

# Ergebnispapier Wechselwirkungen:

## Abwärmenutzung im Kontext Kühl- und Kältetechnik

Im Rahmen des Begleitforschungsprojekts EE4InG



### Verfasser des Berichts:

ETA-Solutions GmbH  
Johannes Thirolf



IREES GmbH  
Dr. Felipe A. Toro Chac



Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

---

## Inhalt

---

1. Zusammenfassung .....	3
2. Beschreibung der auf ihre Wechselwirkungen untersuchten Technologie-Bereiche .....	3
3. Wechselwirkungen zwischen technischen Teilbereichen oder Branchen.....	5
4. Energietechnische und -wirtschaftliche Bewertung: Die Ergebnisse der systemischen Betrachtung der Wechselwirkungen .....	10
5. Zusätzlich durch die Wechselwirkungen entstehenden/zu erwartenden Hemmnisse.....	18
6. Empfehlungen zur Einebnung der zusätzlichen Hemmnisse.....	19
Literaturverzeichnis.....	21

---

## **1. Zusammenfassung**

---

Das Papier zum Thema „Abwärmenutzung im Kontext der Kühl- und Kältetechnik“ befasst sich mit den Wechselwirkungen der drei Bereiche Kühl- und Kältetechnik, Abwärmenutzung sowie Latentwärmespeicher. Hierbei können sowohl positive als auch negative Wechselwirkungen identifiziert werden, welche sich insbesondere auf Effizienzsteigerungen im Bereich der Kühl- und Kältetechnik (positiv) aber auch in Konkurrenz zueinanderstehender Anwendungen (negativ) beziehen. Mitunter haben Aspekte der positiven Wechselwirkungen eine Auswirkung auf die Empfehlungen, welche in anderen TP bzw. im Rahmen von Quick Scans dargestellt werden. Aufgrund des sehr heterogenen Anwendungsfeldes sind Quantifizierungen dieser Auswirkungen problematisch.

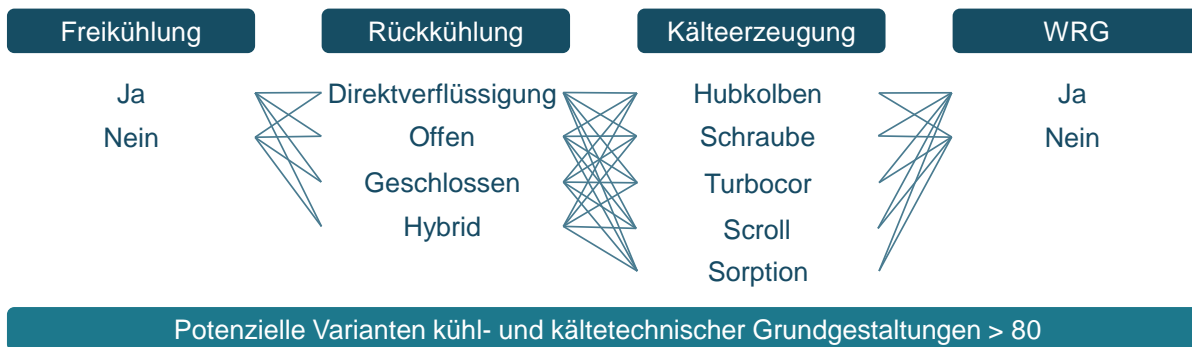
---

## **2. Beschreibung der auf ihre Wechselwirkungen untersuchten Technologie-Bereiche**

---

Aus dem Forschungsfeld Fertigungstechnik wird der Technologiebereich Kühl- und Kältetechnik im Rahmen der Wechselwirkungsuntersuchungen thematisiert. Die Kühl- und Kältetechnik (sowie Wärmepumpentechnik) ist ein Technologiebereich mit einer hohen Durchdringung nicht nur in der Fertigungstechnik, sondern in allen Branchen von Industrie und Gewerbe. Die genutzten Anlagen unterscheiden sich nach Größe der Leistungsbereitstellung im kleinen Leistungsbereich < 1 kW Kälteleistung bis hin zu Anlagen > 1 MW. Weiterhin unterscheidbar sind Anlagen, die dezentral und autonom Nutzenergie bereitstellen sowie Anlagen, die in (komplexe) zentrale Netztopologien eingebettet sind. So unterscheiden sich kühl- und kältetechnische Systeme grundsätzlich beispielsweise in der Art der Kälteerzeugung, welche u.a. durch Kompressionskälteerzeuger oder Sorptionskälteerzeuger in unterschiedlichen Unterkategorien oder auch der Art der Rückkühlung der Kältemaschinen unterschieden werden kann. Darüber hinaus werden durch kühl- und kältetechnische Systeme verschiedene, oftmals aber ähnliche bzw. typische Temperaturniveaus (z.B. 6°C oder 12°C Versorgungstemperatur) bereitgestellt. Anforderungen hierauf ergeben sich zum Beispiel aus dem zu kühlenden Prozess bzw. Produkt (kaltwasserseitig) aber auch durch die Anforderungen der Kältemaschine selbst an die Rückkühlung (kühlwasserseitig), welche das Temperaturniveau im Rückkühlkreis begrenzt ( $T_{\max}$  und  $T_{\min}$ ).

Entsprechend zeichnen sich kühl- und kältetechnische Systeme durch eine große Variantenvielfalt zur Gestaltung bzw. Konfiguration des Systems aus (selbst bei Fokussierung auf eine Kaltwasserversorgungstemperatur > 0°C). Die in Abbildung 2-1 dargestellte Vielfalt kann um weitere Elemente ergänzt werden, sodass sich die Anzahl der dargestellten Varianten sogar verdoppeln kann.



*Nicht berücksichtigte Elemente: z.B. Verteilung, Regelung, Kältemittel, Ölkühlung (→ weitere Varianten)*

Abbildung 2-1: Variantenvielfalt kühl- und kältetechnischer Systemkonfigurationen

Der zweite Bereich, welcher im Kontext der Wechselwirkungen betrachtet wird, ist der Bereich der Abwärmenutzung. Abwärme im industriellen Kontext ist ein vielfältiger Themenkomplex, da Abwärme in Form unterschiedlicher Medien (z.B. Luft oder Wasser) und Temperaturniveaus anfällt und auch zeitliche und räumliche Dimensionen zu berücksichtigen sind. Prinzipiell ist der Bereich der Abwärmenutzung durch Temperaturbereiche zu unterscheiden in Hoch- (500°C-1.600°C), Mittel- (100°C - 500°C) und Niedertemperaturabwärme (<100°C).

Der Bereich der industriellen und gewerblichen Prozesswärme ist sehr vielfältig: die Produktionsprozesse haben Temperaturen zwischen 50°C und 2.200°C; teilweise wird Abwärme zurückgewonnen zur Nutzung für Wärmeprozesse oder für die Strom- oder Kälteerzeugung. Für die (industrielle) Wärmeerzeugung und -nutzung kommen sehr verschiedene Wärme- und Energieträger zum Einsatz, deren Wahl von Anforderungen des Produktionsprozesses, dessen Sicherheit sowie der Produktqualität abhängt.

### Abwärme auf Mittel-/Hochtemperaturniveau

Abwärme in der Industrie ist derzeit eine wenig genutzte Energiequelle. Nur ein kleiner Teil der anfallenden Mittel- und Hochtemperatur-Abwärme (100 – 500 °C: ca. 140 TWh/a und 500 - 1.600°C: ca. 277,7 TWh/a) werden heute in Deutschland genutzt, zum Teil im gleichen Prozess zur Vorerwärmung des Materialinputs (oder von Brenngasen oder Luft), zum Teil in anderen Prozessen am Betriebsstandort oder in Nah- und Fernwärmenetzen (ca. 9 TWh/a derzeit). Geringfügig werden thermische Speicher in Batchprozessen eingesetzt. Die mangelnde Nutzung der Abwärme hat viele Gründe (z.B. nachgeschaltete Abgasreinigung, begrenzte Raumverfügbarkeit für Wärmeübertrager, keine interne Nutzungsmöglichkeit, fluktuierender Abwärmeeinfall, kaum Kenntnisse über neue Nutzungsoptionen, ökonomische Risiken bei Nah- und Fernwärme-Einspeisung).

### Abwärme auf Niedertemperaturniveau

Für den Temperaturbereich unterhalb etwa 100°C liegen kaum aussagekräftige Untersuchungen des Abwärmepotenzials (zur Verfügung stehende und zu ertüchtigende Abwärmemenge) vor. Mitunter beziehen sich Potenzialdarstellungen nur auf geringe Stichproben-/Befragungsgrößen und erlauben nur bedingt eine Skalierung auf die Gesamtheit. Teilweise werden Potenzialdarstellungen ausgehend von Studien aus anderen Ländern abgeleitet. Verschiedene Potenzialuntersuchungen deuten auf ein (qualitatives) Abwärmepotenzial für den Temperaturbereich <140°C im Bereich von etwa 10-44 TWh (36-158 PJ) hin [Blesl/Kessler, 2017; Pehnt et al., 2010]. Dieses Potenzial ergibt sich aufgrund

unterschiedlicher Abwärmequellen im NT-Bereich. Typische Abwärmequellen sind z.B. Rückläufe aus Kalt- und Kühlwasseranlagen oder Abwärme aus der Abluft aus RLT-Anlagen.

Ein weiterer Bereich, welcher im Projekt betrachtet wurde und somit im Rahmen von möglichen Wechselwirkungen miteinbezogen wird, ist dieser der Latentwärmespeicher.

### **Latentwärmespeicher**

Hochtemperaturspeicher auf Basis von Salzen, Salzmischungen, Salzhydraten oder Zeolith können für die effizientere Nutzung von Abwärme in energieintensiven Industriebranchen, wie z.B. bei der Eisen- und Stahlerzeugung, in der chemischen Industrie oder in die Steine und Erden-Industrie, bei Abwärmertemperaturen von etwa 130 bis etwa 600°C angewandt werden. Sowohl die hohen Material- und Herstellungskosten der Speicher als auch die spezifischen Eigenschaften der Phasenwechselmaterialien (PCM) wirken hemmend auf den großflächigen Markteintritt dieser Technik.

