

Technologieübersicht zur Abwärmennutzung aus Rechenzentren

Version: Juni 2024

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Universität Stuttgart

Institut für Energiewirtschaft und Rationelle
Energieanwendung (IER)
Institut für Volkswirtschaftslehre und Recht (IVR)



Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	2
Symbol- und Farbdefinitionen	4
 Rechenzentrums Kühlung	5
Allgemeines zur Rechenzentrums Kühltechnologie	6
Wo könnte die Abwärme der Server ausgekoppelt werden?	7
Luftkühlung	8
Indirekte Flüssigkeitskühlung	9
Direkte Flüssigkeitskühlung.....	10
Immersionenkühlung.....	11
 Wärmeübertrager	12
Allgemeines zu Wärmeübertragern	13
Plattenwärmeübertrager	14
Rohrbündelwärmeübertrager	15
 Wärmepumpe	16
Allgemeines zu Wärmepumpen	17
Luft-Luft-Wärmepumpen	18
Luft-Wasser-Wärmepumpen.....	19
Wasser-Wasser-Wärmepumpen	20
Hochtemperaturwärmepumpen	21
 Kältemaschine	22
Allgemeines zu Kältemaschinen	23
Kompressionskältemaschine	24
Absorptionskältemaschine	25
Adsorptionskältemaschine	26
 Zusatzabschnitt zu Kältemittel	27

Allgemeines zu Kältemittel 28

 **Wärmenetz** 30

Allgemeines zu Wärmenetzen 31

Wärmenetz der ersten Generation 32

Wärmenetz der zweiten Generation 33

Wärmenetz der dritten Generation 34

Wärmenetz der vierten Generation 35

Wärmenetz der fünften Generation 36

Literatur Fehler! Textmarke nicht definiert.

Kontakt 41

Symbol- und Farbdefinitionen

Technologiekurzübersicht („Tags“)

	Technologie
	Abwärmenutzungsart
	Temperaturbereich
	Leistungsbereich

Eignung der Kombination einer Abwärmenutzungstechnologie mit Luftkühlung oder Flüssigkeitskühlung



Luftkühlung (z. B. Umluftklima- und kühleräte etc.)



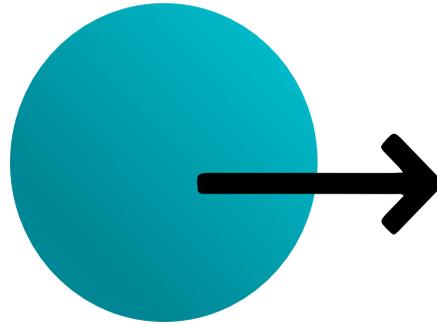
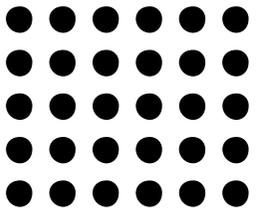
Flüssigkeitskühlung (z. B. Kühlplatten- und Immersionskühlung)



Keine oder nur bedingte Eignung in Kombination mit der Abwärme aus Rechenzentren

Disclaimer

Die in dieser Best-Practice Übersicht enthaltenen Technologien zur Abwärmenutzung aus Rechenzentren dienen lediglich zu Informationszwecken und sollen als Anregung dienen. Es wird keine Gewähr für die Richtigkeit oder Vollständigkeit der Informationen übernommen und es obliegt der Verantwortung der Leserin oder des Lesers, die Informationen im Kontext seiner individuellen Bedürfnisse und Anforderungen zu bewerten und zu nutzen. Wir übernehmen keine Haftung für eventuelle Schäden oder Verluste, die sich aus der Verwendung dieser Informationen ergeben können. Die Nutzung von Bildmaterial für weitere Zwecke ist individuell zu klären.

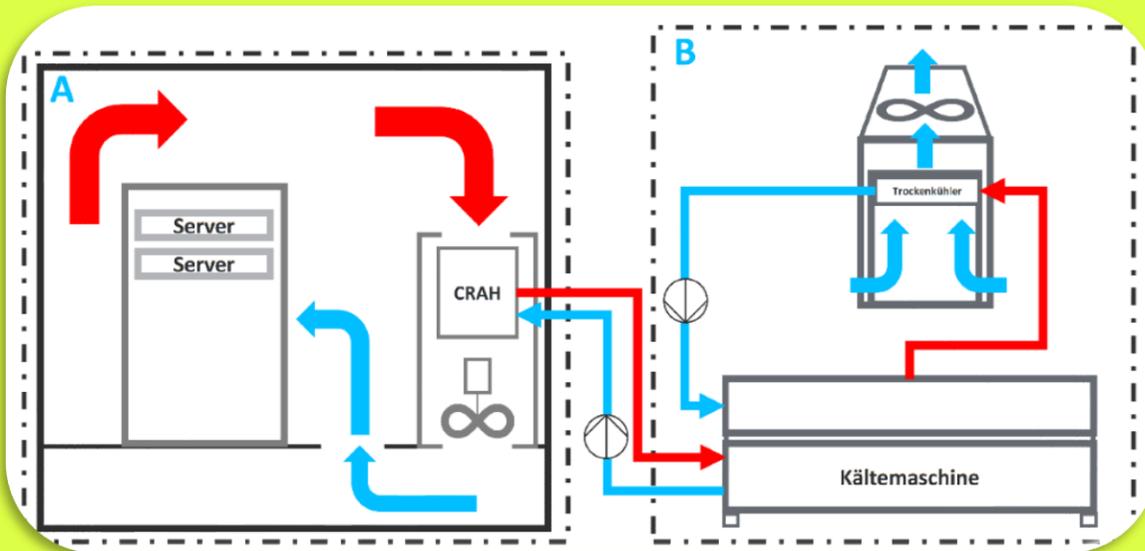


Rechenzentrums- kühltechnologie (Ebene: Server / Rack / Raum)





Allgemeines zur Rechenzentrumskühltechnologie



Die **Kühlung von Rechenzentren** setzt sich aus zwei Teilsystemen (A und B) zusammen. Während die *Raumkühlung* (A) dafür sorgt, dass die beim Betrieb der Server anfallende Abwärme abgeführt wird (z. B. über Umluftkühlgeräte), stellt die *Kühlungsinfrastruktur* (B) das dafür notwendige Kaltwasser bereit (z. B. mit Kompressionskältemaschinen) und führt die überschüssige Abwärme über Rückkühltürme an die Umgebung ab. Innerhalb des Kühlsystems kann auf verschiedenen Temperaturniveaus und von verschiedenen Medienströmen Abwärme ausgekoppelt (z. B. mit Wärmeübertrager) werden. CRAH = Computer Room Air Handler; deu: Umluftkühlgerät
CRAC = Computer Room Air Conditioning; deu: Klimagerät

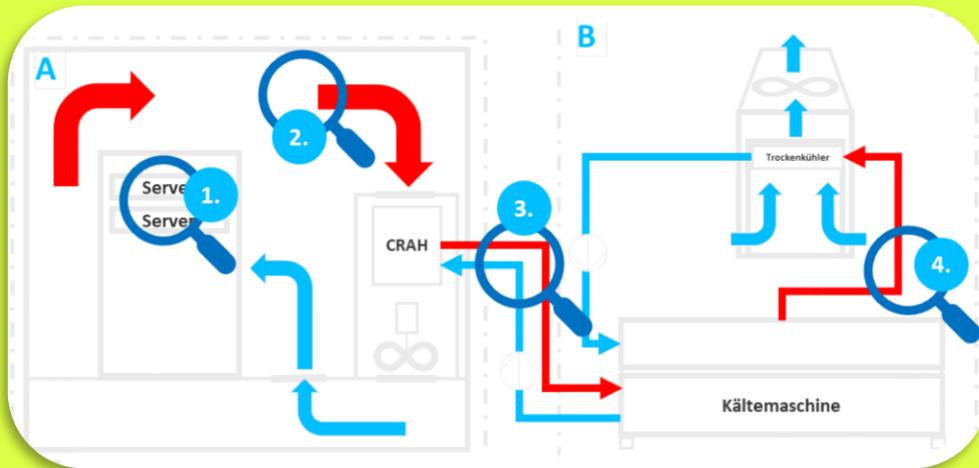
 Luft- und Flüssigkeitskühlung
 20 - 60 °C
(Abwärmtemperatur)

 Abwärmeerfassung und -abführung
 2 - 250 kW_{th}/Rack

 Bildquelle: [1]; Quellen: [2-4]



Wo könnte die Abwärme der Server ausgekoppelt werden?



Für die **Auskopplung der Abwärme** können theoretisch vier verschiedene Ansätze verfolgt werden. Je nach Kühlkonzept kann dieses innerhalb der *Raumkühlung* (A) oder der *Kühlungsinfrastruktur* (B) erfolgen. Gleichzeitig werden dadurch die erreichbare Abwärmemetemperatur und Komplexität der notwendigen technischen Infrastruktur für die Auskopplung bestimmt. Je näher an der Wärmequelle die Abwärme erfasst wird, desto höher deren Temperatur (abgesehen von einer etwaigen Temperaturerhöhung mittels einer Kältemaschine). Andererseits sinkt der technische Aufwand zur zentralen Erfassung der Abwärme aus allen Quellen.

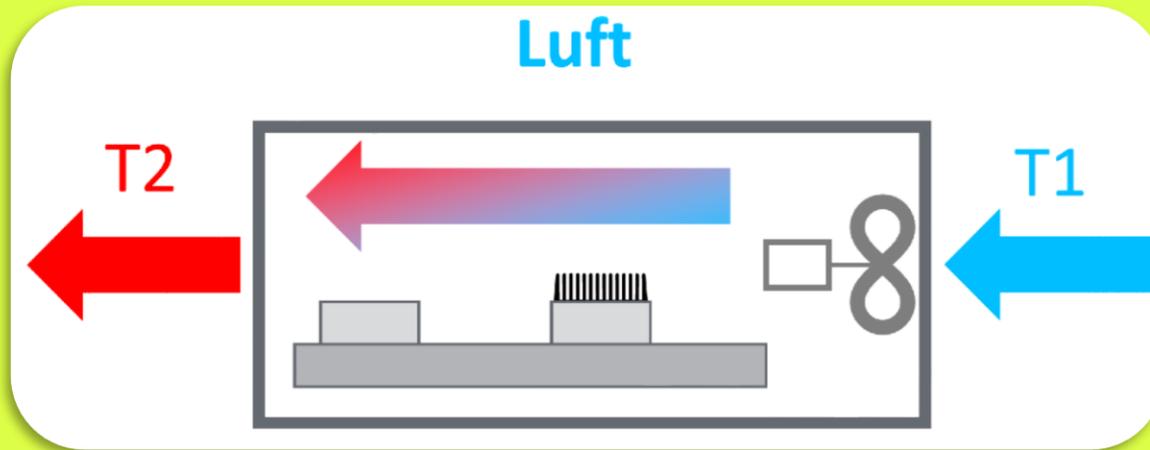
- | | |
|---|---|
| <p>1. Direkt im Server (z. B. Thermoelektrischer Generator)</p> | <p>2. Luft-X-Wärmeübertrager im Warmgang</p> |
| <p>3. Kaltwasser / Kältemittel (X-Wasser-Wärmeübertrager nach CRAH / CRAC)</p> | <p>4. Kühlwasser oder in der Kältemaschine integrierte Auskopplung</p> |



Bildquelle: [5]



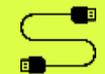
Luftkühlung



Bei der **Luftkühlung** wird kühle Luft über Ventilatoren durch den Server transportiert und nimmt die entstehende Abwärme auf. Teilweise sind dazu auch Kühlkörper auf einzelnen Komponenten installiert. Die "American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers" (ASHRAE) empfiehlt für die Eintrittstemperatur 18 bis 27 °C (T1). Über den Server findet dabei eine Temperaturerhöhung von bis zu 15 K statt. Je nach Konfiguration (z. B. Kaltgang- oder Warmgangeinhausung) kann eine Kühlleistung von bis zu 12 kW_{th} pro Rack erreicht werden.

