkältespeicher eingesetzt. Die Zufuhr und Entnahme thermischer Energie äußert sich bei sensiblen Speichersystemen fühlbar (sensibel) durch eine Änderung der Temperatur. Als Kälte­träger wird meist Wasser verwendet, da Wasser eine hohe Wärmekapazität besitzt, gut verfügbar und kostengünstig ist.

Latentkältespeicher nutzen den Phasenwechsel des Speichermediums. Dies bedeutet, dass während eines Phasenübergangs Wärme in einem Speichermedium ohne fühlbare Temperaturänderung (verborgen) hinzugeführt oder entnommen wird. Diese Speicher bieten bei geringer Temperaturänderung eine gegenüber sensiblen Wärmespeichern höhere Speicherkapazität. Abbildung 9 veranschaulicht das Prinzip der latenten Wärmespeicherung am Phasenwechsel fest/flüssig. Kommerziell werden vorrangig Wasser (Eisspeicher) Paraffine als Phasenwechselmaterialien (PCM) eingesetzt. Weiterhin sind auch Salzlösungen und Salzhydrate möglich. [26]

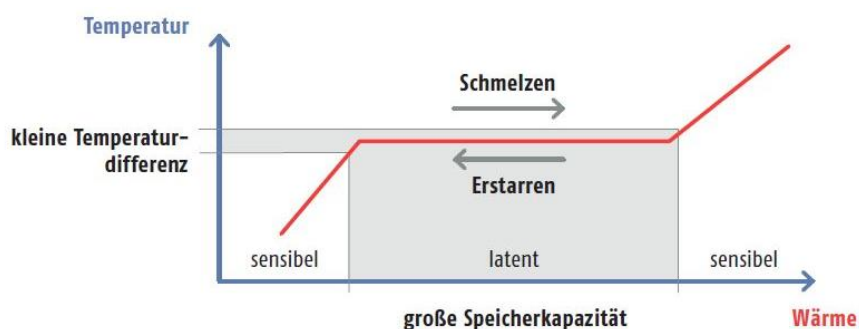


Abbildung 9: Temperatur-Wärme-Diagramm für Phasenwechsel [27]

Sensible Kältespeicher

Bei sensiblen Kältespeichern werden Wasser oder ein Wasser/Glykol-Gemisch als Kälte Träger und Speichermedium verwendet. Die Speichersysteme werden häufig als Pufferspeicher im Kaltwassernetzen eingesetzt, um kurzzeitige Lastschwankungen auszugleichen. Ferner werden Pufferspeicher auch aus betriebstechnischen Gründen eingesetzt, vor allem wenn die thermische Kapazität des Kaltwassersystems im Verhältnis zur Kälteleistung der Kälteerzeugung gering ist. Der Kältespeicher erhöht dann die thermische Kapazität verbraucherseitig, was hinsichtlich der Regelungstechnik vorteilhaft ist oder aus Betriebssicherheitsgründen bei möglichen Lastabwürfen sogar notwendig ist. [28]

Funktionsweise

Der Aufbau eines Kaltwasserspeichers ist dem Aufbau eines Warmwasserspeichers ähnlich. Ein Kaltwasserspeicher kann aus einem Stahlbehälter, der oberirdisch, unterirdisch oder in einem Gebäude verbaut ist, bestehen. Grundsätzlich wird versucht, auch in Kaltwasserspeichern eine Temperaturschichtung zu erzielen. Aufgrund der geringeren Temperaturdifferenzen in Kälteversorgungssystemen im Vergleich zu Wärmeversorgungssystemen, sowie der Dichteanomalie des Wassers ist die Realisierung einer ausgeprägten Temperaturschichtung herausfordernd. Dementsprechend werden in Kaltwasserspeichern zusätzlich Diffusoren eingesetzt, die für einen gleichmäßigen, möglichst nicht turbulenten Strömungsfluss im Kaltwasserspeicher sorgen. [29]