Hochtemperatur-Latentwärmespeicher sind bis jetzt nicht kommerziell verfügbar. Erste Latentwärmespeicher- mit Phasenwechselmaterial bis 120°C aus anorganischen Materialien wie Salzhydraten oder Nitraten für industrielle Anwendungen wurden von Herstellern und Forschungsgruppen in Deutschland entwickelt. Latentwärmespeicher befinden sich zwischen der Phase der Euphorie und Reorientierung, laut aktuelleren Patent- und bibliometrischen Analysen. Die Schwerpunkte der untersuchten Patente deckt Materialthemen (PCM, thermoplastischen Elastomer) für Latentwärmespeicher und die Nutzung von LWS für unterschiedliche Anwendungen und die Interaktion mit anderen wichtigen Komponenten wie Maschinen oder Wärmeübertrager ab. Damit wird einerseits die weitere Optimierung des LWS-Betriebs erreicht und andererseits die weitere Optimierung des Speichers durch verbesserte Wärmespeichermaterialien oder Geometrieänderungen (z.B. Wellenstruktur) erzielt.

Ein weiterer wichtiger Aspekt im Kontext des Strom- und Wärmesektors ist der Einsatz von thermischen Speichern bei der Flexibilisierung von KWK-Anlagen und als Nachrüstooption zur Flexibilisierung von fossilen Kraftwerken oder zur Flexibilisierung von Wärmeangebot und –nachfrage im Rahmen einer zunehmenden Sektor-Kopplung [Toro/Lösch, 2021].

In Bezug auf die Kühl- und Kältetechnik werden Latentwärmespeicher zurzeit in mehreren Projekten erforscht und neue Produkte entwickelt. Der Einsatz von latenten Energiespeichern ist besonders für Kälteanwendungen interessant, da wegen der häufig niedrigen Temperaturspreizung von Kältesystemen (< 6°C) keine hohen Energiedichten mit sensiblen Speichern (z.B. Wasser) erreicht werden. Paraffin besitzt in diesem Einsatzgebiet etwa die achtfache Energiedichte und ist darüber hinaus nicht korrosiv, ungefährlich im Umgang und zyklenstabil (Fraunhofer ISE).

---

## **3. Wechselwirkungen zwischen technischen Teilbereichen oder Branchen**

---

Im Kontext der Wechselwirkungen mit dem Forschungsfeld Abwärmenutzung sind kühl- und kältetechnische Systeme aus zwei Perspektiven heraus zu betrachten. Einerseits stellen sie selbst Abwärmequellen dar, z.B. in Form kühlwassergebundener Abwärme, andererseits kann durch Sorptionstechnik aus vorhandener Abwärme auch Kälte erzeugt werden. Prinzipiell kann eine Abwärmenutzung innerhalb von drei Bereichen erfolgen, welche sich untereinander nochmals um erforderliche Abwärmertemperaturniveaus unterscheiden. Die drei Bereiche sind die Strombereitstellung (z.B. ORC-Technik), die Wärmebereitstellung (z.B. Wärmepumpen) und die Kältebereitstellung (z.B.

Sorptionstechnik) [Hirzel et al., 2013]. Aufgrund der Betrachtung der Wechselwirkungen zwischen der Abwärmenutzung und der Kühl- und Kältetechnik wird sich an dieser Stelle nur auf die Wärmebereitstellung (Kühl-/Kältetechnik als Abwärmequelle) und Kältebereitstellung (Kühl-/Kältetechnik als Abwärmesenke) fokussiert.

Hinsichtlich der Wärmebereitstellung sind insbesondere die Kühlwasseranlagen relevant. Hierbei ist z.B. die unmittelbare Nutzbarmachung der kühlwassergebundenen Abwärme zu nennen, bzw. auch der Einsatz von Kältemaschinentechnologien, welche eine unmittelbare Abwärmenutzung am Kondensator über sogenannte Doppelkondensatoren ermöglichen. Üblicherweise erfolgt die Wärmeabfuhr an Kältemaschinen über den Kondensator direkt an die Umgebung (Direktverflüssigung) oder über einen zweiten Kreislauf mittels (offenen/geschlossenen/hybriden) Kühltürmen an die Umgebung. Der Einsatz eines Doppelkondensators bedeutet, dass die am Kondensator der Kältemaschine abgegebene Wärme zusätzlich in ein (internes) Warmwassersystem (z.B. Heizungsnetz) eingespeist werden kann (Wärmerückgewinnungskreislauf). In diesem Falle arbeitet die Kältemaschine in einem Wärmepumpenbetrieb. Bei einem ausbleibenden oder schwankenden Wärmebedarf seitens des Warmwassersystems erfolgt die (Rest-) Wärmeabfuhr am Kondensator der Kältemaschine wie üblich über den Rückkühler an die Umgebung und nicht mehr über die Wärmeabfuhr in den Wärmerückgewinnungskreislauf. Eine bedarfsangepasste Wärmenutzung ist entsprechend möglich. Folglich ermöglicht die Abwärmenutzung auf solche Art prinzipiell eine Wärmebereitstellung aus kühl- und kältetechnischen Anlagen innerhalb bestehender Wärmenetzstrukturen. Insbesondere bei Weiterentwicklungen zur Wärmebereitstellung von Wärmesenken im Bereich der Prozesswärme (d.h. nicht Warmwasser oder Raumwärme) können hierbei positiv verstärkende Wechselwirkungen zu F&E-Bestrebungen entstehen, welche im Kontext der Dekarbonisierung industrieller Prozesswärme durch den Einsatz von strombasierten Wärmepumpen empfohlen werden (siehe auch Quick-Scan zum Thema „Niedertemperaturwärmenetze in der Industrie“).

Darüber hinaus ist eine Wärmebereitstellung ausgehend einer Abwärmenutzung von kühl- und kältetechnischen Systemen auch in größerem Kontext, d.h. unter der Voraussetzung, dass neue Wärmenetze aufgebaut bzw. bestehende verändert werden müssen, zu betrachten. Die Nutzbarmachung der kühlwassergebundenen Abwärme kann auch aus unternehmensgrenzen-/quartiersübergreifender Sichtweise erfolgen und im Sinne eines Aufbaus von (lokalen) übergeordneten (Nah-)Wärmenetzen betrachtet werden. In diesem Zusammenhang ist insbesondere an Wärmenetze der 4. Generation zu denken, welche sich z.B. mit niedrigen Versorgungstemperaturen und der Integration einer Vielzahl von Wärmequellen beschäftigen.

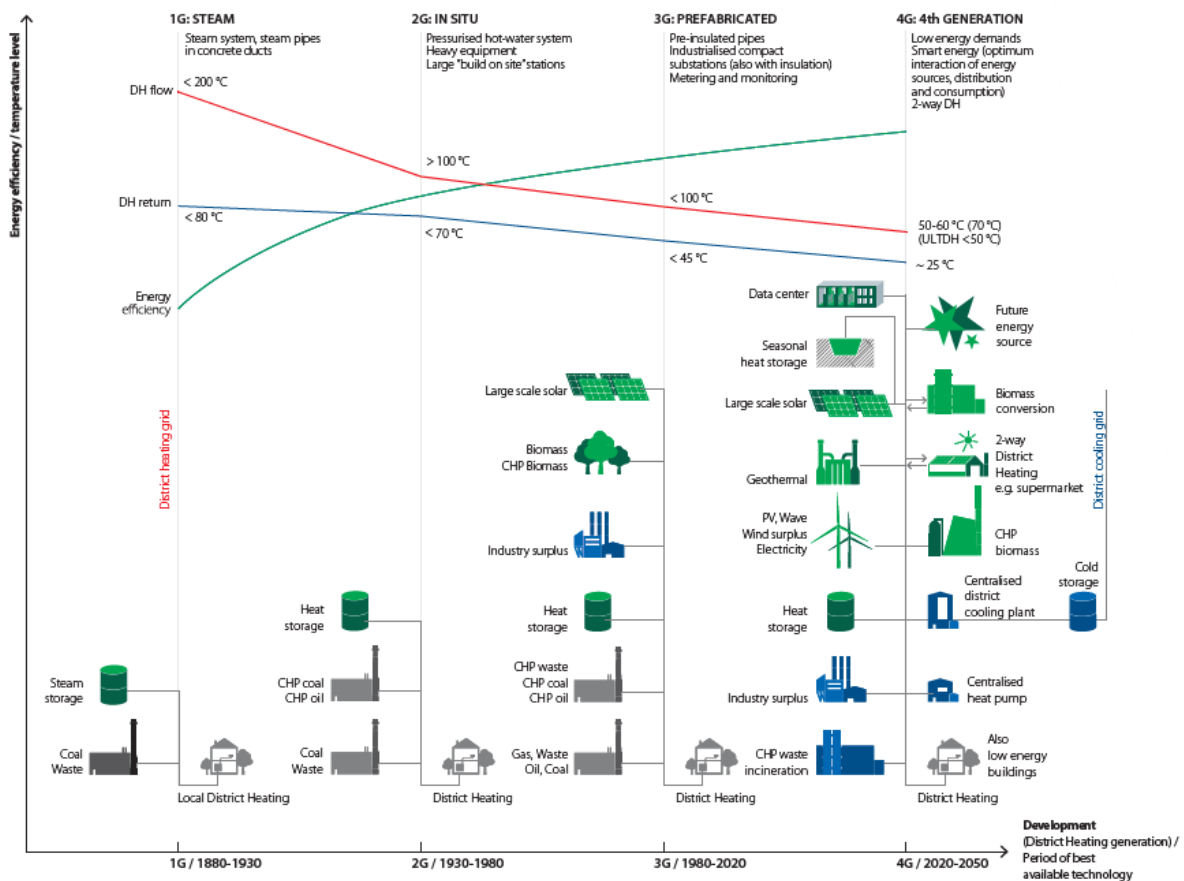


Abbildung 3-1: Wärmenetze unterschiedlicher Generationen [Thorsen et al., 2018]

Prinzipiell wird eine Abwärmenutzung oftmals mit höheren Temperaturniveaus in Verbindung gebracht. Allerdings bewegen sich typische Temperaturniveaus aus dem Rücklauf kühl- und kältetechnischer Anlagen im Bereich von etwa 20-60°C. Über den Einsatz von Wärmepumpen kann allerdings ein effizienter Temperaturhub dieses Temperaturniveaus bis ca. 100°C ermöglicht werden. Auf diese Weise können neben höheren Temperaturniveaus auch Abwärmeparameterniveaus von etwa 25-30°C für eine Wärmebereitstellung ertüchtigt werden. Aufgrund der weiten Verbreitung und des hohen Bestands von kühl- und kältetechnischen Anlagen in Industrie und Gewerbe, ist entsprechend eine hohe Verfügbarkeit von Abwärme auf diesem Temperaturniveau zu erwarten. Zudem ermöglicht eine ökonomisch und ökologisch sinnvolle Nutzarmachung von Abwärme auf einem solchen Temperaturniveau die potenzielle Integration weiterer NT-Abwärmequellen, welche derzeit ungenutzt bleiben, sodass sich hieraus ebenfalls positiv verstärkende Wechselwirkungen zwischen den F&E-Aktivitäten ergeben können. Weiterhin können durch eine zunehmende Nutzarmachung von NT-Abwärmequellen MT- und HT-Abwärmequellen für andere Prozesse (z.B. mit höheren Temperaturanforderungen) genutzt werden.