Anschließend wird die erwärmte Luft durch Umluftklimageräte (CRAC) oder Umluftkühlgeräte (CRAH) abgekühlt.

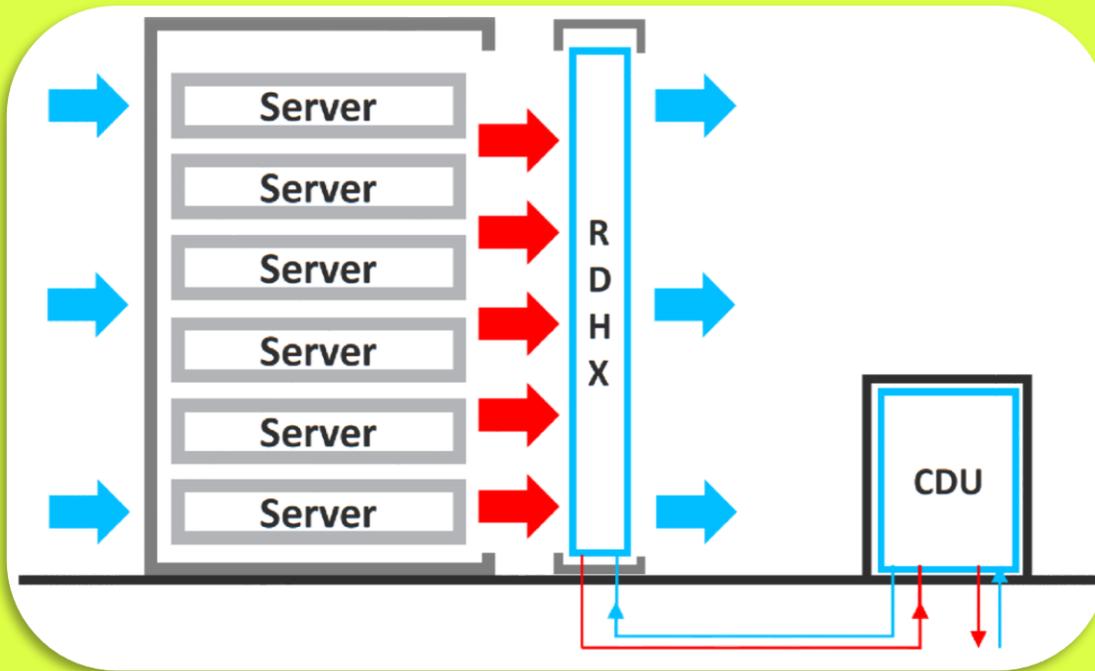
 Umluftklimagerät
oder Umluftkühlgerät
 20 - 40 °C
(Abwärmtemperatur)

 Abwärmeerfassung
und -abführung
 < 12 kW_{th}/Rack

 Bildquelle: [6]; Quellen: [7–15]

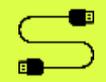


Indirekte Flüssigkeitskühlung



Bei der **indirekten Flüssigkeitskühlung** erfolgt eine Kombination von Luft- und Wasserkühlung. Raumluft wird den Servern zugeführt und erwärmt sich. An deren Rückseite befindet sich ein Luft-Wasser-Wärmeübertrager, durch den die erwärmte Luft zwangsweise strömen muss. Dieses wird durch das durchströmende Kaltwasser auf Raumtemperatur abgekühlt. Die sogenannten „Rear Door Heat Exchanger“ (RDHX) gibt es dabei in zwei Ausführungen: *passiv* und *aktiv*. Im zweiten Fall sind zusätzliche Ventilatoren in der Rückwand installiert und ermöglichen dadurch eine höhere Kühlleistung. Ein großer Vorteil ist die direkte Überführung der Abwärme in den Kaltwasserkreislauf, vor allem im Gegensatz zu den Umluftkühlgeräten.

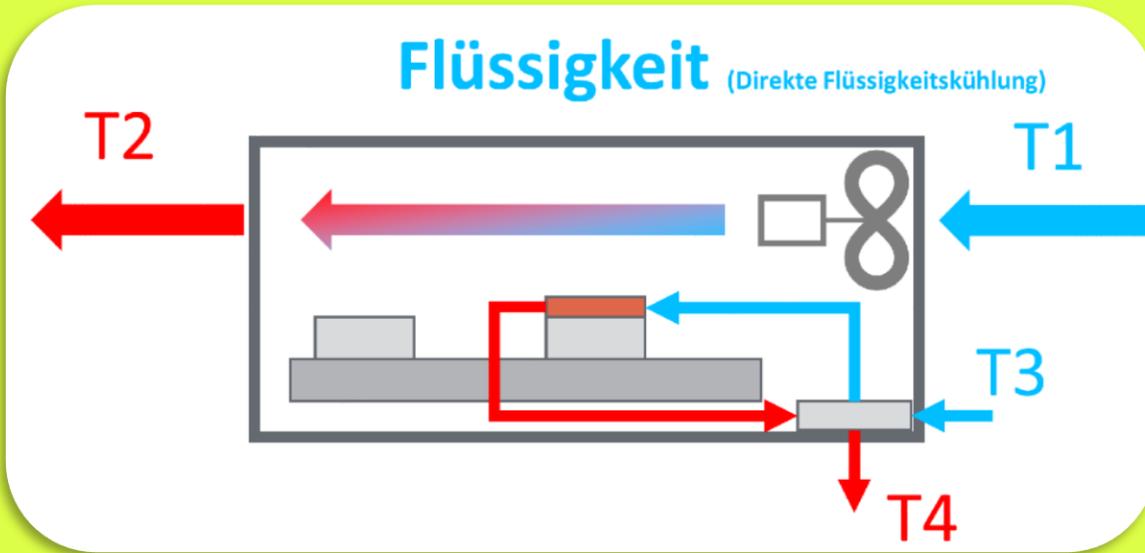
 Gekühlte Rückwandtüren
 20 – 30 °C
 (Abwärmtemperatur)

 Abwärmeerfassung und -abführung
 15 – 55 kW_{th}/Rack

 Bildquelle: [16]; Quellen: [3]



Direkte Flüssigkeitskühlung



Auch bei der **direkten Flüssigkeitskühlung** erfolgt eine Kombination aus Luft- und Flüssigkeitskühlung. Auf den zu kühlenden Komponenten (insbesondere CPU und RAM) befinden sich flüssigkeitsdurchströmte Kühlplatten. Auf diese Art können zwischen 60 und 90 % der Abwärme in der Flüssigkeit aufgenommen werden. Als Kühlmedium können einphasige (z. B. Wasser) oder auch zweiphasige Medien eingesetzt werden. ASHRAE empfiehlt eine Eintrittstemperatur von 17 (W17) bis über 45 °C (W45 und W+). Gleichzeitig beträgt die Temperaturerhöhung über die Serverkomponenten etwa 10 K. Die restliche Abwärmelast wird über einen Luftstrom abgeführt.



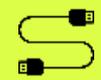
Kühlplatten



30 - 60 °C
(Abwärmemetemperatur)



Abwärmeerfassung
und -abführung

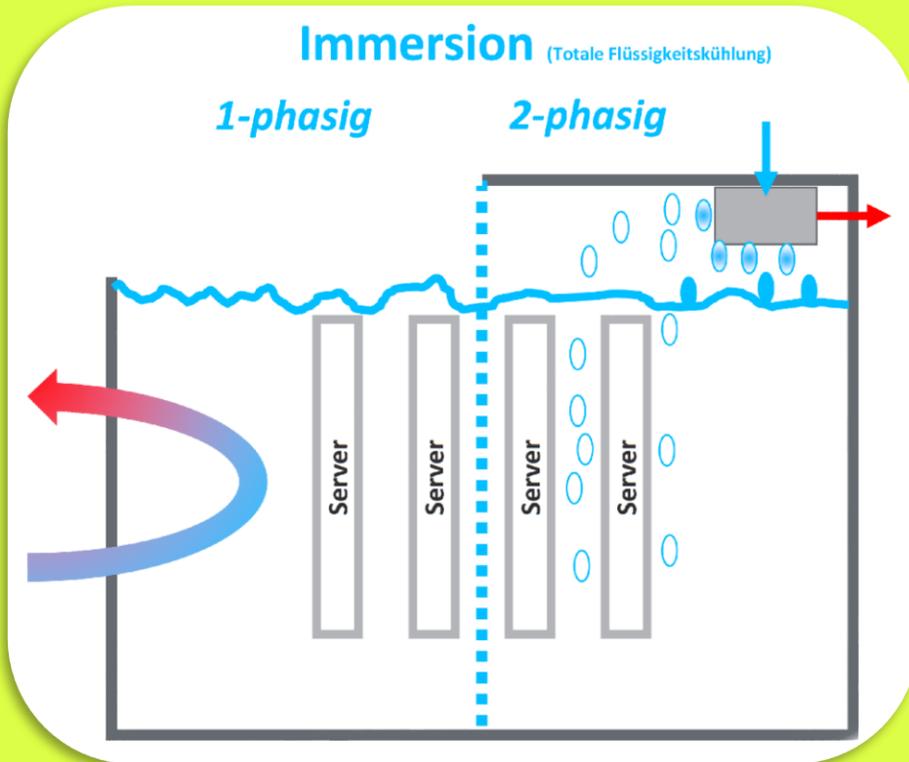


< 80 - 200
kW_{th}/Rack



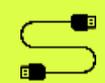
Bildquelle: [17]; Quellen: [14, 15, 18]

Immersionskühlung

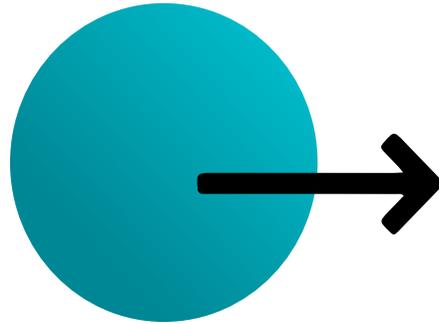
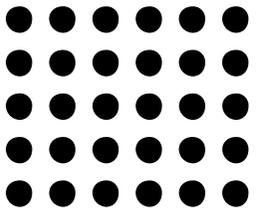


Mit der **Immersionenkühlung** können bis zu 100 % der anfallenden Abwärme in einer Flüssigkeit gebunden werden. Im Gegensatz zur direkten Flüssigkeitskühlung wird der gesamte Server in eine Kühlflüssigkeit eingetaucht. In diesem Fall kann kein Wasser mehr verwendet werden, sondern es sind spezielle elektrisch nichtleitende Flüssigkeiten erforderlich (z. B. Mineralöle). Oftmals erfolgt ein anderer Aufbau. Anstelle eines Racks können auch Tanks eingesetzt werden. Diese können in offener oder geschlossener Bauweise ausgeführt sein. Je nachdem ob ein einphasiges oder zweiphasiges Kühlmittel eingesetzt wird, ist eine geschlossene Ausführung erforderlich. In diesem Fall kann die Verdampfungsenthalpie ausgenutzt werden.

