

Die nachhaltige Nutzung von Kühlsystemen in öffentlichen Gebäuden

Masterthese zur Erlangung des akademischen Grades
“Master of Engineering”

eingereicht bei
Assoz. Prof. Dr.-Ing. Rainer Pfluger

DI Melanie Sophia Maria Krisper BSc

00612986

Eidesstattliche Erklärung

Ich, **DI MELANIE SOPHIA MARIA KRISPER BSC**, versichere hiermit

1. dass ich die vorliegende Masterthese, "DIE NACHHALTIGE NUTZUNG VON KÜHLSYSTEMEN IN ÖFFENTLICHEN GEBÄUDEN", 110 Seiten, gebunden, selbständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfen bedient habe, und
2. dass ich das Thema dieser Arbeit oder Teile davon bisher weder im In- noch Ausland zur Begutachtung in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe.

Wien, 10.08.2022

Unterschrift

Danksagung

Diese Arbeit möchte ich meinen größten Schatz, meinem Mann Michi, widmen.

„In den schwierigsten Zeiten bist du bei mir geblieben und hast mich immer unterstützt. Ich danke dir für unser wundervolles gemeinsames Leben.“

Ein ganz besonderes und herzliches Dankeschön geht an meine ehemaligen Arbeitskolleg*innen der Universalmuseum Joanneum GmbH. Vor allem möchte ich mich bei meinem ehemaligen Vorgesetzten Herr Ing. Erik Ernst, meinen Kollegen Walter Ertl und Martin Schantl bedanken.

“Durch euch habe ich mein Interesse und meine Begeisterung am Facility Management gefunden - die gemeinsame Zeit bei euch hat meinen weiteren Berufsweg sehr geprägt. Danke dafür!”

Meinen Studienkolleg*innen möchte ich für die letzten zwei lernreichen und spannenden Jahre danken.

„Die kostbare Zeit mit euch geht nun zu Ende und die Erfahrungen und die schönen Erinnerungen bleiben ... nachhaltig eben.“

Liebe Karo,

„2020, zeitgleich, haben wir beide uns während der Covid-Krise dazu entschieden eine weitere Ausbildung zu starten - zeitgleich beenden wir diese auch. Ich danke dir für deine Motivation und deine Unterstützung in dieser herausfordernden Zeit. Ich bin sehr stolz auf dich.“

Meine Resi und Bernhard,

danke für die wunderbaren Abende in Wien und euren Zuspruch.

„Liebe Resi, danke, dass du nun schon seit 20 Jahren meine Freundin bist und einfach immer für mich da bist.“

Lieber Heinzl,

vielen lieben Dank für deine Unterstützung, und dass ich während meiner Wienaufenthalte deine Wohnung nutzen durfte.

Ein herzliches Dankeschön geht natürlich auch an meinen Betreuer, Herrn Assoz. Prof. Dr.-Ing. Rainer Pfluger.

„Vielen lieben Dank für die umfassende Betreuung und Ihre Bemühungen.“

Bei meinen Vorgesetzten und Arbeitskolleg*innen möchte ich mich ebenfalls bedanken.

Kurzfassung

Kühlsysteme werden in den unterschiedlichsten Bereichen der Wirtschaft eingesetzt. Der primäre Anwendungsbereich ist der Abtransport von Prozesswärme, die im Produktionsablauf anfällt. Das richtige Kühlsystem auszuwählen ist von vielen Faktoren und Einflüssen abhängig. Neben den ausschlaggebenden technischen Parametern, wie Temperatur und Leistung des Kühlsystems, hängt die Wahl des passenden Kühlsystems von den örtlich verfügbaren Ressourcen ab, denn die Errichtung und das Betreiben, sowohl von gewerblichen und industriellen Großgebäuden haben zusätzlichen Anforderungen zu entsprechen. Vor allem müssen diese Kühlsysteme unter dem Blickwinkel einer raschen und preisgünstigen Planung und Errichtung, einer einfachen Wartung, längerfristigen und flexiblen Nutzung, wie auch im Bezug der Energieeffizienz entsprechen. Diese Masterthese setzt sich mit der Thematik der nachhaltigen Nutzung von Kühlsystemen, vor allem im medizinischen Bereich, an öffentlichen Universitäten auseinander. Die Hauptaugenmerke liegen hier auf der umfassenden Beschreibung von Kühlsystemen und ihren Komponenten sowie dem Betrieb und der Vermeidung von Kühlverlusten an Hochsommertagen, da speziell an diesen Tagen große Kapazitäten an Kühlleistungen aufgrund ineffizienter Nutzung, mangelnder technischer Betriebsführung, mangelnder Wartung, Überdimensionierung der Anlagen etc., verloren gehen können.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Allgemeine Problembeschreibung	2
1.2	Zielsetzung	2
1.3	Anwendbarkeit und Häufigkeit	2
1.4	Umnutzung während des Lebenszyklus	2
2	Komponenten von Kältesystemen	3
2.1	Betriebstemperaturen von Kältesystemen	3
2.1.1	<i>Kühltemperatur und Verdampfungstemperatur</i>	3
2.1.2	<i>Rückkühltemperatur und Verflüssigungstemperatur</i>	3
2.1.3	<i>Verschaltung der Anlage</i>	3
2.1.4	<i>Zweistufige Kälteanlage</i>	4
3	Hintergrund und Allgemeine Beschreibung von Kälteanlagen	5
3.1	Basissystembeschreibung und Funktion einer Kälteanlage	5
3.1.1	<i>Anlagen mit einer Kälteleistung über 20kW</i>	5
3.2	Kältesysteme	6
3.3	Kälteanlagen und ihre Bauarten	7
3.4	Dezentrale und zentrale Anlagen	7
4	Kältemittel	9
4.1	Kenndaten	9
4.1.1	<i>R22</i>	9
4.1.2	<i>R134a</i>	9
4.1.3	<i>R404A</i>	10
4.1.4	<i>R407C</i>	10
4.1.5	<i>R410A</i>	10
4.1.6	<i>Ammoniak</i>	11
4.2	Kriterien für Energieeffizienz von Kältemitteln	11
4.3	Verdampfung im allgemeinen Kältesystem	12
4.3.1	<i>Gesetzliche Vorschriften</i>	12
5	Bauteile einer Kompressions-Kälteanlage	13
5.1	Arten von Verdichtern	14
5.1.1	<i>Kolbenkompressoren</i>	14
5.1.2	<i>Schraubenverdichter</i>	14
5.1.3	<i>Turbokompressoren</i>	15
5.1.4	<i>Kühlung des Schmierölsystems für Schraubenverdichter</i>	15
5.1.5	<i>Economizer</i>	16
6	Antriebsmotoren	17
6.1	Keilriemenantrieb	17
6.2	Direktkupplung	18
7	Leistungsregelung und Effizienz von Verdichtern	19
7.1	Externe Regelungsmöglichkeiten	19
7.1.1	<i>Saugdrossel</i>	19
7.1.2	<i>Externer Bypass</i>	19
7.1.3	<i>Aussetzregelung</i>	19
7.2	Hubkolbenverdichter	20
7.2.1	<i>Integrierter Bypass</i>	20
7.3	Systeme zum Anheben der Saugarbeitsventile	20

7.3.1	Schadraum-Regelung	20
7.3.2	Schließen der Saugventile	20
7.4	Schraubenverdichter	21
7.4.1	Interner Bypass	21
7.4.2	Steuerkolben	21
7.4.3	Regelschieber	21
7.5	Drehzahlregelung	21
7.5.1	Anlagenparallelverbund	22
7.5.2	Gesamtregelung	22
8	Kondensatoren oder auch Verflüssiger	23
8.1	Luftgekühlte Verflüssiger	23
8.1.1	Druckregelung von Verflüssigern	24
8.1.2	Luftgekühlter Verflüssiger und ihre Kältemittelseitige Regelung	24
8.1.3	Luftseitige Regelung	24
8.2	Wassergekühlte Verflüssiger	25
8.2.1	Kühltürme Kühlwasser-Rückkühler	25
8.2.2	Kühlturm des Fallbeispiels	26
8.3	Verdunstungs-Verflüssiger	27
9	Ventile	29
9.1	Entspannungsventile	29
9.1.1	Handexpansionsventil	29
9.1.2	Automatisches Expansionsventil	29
9.1.3	Konstant-Druckexpansionsventil	29
9.1.4	Thermostatisches Expansionsventil	30
9.1.5	Elektronisches Expansionsventil	30
9.2	Niederdruck-Schwimmerventil	30
9.3	Hochdruck-Schwimmerventil	30
9.4	Kapillardrosselrohr	30
10	Verdampfer	31
10.1	Verdampfungsverfahren	31
10.1.1	Trockene Verdampfung	31
10.1.2	Glattrohrverdampfer	32
10.1.3	Lamellenverdampfer	32
10.1.4	Plattenverdampfer	32
10.1.5	Zwangsbelüftete Kühler	32
10.2	Ölabscheider	33
10.3	Verteilnetz	33
10.3.1	Aufteilung des Netzes	34
10.4	Ortung von Leckagen	34
10.5	Filter	34
10.6	Abtauen	35
10.6.1	Nachlauf des Lüfters	35
10.6.2	Elektrische Heizstäbe	35
10.6.3	Abtauen durch Heiß- und Kaltdampf	35
10.6.4	Abtauen durch warmes Wasser	35
10.7	Weitere Effizienzmaßnahmen	36
10.7.1	Wärmerückgewinnung	36
11	Kältebedarf	37
11.1	Kriterien an der Energieeffizienz des Kältebedarfs	37
11.1.1	Ermittlung von Einflussfaktoren und Leistungskennzahlen	37
11.2	Kühlzellen	38