Nutzungsmöglichkeiten der Abwärme aus kühl- und kältetechnischen Anlagen bieten sich aufgrund des (niedrigen) Temperaturniveaus insbesondere für Niedertemperatur-Wärmenetze (NT-Wärmenetze) als Wärmesenken an. Werksinterne NT-Wärmenetze sind in diesem Zusammenhang einerseits im Kontext der Komfortwärme (Raumwärme bzw. Warmwasser) aber auch Prozesswärme zu betrachten. Industrielle Wärmenetze gehen häufig auf gewachsene Strukturen zurück, was ein Verständnis des

Systems komplex macht und oftmals dazu geführt hat, dass ungeeignete Wärmeträger (z.B. Dampfversorgung statt Heißwasser) oder zu hohe Temperaturniveaus bereitgestellt werden. Eine systematische Analyse und somit Systemverständnis zum Aufbau von NT-Wärmenetzen, ausgehend von den Abwärmepotenzialen kühl- und kältetechnischer Anlagen, hätte entsprechend weitere positive Wechselwirkungen zur Folge, welche sich auf ineffiziente oder ungeeignete Wärmeerzeugungs- und Versorgungstechnik beziehen, welche sich oftmals aufgrund von „gewachsenen Strukturen“ entwickelt haben. Zudem besteht auch hier die dargestellte Möglichkeit weitere NT-Abwärmequellen in ein NT-Wärmenetz zu integrieren, was bei höheren Temperaturniveaus der Wärmenetze nicht möglich wäre. Aufgrund der Komplexität und Heterogenität industrieller Infrastruktur-/Versorgungssystemen und Topologien kann keine allgemeine Aussage zu geeigneten Temperaturbereichen solcher Wärmenetze abgeleitet werden, da diese hochgradig von individuellen Anforderungen abhängig ist.

Industrielle NT-Wärmenetze stellen eine geeignete Wärmequelle für einen effizienten Betrieb von Wärmepumpen dar, welche für den notwendigen Temperaturhub für Prozesswärme-, Raumwärme- oder Warmwasseranwendungen erforderlich sind. Auf diese Weise würde sich das Verhältnis zwischen brennstoffbasierter und strombasierter Wärmebereitstellung zum Teil verschieben. Derzeit ist der Anteil der brennstoffbasierten Wärmebereitstellung etwa 9 Mal höher als die strombasierte Wärmebereitstellung (AGEB) [Fraunhofer ISI, 2019].

Wie dargestellt kann die Kühl- und Kältetechnik neben einer (Ab-)Wärmequelle auch eine Wärmesenke zur Kälteerzeugung darstellen. Hierbei kommen dann Ad- oder Absorptionskältemaschinen zum Einsatz. Die beiden Technologieformen unterscheiden sich dabei z.B. hinsichtlich des erforderlichen Abwärmetemperaturniveaus (siehe Tabelle 3-1).

Tabelle 3-1: Übersicht typischer Kennwerte verschiedener Kältemaschinen zur Abwärmennutzung [Quelle: LANUV, 2019; saena, 2016]

	Adsorptionskältemaschine	Absorptionskältemaschine
Temperaturniveau Abwärme	55 bis 100°C	Ab 70°C
Spezifische Kennzahl	0,6 bis 0,7 (Wärmeverhältnis)	0,5 bis 0,8 (Wärmeverhältnis)
Leistungsbereich	5 bis 350 kW	5 kW bis 12 MW

Auch Sorptionskältemaschinen können theoretisch in ein Wärmenetz integriert werden, woraus sich positive Wechselwirkungen der F&E-Bemühungen im Bereich der Sorptionstechnik sowie NT-Wärmenetzen ergeben können. Allerdings kann z.B. der Fokus auf Kompressionskältemaschinen eine Verringerung des Bedarfs bzw. der Einsatzmöglichkeiten der Sorptionstechnik beeinträchtigen, woraus sich wiederum negative Wechselwirkungen ergeben können.

Im Kontext der Kälteerzeugungstechnik ergibt sich darüber hinaus ein zweifacher Zusammenhang mit den aufgezeigten Latentwärmespeichern, da diese im Rahmen der Kälteerzeugung als Wärmesenkenspeicher eingesetzt werden. So können LWS einerseits eine Reduzierung der Kondensationstemperatur bei der Rückkühlung der Kältemaschine realisieren und andererseits auch als Unterkühler nach dem Kondensator zum Einsatz kommen [Loistl, 2018].



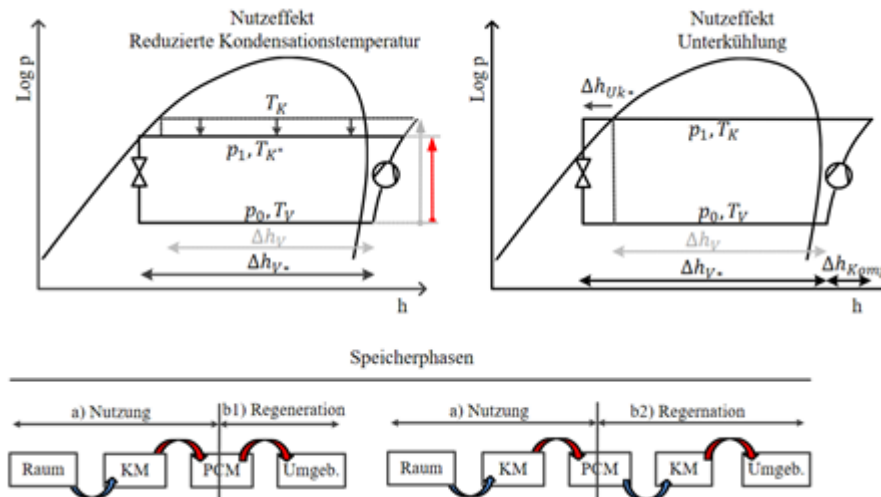


Abbildung 3-2: Wärmesenkenkondensator zur Reduzierung der Kondensationstemperatur (links), als Unterkühler (rechts) und Speicherphasen mit unterschiedlicher Energiebevorratung (unten)

Das Konzept zur Reduzierung der Kondensationstemperatur wurde bereits an Absorptionskältemaschinen demonstriert und kann auf Kompressionskältemaschinen übertragen werden. Eine Reduzierung der Kondensationstemperatur wird ermöglicht, indem die Rückkühlung einer Kältemaschine, durch das definierte und von den Eigenschaften des Latentwärmespeichers vorgegebene Temperaturniveau, auf einem konstanten Temperaturniveau realisiert wird (siehe Abbildung: a) [Schweigler et al., 2007]. Auf diese Weise ist eine Rückkühlung unabhängig von den Umgebungsbedingungen (zeitweise hohe Umgebungstemperaturen) und entgegen dem verbreiteten Einsatzes eines Nasskühlturms möglich, indem die von dem Latentwärmespeicher aufgenommene Wärme in den Nachtstunden bei niedrigeren Umgebungstemperaturen über einen Trockenkühlturm abgegeben werden kann (siehe Abbildung: b1). Eine Wärmeabgabe könnte ggf. auch zur (Teil-) Deckung eines Wärmebedarfs dienen.

Im Falle des Einsatzes als Unterkühler wird der LWS in Reihe nach dem Kondensator eingebunden. Dieser dient nun dazu, die Temperatur des im Kondensator verflüssigten Kältemittels durch eine niedrige Phasenwechseltemperatur  $TPCM$  noch weiter zu senken und stellt auf diese Weise auch an dieser Stelle einen Wärmesenkenkondensator dar, um das flüssige Kältemittel in seiner Temperatur weiter zu verringern ( $TUK^*$ ). Auch in diesem Fall kann die Wärmeabfuhr rein theoretisch zu kühleren Umgebungstemperaturen an die Umgebung erfolgen. Allerdings liegt der Temperaturbereich unterhalb der Kondensationstemperatur, was tiefe (nächtliche) Umgebungsbedingungen erfordert und alternativ eine aktive Regeneration des Speichers mittels einer Kältemaschine erforderlich macht [Schweigler et al., 2007]. Der nächtliche Betrieb der Kältemaschine kann wiederum vor dem Hintergrund tieferer Umgebungsbedingungen erfolgen, möglicherweise aber auch durch Nutzung potenziell vorhandener Überschussenergie aus PV-Erzeugung. Es zeigt sich, dass der energetische Zusatznutzen stets unter der Realisierbarkeit der Regeneration des Speichers zu betrachten ist.

Der Einsatz eines LWS als Wärmesenkenkondensator kann entsprechend eine Effizienzsteigerung des Kältemaschinenbetriebs als Wechselwirkung zur Kühl- und Kältetechnik ermöglichen.

Im Kontext dieses Papiers bietet sich darüber hinaus eine weitere Möglichkeit zur Systemintegration eines LWS an, wenn dieser zur Wärmebevorratung als thermischer Energiespeicher für Gebäudeheizzwecke in ein Wärmepumpensystem integriert wird. In Abhängigkeit der vorliegenden

Rahmenbedingungen und Anforderungen erfolgt dies in einem Temperaturbereich von etwa 30-50°C [Loistl, 2018]. Für diesen Fall gestalten sich die Speicherphasen nach dem folgenden Ablauf.