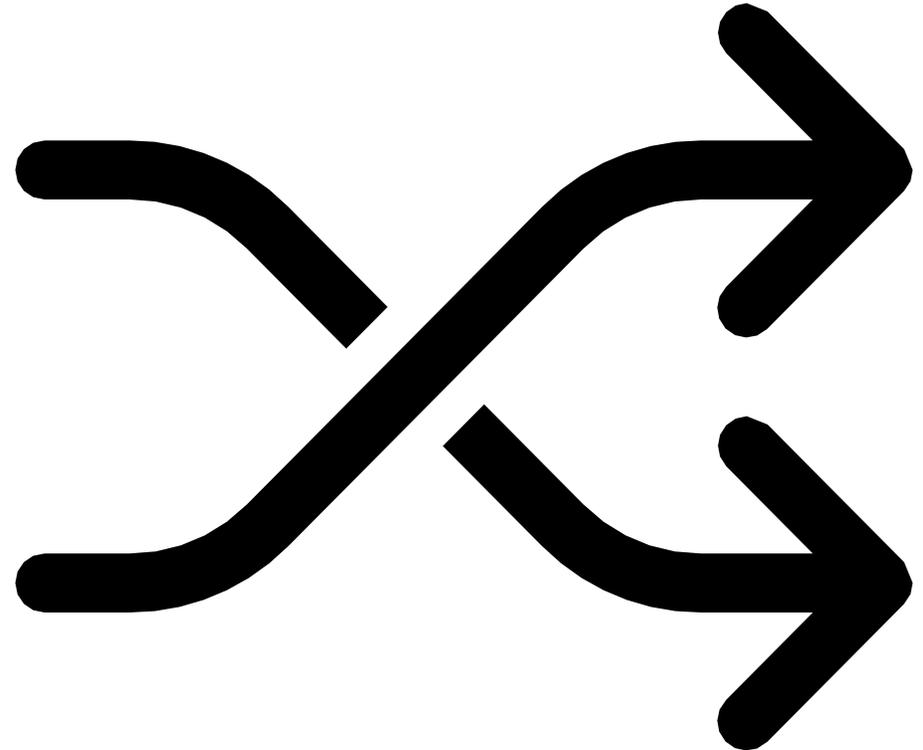
 Einphasig / Zweiphasig
 30 - > 60 °C
 (Abwärmtemperatur)

 Abwärmeerfassung und -abführung
 < 250 kW_{th}/Rack

Bildquelle: [19]; Quellen: [4, 18]



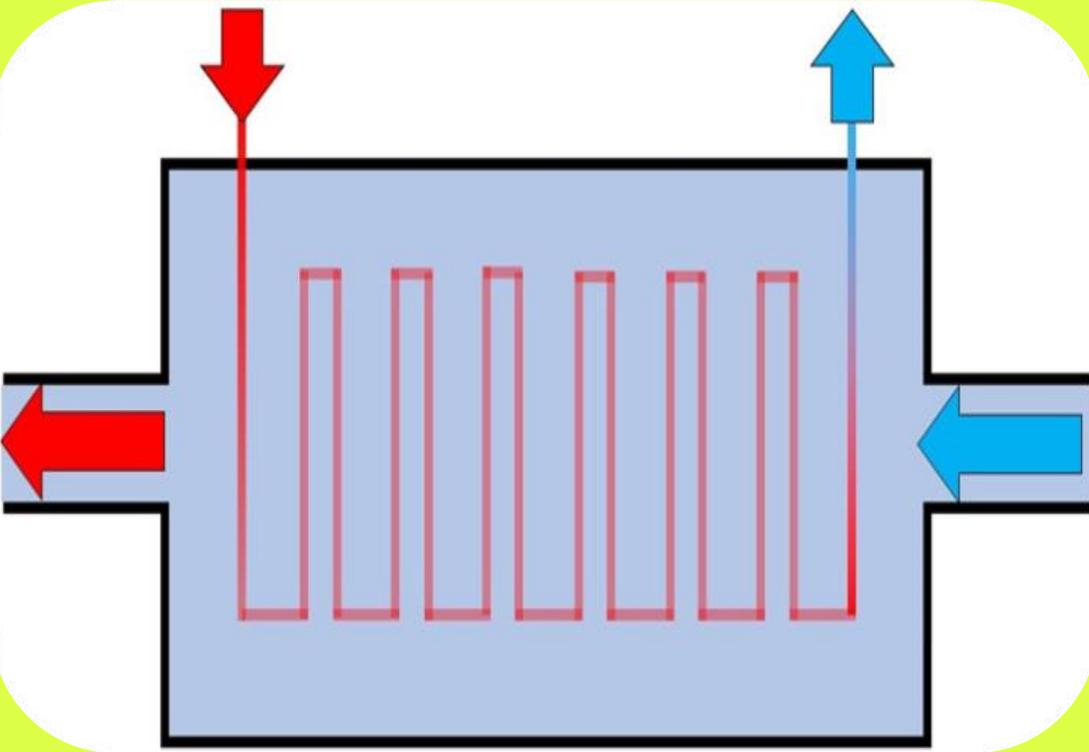
Wärmeübertrager





Allgemeines zu Wärmeübertragern

Ein **Wärmeübertrager** ist eine Vorrichtung, die die Übertragung von thermischer Energie von einem Stoffstrom auf einen anderen ermöglicht, ohne dass die Fluide miteinander in direkten Kontakt kommen müssen. Die übertragene Wärme kann für weitere thermische Anwendungen genutzt werden. Kompakte Wärmetauscher werden für die Abwärmerückgewinnung bevorzugt, da sie bei gleichem Volumen eine höhere Wärmeübertragungsrate und einen sehr geringen Druckverlust aufweisen.



Platten- und
Rohrwärmetauscher



Wärmeübertragung
und -
rückgewinnung



Bis 900 °C
(Betriebstemperatur)



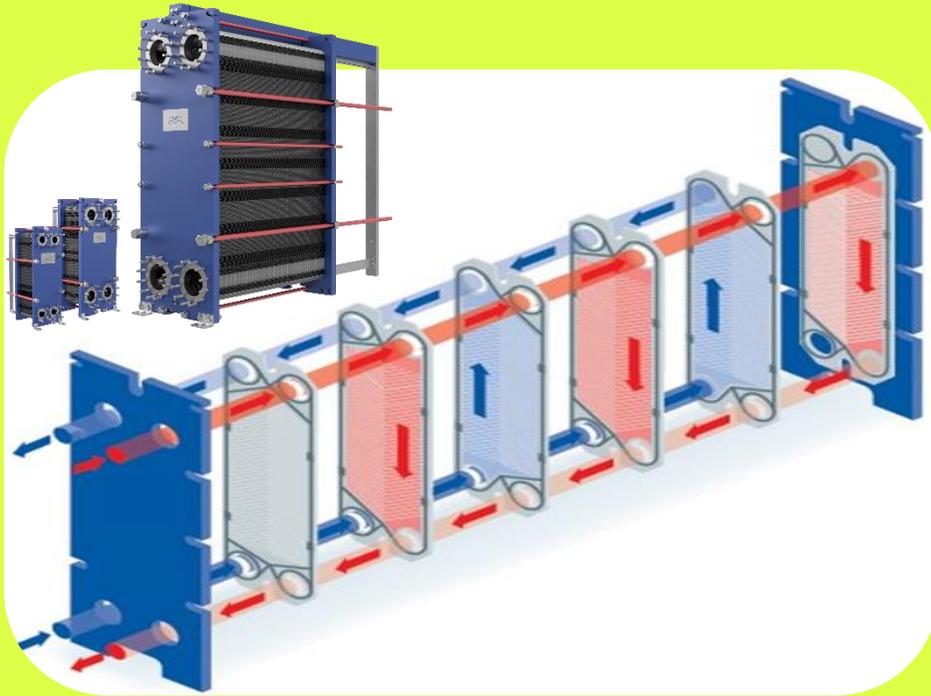
2 kW_{th} – 400 MW_{th}



Bildquelle: [6]; Quellen: [7–13]



Plattenwärmeübertrager



Ein **Plattenwärmeübertrager** ist eine Art von Wärmeübertrager, bei dem Metallplatten verwendet werden, um Wärme von einer Flüssigkeit auf eine andere zu übertragen. Plattenwärmeübertrager bestehen aus einer Reihe dünner, gewellter, geformter Metallplatten. Jedes Plattenpaar bildet einen komplexen Durchgang, in dem die Flüssigkeit fließt. Plattenwärmeübertrager werden im Allgemeinen in zwei Typen eingeteilt: gelötete und gedichtete Platten. Bei Plattenwärmeübertrager fließt die heiße Flüssigkeit in abwechselnden Kammern in eine Richtung und die kalte Flüssigkeit fließt in anderen abwechselnden Kammern, aber entgegengesetzt zur Richtung der heißen Flüssigkeit.



Bis 900 °C
(Betriebstemperatur)



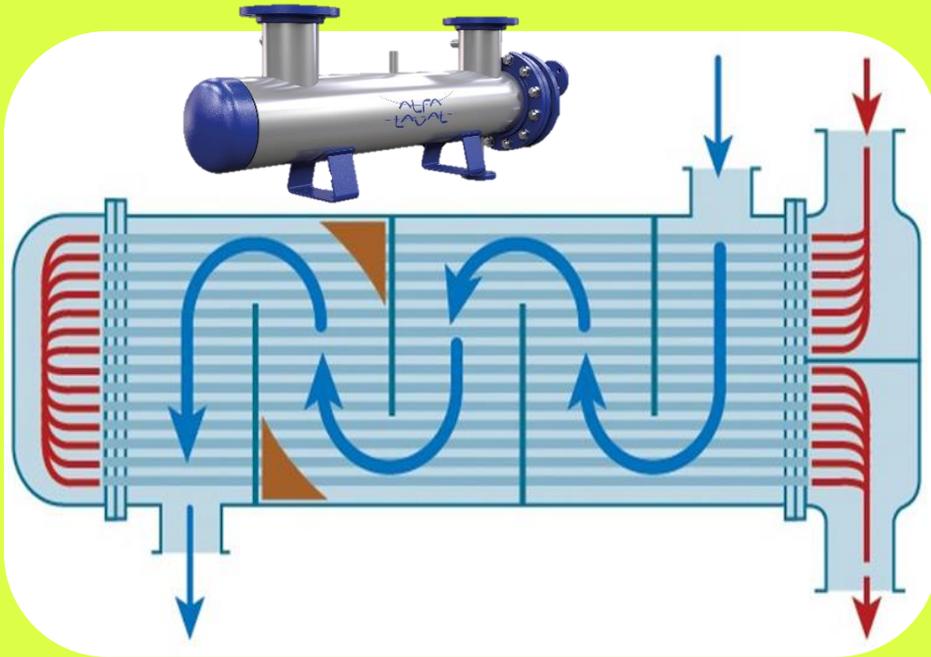
2 kW_{th} – 400 MW_{th}



Bildquelle: [20]; Quellen: [10–13, 21, 22]



Rohrbündelwärmeübertrager



Rohrbündelwärmeübertrager gehören zu der häufigsten verwendeten Art von Wärmeübertrager. Ein Rohrbündelwärmeübertrager besteht aus einer Mantel- und einer Rohrseite, wobei ein flüssiges Medium durch die Mantelseite und ein anderes durch die Rohre fließen. Rohrbündelwärmeübertrager sind für den Hochdruckbetrieb geeignet, da sie sehr robust sind.