11.2.1	Maßnahmen für die Energieeffizienz von Kühlzellen	38
11.2.2	Wärmeeintrag reduzieren (Kulterer, Beschreibung eines Kälteprozesses 2007) 38	
11.2.3	Kühlstellenregelung.....	39
11.3	Kältespeicher	39
12	Kälteerzeugung.....	40
13	Fallbeispiel.....	41
13.1	Problembeschreibung des Fallbeispiels	41
13.2	Pufferspeicher des Fallbeispiels.....	42
13.3	Hitzetage Fallbeispiel	44
13.4	Betriebszeiten der großen Kälteanlage (KM1) des Fallbeispiels.....	45
13.4.1	Normalbetrieb – KM1 schaltet sich nach Erreichung des Leistungsziels aus	45
13.4.2	Störfall 1 – KM1 schaltet sich nicht ein	47
13.4.3	Störfall 2 – KM1 ist eingeschaltet erzielt aber keine Leistung	48
13.4.4	Störfall 3 – KM1 geht in Pendelschaltung.....	49
13.5	Betriebszeiten der kleinen Kälteanlage (KM2).....	50
13.5.1	Normalbetrieb – KM2 schaltet sich nach Erreichung des Leistungsziels aus	50
13.5.2	Störfall 1 – KM2 geht in Pendelschaltung.....	51
13.5.3	Störfall 2 – KM2 schaltet sich wegen Überlastung aus	52
14	Vorläufige Lösungsansätze.....	53
14.1	Maßnahmen für das Kühlsystem.....	53
14.1.1	Neukonzeption der Kühlsysteme	53
14.1.2	Vermeiden von Ein- und Ausschaltvorgängen der Kühlanlage.....	53
14.1.3	Priorisierung der Kühlleistung auf kritische Bereiche	53
14.1.4	GLT in der Cloud	54
15	Klimawandel und das Fallbeispiel.....	56
15.1	Der Klimawandel in Europa und den Städten	56
15.2	Anpassung des Fallbeispiels an den Klimawandel	57
15.3	Maßnahmen für das Gebäude	59
15.3.1	Gebäudehülle.....	59
15.3.2	Fassadensanierung während des Lebenszyklus	59
15.3.3	Fallbeispiel: Gebäudehülle	59
15.4	Fensterelemente – Sonnenschutz.....	66
15.4.1	Fallbeispiel: Außen- und innenliegender Sonnenschutz	66
15.5	Verteilung von Hitzequellen.....	69
15.5.1	Tages- und Kunstlicht im Rauminnen	69
15.5.2	Fallbeispiel: Künstliche Lichtquellen	69
15.5.3	Leuchtstoff vs. LED	69
15.6	Passive Wärmelasten reduzieren – Interne Wärmelasten vermeiden.....	70
15.6.1	Überhitzung von Serverräumen vermeiden	71
16	Temperaturhaushalt Allgemeine Lösungen	72
16.1	Bauteilaktivierung.....	72
16.2	Variationsmöglichkeiten zur Optimierung der TBA.....	72
16.3	Die Variantenvielfalt der TBA.....	75
16.3.1	Belade- und Entladevorgänge, passiv und aktiv	75
16.3.2	Energieversorgung mittels Solarthermie – Variante 1	75
16.3.3	Energieversorgung über Photovoltaik und Wärmepumpe – Variante 2.....	77
16.3.4	Energieversorgung durch Windenergie und Wärmepumpe – Variante 3.....	79
16.3.5	Funktionsweise des Systems	80
16.4	Die Solarthermie des Fallbeispiels	81

17 Aktive und passive Kühlung	83
17.1 Aktive Kühlung.....	83
17.2 Passive Kühlung.....	84
17.3 Freie Kühlung / Free-Cooling.....	84
18 Geothermie	86
18.1 Grundsätze der Planung – oberflächennahe Geothermie.....	86
18.2 Die oberflächennahe Geothermie.....	86
18.3 Erdsonden.....	87
18.3.1 <i>Auslegung der Erdsonden</i>	89
18.3.2 <i>Kühlung durch Erdsonden</i>	89
18.4 Gute Ökobilanz als Vorteil der Geothermie.....	91
18.4.1 <i>Wirtschaftlichkeit nicht immer gegeben</i>	91
18.4.2 <i>Fallbeispiel: Kombi aus oberflächennaher Geothermie & Solarthermie</i>	92
19 Fazit	93
Quellenverzeichnis	95
Abbildungsverzeichnis	99

1 Einleitung

Kühlsysteme werden in den unterschiedlichsten Bereichen der Wirtschaft eingesetzt. Zum Beispiel in der Haus- und Gebäudetechnik, in medizinischen Bereichen, Forschungsbereichen, Laboren, Universitäten etc. Der häufigste Anwendungsbereich ist der Abtransport von Prozesswärme, die im Produktionsablauf anfällt. Hier ist es von großer Bedeutung, die Abhängigkeit der Anforderungen des Herstellungsprozesses und die richtige Menge an Kühlleistung auf einem angepassten Temperaturniveau bereitzustellen. Eine Prüfung vor dem Einsatz eines Kühlsystems ist immer ratsam, ob die Notwendigkeit einer klassischen Kühlung auch wirklich in Frage kommt, oder ob die anfallende Menge an Energie, zumindest stellenweise, wo anders eingesetzt werden kann.

Das richtige Kühlsystem auszuwählen ist von vielen Faktoren und Einflüssen abhängig. Neben den ausschlaggebenden technischen Parametern, wie Temperatur und Leistung des Kühlsystems, hängt die Wahl des passenden Kühlsystems von den örtlich verfügbaren Ressourcen ab, denn die Errichtung und das Betreiben, sowohl von gewerblichen und industriellen Großgebäuden haben zusätzlichen Anforderungen zu entsprechen wie zum Beispiel: den vielfältigen Nutzungsanforderungen mit ihrer vielfältigen und unterschiedlichen Technik. Vor allem müssen diese Kühlsysteme unter dem Blickwinkel einer raschen und preisgünstigen Planung und Errichtung, einer einfachen Wartung, längerfristigen und flexiblen Nutzung, wie auch im Bezug der Energieeffizienz entsprechen. Auch sollten bei der Nutzung die Kosten für den Betreiber möglichst gering ausfallen. All diese Faktoren spielen natürlich auch für einen nachhaltigen Betrieb von Kühlsystemen, vor allem in öffentlichen Gebäuden, eine gravierende Rolle.

Diese Masterthese setzt sich mit der Thematik der nachhaltigen Nutzung von Kühlsystemen, vor allem im medizinischen Bereich, an öffentlichen Universitäten auseinander. Hauptaugenmerk wird hier auf die Vermeidung von Kühlverlusten an Hochsommertagen (d.h. über 31 Grad Celsius Außentemperatur) gelegt, da speziell in diesen Tagen große Kapazitäten an Kühlleistungen verloren gehen können aufgrund ineffizienter Nutzung, mangelnder technischer Betriebsführung, mangelnder Wartung, Überdimensionierung der Anlagen etc.

Es ist es von großer Wichtigkeit, dass sich der Leser anhand des Fallbeispiels, welches hier immer wieder zur Diskussion herangezogen wird, ein Bewusstsein für die damit verbundenen Prozesse bildet. Somit ist der Leser im Stande die damit verbundene Problematik an Kälteverlusten an Hochsommertagen, Überdimensionierung der Kälteanlage, mangelnde Betriebsführung und mangelnde Wartung etc., besser verstehen und nachvollziehen zu können.

1.1 Allgemeine Problembeschreibung

Das Kernproblem, das in dieser Arbeit behandelt wird, ist die ineffiziente und damit nicht nachhaltige Auslegung eines Kühlsystems für ein Gebäude. Konkreter gesagt, eine Überdimensionierung. Während in der landläufigen Meinung der Glaube vorherrscht, dass „*größer ist besser oder mehr hilft mehr*“, bewirkt das bei Kühlsystemen in Gebäuden genau das Gegenteil. Folgende problematischen Situationen treten auf:

1. Wenn ein Kühlsystem überdimensioniert ist, läuft es die meiste Zeit nicht im optimalen Betriebspunkt und ist daher ineffizient. Eine Lösung wäre hier die Maschinen je nach Bedarf ein- und auszuschalten, aber auch dies führt zu Problemen.
2. Ständige Ein- und Ausschaltvorgänge verkürzen die Lebenserwartung der Maschinen ebenfalls enorm, weshalb das auch vermieden werden sollte.

1.2 Zielsetzung

Die Ziele dieser Masterarbeit können wie folgt zusammengefasst werden:

1. Es soll ein Problemverständnis von falsch dimensionierten Kühlsystemen vermittelt werden.
2. Beschreibung und Analyse eines konkreten Fallbeispiels zur Veranschaulichung.
3. Anführen und Diskutieren von Vorschlägen und Handlungsrichtlinien zur Vermeidung und Lösung des Problems. Vordergründig betrifft dies das Fallbeispiel, aber daraus abgeleitet soll auch allgemeine Aussagen getroffen werden.

1.3 Anwendbarkeit und Häufigkeit

Eine ineffiziente Nutzung von Kühlsystemen tritt an anderen Standorten auch auf. In einem weiteren Hochschulgebäude, welches 1999 erbaut wurde, wurde die Haustechnik eher stiefmütterlich behandelt. Die Dimension des Kühlsystems war auf den Technikraum zu groß bemessen und die Anlage konnte durch das Fachpersonal nicht richtig gewartet werden. Die Zugänglichkeit und Erreichbarkeit des Gerätes waren nicht ausreichend gegeben. Das Kühlmittel, das damals verwendet wurde, war FCKW-haltig und im zweiten Jahr nach der Inbetriebnahme schlug die Klimaanlage leck und das Kühlmittel ist entwichen. Dieses Leck konnte durch den unzugänglichen Einbau der Anlage nicht behoben werden und ein Ausbau der Maschine konnte auch nicht erfolgen, da das Gerät hinter einer Stahlbetonwand verbaut war. Die Anlage war nur durch einen Wartungsschacht zugänglich.