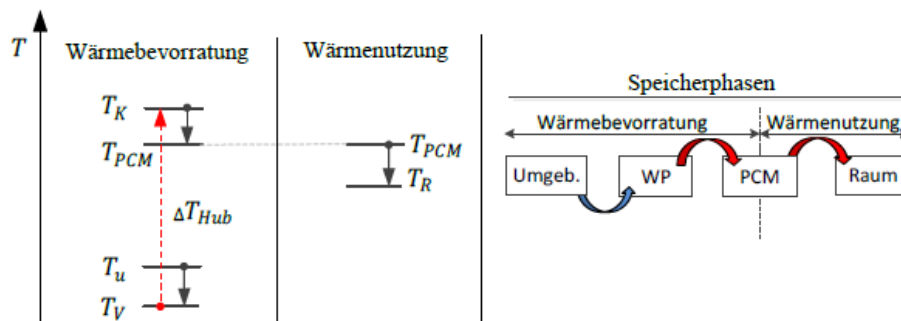


Abb. 4.12: Temperaturumstände des Wärmespeichers mit Wärmeflussrichtung (links) und Speicherphasen (rechts).

Ein vermehrter Einsatz von Latentwärmespeichern kann entsprechend der oben dargestellten Zusammenhänge zu einer Erhöhung von Abwärmenutzungsmöglichkeiten führen bzw. den Effizienzgrad im Betrieb von Kältemaschinen erhöhen. Hieraus ergeben sich jeweils positive Wechselwirkungen der beiden Teilbereiche. Allerdings kann ein Fokus auf den LWS zur Abwärmenutzung an der Kältemaschine gleichzeitig dazu beitragen, den Fokus auf NT-Wärmenetze unter Ausnutzung von Abwärme aus kühl- und kältetechnischen Anlagen, zu verringern. Zudem würde ein starker F&E-Fokus auf NT-LWS ggf. einen kleineren F&E-Fokus der HT-LWS zur Folge haben, welche allerdings noch F&E-Bedarf aufweisen. Hieraus ergeben sich entsprechend negative Wechselwirkung in diesem Zusammenhang.

#### 4. Energietechnische und -wirtschaftliche Bewertung: Die Ergebnisse der systemischen Betrachtung der Wechselwirkungen

Wird der Blick auf die Kühl- und Kältetechnik als Wärmequelle gerichtet, so muss dieser im Zusammenhang mit dem Einsatz von Wärmepumpen auf **NT-Wärmesenken** erfolgen. Die Betrachtung von NT-Wärmesenken/-anforderungen im Bereich unterhalb von etwa 100°C ergibt sich aus diesem Grund, da Temperaturhübe durch Wärmepumpen und ausgehend der typischen Abwärmepemperaturen (20-60°C) aus kühl- und kältetechnischen Systemen auf ein Temperaturniveau von >100°C technisch herausfordernd sind. So liegt z.B. der maximale Coefficient-of-Performance (COP: Verhältnis der eingesetzten Hilfsenergie zum energetischen Output) bei einem Temperaturhub von 50°C auf 130°C in der Theorie bei einem Maximalwert von 5. Ein Temperaturhub mittels Wärmepumpe auf ein Temperaturniveau <100°C ist (fallabhängig) dagegen sehr effizient realisierbar. Im Vergleich zur Wärmeerzeugung durch Gasfeuerung ergibt sich bei einem fiktiven COP einer Wärmepumpe von 3 bereits eine CO<sub>2</sub>-Einsparung von etwa 25% pro kWh (Strommix, Stand 2021). Entsprechend würde mit einer Verschiebung der brennstoffbasierten Wärmeerzeugung hin zur strombasierten Wärmeerzeugung einen (je nach Anteil) großen Einspareffekt hervorrufen können, unabhängig von Folgeeffekten wie eine Absenkung des Temperaturniveaus oder Einsatz geeigneter Wärmeträger. Literaturseitig wird allein der Mehrenergiebedarf durch die Versorgung auf einem höheren Temperaturniveau als erforderlich mit etwa 10-15% angegeben [Hesselbach, 2012]. Wird dieser Anteil auf den Energiebedarf in einem Temperaturniveau von 100-200°C bezogen, welches durch ein abgesenktes Temperaturniveau für eine Versorgung mittels Wärmepumpe (bzw. alternativer CO<sub>2</sub>-reduzierter Erzeugertechnologien) ertüchtigt

werden könnte, so ergibt sich ein überschlägiges Mindestpotenzial i.H.v. ca. 4,3 TWh (15,5 PJ). Wird auch für den Energiebedarf (unter Brennstoffeinsatz) der drei Bereiche PW <100°C, RW und WW ein Dekarbonisierungspotenzial (Wärmebereitstellung durch Wärmepumpe) von 10% angenommen, so ergibt sich für diesen Bereich ein überschlägiges Potenzial i.H.v. 14,4 TWh (51,8 PJ).

In diesem Zusammenhang stellen F&E-Bemühungen zum Aufbau von NT-Wärmenetzen zur Integration von NT-Abwärmequellen (z.B. aus kühl- und kältetechnischen Prozessen eine positive Wechselwirkung zu grundsätzlichen F&E-Bestrebungen hinsichtlich einer sowohl kälte- als auch wärmeseitigen Dekarbonisierung innerhalb der Fertigungstechnik.

Neben der zuvor dargestellten Abschätzung können literaturseitig weitere Potenziale identifiziert werden, welche in (un-)mittelbarem Zusammenhang mit den zuvor aufgezeigten F&E-Ansätzen stehen. Das rein **technische Potenzial** zum Einsatz von Wärmepumpen in der deutschen Industrie wird für das Jahr 2012 auf Werte nach Abbildung 4-1 eingeschätzt.

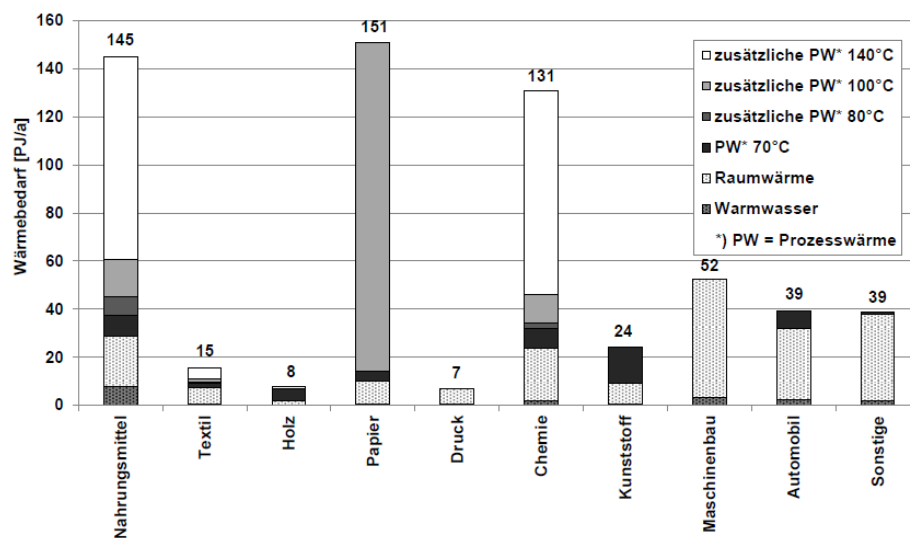


Abbildung 4-1: Technisches Potenzial des Wärmepumpen Einsatzes in der Industrie [Wolf et al., 2014]

Für den NT-Bereich, d.h. die Bereiche Raumwärme, Warmwasser und Prozesswärme <70°C, wird das technische Potenzial bei etwa 58,6 TWh/a (221 PJ/a) gesehen mit einem Schwerpunkt im Bereich des Maschinenbaus und der Automobilbranche mit jeweils hohen Warmwasser und Raumwärmebedarfen. Bei einem erweiterten Temperaturbereich, d.h. die Bereiche Raumwärme, Warmwasser und Prozesswärme <100°C, beträgt das technische Potenzial gemäß den Studienergebnissen etwa 121,4 TWh/a (437 PJ/a) und bei Erweiterung des Temperaturniveaus bis <140°C sogar 169,7 TWh/a (611 PJ/a). Die Darstellung der Potenziale erfolgt dabei ohne Berücksichtigung ökonomischer und ökologischer Einschränkungen, welche die Potenziale erheblich verringern. [Wolf et al., 2014]

Ebenfalls unberücksichtigt bleiben weitere Einschränkungen, wie z.B. Brennbarkeit und Toxizität mancher Kältemittel der Wärmepumpen, welche für höhere Temperaturen erforderlich sind. Mitunter sind Indoor-Einsätze von Wärmepumpen unumgänglich, weswegen sich aus Fragestellungen der Brennbarkeit und Toxizität der Kältemittel weitere Potenzialminderungen ergeben können.

Im Zusammenhang mit den Studienergebnissen zu dem Potenzial im NT-Bereich und dem Fokus auf den Maschinenbau und die Automobilbranche soll an dieser Stelle ein Blick auf den Wärmebedarf dieser Branchen innerhalb relevanter Temperaturbereiche gelegt werden (Jahr 2009).

Tabelle 4-1: Übersicht Wärmebedarf Maschinenbau und Automobilbranche [Schmitt, 2014]

	Warmwasser/Raumwärme	PW <100°C
Maschinenbau	ca. 5,5 TWh (ca. 20 PJ)	ca. 1,8 TWh (6 PJ)
Automobilbranche	ca. 10,3 TWh (ca. 37 PJ)	ca. 3,2 TWh (ca. 12 PJ)

Deutlich zu erkennen ist der große Anteil des Bereichs Warmwasser und Raumwärme, welcher sich prinzipiell für das dargestellte potenzielle Temperaturniveau eines Wärmepumpeneinsatzes anbietet. Darüber hinaus ist zu erwähnen, dass insbesondere in diesen beiden Bereichen anzunehmen ist, dass Wärmequellen und -senken zeitlich häufig synchron auftreten, aufgrund eines ganzjährigen Warmwasserbedarfs sowie des oftmaligen 2-Schichtsystems (oder auch 3-Schicht).

Im Falle eines zeitlich nicht synchronen Bedarfs kann an dieser Stelle nochmal auf die Möglichkeit der Wärmebevorratung (zu Gebäudeheizzwecken) durch die Integration eines LWS in Wärmepumpensysteme verwiesen werden. Es sei allerdings ebenfalls darauf hingewiesen, dass der Einsatz eines LWS zu einem Mehraufwand an elektrischer Antriebsenergie der Wärmepumpe führt, da eine höhere Kondensationstemperatur erforderlich ist. Der sich ergebende Mehrbedarf an Antriebsenergie ist abhängig von dem zusätzlich erforderlichen Temperaturhub und beträgt im Falle einer Wärmeeinspeicherung etwa 10% bei einem Temperaturhub von 5 K [Loistl, 2018].