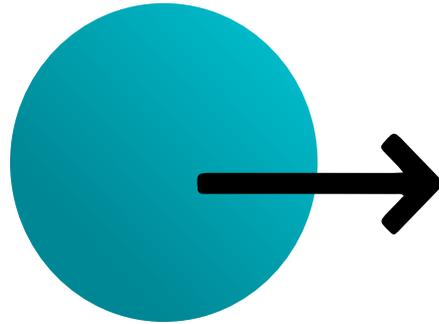
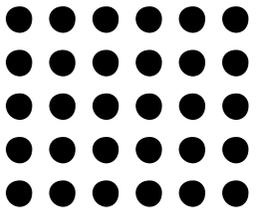
Bis 300 °C
(Betriebstemperatur)



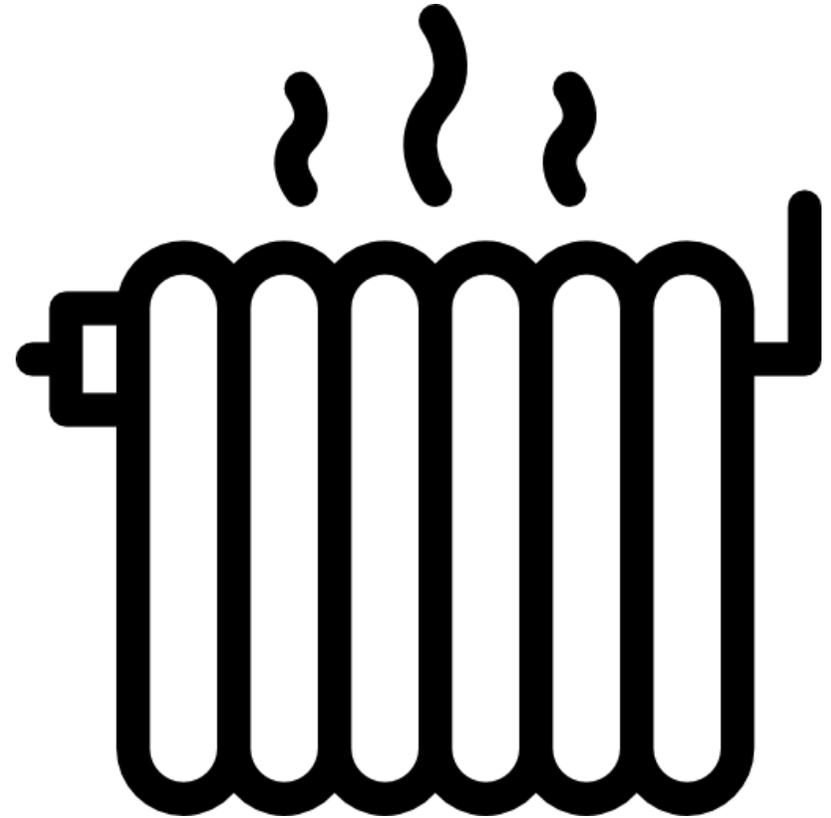
2 kW_{th} - 20 MW_{th}



Bildquelle: [20]; Quellen: [10–13, 21, 22]



Wärmepumpe





Allgemeines zu Wärmepumpen



Eine **Wärmepumpe** nimmt thermische Energie aus einer Quelle mit niedrigeren Temperaturen auf und wertet sie zusammen mit der eingesetzten Betriebsenergie (meistens elektrischer Strom) auf eine höhere Temperatur auf. Wärmepumpen werden häufig zur Temperaturaufwertung von Abwärme aus (luftgekühlten) Rechenzentren eingesetzt.

Mit Hilfe einer Wärmepumpe kann die Abwärme eines Rechenzentrums auf ein Temperaturniveau von 60 °C und höher gebracht werden. Möglich sind auch mehrstufige Wärmepumpen, mit denen ein deutlich höheres Temperaturniveau von > 150 °C erreicht werden kann.



Luft-Wasser-, Wasser-Wasser- und Hochtemperaturwärmepumpe
30 – 150 °C
(Senktemperatur)



Heizung und Kühlung



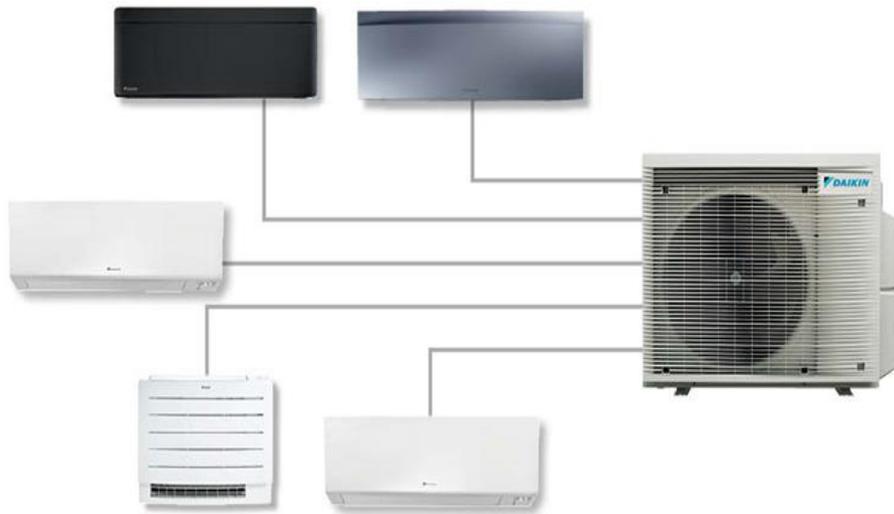
< 10 kW_{th} ... 70 MW_{th}



Bildquelle: [23]; Quellen: [24–30]



Luft-Luft-Wärmepumpen



Luft-Luft-Wärmepumpen nutzen die Luft im Heizbetrieb als Quelle für Wärmeenergie. Ein Luft-Luft-Wärmepumpensystem kann in der Regel auch zu Kühlzwecken verwendet werden, indem der Prozess umgekehrt wird und der Luft im Raum Wärme entzogen wird. In Bezug auf die Abwärmenutzung bei Rechenzentren bewirkt die Luft-Luft-Wärmepumpe eine Kühlung des Serverraums und kann diese als Wärmequelle für Heizzwecke nutzen. Hierbei wird die Wärme von einer Luftquelle auf eine Luftsenke mit einem Temperaturhub übertragen.



Bildquelle: [31]; Quellen: [32–37]



Luft-Wasser-Wärmepumpen



Luft-Wasser-Wärmepumpen entziehen Wärmeenergie aus einer Luftquelle, um Wasser zu erwärmen. Das erwärmte Wasser kann zur Bereitstellung von Raumwärme oder anderen Anwendungen genutzt werden.



Bildquelle: [38]; Quellen: [32–37]



Wasser-Wasser-Wärmepumpen



Eine **Wasser-Wasser-Wärmepumpe** ist eine Art von Wärmepumpe, die Wärme zwischen zwei Wasserströmen (einer Quelle und einer Senke) überträgt. Sie ist in der Lage, die im Wasser vorhandene Wärmeenergie zu nutzen, um sowohl zu heizen als auch zu kühlen.



< 100 °C
(Senktemperatur)



< 10 MW_{th}



Bildquelle: [39]; Quellen: [37, 40–44]



Hochtemperaturwärmepumpen



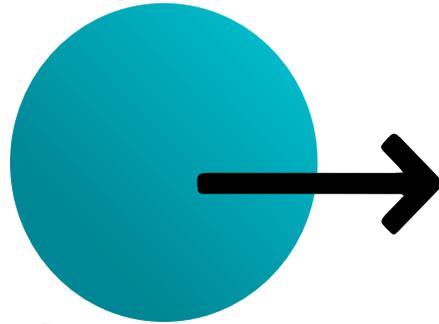
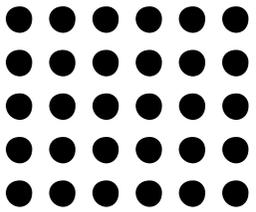
Hochtemperaturwärmepumpen sind eine Technologie zur Aufwertung von Wärmequellen auf ein besonders hohes Temperaturniveau. Sie können zum einen Wärme auf einem höheren Temperaturniveau ($> 100\text{ °C}$) als herkömmliche Wärmepumpen bereitstellen und zum anderen Wärme aus höheren Temperaturquellen aufnehmen. Als Wärmequelle werden in der Regel Wasser, Sole, Abluft oder Abwasser in einem Temperaturbereich zwischen 17 und 65 °C verwendet.



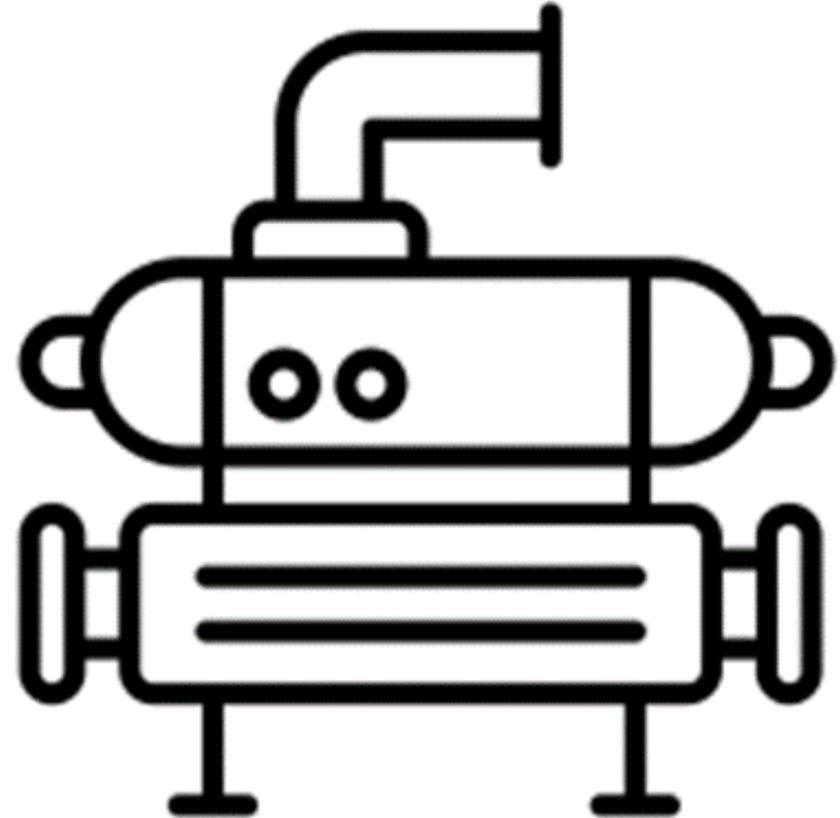
65 - $> 130\text{ °C}$
(Senktemperatur)



Bildquelle: [45]; Quellen: [37, 40–43]



Kältemaschine





Allgemeines zu Kältemaschinen



Kältemaschinen sind Geräte, die für die Kühlung von Räumen oder Prozessen eingesetzt werden. Zu diesem Zweck stellen sie Kaltwasser bereit, welches durch die Raum- oder Prozesswärme erwärmt wird. Dem erwärmten Kaltwasser entziehen sie dann Wärme nach einer Anhebung der Temperatur wird die Abwärme über Rückkühler an die Umgebung abgeben. Standard-Kaltwassersätze haben typischerweise eine Kondensatortemperatur von etwa 40 °C. In die Kältemaschine kann ein Wärmetauscher für die Wärmerückgewinnung integriert werden. Andererseits kann im Gegensatz zu der klassischen mechanischen Kälteerzeugung Abwärme auch als Antriebsenergie für Kältemaschinen vom Typ Ab- und Adsorption eingesetzt werden. Auf diese Weise kann Abwärme dazu genutzt werden, um Kaltwasser bereitzustellen.