1.4 Umnutzung während des Lebenszyklus

Während des Lebenszyklus eines Gebäudes passiert es sehr häufig, dass Räume umgenutzt oder umgebaut werden. Durch die veränderten Strukturen und Anforderungen passt die Kühlleistung nicht mehr zu den Räumlichkeiten. Beispielsweise führt eine Nachrüstung an Ausstattung in Serverräumen zu einer möglichen Überhitzung, weil die Kühlleistung hier nicht adäquat bedacht wurde. Durch die mögliche Überhitzung steigt die Ausfallquote der Elektronik in den Serverräumen.

2 Komponenten von Kältesystemen

Um eine Bewertung bzw. Beurteilung über ein bereits bestehendes Kältesystem abgeben zu können, ist es erforderlich, dass die Verschaltung der Anlage, die Betriebstemperaturen und die Hauptkomponenten des Kältesystems mit all ihren Parametern ermittelt wird (Kulterer und Mair, Leitfaden für Energieaudits in Kältesystemen 2015, 9).

2.1 Betriebstemperaturen von Kältesystemen

2.1.1 Kühltemperatur und Verdampfungstemperatur

Die erste Funktion bzw. Kriterium, das ein Kältesystem ausmacht, ist die nötige Temperatur des Verdampfers (sekundärseitig) auch als Kühltemperatur bekannt. Diese Kühltemperatur wird in den meisten Fällen durch die Anwendung eines Kältesystems bestimmt und festgelegt. Um die passende Kühltemperatur erreichen zu können ist es erforderlich, dass die genaue Verdampfungstemperatur eingestellt wird.

Beim zweiten Kriterium ist auf den Zeitraum zu achten, an dem die erforderliche Kühltemperatur gehalten werden soll. Am besten ist es, wenn dieser Zeitraum entweder auf täglicher, wöchentlicher oder monatlicher Basis geleistet wird (Kulterer und Mair, Leitfaden für Energieaudits in Kältesystemen 2015, 9-10).

2.1.2 Rückkühltemperatur und Verflüssigungstemperatur

In der Kältetechnik ist nicht nur die Kühltemperatur ein wichtiger Faktor, auch die maximale bzw. minimale Rückkühltemperatur ist hier ausschlaggebend für ein gut funktionierendes Kältesystem. Die Rückkühltemperatur wird größtenteils durch die Art der Rückkühlung, also ob mit Wasser oder Luft rückgekühlt wird, oder auch von der Jahreszeit, der Witterung und vom Standort abhängig und wird auch danach bemessen und festgelegt. Hier sollte auch, da sie im direkten Zusammenhang steht, die Temperatur der Verflüssigung (=Verflüssigungstemperatur) angeführt werden. Wie bei der Kühltemperatur ist es auch bei der Rückkühltemperatur und der Verflüssigungstemperatur ratsam, den Zeitraum des Verlaufes, entweder auf täglicher, wöchentlicher oder jährlicher Basis zu kontrollieren (Kulterer und Mair, Leitfaden für Energieaudits in Kältesystemen 2015, 9-10).

2.1.3 Verschaltung der Anlage

In der Regel werden einstufige Kälteanlagen eingesetzt. Diese Kälteanlagen verfügen nur über einen Verdichter. Die Kühltemperatur dieser Kälteanlagen liegt bei bis zu -20°C Kühltemperatur. Bei dem Druckverhältnis mit $\pi = 6-7$, d.h. bei der Hochdruck- und Niederdruckseite bzw. wenn die maximale Differenz der Temperatur von 50K (Kelvin) erreicht wird, spricht man hier von ihren wirtschaftlichen Einsatzgrenzen. Sobald diese Grenzwerte überschritten werden,

sollte das gesamte Kältesystem anders aufgebaut werden (Kulterer und Mair, Leitfaden für Energieaudits in Kältesystemen 2015, 10).

2.1.4 Zweistufige Kälteanlage

Zwei Verdichter kommen bei der zweistufigen Kälteanlage zum Einsatz. Der zweite Verdichter wird hier deshalb benötigt, da die Anlage mit zwei Verdichtern im Stande ist höhere Temperaturdifferenzen und Druckverhältnisse zu meistern. Um die Effizienz einer zweistufigen Kälteanlage zu steigern und diese aufrecht erhalten zu können, ist es ratsam eine Zwischenkühlung einzusetzen.

Hier sollte zwischen folgenden Bauarten unterschieden werden:

- Der äußere Zwischenkühler
- Der innere Zwischenkühler
- Die Mitteldruckflasche
- Die Kaskadenkälteanlage

Kältemittelpumpenbetrieb

Mithilfe von Pumpen wird bei weit verzweigten Verdampfungsanlagen das Kältemittel in der Anlage befördert. Hier werden die Verdampfer meist überflutet errichtet. Bei der überfluteten Verdampfung wird das Kältemittel über eine Hoch- oder Niederdruck-Schwimmerregulierung in den Verdampfer geführt. Die Kältemittelmenge wird anhand des Flüssigkeitsspiegels auf der Hoch- oder Niederdruckseite geregelt. Am Austritt des Verdampfers ist das Kältemittelgas nur geringfügig überhitzt und wird daher als "nass" bezeichnet.

Überflutete Verdampfer weisen oft einen höheren Wirkungsgrad auf, da keine minimalen Temperaturdifferenzen zwischen Kältemittel und Mediumseite notwendig sind und sich die Verdampfungstemperatur somit höher auslegen lässt und daher im Teillastbereich der Wärmepumpe stärker ansteigt (Greenhouse Media GmbH 2021).

Parallelverbund

Beim Parallelverbund werden in denselben Kältekreis zwei Verdichter eingebaut.

Diese Anlagenkonfiguration kann folgende Vorteile aufweisen (Kulterer und Mair, Leitfaden für Energieaudits in Kältesystemen 2015, 9-10):

- Ein Verdichter kann im Teillastbetrieb ausgeschaltet werden und der zweite Verdichter kann daraufhin im Vollastbetrieb weiterbetrieben werden. Hiermit können die Verdichter im bestmöglichen Bereich, also im Optimal-Bereich arbeiten
- Das redundante System birgt auch sehr viele Vorteile in sich
- Das Austauschen von einem defekten Verdichter möglich ist
- Der Betrieb unterschiedlicher Verdampfungstemperaturen ist möglich

3 Hintergrund und Allgemeine Beschreibung von Kälteanlagen

Um dem Leser ein besseres Verständnis für das Kernproblem vermitteln zu können wird zuerst mit einer allgemeinen Einführung in die Funktion einer Kälteanlage begonnen:

3.1 Basissystembeschreibung und Funktion einer Kälteanlage

Ein Kältesystem kann auf Grundlage von bereits bestehenden Darstellungen beschrieben werden, oder auch auf der Grundlage einfacher Messungen ausgearbeitet werden. Hier ist es wichtig, dass weiterführende Information über das Kältesystem bzw. der Anlage zusammenfließen (Kulterer, Beschreibung eines Kälteprozesses 2007, 5):

- Die Komponenten und deren Verschaltung mit Angabe der technischen Einflussgrößen sollten gelistet werden (Technologie, Alter, elektrische Leistung, Kühlleistung etc...)
- Eingesetztes Kältemittel
- Nutzungstemperatur (Bereich der Anwendung, Maximum und Minimum)
- Einsatzgebiete für die Kühlung und Kälteerzeugung
- Wird die Kälte auf unterschiedlichen Temperaturniveaus gebraucht?
- Anzahl der Betriebsstunden pro Jahr
- Berechnung von Schwankung, die binnen eines Tages stattfinden – in Abhängigkeit von den Gezeiten
- Findet eine Abschaltung der Kälteanlage statt, sobald kein Bedarf besteht?

Im Normalfall werden diese Informationen und Daten entweder durch das eigene Personal, eine interne oder externe Betriebsführung gesammelt und ermittelt.

3.1.1 Anlagen mit einer Kälteleistung über 20kW

Nicht nur das Messen und das Dokumentieren der Einflussgrößen des Betriebs ist für Kältesysteme wichtig, diese ist sogar bei Großanlagen mit mehr als 20kW Kälteleistung von hoher Dringlichkeit.

Folgende Punkte sind zu beachten:

- Last- / Leerlaufzeiten
- Typ die Funktion der Anlagensteuerung und der einzelnen Kälteverbraucher.
- Der gesamte Stromverbrauch (samt allen Ventilatoren am Kondensator und Pumpen, z.B. für das Kühlwasser im Sekundärkreislauf)
- Bei größeren Systemen sollte ein Datenlogger verwendet werden, um die Daten besser erfassen zu können

3.2 Kältesysteme

„Unter Kältesystemen werden Anlagen verstanden, die mit einem thermodynamischen Kreisprozess Wärme von tiefer zu hoher Temperatur fördern und damit einen Wärmeträger abkühlen. In den meisten Fällen erfolgt dies unter Zuhilfenahme von mechanischer Arbeit bzw. eines Kompressors. Dem Verdampfer wird auf tiefem Temperaturniveau Wärme zugeführt (hier Kälte) und die vom Kondensator abgegebene Wärme als Abwärme betrachtet. Eine Kälteanlage nimmt also Wärme an der Kühlstelle auf, diese Wärme wird abtransportiert und wird an einem anderen Ort wieder freigegeben“ (Dehli 2020, 527).