Typische Anwendungsbereiche

Anschluss an Kälte Trägersysteme (z.B. Kaltwassersystem), Klimatisierung

Allgemeine Informationen			
Auslegungsparameter	k.A.		
Speicherdichte	[kWh/m ³]	~ 7 <i>Bei einer spezifischen Wärmekapazität von 1,16 kWh/(m³K) und 6/12°C</i>	[2]
Betriebsweise	Sommerbetrieb: Netzlasten sind niedriger, Grundlastmaschinen laufen am Tag ungefähr auf Nennleistung, Spitzenlastabdeckung durch Speicher		[30]
	Winterbetrieb: Optimierungsbetrieb des Speichers, Grundlastmaschine läuft häufiger		
Einfluss auf Ent-/Beladeleistung	Einsatz aufgrund technischer Restriktionen - Erhöhung der thermischen Kapazität auf Verbraucherseite zur Betriebssicherheit und regelungstechnischen Gründen. Zusätzlich zur kurzweiligen Kältebereitstellung als Sicherheitspuffer bei Abschaltung des Kälteerzeugers (Lastabwurf). Angepasste Betriebsweise bei Lastmanagement – Speicherbeladung in Zeiten geringer Stromtarife und anschließender Deckung des Kältebedarfs durch den Speicher in Zeiten hoher Stromtarife anstatt einer kostenintensiveren Kälteerzeugung.		
	Volumenstrom beeinflusst Temperaturdifferenz von Vor- und Rücklauf		[31]
	Speicherform, Wärmeleitung im Speicher, Volumenströme und innere Strömungen beeinflussen die thermische Schichtung		[30]
Investitionskosten	[€/kW]	k.A.	

Sonstiges			
Potenzial zur Reduktion von elektrischen Lastspitzen	Etwa 80 bis 90%, wenn der Speicher während der Entladung die volle Kältebelastung aufnimmt und die Kältemaschinen abgeschaltet werden. Etwa 40 bis 60% bei partieller Deckung des Speichers und Betreiben zusätzlicher Kältemaschinen, um Kältebedarf zu decken		[31;32]
Speicherdauer	Wenige Minuten		[2]

Latentkältespeicher

In diesem Abschnitt werden verschiedene Arten von Latentkältespeichern vorgestellt. Zuerst wird auf die Bauarten des Eisspeichers als Direktverdampfersystem sowie mit integrierten Wärmetauscherrohren eingegangen. Danach folgt die Beschreibung von Speichersystemen mit makroverkapseltem PCM.

Eisspeicher

Bedingt durch den Phasenübergang haben Eisspeicher eine wesentlich höhere Speicherdichte als beispielweise Kaltwasserspeicher. Der Einsatz eines Eisspeichers bietet daher viele Vorteile, aber besitzt eine aufwändigere Regelung sowie hydraulische Einbindung in das gesamte Kältesystem. [28] Die verschiedenen Bauweisen und ihre Funktionen werden nachfolgend beschrieben.

Funktionsweise

Direktverdampfersysteme

Der Verdampfer der Kältemaschine befindet sich direkt im Speicherbehälter. Dort wird an der Verdampferoberfläche Eis erzeugt. Der Verdampfer besteht aus Kühlerrohren oder -platten. Für eine gleichmäßige Eisbildung an der Oberfläche des Verdampfers wird das Wasser im Behälter mit Pumpen umgewälzt oder Luft am Behälterboden eingeblasen. Wegen der schlechten Wärmeleitung im Eis nimmt die thermische Leistung mit zunehmender Eisdicke ab. [28]

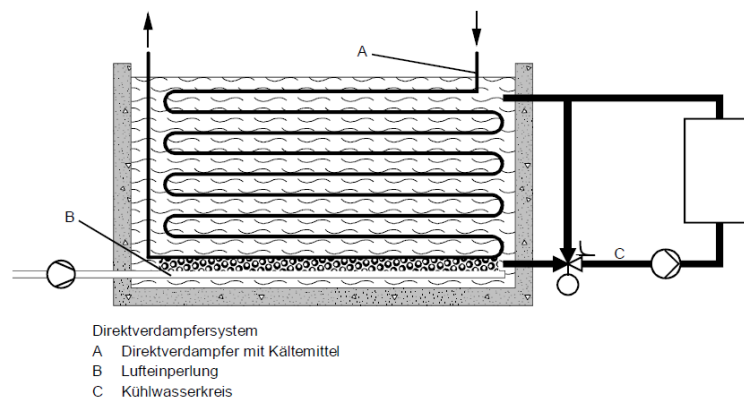


Abbildung 10: Eisspeicher als Direktverdampfersystem [28]

Eisspeicher mit Wärmetauscherrohren

In diesen Eisspeichern werden Wärmetauscherrohre verwendet, die mit einem Kälteträger durchflossen werden. Die Wärmetauscherrohre sind am Beispiel in Abbildung 11 spiralförmig in der Ebene und über mehrere Ebenen angeordnet. Sie füllen den Eisspeicherbehälter vollständig aus, um eine möglichst große Wärmeübertragungsfläche zu realisieren. [28]