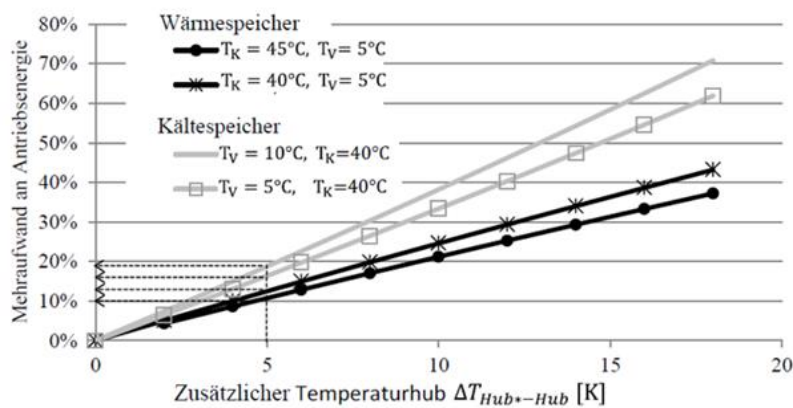


Abbildung 4-2: Mehraufwand an Antriebsenergie für den WP- und KM-Betrieb mit thermischen Speichern unter Berücksichtigung verschiedener Verdampfungs- und Kondensationstemperaturen

In diesem Zusammenhang soll ebenfalls nochmals auf die zuvor erwähnten Doppelkondensatoren eingegangen werden. Doppelkondensatoren bieten die Möglichkeit die Wärmeabgabe zu Zeiten eines Wärmebedarfs nicht an die Umgebung, sondern in ein (Warmwasser-) Wärmenetz einzuspeisen und nur die verbleibende Wärmemenge über den Rückkühler an die Umgebung zu geben. In diesem arbeitet die Kältemaschine in einem Wärmepumpenbetrieb (Hybridisierung und Nutzung der „warmen“ Seite) mit entsprechendem CO<sub>2</sub>-Minderungspotenzial, bietet allerdings die Möglichkeit auch bei ausbleibendem/schwankendem Wärmebedarf die Wärmeabfuhr auf konventionelle Art und Weise zu realisieren. Ein Erfolgsbeispiel aus der Fertigungstechnik zeigt die großen zu realisierenden Einsparungen, wenn eine zielführende Konfiguration mittels Doppelkondensatoren und Wärmeeinspeisung in ein NT-Wärmenetz bereits im Planungsprozess betrachtet wird. Hierbei wurde zusätzlich eine Wärmepumpe (wassergebundene Abwärme als Wärmequelle) für Zeiten mit geringem Wärmebedarf integriert, da sich der EER der Kältemaschine (Energy-Efficiency-Ratio als Verhältnis Kälteleistung zu erforderlichem Strombedarf) bei Betrieb des Doppelkondensators infolge eine höheren Verflüssigungstemperatur und somit verringertem  $\Delta T$  verringert (siehe Abbildung 4-7). Dennoch war

die (Einzel-)Maßnahme mit einer jährlichen CO<sub>2</sub>-Einsparung i.H.v. 1.891 t CO<sub>2</sub> immerhin für 60% der erwarteten Gesamteinsparung von 11 Maßnahmen verantwortlich. Im Vergleich zu einer (ineffizienteren) Standardplanung konnte allein durch diese Maßnahme eine (maximale) Verringerung des jährlichen Energiebedarfs um ca. 40% errechnet werden (abhängig von Wechselwirkungen mit weiteren Maßnahmen). Insbesondere für Neubauprojekte, bei welchen eine NT-Heizwärmeversorgung realisiert werden kann und Prozesse von einem kontinuierlichen Kältebedarf (und damit Abwärmequelle) charakterisiert sind, bietet sich eine Realisierung nach dem aufgezeigten Projektbeispiel potenziell an.

Für eine quantitative Abschätzung bzgl. der Anzahl erforderlicher Speicher zu Deckung einer bestimmten Menge ab Wärme, soll an dieser Stelle eine überschlägige Bestimmung einer möglichen Anzahl eingesetzter Speicher zur Deckung eines NT-Wärmebedarfs durch Einspeicherung von NT-Abwärme unter Nutzung dieser Abwärme als Wärmequelle eines Wärmepumpenbetriebs ähnlich *Brückner* vorgenommen werden. Nach *Brückner* besteht für die Substitution von ca. 22,2 TWh Wärmebedarf bei Trocknungsprozessen (aus Brennstoffeinsatz und Berücksichtigung verschiedener Randbedingungen), bei 2,8 MWh/Ladung (Zeolith Speicher) und 300 Ladungen/Jahr, ein Potenzial von etwa 26.000 Speichern [Brückner, 2016]. Bezieht man diese Werte auf einen Wärmebedarf (Raumwärme, Warmwasser, Prozesswärme <100°C) von etwa 143 TWh und nimmt eine Substituierbarkeit von 10% an (durch Einspeicherung von NT-Abwärme zur Wärmebereitstellung aus Wärmepumpenbetrieb), so ergibt sich ein Potenzial zur Substituierung von 14,3 TWh Wärme. Bei einem COP der Wärmepumpe von 3 würde sich unter den oben genannten Annahmen hinsichtlich des Speichers eine Anzahl von ca. 5.700 Speichern ergeben, welche zur Substitution des genannten Wärmebedarfs erforderlich wären. Dieser Überschlag erfolgt allerdings ohne Berücksichtigung technischer und wirtschaftlicher Randbedingungen.

Grundsätzlich liegen wie dargestellt nur wenige Informationen hinsichtlich NT-Abwärme(-systemen) vor. Im Rahmen der Projektarbeit wurde als Ansatz zum Aufbau einer entsprechenden Datengrundlage die Abfrage bei Landesumweltbehörden gewählt, welchen nach 42. BImSchV Verdunstungskühlanlagen, Kühltürmen und Nassabscheider durch die Betreiber angezeigt werden müssen. Insgesamt wird davon ausgegangen, dass ein Bestand zwischen 30.000 und 50.000 solcher Anlagen in Deutschland besteht [Internetquelle/Presseinformation]. Eine entsprechende Anfrage bei den zuständigen Landesumweltbehörden (für 14 von 16 Bundesländer) ergab einen Bestand von insgesamt etwa 15.000 derzeit angezeigten Anlagen [Datenabfrage Behörden]. Im Rahmen der Abfrage konnte keine Information über (Kühl-)Leistungswerten bzw. Größen der Anlagen erhalten werden. Es ist zu betonen, dass sich diese Bestandsdaten ausschließlich auf (1) Verdunstungskühlanlagen, (2) Kühlturm und (3) Nassabscheider beziehen, d.h. **keine Informationen über Kältemaschinen, Trockenkühler, Hybridkühler und Direktverflüssiger** enthalten sind. Diese erhöhen den Anlagenbestand entsprechend nochmals und stellen gemeinsam mit den Verdunstungskühlanlagen und Kühltürmen potenziell eine weit verbreitete NT-Abwärmequelle dar.

Wie angedeutet, liegt im Bereich der NT-Abwärme nur eine eingeschränkte Datengrundlage vor, weswegen ein Kurzgutachten aus dem Jahr 2018 bzgl. strategischer Optionen zur Dekarbonisierung und effizienten Nutzung von Prozesswärme und -kälte zu dem Ergebnis kommt, dass eine aussagekräftige Potenzialbestimmung der NT-Abwärme (Temperaturniveau 20-60°C) in Deutschland nicht vorliegt. Dies wird z.B. mit der Vielfältigkeit der vorhandenen Quellen begründet. Weiterhin kommt das Kurzgutachten zum Ergebnis, dass NT-Abwärme zum Zeitpunkt des Gutachtens sowohl nur in geringem Maße erfasst sowie genutzt wird. Das Potenzial der NT-Abwärme wird als sehr bedeutend im Vergleich

zu dem Potenzial der „klassischen“ Abwärme angesehen. In diesem Zusammenhang werden z.B. interne Kühlkreisläufe als Beispiel herangezogen, welche sich mit einer Temperatur von 25-40°C gut als Wärmequelle für Wärmepumpen anbieten. [Maaß et al., Stand 2018]

Neben der Betrachtung kühl- und kältetechnischer Systeme als Wärmequelle können diese wie zuvor dargestellt auch als Wärmesenke betrachtet werden. Hinsichtlich des Potenzials der Kältebedarfsdeckung über wärmegetriebene Kälteerzeugungsverfahren kommt eine Untersuchung aus dem Jahr 2014 zu dem Ergebnis, dass in den Bereichen der Industriekälte, der Nahrungsmittelherstellung und der Gebäudeklimatisierung ein hohes Potenzial besteht, den zum Zeitpunkt der Untersuchung herrschenden Anteil der Kältebedarfsdeckung mittels Ab-/Adsorptionskältemaschinen, zu steigern.