Kälteanlagen werden mittlerweile für zahlreiche industrielle Prozesse genutzt. Sektoren mit einem hohen Bedarf an Kältemaschinen sind die Bau-, Chemie-, Lebensmittelindustrie, sowie in Medizinischen Bereichen. Die häufigsten Anlagen beruhen auf dem Kaltdampfprozess, bei dem ein Kältemittel in Verwendung kommt, dass eine Änderung vom flüssigen zum gasförmigen Aggregatzustand durchläuft. (Dehli 2020, 528)

Die Hauptbestandteile solcher Systeme sind ein Kondensator, ein Verdichter und ein Verdampfer, siehe auch Abb. 1. - bedingt von dem Anwendungsgebiet kann eine Anlage auch aus mehreren dieser Bestandteile zusammengesetzt sein. Die kalte Luft kann direkt über einen Wärmetauscher oder durch einen sekundären Kältekreislauf befördert werden, vor allem wenn das Risiko einer Kontaminierung durch das Kältemittel sehr groß ist. Beträgt die Kühltemperatur mehr als 0°C, dann wird hier meist kaltes Wasser zum Kühlen benutzt (Kulterer, Beschreibung eines Kälteprozesses 2007, 8).

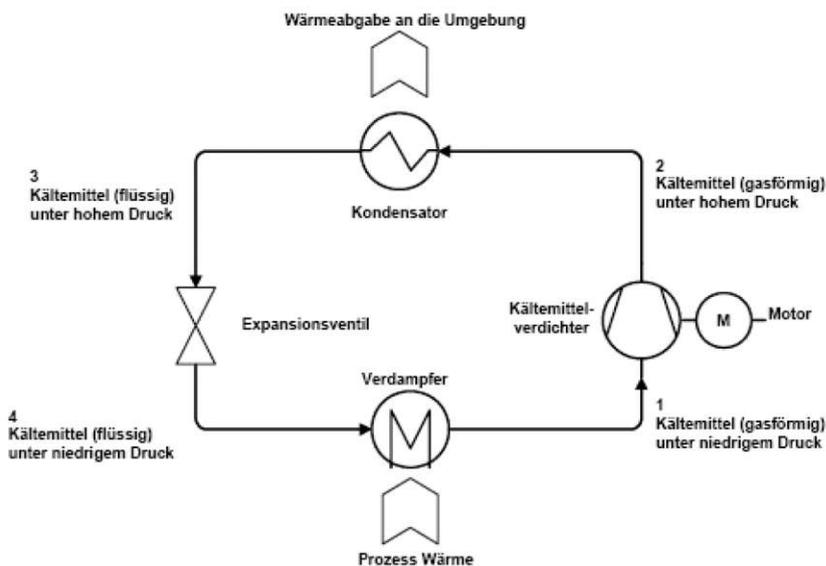


Abbildung 1.: Beschreibung eines Kälteprozesses (Kulterer, Beschreibung eines Kälteprozesses 2007, 8).

3.3 Kälteanlagen und ihre Bauarten

Bei der Berechnung und beim Planen von Kälteanlagen ist immer, d.h. ohne Ausnahme, die notwendigen Einzelsituation zu begutachten. Es muss geprüft werden, ob ein dezentrales, oder ein zentrales System, eine indirekte oder direkte Kühlung und ob auf eine passende Form der Wärmeübertragung zu achten ist. Größeren Projekten sind vor allem durch die verschiedenen Anlagenkalibrierungen an Kältetechniken realisierbar. Bei größeren Projekten ist es immer ratsam, wenn diese durch Fachplaner bzw. Fachfirmen begleitet werden. Bei der Lagerung und Haltbarmachung von Lebens- und Nahrungsmitteln sollte immer auf die unterschiedlichen Temperaturanforderungen und die Kühlgeschwindigkeit geachtet werden. Spezielle Anforderungen der Klimatisierung und Kühlung benötigen größere Räumlichkeiten, wie z.B. Fertigungshallen hinsichtlich der Arbeitsbedingungen und der Behaglichkeit des Raumklimas. In der chemischen Industrie ist auf die jeweiligen Voraussetzungen der unterschiedlichen Reaktionen und Verfahrensabläufe zu achten, da diese verschiedener Temperaturniveaus, der Leistungsanpassungen und der Verfügbarkeiten zugrunde liegen (Dehli 2020, 526).

3.4 Dezentrale und zentrale Anlagen

In der gewerblichen, wie auch in der industriellen Nutzung gibt es eine Reihe an unterschiedlichen von Kältemaschinen. Prinzipiell geht es bei Kälteanlagen permanent darum, dass an einem Raum genügend Kälte produziert wird, um diese bei Bedarf in die kritischen Räume zu führen, die auf niedrige Innentemperaturen angewiesen sind. Laut der Thermodynamik ist dieser Prozess so zu verstehen, dass Wärme (Energie) an einer Stelle oder einer Substanz auf einem niedrigeren Temperaturniveau entnommen wird, um wo anders auf einem höheren Temperaturniveau an die Umwelt oder Umgebung weggeführt zu werden (Dehli 2020, 526).

Bei dezentrale Kälteanlagen wird im Raum, wo Kälte benötigt wird, also die Kühlstelle, die Wärme, die dem Raum mit dem Kältebedarf entzogen werden muss, bei der niedrigeren Temperatur im Verdampfer des Kältemittelkreislaufs aufgenommen, ohne dass bei diesem Vorgang ein Zwischenkreislauf von Nöten ist. Die entzogene Wärme wird infolge, durch den Kälteprozess auf ein höheres Temperaturniveau gebracht und an die Raumluft abgegeben. Diesen Prozess kennen wir vor allem von Kühlschränken, Gefrierschränken, Kühltheken in Lebensmittelgeschäften oder Buffets, Getränkeautomaten (direkte Kühlung) etc. (Dehli 2020, 527).

Zentrale Kälteanlagen unterscheiden sich von den dezentralen Kälteanlagen, da sie ihren zu Inhalt kühlen, d.h. dem Kühlgut wird bei niedrigerer Temperatur die entzogene Wärmeenergie zuerst an einem zentralen Ort oder Raum, dem Aufstellungsort der Kälteanlage befördert. Nun ist die Kälteanlage in der Lage diese Wärmeenergie auf ein höheres Temperaturniveau zu

bringen, damit diese Wärmeenergie bzw. Abwärme z.B. über einen am Dach stehenden Kühlturm an die Umwelt (Außenbereich) abgeleitet werden kann. Zentrale Kälteanlagen transportieren die Abwärme mithilfe verschiedener Flüssigkeiten ab, z.B. Mittels Kaltwasser oder der Kühlluft (indirekte Kühlung). Beim Gebrauch von Kaltwasser oder der Kühlluft sollte in dem Raum, wo Kälte benötigt wird, eine Differenz der Temperatur zwischen dem zu kühlenden Material oder Substanz und dem Kaltwasser bzw. der Kühlluft geben, da die Wärme des Kühlguts durch diesen Prozess weggeleitet werden kann. Weiters ist es wichtig, dass am zentralen Aufstellungsort der Kälteanlage der Verdampfer der Anlage eine andere Temperaturdifferenz zwischen dem enthaltenden Kältemittel und dem Kaltwasser oder Kühlluft vorweist. Zentrale Kälteanlagen sind auch im Stande direkt zu kühlen – hier wird das Kältemittel, das in der Anlage (Kompressionskälteanlage) eingesetzt wird, mithilfe einer längeren Kältemittelleitung zum Raum mit Kühlbedarf geleitet. Zwei Varianten sind bei diesem Fall ausführbar. Bei der ersten Variante wird das Kältemittel schon in der zentralen Kälteanlage durch Zügelung heruntergekühlt, um es später in den Raum mit Kältebedarf in den dort gruppierten Verdampfer zu bringen. Bei der zweiten Variante wird das erwärmte Kältemittel zuerst in dem zu kühlenden Raum durch Zügelung heruntergekühlt und in den dort befindlichen Verdampfer eingeführt. Allgemein wird bei diesen beiden Varianten bzw. bei diesen Prozessen, bei denen Kältemittel direkt im zu kühlenden Raum benutzt wird, direkte Kühlung genannt. Bei diesen Verfahren werden auch kein Kaltwasser und keine Kühlluft verwendet. Der direkten Kühlung steht die indirekte Kühlung gegenüber. Bei der indirekten Kühlung dient das Kaltwasser oder die Kühlluft als Zwischenträger der Kälte, der Kältemaschine und dem zu kühlenden Raum (Dehli 2020, 527-528).

4 Kältemittel

Kältemittel werden mit R für Refrigerant gekennzeichnet. Vor allem in Kompressionskälteanlagen (Kühlschränken etc.) sind früher FCKW-haltige Kältemittel (Fluorchlorkohlenwasserstoffe) zum Einsatz gekommen. Diese Kältemittel sind umweltschädlich, da die schädliche Wirkung dieses Mittels nicht nur zur Auflösung der stratosphärischen Ozonschicht beiträgt, sondern auch den atmosphärischen Treibhauseffekt vorantreibt. 1987 konnte mithilfe des „Montreal-Protokolls“ der Vereinten Nationen ein Ablaufplan für die Einstellung der Produktion und für den Einsatz dieser FCKWs gesetzt werden, der FCKW-haltige Produkte zunehmend untersagt. Bei der Wahl von Kältemitteln ist nicht nur auf die sicherheitstechnischen Aspekte, sondern auch auf die Verfügbarkeit der Kältemittel während der Lebensdauer/Nutzung der Kälteanlage und den Umweltgesetzgebungen zu achten. Alternativ zu FCKW-haltigen Kältemitteln können auch Gemische aus Propan (C₃H₈) oder Butan (C₄H₁₀) – Kältemittelbezeichnung: R290 – verwendet werden. Im Gegensatz zu FCKW-haltige Kältemittel, erzielen Gemische aus Propan oder Butan vergleichbar gute Eigenschaften als Kältemittel, sind aber brennbar. Beim Einsatz von propan- und butanhaltigen Kältemitteln sind dieselben Sicherheitsbestimmungen zu beachten, wie beim Einsatz von Flüssiggasanlagen (Pech und Jens, Heizung und Kühlung 2005, 66).