Kompressions-,
Absorptions- oder
Adsorptionskältemaschine
~ 40 °C
(Kondensatortemperatur)



Kälteerzeugung
und
Abwärmennutzung
15 kW – 15 MW
(Kälteleistung)

 Bildquelle: [46]; Quellen: [15, 47–51]



Kompressionskältemaschine



Die **Kompressionskältemaschine** (KKM) wird am häufigsten in Kälteversorgungssystemen eingesetzt und besitzt den größten Marktanteil. Sie können sowohl zum Kühlen als auch Gefrieren eingesetzt werden. In einem linkslaufenden Kreisprozess wird ein Kältemittel verdampft und anschließend wieder kondensiert. Eine Kernkomponente ist der Kältemittelverdichter, wofür verschiedene Bauarten (Schrauben-, Turbo-, Kolben- und Scrollverdichter) eingesetzt werden. Im Regelfall wird der Kondensator mit Luft oder Wasser gekühlt. Jedoch ist auch eine Abwärmeauskopplung über das Kühlwasser oder einen integrierten Wärmeübertrager möglich.



Schrauben-, Turbo-,
Kolben- und
Scrollverdichter



~ 40 °C
(Kondensatortemperatur)



10 kW – 8 MW
(Kälteleistung)



Bildquelle: [52]; Quellen: [51]



Absorptionskältemaschine



Absorptionskältemaschine (AbKM) benötigen eine Antriebstemperatur von mindestens 70 bis 95 °C. Die im Rechenzentrum anfallende Abwärme erreicht im Regelfall aber nicht diese Temperatur- auch nicht bei flüssigkeitsgekühlten Servern. Dies stellt gleichzeitig die größte Herausforderung für diese Technologie dar. Ein Antrieb kann in dem Fall nur durch die Zwischenschaltung einer Wärmepumpe erfolgen. Anstelle eines elektrisch betriebenen Verdichters erfolgt ein thermischer Antrieb über einen Sorptionsprozess. Der Kälteprozess setzt sich zusammen aus zwei ineinander verschalteten Kreisläufen (Kältemittel- und Lösungsmittelkreislauf).



LiBr/H₂O oder
NH₃/H₂O AbKM



70 - 180 °C
(Antriebstemperatur)



10 kW – 20,5 MW
(Kälteleistung)



Bildquelle: [53]; Quellen: [25, 28, 49, 51, 54, 55]

Adsorptionskältemaschine



Eine **Adsorptionskältemaschine** (AdKM) kommt im Gegensatz zu einer Absorptionskältemaschine mit einer geringeren Antriebstemperatur aus und nutzen ein festes Sorptionsmittel wie z. B. Aktivkohle, Zeolith oder Silikagel. Zusätzlich erfolgt der Prozess diskontinuierlich und setzt sich aus zwei Phasen zusammen: dem Adsorptions- und Desorptionsprozess. Es reicht eine Antriebstemperatur von 55 - 100 °C. Damit können auch flüssigkeitsgekühlte Server als Wärmequelle verwendet werden. Im Gegensatz zur KKM kann nur gekühlt werden.

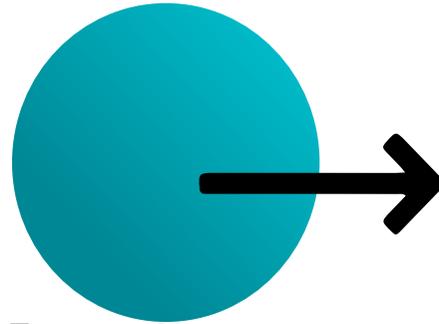
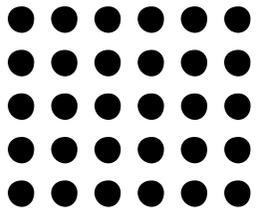


55 - 100 °C
(Antriebstemperatur)

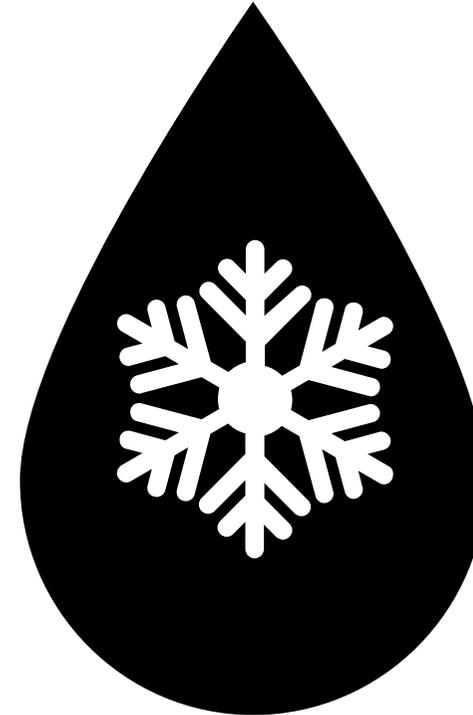


10 kW – 1 MW
(Kälteleistung)

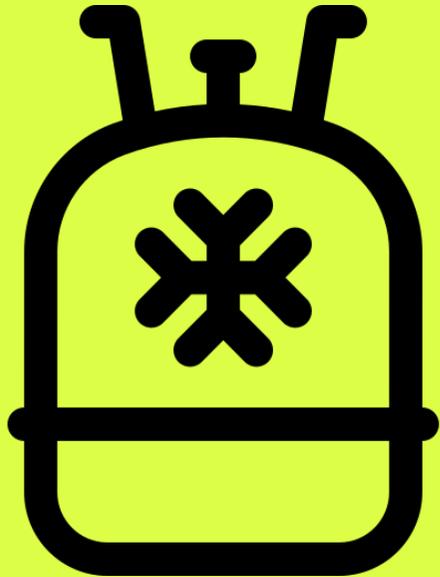
Bildquelle: [56]; Quellen: [25, 28, 51, 57, 58]



Zusatzabschnitt zu Kältemittel



Allgemeines zu Kältemittel



Kältemittel werden sowohl in Kältemaschinen und auch Wärmepumpen eingesetzt. Eine kompakte Übersicht der gebräuchlichsten Kältemittel inklusive der thermophysikalischen Stoffeigenschaften bietet u. A. [59]. In der EU werden heutzutage vor allem folgende Kältemittel genutzt:

- **Teilhalogenierte Fluorkohlenwasserstoffe** (HFKW), z. B. R134a
- **Teilhalogenierte ungesättigte Fluorkohlenwasserstoffe** bzw. – **olefine** (HFO) z. B. R1234yf
- **Ammoniak** (R717)
- **Kohlendioxid** (R744)
- **Kohlenwasserstoffe** (KW), z. B. Propan R290
- **Wasser** (R718); bisher vergleichsweise wenige Anlagen
- Mischungen, aus den zuvor genannten Kältemitteln z. B. R404A oder R507

Die grundlegenden **internationalen Vereinbarungen** sind:

- das **Montreal-Protokoll** von 1987, das Produktion und Verbrauch ozonabbauender Substanzen (ODS) regelt → EU-Verordnung 1005/2009
- das **Pariser Klimaschutzabkommen** von Dezember 2015, das als Nachfolgeabkommen zum **Kyoto-Protokoll** die Reduzierung von Treibhausgasen (GHG) regelt
- das **Kigali Amendment** zum Montreal Protokoll, das in 12/2016 verabschiedet wurde und die Maßnahmen zur Reduzierung von HFKWs unter das Montreal Protokoll stellt.

Eine Übersicht über die EU-Verordnung über fluorierte Treibhausgase bietet [60]. Mit der **EU-F-Gas-Verordnung 2024/573**, welche am 11.03.2024 in Kraft tritt, soll insbesondere ein Anreiz zur Verwendung von Alternativen anstelle von F-Gasen geschaffen werden. Die in der EU in den Verkehr gebrachten Mengen von teilfluorierten Kohlenwasserstoffen (HFKW) werden weiter schrittweise reduziert. Ab 2050 wird die zulässige Menge auf Null gesetzt. Zusätzlich werden neue Verbote des Inverkehrbringers u. a. für folgende Anlagen erlassen:

- Ortsfeste Kälteanlagen (s. Anhang IV Nr. 4 und 5 b + c)
- Ortsfeste Chiller (s. Anhang IV Nr. 7 b - d)
- Ortsfeste Klimaanlage und Wärmepumpen (Anhang IV Nr. 8 b - e und 9 b - f)

Ein **gutes Kältemittel** sollte folgende **Eigenschaften** aufweisen:

- Gute thermodynamische Eigenschaften
- Gute chemische Stabilität, gute Mischbarkeit mit Öl
- Gute physikalische Eigenschaften
- Keinen oder nur geringen Umwelteinfluss
- Gute Verfügbarkeit

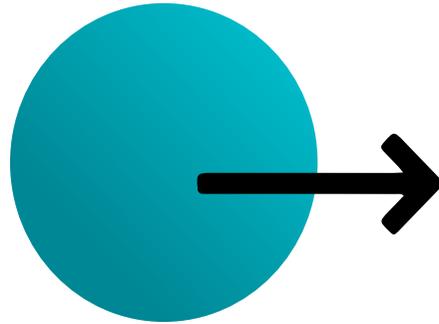
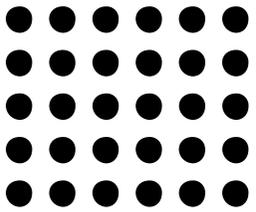
Eine **Übersicht** inklusiver ausführlicher **Steckbriefe** bietet [61] in Bezug auf **natürliche Kältemittel** wie Ammoniak, Kohlenstoffdioxid, Kohlenwasserstoffe, Ammoniak-Dimethylether und Wasser. In Wärmepumpen werden je nach Leistungsbereich folgende Kältemittel eingesetzt.

Großwärmepumpen: Kohlendioxid (R744), Propan (R290), Ammoniak (R717), Ammoniak-Dimethylether (R723).