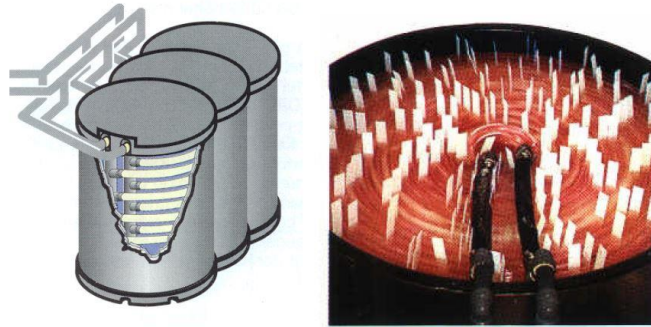


Abbildung 11: Eisspeicher mit Wärmetauscherrohren [28]

Typische Anwendungsbereiche

Klimatechnik und Gewerbekälte

Klimatechnik

Eisspeicher werden in der Klimatechnik aus verschiedenen Überlegungen eingesetzt. Aus ökonomischen Überlegungen, wenn eine Stromkostenoptimierung erreicht werden kann (z.B. Stromnutzung zur Kälteerzeugung bei Niedertarif oder Lastspitzenreduktion zur Gebäudekühlung), wenn bei einem bestehenden Kältenetz die Kälteleistung vergrößert werden soll oder als Backup bei Stromausfällen, wenn die Kälteversorgung abgesichert werden muss. [28]

Gewerbekühlung

In der Gewerbekühlung werden Eisspeicher meistens eingesetzt, wenn hohe Kältelasten für wenigen Stunden pro Tag auftreten, z.B. in Brauereien, Molkereien, usw. Die Kälteerzeugung wird in diesen Anwendungen stoßweise benötigt, Eisspeicher sorgen hier für einen kontinuierlichen Betrieb der Kältemaschinen mit oftmals deutlich geringer Kälteleistung im Vergleich zur auftretenden maximalen Kältelast. [28]

Latente Speicher mit makroverkapselten PCM

Eine weitere Möglichkeit der Latentkältespeicherung bieten makroverkapselte PCM. Als PCM können Wasser, Paraffine oder Salzlösungen eingesetzt werden. Durch den Einsatz verschiedener PCM können die unterschiedlichen Schmelztemperaturen der PCM genutzt und das Speichersystem an die Anwendung angepasst werden.

Funktionsweise

Das Makrokapselkonzept erlaubt die Nutzung unterschiedlicher PCM. Dabei befinden sich die verkapselte PCM in einem Tank (A), welcher mit einem Kälteübertragungsmedium durchströmt wird. Das Umstellventil (C) legt bei entsprechender Pumpensteuerung den Be- oder Entladebetrieb des Speichers fest. Das Kälteübertragungsmedium kann sowohl Wasser als auch ein Wasser/Glykol-Gemisch sein. Die Wärmeübertragung erfolgt über die Oberfläche der Kapseln.

In Abbildung 12 ist beispielhaft ein Speicher mit wassergefüllten Kunststoffkugeln dargestellt. Diese Kugeln sind elastisch, damit sie nicht durch die Ausdehnung des PCM beim Gefrieren beschädigt werden. Hierzu wird ein zusätzliches Ausdehnungsgefäß (B) in das System integriert. [28]

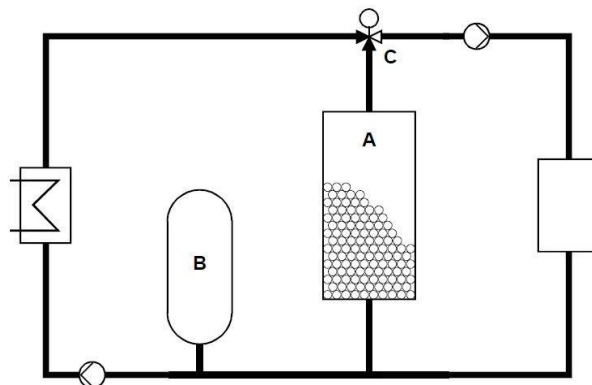


Abbildung 12: Latentkältespeicher mit wassergefüllten Kunststoffkugeln [28]

Die Eignung eines PCM für eine spezifische Anwendung ist von seinen Stoffeigenschaften, insbesondere der Schmelzenthalpie und Phasenwechseltemperatur, abhängig.