4.1 Kenndaten

Kältemittel	Stoffklasse	Ozonabbau-potential R11=1	Treibhauspotenzial (GWP 100a) CO ₂ =1	Siedepunkt [°C]
R22	HFCKW	0,055	1700	-40,8
R 134a	HFKW	0	1300	- 26,2
R 404A	HFKW	0	3800	-46,4
R 407 C	HFKW	0	1600	-44
R 410 A	HFKW	0	1600	-51,5
R 290	KW Propan	0	3	-42
R 717	Ammoniak anorganisch	0	0	-33,5

Abbildung 2.: Kenndaten der verschiedenen Kältemittel (Kulterer, Energieeffizienz in Kältesystemen 2007, 33).

4.1.1 R22

Das Kältemittel R22 ist lang Zeit hindurch in der Klima- und Kältetechnik verwendet worden. Dieses Kältemittel wurde als Alternativlösung und Ersatzmittel der FCKWs verwendet. Auch die Ersatzgemische aus R502 und R12 haben das Kältemittel R22 enthalten. Hinsichtlich der Gebrauchsverbote ist das Kältemittel R22 nur noch für den Altanlagenbestand für Servicezwecke bedeutsam.

4.1.2 R134a

Das Kältemittel R134a stellt einen guten Ersatz für R22 dar und wird hauptsächlich im Normkühl- und Klimabereich eingesetzt. Die vorteilhaften Leistungszahlen sprechen hier für

sich, da die Kälteleistung, mit der vom Kältemittel R12 vergleichbar ist. Bei Kolben- und Schrauben-Verdichtern ist hingegen ein höheres Fördervolumen von ca. 30-40% notwendig. Es sind geeignete Verdichter für Kältemittel mit besonderer Schmierölfüllung nötig. Die Rohrdurchmesser im Verdampfer und Arbeitsventile im Verdichter sollten gleichermaßen größer ausgeführt sein, da aufgrund der Dichte des Kältemitteldampfes und der damit zusammenhängenden Druckdifferenzen, diese größer sein sollten als für andere Kältemittel.

4.1.3 R404A

R404A kommt bei Anwendungen von Tiefkühltemperaturen und gewerblicher Kälte zum Einsatz. Dieses Kältemittel kann ein breites Gebiet von Verdampfungstemperaturen ausgleichen. Leider ist das Treibhauspotenzial ist allerdings mit einem GWP von 3800 sehr hoch.

4.1.4 R407C

R407C gilt ein gutes Ersatzkältemittel für R22, wenn vergleichbare Kriterien der Auslegung gegeben sind. Allerdings handelt es sich um ein sogenanntes azeotropes Gemisch, d.h. einzelne Stoffe dieses Gemisches verdampfen bzw. verflüssigen bei ungleichen Temperaturen. Der Übergang von Wärme im Verdampfer oder Verflüssiger ist daher minderwertiger. Bei trockener Verdampfung in luftgekühlten Lamellenwärmetauschern ist dies jedoch nicht ausschlaggebend. Bei Leckagen verdunsten die Stoffe unterschiedlich stark. Dies hat erhebliche Auswirkungen auf die Leistungsfähigkeit des Kompressors.

4.1.5 R410A

Das Kältemittel R410A hat einen sehr breiten Einsatzbereich von Klimaanlage bis hin zu gewerblich genutzten Tieftemperaturanwendungen. Günstig sind die hohen Koeffizienten der Wärmeübertragung im Verdampfer und im Verflüssiger. Vom Nachteil ist der erforderliche hohe Druck der Verflüssigung von 25 Bar bei einer Verflüssigungstemperatur von ca. 41°C. (Infraserv GmbH & Co. Höchst KG 2022)

R134a, das Kältemittel der Fallbeispiel Kälteanlage

Die Kälteanlage des Fallbeispiels wird mit dem Kältemittel R134a versorgt. Das synthetische Kältemittel, wird hier nicht nur für die beiden Kältemaschinen verwendet, es kommt auch bei den beiden Wärmepumpen zum Einsatz. Diese beiden Wärmepumpen sind sowohl im Stande zu heizen als auch zu kühlen. Das Kältemittel R134a ist neben dem Kältemittel R410A eines der am meistens verwendeten Kältemittel und wurde wegen seiner nicht-ozonschädlichen Eigenschaften bei dem Fallbeispiel favorisiert. Leider weist dieses Mittel einen GWP-Wert (=Global Warming Potential) von 2088 an Treibhausgas auf.

Informationen über das Kältemittel R134a

Da der GWP-Wert des Kältemittels unter 2500 liegt, ist es von vielen zukünftigen Verboten der im Rahmen der geltenden EU-F-Verordnung nicht inkludiert, allerdings sorgen das Phase-Down-Szenario der Verordnung und die daraus resultierende Mengenbeschränkung der Kältemittel mit hohen GWP-Werten dafür, dass es zu einer steigenden Knappheit der Kältemittel kommen könnte. Das Kältemittel wurde als Ersatzkältemittel entwickelt, um die verbotenen R22-Anlagen abzudecken bzw. abzulösen. Das Gemisch weist fast die gleiche Verfahrensweise wie das HFCKW-haltige Kältemittel R22 auf. Dies hat zur Folge, dass der Preis für Kältemittel und auch für das R134a zukünftig in die Höhe gehen wird. D.h. dass, das Kühlen mit Hilfe einer mit R134a betriebenen Anlage in nächster Zeit teurer wird (Infraserv GmbH & Co. Höchst KG 2022).

Zukunftsweisen als Ersatzkältemittel könnte ein Drop-in-Kältemittel Abhilfe schaffen bzw. das Kältemittel R134a ersetzen. Dieses Mittel besitzt dieselben günstigen Eigenschaften, hat allerdings einen niedrigeren GWP-Wert mit 675.

Das Kältemittel R134a kann bis zum Jahr 2025 ohne Einschränkungen verwendet werden. Leider wird dieses Kältemittel aber in den nächsten Jahren, durch die zunehmende Mengenbeschränkung nicht so gut erhältlich sein und deshalb auch teurer werden. Eine Umrüstung auf ein alternatives Kühlmittel ist hier ratsam (Infraserv GmbH & Co. Höchst KG 2022).

4.1.6 Ammoniak

Das preisgünstige Kältemittel Ammoniak weist einen hohen energetischen Vorteil auf und ist zudem schwer brennbar. Normalerweise wird es mit überfluteter Verdampfung benutzt, da mischbare Öle noch nicht produziert wurden. Ammoniak wird in großen Kälteanlagen in der Industrie benutzt. Es wird aber nicht für kleinere Anwendungsbereiche wie in Supermärkten eingesetzt. Buntmetallen, wie z.B. Kupfer, finden hier keine Verwendung (Kulterer, Beschreibung eines Kälteprozesses 2007, 32-33).

4.2 Kriterien für Energieeffizienz von Kältemitteln

- Die Auswahl des Kältemittels (Art) kann die gesamte Effizienz des Systems, um bis zu 10% beeinflussen.
- Die Effektivität des Kältemittels auf die Wirksamkeit hängt vom Kompressor und den örtlichen Betriebsbedingungen ab
- Die Dosis des Kältemittels ist für die Leistung der Anlage ausschlaggebend, sowohl zu viel als auch zu wenig Kältemittel wirken sich schlecht aus.
- Bei Anlagenleckagen verliert das Kältesystem Kältemittel, und zu wenig Kältemittel im System führt zu einer Überhitzung im Verdampfer, was den Saugdruck reduziert und damit die erforderliche Erhöhung des Drucks anhebt.

- Bei Einschlüssen von Luft im Kältemittel kommt es zu einer Verringerung der Leistung (Kulterer, Beschreibung eines Kälteprozesses 2007, 33).

4.3 Verdampfung im allgemeinen Kältesystem

Das flüssige Kältemittel beginnt ab einer Temperatur von $-26,4^{\circ}\text{C}$ zu verdampfen. Bei diesem Wechsel des Aggregatzustandes entzieht es dem Umfeld z.B. bei einem Kühlschrank mit der Temperatur von 5°C Wärme (Pech und Jens, Heizung und Kühlung 2005, 66).

4.3.1 Gesetzliche Vorschriften

Laut Kulterer ist die Verwendung von teilhalogenierter FCKWs bzw. HFCKWs, wie z.B. R 22, als Kältemittel in Klima- und Kälteanlagen und in Neuanlagen seit dem 1. Jänner 2001 (unter Berücksichtigung zusätzlicher Unterscheidung und Fristen) untersagt. Ab 2010 ist zudem ein Anwendungsverbot zur Wartung und Instandhaltung noch bestehender Klima- und Kälteanlagen in Kraft getreten. Ab 2015 wurden alle H-FCKW verboten. Nähere Information sind in der Verordnung (EG) Nr. 2037/2000, HFCKW-Verordnung, BGBl. Nr. 750/1995 zu finden. Außerdem müssen ortsgebundene Anlagen, die mehr als 3g Kältemittel (FCKW, HFCKW) fassen können, einmal im Jahr auf Leckagen geprüft werden.

Für HFCKW sind für ortsgebundene Kälteanlagen bei einer Füllmenge von Kältemittel $> 3\text{kg}$ jährliche Kontrollen auf Dichtheit durchzuführen ($> 30\text{kg}$ immer $\frac{1}{2}$ jährlich und $> 300\text{kg}$ immer $\frac{1}{4}$ jährlich).