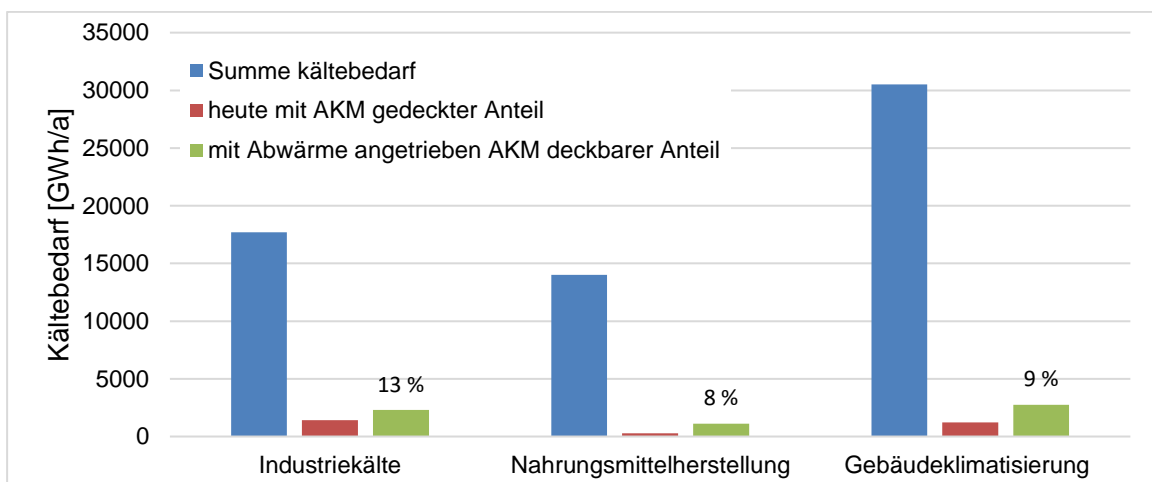


Abbildung 4-3: Kältebedarf und gegenwärtiger bzw. perspektivischer Anteil der mit Abwärme angetriebenen Kältetechnik - Variante: Nutzung vorhandener Abwärme zur Kälteerzeugung [Heinrich et al., 2014]

Der Anteil der mittels Abwärme angetriebenen Kältetechnik wird im Bereich der Industriekälte perspektivisch mit etwa 13 % (Ist-Anteil: 8 %) gesehen. Für den Bereich der Nahrungsmittelherstellung vervierfacht sich dieser Wert vom Ist-Anteil mit 2 % auf 8 %. Der Bereich der Gebäudeklimatisierung weist dagegen ein noch größeres Potenzial auf und erhöht sich von dem Ist-Anteil 2 % auf insgesamt 9 %. Ein großer Vorteil, welcher sich aus der Kälteerzeugung aus Abwärme ergibt, ist die Realisierung einer Abwärmennutzung auch zu Sommermonaten, in welchen der Kältebedarf am größten und der Bedarf einer Abwärmennutzung für Heizzwecke am geringsten ist. Die Studie gibt ebenfalls einen Hinweis auf das Stromeinsparpotenzial durch die Substitution von Kompressionskältemaschinen durch Sorptionstechnik. Dieses bewegt sich nach Abbildung 4-4 in einem Bereich von 240 bis 778 GWh/a (0,9 bis 2,8 PJ/a), was einer jährlichen CO<sub>2</sub>-Einsparung i.H.v. etwa 102.480 bis 332.206 t CO<sub>2</sub> entspricht.

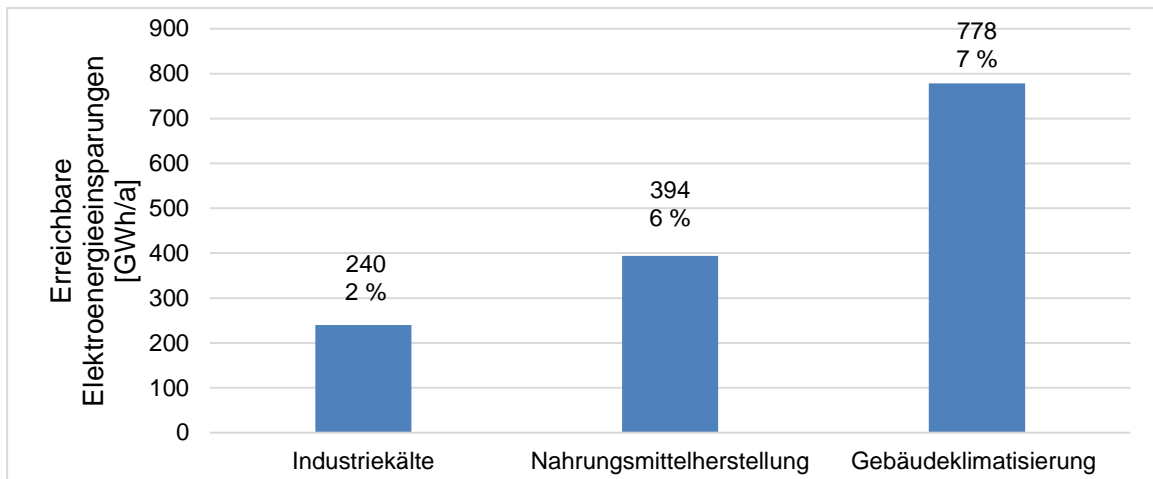


Abbildung 4-4: Erreichbare Elektroenergieeinsparungen in den einzelnen Branchen (%-Anteile auf den Elektroenergiebedarf der Kälteerzeugung je Branche bezogen) - Variante: Nutzung vorhandener Abwärme zur Kälteerzeugung - Keine Berücksichtigung Eigenbedarf Strom AKM [Heinrich et al., 2014]

Nach Expertenaussagen aus dem Fachgespräch zur Kühl- und Kältetechnik kann eine Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen je Betriebsstunde um etwa 80% erreicht werden, wenn eine Kompressionskältemaschine durch eine Sorptionskältemaschine (Prozessabwärme als Wärmequelle) ersetzt wird. Diese Reduzierung wurde exemplarisch für einen Kälteleistungsbereich von 100 kW bis 5.000 kW angegeben.<sup>1</sup>

Neben der dargestellten Variante der Nutzung vorhandener Abwärmequellen als Antriebswärme wird weiterhin die Variante der Nutzung von vorhandenen bzw. nachzurüstenden KWK-Anlagen auf Erdgas-Basis betrachtet. Hierbei ergeben sich die folgenden Anteile.

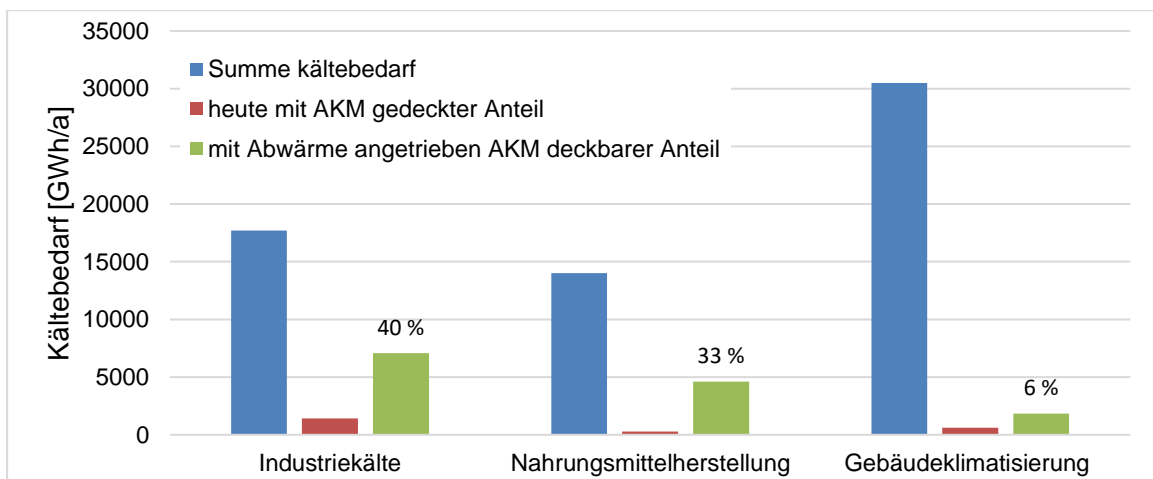


Abbildung 4-5: Kältebedarf und gegenwärtiger bzw. perspektivischer Anteil der mit Abwärme angetriebenen Kältetechnik - Potenzial: Einsatz von Erdgas-betriebenen KWK-Anlagen [Heinrich et al., 2014]

Das Potenzial für diese Variante wird im Bereich der Industriekälte von etwa 8 % (Ist-Anteil) auf etwa 40 % gesehen. Im Bereich der Nahrungsmittelherstellung von 2 % (Ist-Anteil) auf 33 % und im Bereich der Gebäudeklimatisierung von 2 % (Ist-Anteil) auf 6 %. Auch für diese Betrachtung werden

<sup>1</sup> Expertenrückmeldung im Rahmen des EE4InG Fachgesprächs zum Thema Kühl- und Kältetechnik, Hr. Molter



erreichbare Elektroenergieeinsparungen genannt (Abbildung 4-6). Diese bewegen sich hierbei in einem Bereich von 470 bis 1.940 GWh/a (1,7 bis 6,9 PJ/a), was einer jährlichen CO<sub>2</sub>-Einsparung i.H.v. etwa 200.690 bis 828.380 t CO<sub>2</sub> entspricht.

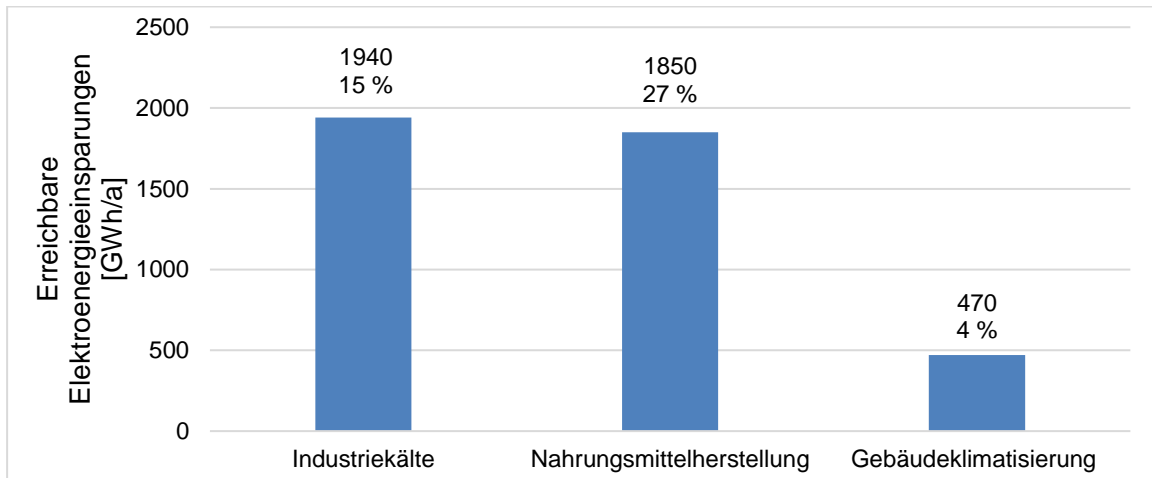


Abbildung 4-6: Erreichbare Stromeinsparungen in den einzelnen Branchen (%-Anteile auf dem Strombedarf der Kälteerzeugung je Branche gerechnet) – Potenzial: Einsatz von Erdgas-betriebenen KWK-Anlagen – Keine Berücksichtigung Eigenbedarf Strom der AKM [Heinrich et al., 2014]

Die Expertenaussagen aus dem Fachgespräch zur Kühl- und Kältetechnik beziehen sich ebenfalls auf den Sachverhalt eines BHKW als Wärme- und Stromquelle für Sorptionskältemaschinen zur Substitution von Kompressionskältemaschinen. Hierbei wird ein Reduzierungspotenzial der CO<sub>2</sub>-Emissionen je Betriebsstunde im Bereich von 86 bis 90% angegeben. Das Reduzierungspotenzial steigt hierbei mit der betrachteten Kälteleistung (100 kW bis 5.000 kW).<sup>2</sup>

Im Kontext möglicher F&E-Aktivitäten zum Aufbau industrieller NT-Wärmenetze unter Nutzung der Abwärme aus kühl- und kältetechnischen Anlagen, ergeben sich hinsichtlich der aufgezeigten Potenziale der Sorptionstechnik mögliche negative Wechselwirkungen. Diese sind bei der Betrachtung der Potenziale zu berücksichtigen, sofern ein Einsatz von Sorptionskältemaschinen verhindert wird, auch wenn prinzipiell auch Sorptionskältemaschinen in NT-Wärmenetze integriert werden können.