Typische Anwendungsbereiche

Klimakälte, Gewerbekälte, Tiefkälte

Allgemeine Informationen								
Auslegungsparameter		<ul style="list-style-type: none"> • Maximale Kühllast • Notwendige Speicherkapazität • Betriebszeit • Beladedauer • Ladeverhältnis <i>Kältemaschinenleistung während der Ladung zur Leistung im Normalbetrieb</i>	[33;34]					
Speicherdichte	[kWh/m ³]	Eisspeicher	<table border="1"> <tr> <td>Maximal</td> <td>84,4</td> </tr> <tr> <td>Praktisch</td> <td>40 bis 60</td> </tr> </table>	Maximal	84,4	Praktisch	40 bis 60	[2]
		Maximal	84,4					
Praktisch	40 bis 60							
		PCM	80 bis 110	[35]				
Betriebsweise		<p>Einsatz aufgrund technischer Restriktionen - Erhöhung der thermischen Kapazität auf Verbraucherseite zur Betriebssicherheit und regelungstechnischen Gründen. Zusätzlich zur Kältebereitstellung als Sicherheitspuffer bei Abschaltung des Kälteerzeugers (Lastabwurf).</p> <p>Angepasste Betriebsweise bei Lastmanagement – Speicherbeladung in Zeiten geringer Stromtarife und anschließender Deckung des Kältebedarfs durch den Speicher in Zeiten hoher Stromtarife anstatt einer kostenintensiveren Kälteerzeugung.</p>						
Einfluss auf Ent-/Beladeleistung		Außen- und Innenraumtemperatur		[34]				
Investitionskosten	[€/kWh]	Eisspeicher	30	[36]				
		PCM	20 bis 100	[35]				

Sonstiges			
Potenzial zur Reduktion von Kühllastspitzen	[%]	10 bis 57	[34]
Speicherwirkungsgrad	[%]	80 bis 98	[35]
Lebensdauer		3.500 bis 15.000 Zyklen	[35]
Spezifische Leistung	[kW/m ³]	10 bis 20	[35]
Speicherdauer		Stunden bis Wochen	[35]
Reaktionszeit		Minuten	[35]

Literatur

- [1] *Wosnitza, F., Hilgers, H. G.*: Energieeffizienz und Energiemanagement: Ein Überblick heutiger Möglichkeiten und Notwendigkeiten. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2012.
- [2] *Sprenger, E., Recknagel, H., Albers, K.-J.* (Hrsg.): Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik 2015/2016: einschließlich Warmwasser- und Kältetechnik sowie Energiekonzepte. München: DIV Deutscher Industrieverlag GmbH, 77. Aufl., 2015.
- [3] *Maurer, T.*: Kältetechnik für Ingenieure. Berlin, Offenbach: VDE Verlag GmbH, 2016.
- [4] *Reisner, K.*: Fachwissen Kältetechnik: Eine Einführung für die Aus- und Weiterbildung mit Aufgaben und Lösungen. Heidelberg: C.F. Müller, 4. Aufl., 2008.
- [5] *Recknagel, Sprenger, Schramek*, 2007: Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik: einschließlich Warmwasser- und Kältetechnik.
- [6] *Bez, A.*, 2012: Kälte durch Wärme erzeugen: Möglichkeiten der mit Kraft-Wärme-Kopplung beheizten Absorptionskältemaschine im Vergleich zur Kompressionskältemaschine unter wirtschaftlichen und technischen Gesichtspunkten. Bachelorthesis. Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, Hamburg.
- [7] *trend:research GmbH*, 2013: Energieeffizienz im Kältemarkt: Entwicklungen und Potenziale für den Industrie- und Dienstleistungssektor bis 2020, Bremen.
- [8] *Kulterer, K., Mair, O., Österreichische Energieagentur*, 2015: Leitfaden für Energieaudits in Kältesystemen. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Österreichische Energieagentur, Wien.
- [9] *Blesl, M., Kessler, A.*: Energieeffizienz in der Industrie. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013.
- [10] *Popp, S.*, 2016: Entwicklung und Charakterisierung alternativer Arbeitsstoffpaare für den Einsatz von Absorptionskältemaschinen. Dissertation. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Erlangen-Nürnberg.
- [11] *Henning, H.-M.* (Hrsg.): Kühlen und Klimatisieren mit Wärme. Berlin: Verl. Solarpraxis, 2009.
- [12] *Zetzsche, M.*, 2012: Experimentelle Untersuchungen und regelungstechnische Optimierung einer Ammoniak/Wasser-Absorptionskältemaschine in Kombination mit einem solar angetriebenen Kühlsystem mit Eisspeicher. Dissertation. Universität Stuttgart, Stuttgart.
- [13] *Institut für Kälte- Klima- und Energietechnik GmbH* (Hrsg.): Pohlmann Taschenbuch der Kältetechnik: Grundlagen, Anwendungen, Arbeitstabellen und Vorschriften. Berlin: VDE VERLAG, 22. Aufl., 2018.
- [14] *Urbanek, T., Uhlig, U., Platzer, B., Schirmer, U., Göschel, T., Zimmermann, D.*, 2006: Machbarkeitsuntersuchung zur Stärkung der Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung durch den Einsatz von Kältespeichern in großen Versorgungssystemen. Stadtwerke Chemnitz AG, Technische Universität Chemnitz, Chemnitz.
- [15] *Jakob, U.*, 2008: Solare Kühlung – die umweltfreundliche Klimatisierung, Rimsting.
- [16] *Noeres, P.*: Thermische Kälteerzeugung mit Dampfstrahlkältemaschinen: Konzepte und Erfahrungen. KI Kälte Luft Klimatechnik (2006), H. 11, S. 478–483.
- [17] *Röben, J.*, 2002: Sorptionsgestützte Klimatisierung. BINE Informationsdienst, Mülheim an der Ruhr.
- [18] *Stark, T., Schreiber, J., Lenz, B.*: Nachhaltige Gebäudetechnik: Grundlagen - Systeme - Konzepte. Berlin, München: De Gruyter; Detail, 2010.