Gemäß §22 der Kälteanlagenverordnung müssen Anlagen einmal im Jahr einer Inspektion, betreffend, ihrer Betriebssicherheit, unterzogen werden. Ebenfalls ist ein Prüfbuch für jede Kühlanlage über 1,5kg Füllgewicht zu führen. In diesem Prüfbuch ist immer das Datum jeder Überprüfung einzutragen (§23) (Kulterer, Beschreibung eines Kälteprozesses 2007, 33-34).

5 Bauteile einer Kompressions-Kälteanlage

- Kältemittel-Verdichter = Kompressor → komprimiert Kältemittel
- Kältemittel-Verflüssiger = Kondensator → erwärmt Wärmeträger
- Kältemittel-Expansionsventil = Expansionsventil → entspannt Kältemittel
- Kältemittel-Verdampfer = Kühler → kühlt Kälte­träger

Abbildung 150.4-02: Bauteile einer Kompressions-Kälteanlage

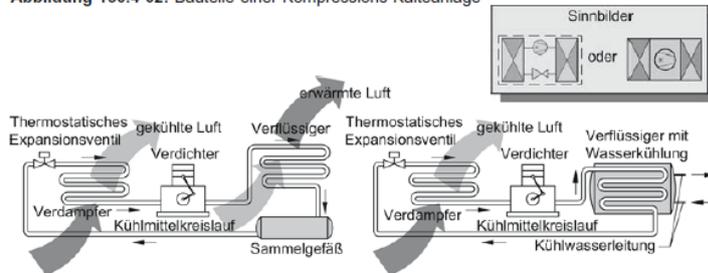


Abbildung 3.: Die Bauteile einer Kompressions-Kälteanlage (Pech und Jens, Heizung und Kühlung 2005, 67).

Folgendes ist hier zu beachten (Pech und Jens, Heizung und Kühlung 2005, 66):

- Die Temperatur der Kondensation wird niedriger, wenn die Kondensationsfläche größer ist und die Wärmeübertragung ohne Hindernisse ablaufen kann.
- Die Kondensationstemperatur wird mit der Temperatur der Umgebung nach unten geregelt.
- Wenn Wasser statt Luft als Kühlmedium in Verwendung tritt.
- Die Temperatur der Verdampfung wird höher, wenn die Fläche der Verdampfung größer ist und die Übertragung der Wärme ungehindert erfolgen kann, im Besonderen ohne Eis ist.

Folgende Faktoren haben auf die Leistung eines Kältesystems Einfluss (Kulterer, Beschreibung eines Kälteprozesses 2007, 9-10):

- Es gibt Abweichungen bei der Effizienz der unterschiedlichen Typen an Kompressoren. Die Typen müssen nach der Eigenschaft des Kältemittels, nach der Größe der Kühllast, nach der nötigen Temperatur und der mittleren Temperatur des Kühlträgers (Wasser oder Luft) ausgesucht werden.
- Die Dosis des Kältemittels hat eine erhebliche Wirkung auf die Höhe des Druckunterschiedes zwischen Druck- und Saugseite. Jene Systeme die undicht sind, oder auch überfüllte Kältesysteme, weisen geringere Leistungsziffern auf.
- Eine Überhitzung des Saugdampfes muss so gering wie möglich gehalten werden. Die Steuerung einer Überhitzung kann z.B. durch Expansionsventile verhindert werden.

- Das Kältemittel sollte vor der Entspannung unterkühlt werden. Hier ist wichtig, dass die Flüssigkeitsleitung nicht durch beheizte Räume verläuft.
- Die Auswahl des Kältemittels (Art) kann die gesamte Effizienz des Systems, um bis zu 10% beeinflussen.

5.1 Arten von Verdichtern

Die Ansaugung des Kaltgases aus dem Verdampfer erfolgt durch den Verdichter, um eine Drücksteigerung erzielen zu können. Aufgrund der Bündelung steigt der Siedepunkt des Kältemittels an. Kälteverdichter werden üblicherweise im Zentralmaschinenraum aufgestellt. Hier unterscheidet man von drei vorrangigen Typen: Kolben-, Schrauben- oder Turboverdichter (Kulterer, Beschreibung eines Kälteprozesses 2007, 11).

5.1.1 Kolbenkompressoren

In gewerblich genutzten Betrieben werden Verdichter mit beweglichen Kolben (Hubkolbenverdichter) regelmäßig verwendet.

Im durchschnittlichen Bereich der Leistung werden halbhermetische Verdichter verwendet, da bei diesen Verdichtern der Motor und der Verdichter in einem Gehäuse eingebaut sind. Diese Hülle ist, im Gegenteil zu den hermetischen Kolbenverdichtern nicht verschweißt. Sie ist verschraubt, um die inneren Komponenten besser bei etwaigen Defekten besser reparieren zu können.

Der zurückweichende Kolben löst im Zylinder einen Unterdruck gegen die Saugleitung aus. Dieser Vorgang macht, dass das Einlassventil sich öffnet und das Kältemittel mit Niederdruck in den Zylinder einströmt. Sobald der Kolben seinen Totpunkt erreicht hat und ihn überschreitet, steigt der Zylinderdruck an und das Einlassventil schließt sich. Das Auslassventil bleibt deshalb noch geschlossen, weil der Druck auf der Hochdruckseite, der Verflüssigerdruck, noch zu hoch ist. Das Kältemittel im Zylinder wird während der Komprimierung vom Verdampfungsdruck (Niederdruck) auf den Verflüssigerdruck (Hochdruck) gebündelt, also verdichtet. Sobald der Zylinderdruck den Verflüssigerdruck überschreitet, wird der hochgespannte Dampf ausgesondert. Der Vorzug eines Kolbenkompressor-Systems ist zu einem die bewährte Bauart und zum anderen die hohen Leistungsziffern. Die Nachteile sind der hohe Unterhaltsbedarf, die Vibration und die eher schlechte Regelbarkeit (Kulterer, Beschreibung eines Kälteprozesses 2007, 11).

5.1.2 Schraubenverdichter

Bei diesen Verdichtern verdichten achsparallele Rotoren den Kältemitteldampf durch form-schlüssige Zahnprofile in gegenseitig abdichtendem Eingriff (z. B. Hauptrotor konvex, Nebenrotor konkav verzahnt). Die Verdichtung wird durch die Position der Öffnungsränder bestimmt.

Schraubenkompressoren sind tendenziell kostspieliger als Kolbenkompressoren und etwas weniger effizient. Hierfür lässt sich die Leistung stufenlos und mit gutem Teillastwirkungsgrad regeln. Schraubenkompressoren werden im durchschnittlichen Leistungsbereich von 50kW bis 1000kW eingesetzt. Bei einer Leistung unter 60% ist der Kompressor meist ineffizient (Kulterer, Beschreibung eines Kälteprozesses 2007, 11).

5.1.3 Turbokompressoren

Bei diesen Verdichtern, die hohe Leistungen von mehreren MWs schaffen, sind Turbinenschaufeln auf einer rotierenden Welle angeordnet. Diese Verdichter erreichen gute Leistungswerte, sind aber nicht für alle Kältemittel wie z.B. Ammoniak verfügbar (Kulterer, Beschreibung eines Kälteprozesses 2007, 11-12).

Hier gilt für alle Verdichter (Kulterer, Beschreibung eines Kälteprozesses 2007, 12):

- „Je niedriger der Saugdruck, umso weniger Kältemitteldampf wird angesaugt.
- Je höher der Verflüssigungsdruck ist, umso weniger Kältemitteldampf wird ausgestoßen.
- Je größer der Druckunterschied zwischen Hoch- und Niederdruck ist, umso weniger Kältemitteldampf wird befördert.
- Je weniger Kältemittel befördert wird, umso geringer ist die Kälteleistung.“

Die Kälteleistung und damit die Leistungszahl ist daher umso höher (Kulterer, Beschreibung eines Kälteprozesses 2007, 12):

- „Je höher der Saugdruck (Verdampfungsdruck/-temperatur)
- Je niedriger der Verflüssigungsdruck (-temperatur)
- Je kleiner der Druckunterschied zwischen Hoch- und Niederdruck
- Je höher der mittlere Kolbendruck ist, umso größer muss die Antriebsleistung des Verdichters sein.“

5.1.4 Kühlung des Schmierölsystems für Schraubenverdichter

Schraubenverdichter brauchen Schmieröl, damit sie den Wärmestrom der Komprimierung bzw. der Verdichtung aufnehmen können und für das Schmieren und Abdichten der Flanke der Läufer bzw. zum Schmieren der Lager etc. Der Schmierölkreislauf wird bei Kälteanlagen meist extern ausgeführt.

Das Schmieröl kann durch mehrere Varianten gekühlt werden (Pech und Jens, Heizung und Kühlung 2005, 12):

- Wassergekühlte Kühler, diese benötigen zur Kühlung Frischwasser. Bei dieser Variante sind hohe Betriebskosten zu erwarten.
- Kühlung durch direkte Einspritzung des Kältemittels in die Arbeitsräume. Diese Variante benötigt zwischen 5 – 15% der Leistung des Kompressors, denn es sind bei luftgekühlten Verflüssigern höhere Druckunterschiede zu tragen.
- Kühlung mithilfe eines Thermosiphon, bei dieser Variante wird weniger Energie als bei der Einspritzung des Kältemittels gebraucht. Über ein natürliches Gefälle wird das flüssige Hochdruck-Kältemittel, ganz ohne Pumpen, aus dem Verflüssiger zum Wärmetauscher bzw. Ölkühler vorangetrieben. Bei diesem Vorgang kühlt das Öl ab. Über die Heißgasleitung wird der Dampf zum Kondensator geleitet. Hier ist darauf zu achten, dass der maximale Druckunterschied im Verflüssiger und im Wärmetauscher (Ölkühler) geringer als der Höhenunterschied der Flüssigkeitssäule ist.