### Latentwärmespeicher

Die zuvor dargestellte Möglichkeit einen LWS als Wärmesenkenpeicher zur Reduzierung der Kondensationstemperatur bzw. von der Umgebungstemperatur unabhängigen Kondensationstemperatur einzusetzen, ermöglicht eine Effizienzsteigerung durch Verringerung der Spreizung zwischen der Verflüssigungs- und Kondensationstemperatur der Kältemaschine. Als Faustformel kann hier eine Energieeinsparung von etwa 3% je um 1 K reduzierter Temperaturspreizung angenommen werden. Exemplarisch ist der folgende Prinzipverlauf des EER in Abhängigkeit der Verflüssigungs- und Kondensationstemperatur in der folgenden Abbildung aufgetragen. Insbesondere beim Einsatz von Trockenkühlern, mit der Umgebungstemperatur als maßgebliche Größe zur minimalen Rückkühltemperatur, bietet eine solche Konfiguration mögliche Ansatzpunkte. Die minimal bereitzustellende Rückkühltemperatur von Nasskühltürmen ist grundsätzlich ebenfalls von den Umgebungsbedingungen abhängig, bietet allerdings mit der Feuchtkugeltemperatur als maßgebliche

<sup>2</sup> Expertenrückmeldung im Rahmen des EE4InG Fachgesprächs zum Thema Kühl- und Kältetechnik, Hr. Molter



Größe die Möglichkeit, das Kühlwasser auch unter die Umgebungstemperatur zu kühlen. Sofern die Konfiguration aus LWS und Trockenkühler den Einsatz eines Nasskühlturms ersetzen kann, kann auf diese Weise zudem der Wasserbedarf der Rückkühlung mittels Nasskühlturm signifikant gesenkt bzw. vermieden werden. Etwa 2/3 der Kühlleistung eines Nasskühlturms wird über die Verdunstung des Kühlwassers realisiert, was im Gegensatz zum Einsatz eines Trockenkühlers eine Nachspeisung von Frischwasser erforderlich macht.

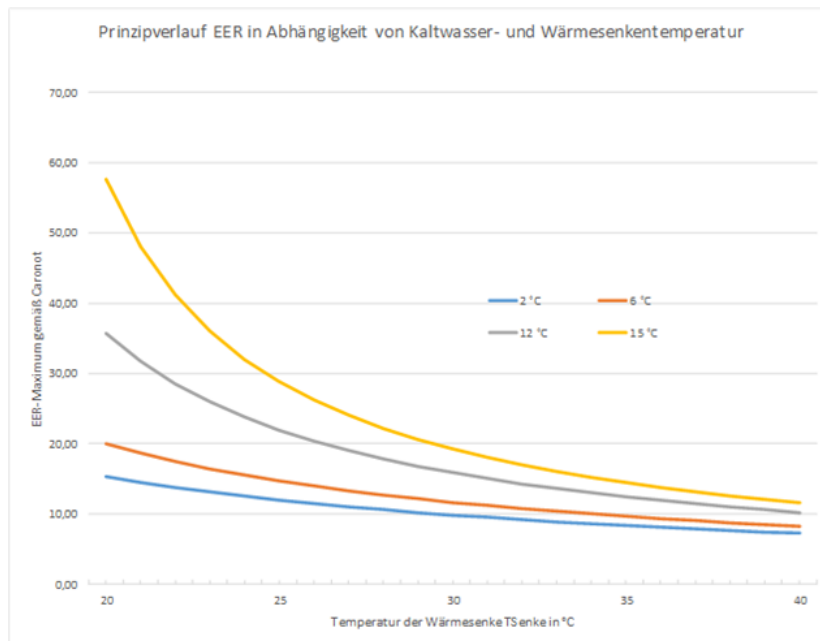


Abbildung 4-7: Prinzipverlauf EER in Abhängigkeit von Kaltwasser- und Wärmesenkentemperatur

Auch für den Einsatz eines LWS als Wärmesenkenspeicher zur Unterkühlung können Aussagen zur Leistungssteigerung abgeleitet werden. So ergibt sich in Abhängigkeit des eingesetzten Kältemittels eine unterschiedliche Leistungssteigerung durch die Unterkühlung. Die Leistungssteigerungsrate weist dabei einen linearen Zusammenhang auf und ist zudem abhängig von der Unterkühlung. Für Propan beträgt die Leistungssteigerung etwa 1% je Kelvin Unterkühlung [Loistl, 2018].

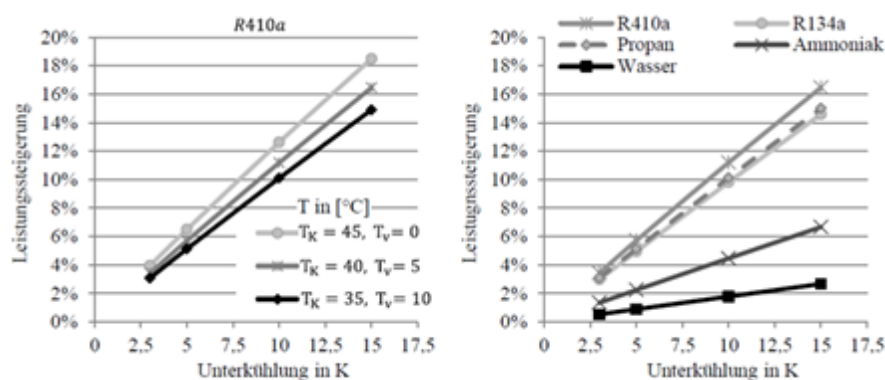


Abbildung 4-8: Leistungssteigerung im Kühlbetrieb durch Unterkühlung für verschiedene Kältemittel

Darüber hinaus ist ein zentraler Latentwärmespeicher auf der Basis eines PCM mit 15 °C Schmelztemperatur zur Gebäudekühlung deutlich effizienter als Eisspeicher oder Kaltwasserspeicher zu betreiben. Gerade PCM auf der Basis von Salzhydraten bzw. Salzhydratmischungen sind aufgrund der relativ hohen erzielbaren Speicherdichten von großem Interesse. Jedoch besteht im betrachteten

Temperaturbereich noch Bedarf ein entsprechendes PCM zu entwickeln, das sich auch über den anvisierten Anwendungszeitraum als stabil erweist. Ob ein PCM für die Anwendung in einem zentralen Speicher zur Gebäudekühlung geeignet ist, hängt neben der thermischen Zyklusstabilität von deren Verträglichkeit mit anderen Speicherkomponenten, von etwaigen Zulassungsanforderungen bzw. für den Dauerbetrieb zu treffende Sicherheitsmaßnahmen und vom Preis der Materialien ab.

Die gegenüber einphasigen Kälteträgern erhöhte Speicherkapazität eines Phase Change Slurries birgt in Verbindung mit Kühldecken den Vorteil, dass sich das PCS über die Kühldecke betrachtet weniger erwärmt und daher im Mittel ein größeres  $\Delta T$  zwischen Kälteträger und Raum vorliegt. Wird durch die Verwendung eines PCS beispielsweise das zur Kühlung verfügbare effektive, mittlere  $\Delta T$  von 4 auf 5 °C erhöht, so entspricht dies einer Leistungssteigerung von 25 % und damit einer möglichen Verkleinerung der zu installierenden Kühldeckenfläche um 25 %. Durch die höhere Transportkapazität lassen sich darüber hinaus die Rohrdimensionen im Kühlungsnetzwerk und/oder die Pumpleistung signifikant verringern. Zur Entwicklung von PCS auf Salzhydratbasis wurde am ZAE Bayern ein neuartiger Ansatz entwickelt, welcher auf dem Einsatz von Salzhydraten mit sehr niedriger Kristallisationsgeschwindigkeit beruht.

---

## **5. Zusätzlich durch die Wechselwirkungen entstehenden/zu erwartenden Hemmnisse**

---

Die dargestellten Wechselwirkungen bzw. Möglichkeiten zur Abwärmenutzung bei kühl- und kältetechnischen Systemen im Kontext von industriellen Wärmenetzen führen zu unterschiedlichen Hemmnissen, u.a. infolge von negativen Wechselwirkungen. Diese ergeben sich etwa aus der Tatsache, dass eine Wärmerückgewinnung an der Kältemaschine (Doppelkondensator mit Einspeisung in das Heizungsnetz) nur im Betrieb der Kältemaschine möglich ist und somit eine (effizientere) Kälteerzeugung über eine Freikühlung (d.h. nur Kühlturbetrieb ohne Kältemaschinenbetrieb) verhindern. Beide Anwendungsfälle sind insbesondere im Winter relevant (Heizungswärmebedarf als Wärmesenke der Abwärme und Möglichkeit zur Freikühlung aufgrund geeigneter Umgebungsbedingungen) und stehen somit in unmittelbarer Konkurrenz zueinander. Auch Effizienzsteigerungen während des (erforderlichen) Kältemaschinenbetriebs könnten aufgrund einer ggf. lukrativen Abwärmerückgewinnung/-verkaufs nicht mehr verfolgt werden, wenn diese möglicherweise mit einem verringerten Abwärmeaufkommen einhergehen. Weitere Hemmnisse im Zusammenhang mit Doppelkondensatoren können sich aufgrund der verringerten Effizienz der Kältemaschine durch den Doppelkondensatorbetrieb ergeben. In Abhängigkeit des individuellen Anwendungsfalls hat hier eine spezifische Untersuchung hinsichtlich Aufwand und Nutzen zu erfolgen. Darüber hinaus ergeben sich aus den systemischen Abhängigkeiten, welche sich infolge der aufgebauten Vernetzungen ergeben (z.B. Heizwärmebereitstellung über Doppelkondensatoren nur bei Kältemaschinenbetrieb), Hemmnisse, da Ausfälle von Systemelementen Auswirkungen auf das Gesamtsystem haben und Backup-Lösungen berücksichtigt werden müssen. Auch aus diesem Grund kann je nach Gestaltung und Erfordernissen des Systems ein großer Raumbedarf für Wärmeübertrager und Speicher anfallen, woraus sich kosten- und flächenbezogene Hemmnisse ergeben können.