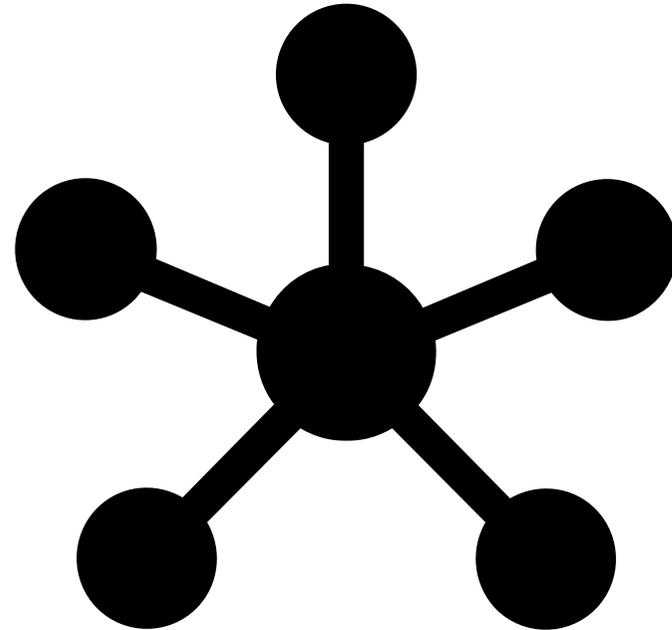
Mittleren bis großen Leistungsbereich: Ammoniak.

Mittleren bis kleinen Leistungsbereich: Nicht-halogenierte wie auch fluorierte Kältemittel.

 Bildquelle: [62]; Quellen: [59–61, 63]

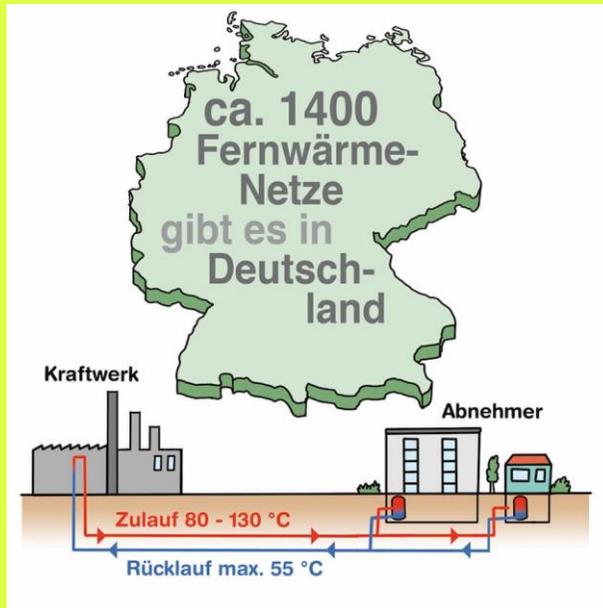


Wärmenetz





Allgemeines zu Wärmenetzen



Ein **Wärmenetz** verteilt Wärme über ein Rohrnetz, das entweder heißes Wasser oder Niederdruckdampf von zentralen Anlagen und Wärmezeugungseinheiten zu Wohn-, Gewerbe- und Industriegebäuden leitet. Es erfolgt eine Differenzierung zwischen Nah- und Fernwärme, wobei der Übergang dazwischen fließen ist und von der Ausbreitung und Größe abhängig ist.

Die Abwärme aus den Rechenzentren ist selten warm genug (~ 20 bis 35 °C), um direkt in klassische Wärmenetze eingespeist zu werden. Konventionelle Fernwärmesysteme werden aus Kraft-Wärme-Kopplungs-Kraftwerken (KWK) oder Heizwerken mit Wärme versorgt. Daneben kann die Abwärme aus der Industrie oder Rechenzentren eingespeist werden. Hierbei ist je nach Vorlauftemperatur eine Temperaturanhebung erforderlich.



Wärmenetze von der 1. bis zur 5. Generation



Bereitstellung von Raumwärme, Warmwasser und Prozesswärme und Einbindung von Abwärme k. A.



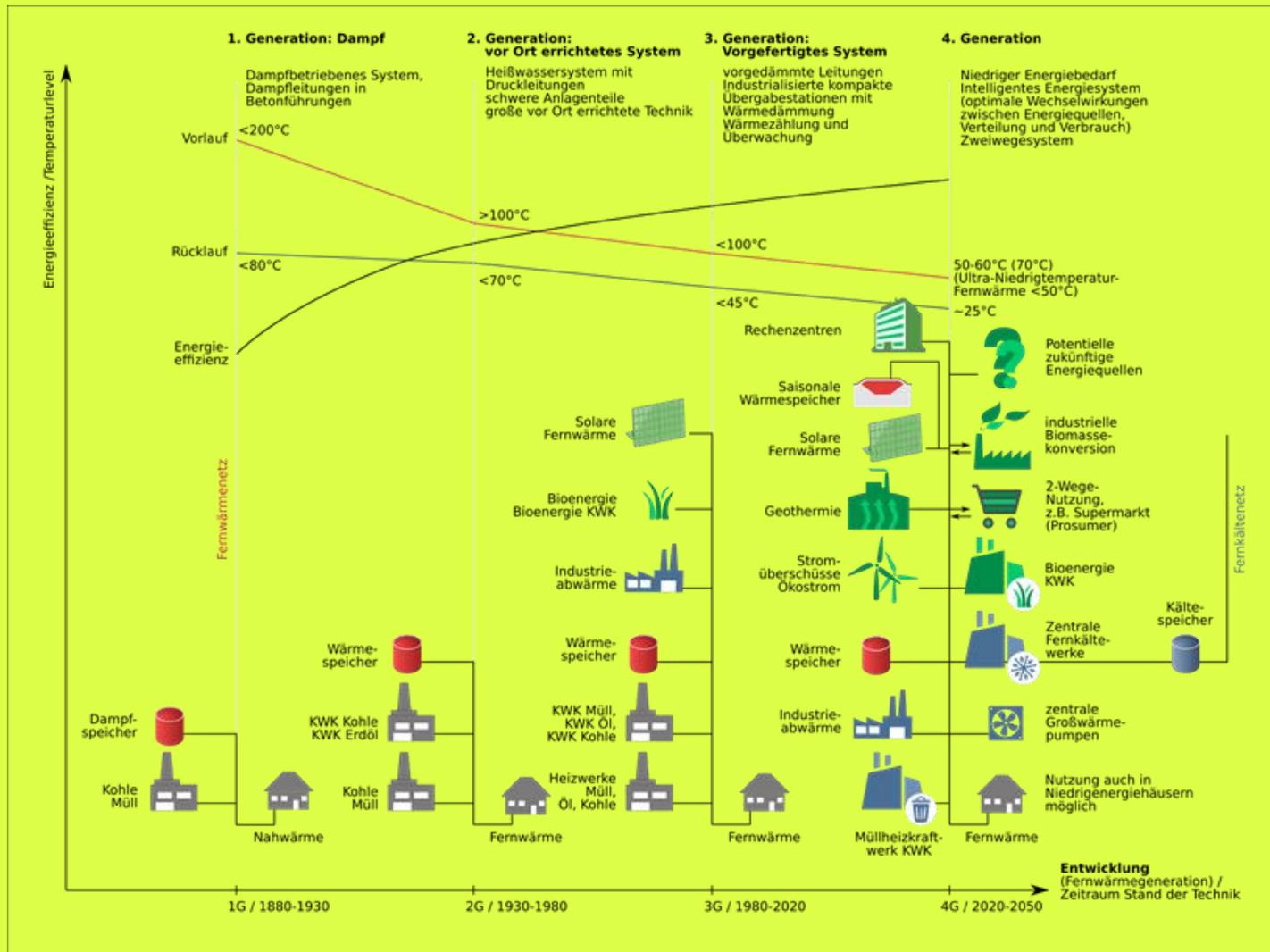
15 - 200 °C (Vorlauftemperatur)



Bildquelle: [64]; Quellen: [28, 65–68]



Wärmenetz der ersten Generation



Das Hauptmerkmal der Fernwärmesysteme der **ersten Generation** war, dass die Wärme mit Dampf transportiert wurde, da dieser aufgrund seiner hohen Wärmekapazität ein gutes Transportmedium ist. Er wurde z. B. aus Heizkesseln oder Dampfkraftwerken bezogen, die nicht im Kondensationsbetrieb liefen und daher über Dampf mit hoher Temperatur verfügten. Typische Dampftemperaturen sind bis zu 200°C und Drücke bis zu 20 bar.



<math>< 200^{\circ}\text{C}</math>
(Vorlauftemperatur)



k. A.



Bildquelle: [69]; Quellen: [70–72]



Wärmenetz der zweiten Generation

Das Hauptmerkmal des Fernwärmesystems der **zweiten Generation** besteht darin, dass die Wärme durch unter Druck stehendes, überhitztes Wasser mit Temperaturen von über 100 °C transportiert wird. Die Fernwärme der zweiten Generation war von den 1930er bis zu den 1980er Jahren vorherrschend. Das Verteilungsnetz bestand in der Regel aus zwei Stahlrohren, einem Vorlauf- und einem Rücklaufrohr. Die Kessel wurden mit Kohle, Abfall und Öl befeuert. Zusätzlich wurde die Kraft-Wärme-Kopplung eingeführt, um Primärenergie einzusparen. Ein Unterschied zu den dampfbasierten Systemen der ersten Generation waren die zentral angeordneten Umwälzpumpen, die für eine ausreichende Förderhöhe des Wassers im Verteilungsnetz sorgten und die Wärmeentnahme am Ort des Verbrauchs ermöglichten.



$\geq 100 \text{ °C}$
(Vorlauftemperatur)



k. A.



Quellen: [70–72]



Wärmenetz der dritten Generation

Das Hauptmerkmal des Fernwärmesystems der **dritten Generation** ist der Einsatz material- und arbeitssparender Komponenten in Kombination mit allgemein niedrigeren Temperaturen ($< 100\text{ °C}$). Die dritte Generation wurde in den 1970er Jahren entwickelt, nachdem die beiden Ölkrisen zu Ölknappheit führten. Die Wärmenetze der dritten Generation werden auch als „skandinavische“ Fernwärmetechnologie bezeichnet. Dieses System nutzte Kohle, Biomasse und Abfall als Energiequellen, einige nutzten auch Geothermie und Solarenergie.



$< 100\text{ °C}$
(Vorlauftemperatur)



k. A.



Quellen: [73–77]



Wärmenetz der vierten Generation

Bei Fernwärme der **vierten Generation** oder Niedertemperatur-Fernwärme kann die Vorlauftemperatur unter 50 °C und die Rücklauftemperatur nahe bei 20 °C liegen. Dies würde es kleineren Wärmenetzen ermöglichen, hocheffizient zu sein, wobei Wärme geringerer Qualität effizienter genutzt werden könnte. Bei Vorlauftemperaturen unter 50 °C kann die Abwärme von Rechenzentren teilweise ohne Wärmepumpe direkt in dieses Netz eingespeist werden, insbesondere von Rechenzentren mit modernen Kühltechnologien, die hohe Abwärmepemperaturen ermöglichen.



< 70 °C

(Vorlauftemperatur)



k. A.



Quellen: [73–77]



Wärmenetz der fünften Generation

Die **fünfte Generation** der Fernwärme verteilt Wärme nahe der Umgebungstemperatur und minimiert so Wärmeverluste und damit den Isolierungsbedarf. Diese eignen sich besser für die niedrigeren Abwärmepemperaturen luftgekühlter Server. Für Wärme- und Kältenetze der fünften Generation ist ein bidirektionaler Energiefluss besonders wichtig, was bedeutet, dass angeschlossene Gebäude im Netzwerk gleichzeitig geheizt und gekühlt werden können. Hauptmerkmale sind:

- Die Energieverteilung erfolgt auf niedrigem Temperaturniveau und ist nicht für die direkte Nutzung geeignet.
- Dezentrale Wärmepumpen werden mit dem Wärmenetz als Niedertemperatur-Wärmequelle eingesetzt.
- Die Wärmeversorgung integriert Abwärme und erneuerbare Energien bei niedrigen Temperaturen.
- Zum Heizen und Kühlen kann die gleiche Infrastruktur genutzt.