5.1.5 Economizer

Der Economizer gehört zu der Kategorie der Unterkühler. Beim Economizer wird ein Anteil des Kältemittels, größtenteils 10% bis 20%, bei einer höheren Temperatur verdampft als im Hauptverdampfer. Zeitgleich wird der verbleibende Kältemittelstrom stark unterkühlt. Für einen stärkeren Saugdruck benötigen Schraubenverdichter einen zweiten Sauganschluss, der über dem Verdampfungsdruck liegen sollte. Der Kältemitteldampf, der in dieser Beschaffenheit angesaugt wird, wird über eine geringere Druckdifferenz komprimiert, also verdichtet. Bei diesem Prozess der Verdichtung wird Energie eingespart (SWEP International AB 2019).

Energieeffizienzkriterien für Verdichter:

- Die Effizienz unterschiedlicher Verdichter unterscheidet sich sehr markant, auch bei unterschiedlichen Bedingungen während des Betriebs. Bei der Wahl der Kompressoren sind auch die Zusatzkomponenten wie Ventilatoren zu kühlen zu beachten.
- Bei größerer Kühllast ist es meist effizienter, die Last auf diverse Verdichter mit einem Kontrollsystem aufzugliedern. Zum schnellen Wechsel der Last, wegen der Angleichung eines überdimensionierten Verdichters an die Last, führt zu einer geringeren Effizienz und zu einem schnelleren abnutzen.
- Das Vermeiden interner Regelungen, da Anlagenverbunde effizienter sind.
- Sofern die Regelung des einzelnen Verdichters notwendig ist: Nutzung aktueller Regelungsmethoden (z.B. Drehzahlregelung)

6 Antriebsmotoren

„Die erforderliche Leistung des Antriebmotors muss umso höher sein ...

- Je größer der Verdichter ist (Kolbenhub und/oder Zylinderdurchmesser)
- Je höher der Saugdruck ist
- Je höher der Verflüssigungsdruck ist
- Je höher die Drehfrequenz ist“

(Kulterer, Beschreibung eines Kälteprozesses 2007, 14)

Hier ist es wichtig zu verstehen, dass für einen identischen Verdichter je nach Betriebsbedingung oder Drehzahl, verschiedene starke Antriebsmotoren verwendet werden können.

Der Antriebsmotor einer Kälteanlage sollte gegen Vollast anlaufen können, vor allem wenn sich im Zylinder hochgespanntes Gas befindet. Um den Bedarf an Energie einer Kältemaschine weitgehend niedrig zu halten, wurden Spezialstrommotoren für den Antrieb konstruiert. Diese Motoren verfügen über eine sehr starke Zugkraft beim Anlaufen der Kältemaschine. Steigt die Drehfrequenz an, so fällt die Anlaufkraft auf die normale Zugkraft ab, somit wird weniger Energie vom Motor benötigt bzw. verbraucht. Größere Anlagen, die auch Tiefkühlzwecke durchführen können, sollten mit Startregelung ausgestattet werden.

Die Leistung eines Antriebmotors hat nichts mit der Leistung deiner Kälteanlage zu tun, denn eine Kälteanlage arbeitet dann am besten und effizientesten, wenn sie zum Erreichen der Kälteleistung die geringste Antriebsleistung braucht.

6.1 Keilriemenantrieb

Bei offenen Kälteverdichtern wird oft ein Keilriemen als Antrieb eingesetzt. Bei dieser Variante des Antriebs, also mittels Keilriemen, ist darauf zu achten, dass die Keilriemen Querkräfte auf die Wellenlager übertragen, die durch das Kugellager effizienter aufgefangen werden als durch die Gleitlager. Auf die Spannkraft der Keilriemen ist hier mit regelmäßigen Kontrollen zu achten, da es zu verstärkten Schwingungen kommen kann, wenn die Riemen zu sehr gedehnt sind. Wenn der Keilriemen über eine zu geringe Vorspannung verfügt, da führt dies zu einer mangelnden Übertragung der Leistung, zu einem abfallenden bzw. sinkenden Wirkungsgrad und damit auch zu einem frühzeitigen Verschleiß bzw. Defekt der Keilriemen. Andererseits sollte ein Keilriemen auch nicht zu kräftig gespannt werden, denn dies erhöht die Gefahr von Querbiegung oder führt zu einer erhöhten Beanspruchung der Zugträger. Auch eine vorzeitige Dehnung der Keilriemen und damit verbundene Schäden an den Wellenlager können eine Konsequenz sein.

6.2 Direktkupplung

Es ist aber auch möglich, dass ein offener Kältemittelverdichter, direkt von einem Elektromotor betrieben werden kann. Dies wird durch eine anpassungsfähige Kupplung umgesetzt. Wichtig ist es hier, dass der Verdichter für die beabsichtigte Motordrehfrequenz bemessen sein sollte. Hier liegt der Vorteil klar gegenüber anderen Antrieben beim Vermeiden der Übertragungsverluste.

Energieeffizienzkriterien für Antriebssystem:

- Der Einsatz höchst effizienter Motoren.
- Der Einsatz einer Direktkupplung bei von Kälteanlagen
- Auf eine regelmäßige Überprüfung und Nachspannung beim Einsatz von Keilriemen ist zu achten.

7 Leistungsregelung und Effizienz von Verdichtern

Die beste Möglichkeit, um Energie bei energetischen Systemen einzusparen, ist sie an den Bedarf der Nutzung anzupassen.

Klteinlagen sollten in Bezug auf die benötigte Kälteleistung auf die größtmöglichen Betriebsbedingungen, also auf den maximalen Temperaturhub (= Die Temperaturdifferenz der Wärmequelle, oder dem Verdampfer und der Vorlauf­temperatur des aufgeheizten Wassers, dem Verflüssiger, auf deren Niveau die Wrmpumpe die Temperatur anheben muss) ausgelegt werden. Hier kann es dazu führen, dass die Klteinlage für alle anderen Betriebszustände zu gro dimensioniert ist, d.h. die Anlage hat zu viel Leistung. Es ist wichtig eine Überdimensionierung der Klteinlage zu vermeiden, da eine adquate Leistungsregelung einer der besten und bedeutsamsten Maßnahmen für die Effizienz ist.

Für eine Regelungsauswahl gibt es noch weitere Kriterien, wie die Qualität der Regelung, die Ausgaben, die Betriebssicherheit, der Anwendungsbereich des Kompressors, die Mindestlaufzeit und die Belastung des Stromnetzes.

7.1 Externe Regelungsmöglichkeiten

7.1.1 Saugdrossel

Die Saugdrosselregelungen kommen wegen ihres hohen Saugdrucks meist bei Klimaanwendungen zum Einsatz. Aufgrund des Drosselungseffektes in der Saugleitung wird der Saugdruck für den Kompressor verfälscht herabgesenkt. Der daraus resultierende Druck der Verdampfung wird hierbei nur indirekt durch die niedrigere Leistung an Kälte bestimmt. Der Prozess der Verdichtung wird hier aus energetischer Sicht durch das höhere Druckverhältnis negativ beeinträchtigt.

7.1.2 Externer Bypass

Ein externer Bypass kann meist bei Klima- und Normalkühlung durch eine schlichte Rohrleitung zwischen der Nieder- und Hochdruckleitung ausgeführt werden. Um eine permanente Anpassung der Kälteleistung zu ermöglichen wird der Bypass durch ein vom Verdampfungsdruck geregeltes Ventil geschlossen und geöffnet. Zu beachten ist hier, dass bei Tiefkühl­anwendungen ein weiteres Flüssigkeits-Nachspritzenventil nötig ist. Auch eine direkte Rückführung zur Verdampfer-Eintrittsseite ist hier umsetzbar.

Das Fallbeispiel verfügt über einen externen Bypass, um mehr Effizienz im Betrieb aufbringen zu können.

7.1.3 Aussetzregelung

Das Ein- und Ausschalten der Kältemaschine ist die einfachste Art das System zu steuern. Bei häufigen Ein- und Ausschaltprozessen wird der Motor gegen Last angefahren, dies führt

aufgrund der hohen Schalthäufigkeit zu stark schwankenden Betriebsbedingungen und kann die Lebensdauer der Maschine erheblich herabsenken. Auch die Lebensdauer von Verdichter und den Systemkomponenten ist durch häufige Ein- und Ausschaltprozesse stark beeinträchtigt. Durch Pufferspeicher ist es möglich die Taktzahl zu vermindern, da die Leistungszahl von der Kondensations- und Verdampfungstemperatur abhängt. Mithilfe der Aussetzregelung ist es oft nicht möglich die Kälteanlage in unterschiedlichen Betriebspunkten optimal zu betreiben, daher erhöht dieses Verfahren die Betriebskosten.

7.2 Hubkolbenverdichter

7.2.1 Integrierter Bypass

Bei alten Modellen von halbhermetischen Kompressoren wurde meistens die integrierte Schaltung des Bypasses benutzt. In den Zylindern, die es zu entlasten gilt, wird eine Anbindung zwischen der Niederdruckkammer und der Hochdruckkammer erzeugt, sodass die Gasförderung unterbrochen und dadurch der Verflüssigungsdruck herabgesetzt werden kann. Die Effizienz ist aufgrund der hohen Strömungsverluste nicht günstig, da die thermische Strapazierung enorm ist. Die Aufnahme der Leistung des Kompressors bei Teillast vermindert sich kaum.

7.3 Systeme zum Anheben der Saugarbeitsventile

7.3.1 Schadraum-Regelung

Die Schadraum-Regelung dient dazu, um beim Verdichtungsprozess einen Teil des Gasstroms in einen weiteren Druckraum zu befördern. Hier strömt beim Abwärtshub das Gas wieder retour. Dieser Vorgang reduziert die Zylinderfüllung und wird bei Verdichtern mit weniger als drei Zylindern angewendet. Leider führen die hohen Rückexpansionsverluste zu einem verstärkten Absinken im Teillast-Wirkungsgrad.