Im Zusammenhang mit dem Aufbau von industriellen NT-Wärmenetzen zur Bereitstellung von Prozesswärme, Raumwärme und Warmwasser mittels Wärmepumpen ergeben sich weitere Hemmnisse. Der Dekarbonisierung dieser drei Wärmebereiche bzw. des industriellen Wärmesektors, z.B. über den Aufbau von NT-Wärmenetzen für einen effizienten Wärmepumpenbetrieb oder über bedarfsgerechte

Temperaturniveaus, stehen verschiedene Herausforderungen und Hemmnisse entgegen. Derzeitige Strukturen sind oftmals auf „gewachsene Strukturen“ zurückzuführen oder liegen darin begründet, dass eine Versorgung über ein einziges (mitunter schon bestehendes) Dampfnetz, welches sich an dem Verbraucher mit der höchsten Temperaturanforderung orientiert, einfacher und weniger komplex ist als verschiedene Anforderungen mit ggf. mehreren Netzen abzudecken. Die Komplexität, welche mit den gewachsenen Strukturen einhergeht, darf bei der Frage nach potenziellen Hemmnissen nicht vernachlässigt werden. Weiterhin weisen die derzeitigen Strukturen allerdings auch auf ein Betreiberseitig fehlendes Problem- und Potenzialbewusstsein hin und somit fehlende systematische Bedarfsanalysen, Hemmnisse beim Technologiewechsel sowie allgemein auf ein relevantes Knowhow-Gefälle der Beteiligten hin.

Der Aufbau von NT-Wärmenetzen und die Versorgung von Verbrauchern im Bereich Prozesswärme, Raumwärme und Warmwasser führt potenziell zu komplexen Systemanalysen und macht mitunter auch Verfahrensumstellungen oder Technologieentwicklungen erforderlich, was zusätzliche Hemmnisse bedingt. Auch dürften teils Vorbehalte gegenüber der vermehrten strombasierten Wärmebereitstellung mittels Wärmepumpen Hemmnisse verstärken, unabhängig davon, welcher Aufwand und welche Infrastruktur darüber hinaus noch zum Aufbau von NT-Wärmenetzen erforderlich sind.

Auch hinsichtlich dem Einsatz von Latentwärmespeichern für die zuvor genannten Zwecke und Wechselwirkungen können Hemmnisse identifiziert werden. Diese drehen sich einerseits um die zusätzlichen Kosten, welche z.B. der Einsatz eines LWS und Trockenkühlers anstatt eines Nasskühlturms bedeuten, aber auch um den erforderlichen Platzbedarf, welcher für die Realisierung erforderlich wäre. Hierbei sind ebenfalls individuelle Aufwand/Nutzen-Abschätzungen vorzunehmen, welche mitunter eine Komplexität mit sich bringen.

---

## **6. Empfehlungen zur Einebnung der zusätzlichen Hemmnisse**

---

Im Hinblick auf die dargestellten Hemmnisse bzgl. individueller Aufwand/Nutzen-Untersuchungen könnte die Entwicklung allgemeingültiger Herangehensweisen geeignet sein, welche eine individuelle Szenario- und Verbraucheranalyse für eine schnelle und einfache Abwägung von Aufwand/Nutzen im Einzelfall ermöglichen. Hierbei können z.B. Einschätzungen hinsichtlich der Fragestellungen Freikühlung/Wärmerückgewinnung oder Doppelkondensator/EER-Auswirkungen oder EER-Auswirkungen/Kosten Latentwärmespeicher berücksichtigt werden und zielführende Kurzanalysen für Aufklärungs- sowie Entscheidungsprozesse ermöglichen. Zur Förderung des Aufbaus von Wärmenetzen (insbesondere quartiersübergreifend) könnten Garantien zur Absicherung von Risiken durch Ausfälle in Erwägung gezogen werden. Zudem könnten im Rahmen geeigneter und geförderter Pilotprojekte Musterbeispiele und Potenzialdemonstrationen realisiert werden und ggf. auch Benchmarks abgeleitet werden. Ein Ziel sollte sein, allgemeingültige Anforderungen und Kriterien zur systematischen und einfachen Analyse des Dekarbonisierungspotenzials im individuellen industriellen Wärmesektor (durch den Aufbau von NT-Wärmenetzen mit Einbindung von Abwärme aus kühl- und kältetechnischen Systemen) zu identifizieren und zu definieren. Weiterhin sollten Lösungsansätze geschaffen werden, um systemische Analysen in diesem Kontext zu fördern, um diese zukünftig anstatt der bisher verbreiteten reinen Ersatzinvestitionen zu etablieren.

Ähnliche Empfehlungen können im Bereich der Latentwärmespeicher gegeben werden. Ein wichtiger Schritt für die weitere Entwicklung der Latentwärmespeicher ist der geförderte Aufbau von

Demonstrationsanlagen in unterschiedlichen Industriebranchen und Anwendungen insbesondere bei Batch-Betrieb, sobald die Technik in der späten Re-Orientierungsphase ist.

---

## Literaturverzeichnis

---

Blesl, M.; Kessler, A. (2017): Energieeffizienz in der Industrie. Berlin

Brückner, S. (2016): Industrielle Abwärme in Deutschland. Bestimmung von gesichertem Aufkommen und technischer bzw. wirtschaftlicher Nutzbarkeit. Dissertation. Technische Universität München.

Datenabfrage Landesbehörden: Hessen, Brandenburg, Berlin, Hamburg, Sachsen-Anhalt, Bremen, Baden-Württemberg, Bayern, Mecklenburg-Vorpommern, Niedersachsen, Rheinland-Pfalz, Saarland, Sachsen, Schleswig-Holstein

Fraunhofer ISI (2019): Erstellung von Anwendungsbilanzen für die Jahre 2018 bis 2020 für die Sektoren Industrie und GHD. Studie für die Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V. (AGEB) – Entwurf. Karlsruhe

Heinrich, C.; Wittig, S.; Albring, P.; Richter, L.; Safarik, M.; Böhm, U.; Hantsch, A. (2014): Nachhaltige Kälteversorgung in Deutschland an den Beispielen Gebäudeklimatisierung und Industrie. Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes. Hg. V. Umweltbundesamt (Climate Change, 25/2014).

Hesselbach, J. (2012): Energie- und klimafreundliche Produktion. Grundlagen, Leitlinien und Praxisbeispiele. Wiesbaden

Hirzel, S.; Sontag, B.; Rohde, C. (2013): Industrielle Abwärmenutzung. Kurzstudie. Fraunhofer-institut für System- und Innovationsforschung ISI. Karlsruhe.

Internetquelle/Presseinformation:

[https://www.chillventa.de/de/news/presseinformationen/expertenwissen-42blmschv-cftos3rd2v\\_pireport](https://www.chillventa.de/de/news/presseinformationen/expertenwissen-42blmschv-cftos3rd2v_pireport)

Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen (LANUV) (Hrsg.) (2019): Potenzialstudie Industrielle Abwärme. LANUV-Fachbericht 96. Recklinghausen.

Loistl, Felix Michael (2018): Latentwärmespeicher in Wärmepumpensystemen – Speicherkonzepte und thermische Auslegung. Dissertation. Technische Universität München. München.

Maaß, C.; Sandrock, Dr. M.; Fuß, G. (2018): Strategische Optionen zur Dekarbonisierung und effizienten Nutzung der Prozesswärme und -kälte. Kurzgutachten. Hamburg Institut.

Pehnt, Dr. M.; Bödeker, J.; Arens, M.; Jochem, Prof. Dr. E.; Idrissova, F. (2010): Die Nutzung industrieller Abwärme – technisch-wirtschaftliche Potenziale und energiepolitische Umsetzung. Bericht im Rahmen des Vorhabens „Wissenschaftliche Begleitforschung zu übergreifenden technischen, ökologischen, ökonomischen und strategischen Aspekten des nationalen Teils der Klimaschutzinitiative“. Förderkennzeichen: 03KSW016A und B. Heidelberg, Karlsruhe.

Sächsische Energieagentur SAENA GmbH (Hrsg.) (2016): Technologien der Abwärmenutzung. Dresden.

Schmitt, Bastian (2014): Integration thermischer Solaranlagen zur Bereitstellung von Prozesswärme in Industriebetrieben. Dissertation. Universität Kassel.

Schweigler, Christian; Keis, Christian; Helm, Martin; Demel, Saskia; Hiebler, Stefan; Mehling, Harald (2007): Solares Heizen und Kühlen mit Absorptionskälteanlage und Latentwärmespeicher. Konferenzpapier. Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung e.V. (ZAE Bayern)

Thorsen, J. E., Lund, H., & Mathiesen, B. V. (2018). "Progression of District Heating – 1st to 4th generation".

Toro, F., Jochem, E., Lösch, O. (2021): Bewertung der thermischen Energiespeicher (Latentwärmespeicher) als eine Komponente industrieller Abwärmenutzung, FuE-Bedarf, Marktpotentiale, Hemmnisse und Empfehlungen- ein Statuspapier 2021. IREES, <https://irees.de/en/2021/02/25/bewertung-der-latentwaermespeicher-bei-industriellen-abwaermetemperaturen-von-100-600c-en/>

Wolf, S.; Fahl, U.; Blesl, M.; Voß, A.; Jakobs, R. (2014): Analyse des Potenzials von Industriewärmepumpen in Deutschland. Forschungsprojekt gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie und der Energie Baden-Württemberg AG. Endbericht. FKZ 0327514A.