- [19] *Engelmann, T.*: Wie funktioniert eine Klimaanlage?, 22.10.2020, <https://www.kaelte-technik-kwe.de/wir-funktioniert-eine-klimaanlage/>, 2019.
- [20] *Sironi, M.*: Möglichkeiten moderner VRF- und Multisplit-Klimasysteme: Gebäudekühlung, effiziente Wärmerückgewinnung, flexible Wärmeverschiebung, 22.10.2020, <https://www.ikz.de/klima-lueftungstechnik/news/detail/moeglichkeiten-moderner-vrf-und-multisplit-klimasysteme/>, 2017.
- [21] *Paschotta, R.*: Split-Klimagerät, 15.12.2020, https://www.energie-lexikon.info/split_klimageraet.html.
- [22] *Stahl, M.* (Hrsg.): VRF-Klima - die stille Revolution. Karlsruhe: cci Dialog, 2009.
- [23] *HEA – Fachgemeinschaft für effiziente Energieanwendung e.V.*: Kühl- und Gefriergeräte: Aufbau und Funktion, 20.10.2020, <https://www.hea.de/fachwissen/kuehl-und-gefriergeraete/aufbau-und-funktion>, 2020.
- [24] *Schmid, F.*, 2016: Entwicklung einer direkt solarthermisch angetriebenen Diffusions-Absorptionskältemaschine. Dissertation. Universität Stuttgart, Stuttgart.
- [25] *Umweltbundesamt*, 2013: Energiesparen im Haushalt: Wie Sie einfach und ohne Komfortverlust Ihren Energieverbrauch senken und Geld sparen können., Bonn.
- [26] *Mhadhbi, M.* (Hrsg.): Phase Change Materials and Their Applications. London: InTechOpen, 2018.
- [27] *Frigoteam Handels GmbH*, 2019: Thermische Energiespeicher mit PCM-Latentspeichertechnologie (PCM = Phase Change Material) für Kälte- und Klimaanlage, Berlin.
- [28] *Siemens AG, Building Technologies Division*, 2017: Kältetechnik, Frankfurt am Main.
- [29] *Stadler, I., Sterner, M.*: Energiespeicher: Bedarf, Technologien, Integration. Berlin: Springer Vieweg, 2014.
- [30] *Urbanek, T.*: Kältespeicher: Grundlagen, Technik, Anwendung. München: Oldenbourg Verlag, 2012.
- [31] *Puls, P.*, 2019: Simulationsgestützte Effizienzoptimierung von industriellen Kaltwassersystemen mit thermischen Speichern. Dissertation. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Erlangen.
- [32] *Hasnain, S. M.*: Review on sustainable thermal energy storage technologies, Part I: heat storage materials and techniques. *Energy Conversion and Management* 39 (1998), H. 11, S. 1127–1138.
- [33] *Buchner, S.; Hilligweg, A.*: Eine kennzahlgestützte Auslegungsmethodik für Eisspeicheranlagen. *Technik im Bau* 37 (2006), H. 3.
- [34] *Frigione, M., Lettieri, M., Sarcinella, A.*: Phase Change Materials for Energy Efficiency in Buildings and Their Use in Mortars. *Materials (Basel, Switzerland)* 12 (2019), H. 8.
- [35] *BVES*, 2016: Fact Sheet Speichertechnologien: Niedertemperatur-Latentwärmespeicher.
- [36] *MVV Energie AG*, 2013: Abschlussbericht E-Energy Modellstadt Mannheim: Beiträge von moma zur Transformation des Energiesystems für Nachhaltigkeit, Beteiligung, Regionalität und Verbundenheit, Mannheim.