< 50 °C

(Vorlauftemperatur)



k. A.



Quellen: [75–77]

Literatur

Literaturquellen

- [2] D. Huang, C. Yang und B. Li, „Rack-Level Cooling and Server-Level Cooling“ in *Data Center Handbook: Plan, Design, Build, and Operations of a Smart Data Center*, H. Geng, Hg., 2. Aufl. Newark: John Wiley & Sons Incorporated, 2021. [Online]. Verfügbar unter: 227–237
- [3] B. Dürr, *IT-Räume und Rechenzentren planen und betreiben: Handbuch der baulichen Maßnahmen und Technischen Gebäudeausrüstung*, 2. Aufl. Erkrath: Verlag Bau+Technik, 2018.
- [4] 3M, „Two-Phase Immersion Cooling: A revolution in data centre efficiency“, 2015. <https://multimedia.3m.com/mws/media/1602994O/novec-immersion-cooling-article-english.pdf>. (Aufgerufen: 3. Oktober 2023).
- [7] S. Mavridou, G. C. Mavropoulos, D. Bouris, D. T. Hountalas und G. Bergeles, „Experimental Studies On Performance Parameters Of Finned Tube Heat Exchanger For Waste Heat Recovery“, *Applied Thermal Engineering*, Jg. 30, 8-9, S. 935–947, 2010, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2010.01.003.
- [8] O. Khayal, „Fundamentals of Heat Exchangers“, 2019.
- [9] Y. Luo, J. Andresen, H. Clarke, M. Rajendra und M. Maroto-Valer, „A decision support system for waste heat recovery and energy efficiency improvement in data centres“, *Applied Energy*, Jg. 250, S. 1217–1224, 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.05.029.
- [10] E. Edreis und A. Petrov, „Types of heat exchangers in industry, their advantages and disadvantages, and the study of their parameters“, *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, Jg. 963, Nr. 1, 2020. [Online]. Verfügbar unter: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/963/1/012027/pdf>
- [11] energie-experten.org, *Wärmetauscher-Arten & Typen im Überblick*. <https://www.energie-experten.org/heizung/heizungstechnik/waermetauscher#c33601> (Aufgerufen 27. März 2024).
- [12] R. Cheaytani, „Die Wahl des richtigen Wärmetauschers“, *VirtualExpo Group*, 2019, 2019. <https://guide.directindustry.com/de/die-wahl-des-richtigen-waermetauschers/>. (Aufgerufen: 27. März 2024).
- [13] M. Dehli, *Energieeffizienz in Industrie, Dienstleistung und Gewerbe*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2020.
- [14] Ashrae, Hg., „2021 Equipment Thermal Guidelines for Data Processing Environments: ASHRAE TC 9.9 Reference Card“, 2021. https://www.ashrae.org/file%20library/technical%20resources/bookstore/supplemental%20files/referencecard_2021thermalguidelines.pdf. (Aufgerufen: 20. Februar 2023).
- [15] K. Ebrahimi, G. F. Jones und A. S. Fleischer, „A review of data center cooling technology, operating conditions and the corresponding low-grade waste heat recovery opportunities“, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Jg. 31, S. 622–638, 2014, doi: 10.1016/j.rser.2013.12.007.
- [18] L. Brochard, V. Kamath, J. Corbalán, S. Holland, W. Mittelbach und M. Ott, „Cooling the Data Center“ in *Energy-Efficient Computing and Data Centers*, L. Brochard et al., Hg., Newark: John Wiley & Sons Incorporated, 2019, S. 37–63.
- [21] R. P. Sarode und P. Wankhade, „Waste Heat Recovery using the Plate Heat Exchanger“, *International Journal for Scientific Research & Development*, 2020. [Online]. Verfügbar unter: https://www.researchgate.net/publication/343650069_Waste_Heat_Recovery_using_the_Plate_Heat_Exchanger
- [22] I. A. Fetuga, O. T. Olakoyejo, S. M. Abolarin, J. K. Gbegudu, A. Onwuegbusi und A. O. Adelaja, „Numerical analysis of thermal performance of waste heat recovery shell and tube heat exchangers on counter-flow with different tube configurations“, *Alexandria Engineering Journal*, Jg. 64, S. 859–875, 2023, doi: 10.1016/j.aej.2022.09.017.
- [24] D. Harman, „Waste Heat Recovery In Data Centers: Ejector Heat Pump Analysis“. Masterarbeit, Georgia Institute of Technology, 2008. [Online]. Verfügbar unter: <https://repository.gatech.edu/server/api/core/bitstreams/cb1bf575-6cd1-4af0-92f0-8ae5990b7584/content>

- [25] X. Yuan, Y. Liang, X. Hu, Y. Xu, Y. Chen und R. Kosonen, „Waste heat recoveries in data centers: A review“, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Jg. 188, S. 113777, 2023, doi: 10.1016/j.rser.2023.113777.
- [26] Smart Cities Information System, „Heat Pump Driven District Heating Systems Solution Booklet“, 2019. https://smart-cities-marketplace.ec.europa.eu/sites/default/files/2021-02/scis_solution_booklet_heat_pump_driven_district_heating_systems.pdf. (Aufgerufen: 8. April 2024).
- [27] H. Jouhara, N. Khordehgah, S. Almahmoud, B. Delpech, A. Chauhan und S. A. Tassou, „Waste heat recovery technologies and applications“, *Thermal Science and Engineering Progress*, Jg. 6, S. 268–289, 2018, doi: 10.1016/j.tsep.2018.04.017.
- [28] T. Funke *et al.*, „Utilization of Waste Heat in the Data Center: A white paper by NeRZ in collaboration with eco – Association of the Internet Industry“, Berlin, Köln, 2019. <https://international.eco.de/topics/datacenter/white-paper-utilization-of-waste-heat-in-the-data-center/>. (Aufgerufen: 9. April 2024).
- [29] Agora Energiewende und Fraunhofer IEG, Hg., „Roll-out von Großwärmepumpen in Deutschland. Strategien für den Markthochlauf in Wärmenetzen und Industrie.“, 2023. https://www.ieg.fraunhofer.de/content/dam/ieg/deutsch/dokumente/ver%C3%B6ffentlichungen/Rollout_Grosswaermepumpen_Angora_Fraunhofer%20IEG.pdf. (Aufgerufen: 19. März 2024).
- [30] D. Hochwarth, „Fernwärme: Größte Wärmepumpe der Welt heizt 100.000 Dänen ein“, *ingenieur.de - Jobbörse und Nachrichtenportal für Ingenieure*, 19. Juni 2023, 2023. <https://www.ingenieur.de/technik/fachbereiche/energie/fernwaerme-groesste-waermepumpe-der-welt-heizt-100-000-daenen-ein/>. (Aufgerufen: 1. April 2024).
- [32] C. Montagud-Montalvá, E. Navarro-Peris, T. Gómez-Navarro, X. Masip-Sanchis und C. Prades-Gil, „Recovery of waste heat from data centres for decarbonisation of university campuses in a Mediterranean climate“, *Energy Conversion and Management*, Jg. 290, S. 117212, 2023, doi: 10.1016/j.enconman.2023.117212.
- [33] M. Deymi-Dashtebayaz und S. Valipour-Namanlo, „Thermoeconomic and environmental feasibility of waste heat recovery of a data center using air source heat pump“, *Journal of Cleaner Production*, Jg. 219, S. 117–126, 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.02.061.
- [34] R. Nandhini, B. Sivaprakash und N. Rajamohan, „Waste heat recovery at low temperature from heat pumps, power cycles and integrated systems – Review on system performance and environmental perspectives“, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, Jg. 52, S. 102214, 2022, doi: 10.1016/j.seta.2022.102214.
- [35] Y. Jang, D. Lee, J. Kim, S. H. Ham und Y. Kim, „Performance characteristics of a waste-heat recovery water-source heat pump system designed for data centers and residential area in the heating dominated region“, *Journal of Building Engineering*, Jg. 62, S. 105416, 2022, doi: 10.1016/j.jobeb.2022.105416.
- [36] Robert Bosch GmbH, *Brine, air, water: Heat pump technology explained*. <https://www.bosch-presse.de/pressportal/de/en/brine-air-water-heat-pump-technology-explained-259638.html> (Aufgerufen 9. April 2024).
- [37] J. F. Urchueguía, M. Zacarés, J. M. Corberán, Á. Montero, J. Martos und H. Witte, „Comparison between the energy performance of a ground coupled water to water heat pump system and an air to water heat pump system for heating and cooling in typical conditions of the European Mediterranean coast“, *Energy Conversion and Management*, Jg. 49, Nr. 10, S. 2917–2923, 2008, doi: 10.1016/j.enconman.2008.03.001.
- [40] E. Hervás-Blasco, E. Navarro-Peris, F. Barceló-Ruescas und J. M. Corberán, „Improved water to water heat pump design for low-temperature waste heat recovery based on subcooling control“, *International Journal of Refrigeration*, Jg. 106, S. 374–383, 2019, doi: 10.1016/j.ijrefrig.2019.06.030.
- [41] K. Hamid *et al.*, „Potential evaluation of integrated high temperature heat pumps: A review of recent advances“, *Applied Thermal Engineering*, Jg. 230, S. 120720, 2023, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2023.120720.
- [42] C. Arpagaus, „From Waste Heat to Cheese“, 2019. <https://waermepumpe-izw.de/wp-content/uploads/2020/05/190800-Arpaguas-HPT-Magazine-2-2019.pdf>. (Aufgerufen: 9. April 2024).
- [43] J. Jerez Monsalves, C. Bergaentzlé und D. Keles, „Impacts of flexible-cooling and waste-heat recovery from data centres on energy systems: A Danish case study“, *Energy*, Jg. 281, S. 128112, 2023, doi: 10.1016/j.energy.2023.128112.
- [44] S. Ortner *et al.*, „Analyse des wirtschaftlichen Potenzials für eine effiziente Wärme- und Kälteversorgung: Beitrag zur Berichtspflicht EnEff-RL, Artikel 14 Anhang VIII“, Dessau-Roßlau, 2021. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2021-08-05_cc_54-2021_effiziente_waerme-kaelteversorgung.pdf. (Aufgerufen: 28. Februar 2023).

- [47] J. Stenea, G. Eggena, O. Ø. Smedegårda, K. Vagnildhauga und E. Selvåg, „Combined Liquid Chiller and Heat Pump Systems for Data Centre Cooling with High-Temperature Heat Recovery“, 2017. <https://etkhpcorderapi.extweb.sp.se/api/file/1592>. (Aufgerufen: 22. Oktober 2023).
- [48] R. N. Avery, C. Booth, W. Livingston und W. Lopp, „Utilization Of Data Center Waste Heat For Heat Driven Engine,“ US 8,522,569 B2.
- [49] A. Haywood, J. Sherbeck, P. Phelan, G. Varsamopoulos und S. K. Gupta, „Thermodynamic feasibility of harvesting data center waste heat to drive an absorption chiller“, *Energy Conversion and Management*, Jg. 58, S. 26–34, 2012, doi: 10.1016/j.enconman.2011.12.017.
- [50] Trane Klima- und Kältetechnisches Büro GmbH, *Kältemaschinen: von 15 – 15.000 kW zur Deckung des Kühlbedarfs*. <https://trane-roggkamp.de/kaeltemaschinen.html#:~:text=von%2015%20%E2%80%93%2015.000%20kW%20zur%20Deckung%20des%20K%C3%BChlbedarfs&text=Wir%20bieten%20Ihnen%20luft%2D%20und,wir%20Ihr%20Ansprechpartner%20in%20Bayern>. (Aufgerufen 10. April 2024).
- [51] D. Schmidt, C. Goetschkes und C. Pollerberg, „Kältetechnik in Deutschland: Steckbriefe zu Kältetechnologien“, Oberhausen, 2020. https://www.umsicht.fraunhofer.de/content/dam/umsicht/de/dokumente/referenzen/flexkaelte/K%C3%A4ltetechnik_in_Deutschland-Steckbriefe_zu_K%C3%A4ltetechnologien.pdf. (Aufgerufen: 10. April 2024).
- [54] R. Sweetser, „Develop & Demonstrate an Advanced Low Temperature Absorption Chiller Module“, 2011. <https://www.energy.gov/eere/amo/articles/advanced-low-temperature-absorption-chiller-module-integrated-chp-system>. (Aufgerufen: 9. April 2024).
- [55] L. Amiri, E. Madadian, N. Bahrani und S. A. Ghoreishi-Madiseh, „Techno-Economic Analysis of Waste Heat Utilization in Data Centers: Application of Absorption Chiller Systems“, *Energies*, Jg. 14, Nr. 9, S. 2433, 2021, doi: 10.3390/en14092433.
- [57] R. Gupta und I. K. Puri, „Waste heat recovery in a data center with an adsorption chiller: Technical and economic analysis“, *Energy Conversion and Management*, Jg. 245, S. 114576, 2021, doi: 10.1016/j.enconman.2021.114576.
- [58] P. Ruch *et al.*, „Sustainable data centers and energy conversion technologies“, 2017. <https://etkhpcorderapi.extweb.sp.se/api/file/1655>. (Aufgerufen: 24. Oktober 2023).
- [59] F. Flohr, „D4.1 Thermophysikalische Stoffwerte gebräuchlicher Kältemittel“ in *Springer Reference Technik, VDI-Wärmeatlas*, P. Stephan *et al.*, Hg., Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2019, S. 511–530, doi: 10.1007/978-3-662-52989-8_22.
- [60] Umweltbundesamt, *EU-Verordnung über fluorierte Treibhausgase*. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/fluorierte-treibhausgase-fckw/rechtliche-regelungen/eu-verordnung-ueber-fluorierte-treibhausgase#aktuelles> (Aufgerufen 15. April 2024).
- [61] Umweltbundesamt, *Kältemittel*. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/fluorierte-treibhausgase-fckw/natuerliche-kaeltemittel-in-stationaeren-anlagen/kaeltemittel-start#das-richtige-kaltemittel-ist-klimafreundlich> (Aufgerufen 15. April 2024).
- [63] Umweltbundesamt, *Wärmepumpen*. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/fluorierte-treibhausgase-fckw/natuerliche-kaeltemittel-in-stationaeren-anlagen/anwendungen/waermepumpen> (Aufgerufen 15. April 2024).
- [65] M. Wahlroos, M. Pärssinen, J. Manner und S. Syri, „Utilizing data center waste heat in district heating – Impacts on energy efficiency and prospects for low-temperature district heating networks“, *Energy*, Jg. 140, S. 1228–1238, 2017, doi: 10.1016/j.energy.2017.08.078.
- [66] P. Huang *et al.*, „A review of data centers as prosumers in district energy systems: Renewable energy integration and waste heat reuse for district heating“, *Applied Energy*, Jg. 258, S. 114109, 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.114109.
- [67] Z. He, T. Ding, Y. Liu und Z. Li, „Analysis of a district heating system using waste heat in a distributed cooling data center“, *Applied Thermal Engineering*, Jg. 141, S. 1131–1140, 2018, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2018.06.036.
- [68] E. Oró, P. Taddeo und J. Salom, „Waste heat recovery from urban air cooled data centres to increase energy efficiency of district heating networks“, *Sustainable Cities and Society*, Jg. 45, S. 522–542, 2019, doi: 10.1016/j.scs.2018.12.012.
- [70] Danfoss, *Different generations of DHC*. <https://www.danfoss.com/en/about-danfoss/articles/dhs/district-energy-generations-explained/> (Aufgerufen 15. November 2023).
- [71] J. E. Thorsen, O. Gudmundsson und M. Brand, „Distribution of district heating: 1st Generation“, 2020. <https://assets.danfoss.com/documents/57292/BE346042889071en-010101.pdf>. (Aufgerufen: 10. November 2023).

- [72] J. E. Thorsen, O. Gudmundsson, M. Brand und A. Dyrelund, „Distribution of district heating: 2nd Generation“, 2020. <https://assets.danfoss.com/documents/57294/BE343939708434en-010101.pdf>. (Aufgerufen: 10. November 2023).
- [73] J. E. Thorsen, O. Gudmundsson, M. Brand und A. Dyrelund, „Distribution of district heating: 3rd Generation“, 2020. <https://assets.danfoss.com/documents/57302/BE346234898141en-010101.pdf>. (Aufgerufen: 10. November 2023).
- [74] J. E. Thorsen, O. Gudmundsson, M. Brand und A. Dyrelund, „Distribution of district heating: 4th Generation“, 2020. <https://assets.danfoss.com/documents/57293/BE343939535432en-010101.pdf>. (Aufgerufen: 10. November 2023).
- [75] Danfoss, *Comparison of 4th vs. 5th generation district heating*. <https://infogram.com/1prdyye0n03yn0cg2xyjjlg1x5um7r1we2j?live> (Aufgerufen 10. November 2023).
- [76] H. Lund *et al.*, „Perspectives on fourth and fifth generation district heating“, *Energy*, Jg. 227, S. 120520, 2021, doi: 10.1016/j.energy.2021.120520.
- [77] V. Mikler, „District Energy 101“, 2017. https://www.integralgroup.com/wp-content/uploads/2017/06/IntegralGroup_District-Energy-101.pdf. (Aufgerufen: 16. November 2023).

Bildquellen

- [1] B. Ott, „Schematische Darstellung eines möglichen Kühlungssystems für ein Rechenzentrum: Eigene Darstellung“, Stuttgart, 2024.
- [5] B. Ott, „Schematische Darstellung der möglichen Abwärmeauskopplungsoptionen eines Rechenzentrums anhand des Kühlungssystems: Eigene Darstellung“, Stuttgart, 2024.
- [6] B. Ott, „Schematische Darstellung eines Wärmeübertragers: Eigene Darstellung“, Stuttgart, 2024.
- [16] B. Ott, „Schematische Darstellung eines Serverschranks mit einer gekühlten Rückwand: Eigene Darstellung“, Stuttgart, 2024.
- [17] B. Ott, „Schematische Darstellung einer direkten Flüssigkeitskühlung mit Kühlplatten: Eigene Darstellung“, Stuttgart, 2024.
- [19] B. Ott, „Schematische Darstellung der ein- und zweiphasige Immersionskühlung: Eigene Darstellung“, Stuttgart, 2024.
- [20] Alfa Laval, *Wärmetauscher*.
- [23] Oschner, *Großwärmepumpen: Wärmepumpen für die Industrie Industriewärmepumpen für große Leistungen*. <https://www.ochsner.com/de-de/ochsner-produkte/waermepumpen-fuer-grosse-leistungen/> (Aufgerufen 9. April 2024).
- [31] Daikin, *Multisplit-Klimaanlage*. https://www.daikin.at/de_at/produktgruppen/luft-luft-waermepumpe/multisplit.html (Aufgerufen 8. April 2024).
- [38] Vaillant, *Luft/Wasser-Wärmepumpe aroTHERM plus*. <https://www.vaillant.de/heizung/produkte/luft-wasser-waermepumpe-arootherm-plus-194816.html> (Aufgerufen 11. März 2024).
- [39] Combitherm, *Wärmepumpen*. <https://www.combitherm.de/produkte-und-loesungen/waermepumpen/> (Aufgerufen 11. März 2024).
- [45] Combitherm, *Hochtemperatur-Wärmepumpen* (Aufgerufen 11. März 2024).
- [46] MTA, *Kältemaschine wassergekühlt*. <https://www.mta.de/anwendungen/prozesskuehlung/kaltwassersatz-wassergekuehlt/aquarius-g-456-1934-kw/> (Aufgerufen 11. März 2024).
- [52] ENGIE Refrigeration, *QUANTUM-Air-Kältemaschinen*. <https://www.engie-refrigeration.de/de/kaelte/quantum-air-kaeltemaschinen> (Aufgerufen 15. April 2024).
- [53] Hitachi, *CGN/CW Series*. <https://www.hitachiaircon.com/ranges/chillers/waste-heat-absorption-chiller-gene-link> (Aufgerufen 10. Oktober 2023).
- [56] Fahrenheit GmbH. Mail, 2024.
- [62] Flaticon.com, *Kältemittel*. https://www.flaticon.com/de/kostenloses-icon/kaltemittel_5098190 (Aufgerufen 15. April 2024).
- [64] Heizsparer, *Fernwärme Grundlagen*. <https://www.heizsparer.de/heizung/heizungssysteme/fernwaerme/fernwaerme-grundlagen> (Aufgerufen 28. Februar 2024).
- [69] Andol und Mrmw, *Die vier Generationen von Nah- und Fernwärmesystemen samt ihren Wärmequellen*. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Generations_of_district_heating_systems_DE.svg (Aufgerufen 28. Februar 2024).

Kontakt

Autor: Benjamin Ott und Peter Radgen, IER – Universität Stuttgart

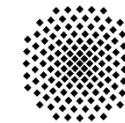
Zitiervorschlag: Ott, B. und Radgen, P.: "Technologieübersicht zur Abwärmenutzung aus Rechenzentren", Universität Stuttgart, Stuttgart, 2024.



Deutsche Unternehmensinitiative
Energieeffizienz e.V. (DENEFF)
Alt Moabit 103
10559 Berlin
www.deneff.org



empact GmbH
Ella-Barowsky-Straße 44
10829 Berlin
<https://www.empact.energy>



Universität Stuttgart

Institut für Energiewirtschaft und Rationelle
Energieanwendung (IER)
Institut für Volkswirtschaftslehre und Recht (IVR)

Institut für Energiewirtschaft und
Rationelle Energieanwendung (IER)
Heßbrühlstraße 49A
70565 Stuttgart
<https://www.ier.uni-stuttgart.de>

Institut für Volkswirtschaftslehre
und Recht (IVR)
Keplerstraße 17
70174 Stuttgart
<https://www.ivr.uni-stuttgart.de/>

E-Mail: bytes2heat@deneff.org

DISCLAIMER: Die Informationen in dieser Best-Practice-Übersicht werden ständig geprüft und aktualisiert. Trotz aller Sorgfalt können sich Angaben inzwischen geändert haben. Eine Haftung oder Garantie für die Aktualität, Richtigkeit und Vollständigkeit der zur Verfügung gestellten Informationen kann deshalb nicht übernommen werden. Die Universität Stuttgart übernimmt keine Haftung für Informationen auf Webseiten Dritter, die per Link mit dieser Übersicht verbunden sind.