7.3.2 Schließen der Saugventile

Die am meisten benutzte integrierte Regelung der Leistung für Hubkolben-Verdichter, vor allem bei einer gewerblichen Nutzung, ist das Absperren des Saugkanals bzw. die Drosselung des Ansaugdrucks. Um die Saugventile anzuheben, werden umgekehrt diese bei dieser Schaltung zu gemacht, also geschlossen. Die Kolben laufen hier ohne Gasdruck leer mit, da der Gasfluss unterbrochen wird, mithilfe dieses Prozesses können Strömungsverluste verhindert werden und die Leistungsaufnahme des Motors verringert sich fast gleichmäßig zur Reduktion der Leistung.

7.4 Schraubenverdichter

7.4.1 Interner Bypass

Bei Systemen mit einem internen Bypass werden radial gegliederte Bohrungen in den Profildbereich festgesetzt, diese sind mit einem steuerbaren Ventil zur Saugseite hin öffnbar. Das vorverdichtete Gas strömt dann im Teillastbetrieb wieder zur Saugkammer retour und vermindert dadurch den Förderstrom. Wird der Querschnitt der Bohrung erhöht, so kann dies zu einer Leckage bzw. Undichtheit bei der Verdichtung während des Volllastbetriebes kommen. Während des Regelbetriebes kann es zu Verlusten durch Vorverdichtung und einen zu hohem Strömungswiderstand kommen.

Hubkolbenverdichter	Schraubenverdichter
Abhebung der Saugventile	Interner Bypass
Interner Bypass	Interne Reglerkolben
Vergrößerung des Zylinder-Schadraums	Parallel zur Rotorachse bewegter Regelschieber
Absperrung des Ansaugkanals zu einzelnen Zylindern	Drehzahlregelung
Drehzahlregelung	

Abbildung 4.: Hubkolbenverdichter vs. Schraubenverdichter (BITZER Kühlmaschinen GmbH 2016, 4).

7.4.2 Steuerkolben

Leider greifen überdimensionierte Steuerkolben direkt in den Profildbereich ein. Hier können interne Leckagen beim Verdichten vermieden werden, indem die Steuerkolben an die Kontur des Rotorgehäuses angepasst werden.

7.4.3 Regelschieber

Mithilfe einer Schiebersteuerung ist es möglich, vor allem bei größeren Schraubenaggregaten, die Leistungsregelung stufig bzw. bei größeren Schrauben auch kontinuierlich zu einer minimalen Leistung von ca. 10% zu reduzieren. Somit befindet sich während des Volllastbetriebs der Schieber in der Anschlagposition. Der ganze Profilarbeitsraum füllt sich bei der Dehnung der Rotoren mit Sauggas und ist dadurch im Stande die gesamte Förderleitung zu erzielen. Wird der Schieber immer weiter zur Hochdruckseite hinbewegt, so verringert sich das verfügbare Profilvervolumen. Da weniger Volumen angesaugt wird, verringert sich auch die Kälteleistung der Anlage. Die Steuerung ist nur bei einer Leistung von über 50% effizient, sobald die Steuerung unter 50% liegt, fällt die Leistungszahl enorm ab. Die Regelschieber-Variante ist deutlich kostengünstiger als die Drehzahlregelung.

7.5 Drehzahlregelung

Die Leistung an Kälte der Kälteanlage wird vorwiegend durch den geförderten Kältevolumenstrom angegeben.

Über das Jahr verteilt kann es schon dazu kommen, dass der Kältebedarf von den Anlagen oft variiert und nicht gleichbleibend ist. Die Drehzahlregelung dient dazu, die Leistung des Verdichters an den notwendigen Bedarf anzupassen und er sorgt auch dafür, dass er mit keiner zu hohen Drehzahl arbeitet. Obwohl die Systemdrücke bei Drehzahlregelung in der Kältemaschine bei Lastschwankungen konstant bleiben, können viele Vorteile erzielt werden, wie z.B. eine Energieeinsparung durch die Anhebung der Temperatur des Verdampfers, die Optimierung der Kondensationstemperatur, die Reduktion des Vereisungsgrades des Verdampfers und der verlängerten Abtauintervalle, die Kühlleistung wird gesteigert, die Temperaturschwankungen an den Kühlstellen nehmen ab und dadurch wird auch die Kühlgutqualität angehoben.

Weiters ist anzumerken, dass es vom Vorteil ist, dass bei der Wahl von Kälteanlagenverdichtern aus Gründen der Sicherheit oft der größtmögliche zu erwartende Bedarf vorausgesetzt wird. Dies führt leider zu einer Überdimensionierung der Maschine. Bei der Wahl einer Anlage, die eine variable Drehzahl hat, kann für die gewünschte Leistung des Systems geringer dimensioniert werden, diese Variante ist natürlich die Kostengünstigere.

7.5.1 Anlagenparallelverbund

Wenn man die Gesamtleistung auf mehrere Verdichter aufteilt, dann bringt dies sehr viele Vorteile mit sich, wie z.B. die Anpassung der Leistung an den Kältebedarf, sobald einzelner Verdichter ein- und ausgeschaltet werden. Die Leistungszahlen steigen in der Zwischenzeit bei der Nutzung der gemeinsamen Verdampfer und Kondensatoren an. Die Antriebsleistungsspitzen werden verringert und die Ausfallsicherheit ist gegeben und ermöglicht eine effizientere Wartung der Anlage.

Eine entsprechende Anzahl an Verdichtern und die vorhandene Leistungsgröße wirkt sich durch eine smarte Steuerung positiv auf die Regelgüte aus. Um eine gleichmäßige Abnutzung der Aggregate zu erreichen, bewährt sich oft eine Folgesteuerung bei den gleichen Betriebsstunden der Verdichter.

7.5.2 Gesamtregelung

Eine ökonomische Teillastregelung erfordert ein kontrolliertes Absenken des Verflüssigungsdrucks und ein Anheben des Saugdrucks. Ebenfalls muss der Bedarf an Energie für Hilfsantriebe (Pumpen, Ventilatoren) genau bilanziert werden, diese sollten ebenfalls geregelt werden.

8 Kondensatoren oder auch Verflüssiger

Der Wärmetauscher, der getrennt von der Kälteanlage ist, ist für die Abfuhr der Wärme vom Kältemittel an die Umgebung verantwortlich. Die Verflüssigungsarbeit der Kälteanlage ist das Resultat aus der Verdampfungsarbeit und der in Wärme transformierte Arbeit des Antriebsmotors des Verdichters. D.h., dass am Verflüssiger mehr Wärme abgegeben wird als im Verdampfer aufgenommen wird. Erst bei einer Temperaturdifferenz kann ein Wärmestrom fließen, daher sollte die Temperatur des Verflüssigers immer über der Temperatur des Kühlmittels, also der Umgebungsluft oder dem Wasser, liegen. Bei sehr hohen Temperaturen wird das unter Druck stehende Kältemittel im Kondensator verflüssigt. Der Kältemitteldampf durchfließt hier drei Abschnitte bei immer konstantem Druck. Die Enthitzungszone, in der das überhitzte gasförmige Kältemittel auf Verflüssigertemperatur gebracht wird, dann die Verflüssigerzone, in der die Verflüssigung bei konstanter Temperatur passiert und die Unterkühlungszone, in der die Abkühlung des flüssigen Kältemittels unter die Verflüssigertemperatur fällt. Hier tritt das flüssige Kältemittel aus dem Kondensator mit sehr hohem Druck und bei mittlerer Temperatur heraus.

8.1 Luftgekühlte Verflüssiger

Die Verflüssigungstemperatur und der Verflüssigungsdruck ist von mehreren Faktoren abhängig, denn je geringer der Verflüssigungsdruck, desto höher ist die Energieeffizienz. Hier ist darauf zu achten, dass der Verflüssigungsdruck immer so hoch sein sollte, dass die Verflüssigungstemperatur über der Temperatur der Umgebung liegt, weil sonst die Wärme aus dem Verflüssiger in die Umgebung nicht fließen kann. Wichtig ist auch, dass je größer die Verflüssigeroberfläche ist, desto niedriger kann die Temperatur der Verflüssigung und der damit verbundene Verflüssigungsdruck sich befinden und umso größer ist auch die Leistung der Kältemaschine.

Die Temperatur des Verflüssigers sollte ehestmöglich niedrig gehalten werden, da sie zur Steigerung der Kälteleistung beiträgt, d.h. die Temperatur der Kühlluft des Verflüssigers sollte ehestmöglich niedrig gehalten werden. Hier ist es also wichtig, dass der Verflüssiger an einer Stelle steht, an dem die Luft zum Kühlen gering ist und die erwärmte Luft leicht wegströmen kann. Daher sollte der Verflüssiger nicht in warmen kleinen Räumen aufgestellt werden, oder an der Sonne, unter Treppen und im Keller.

Die Temperatur des Kühlmediums erhöht sich, solange es das Kältemittel gekühlt hält. Diese Steigerung der Temperatur sollte so niedrig wie nur möglich erfolgen und kann auch durch einen erhöhten Kühlmittelstrom erzielt werden. Bei diesem Prozess sollte vor allem auf den Energieverbrauch der Ventilatoren und der Pumpen geachtet werden, da diese zusätzlichen Strom benötigen.

8.1.1 Druckregelung von Verflüssigern

Damit die Kälteanlage bestmöglich und am effektivsten arbeiten kann, sollte der Verflüssigungsdruck immer an der untersten Grenze liegen, die möglich ist. Ist die Leistungszahl gering, so weist dies auf einen hohen Verflüssigungsdruck hin, bei dem die Antriebsleistung für den Verdichter zeitgleich höher werden muss. Die Begrenzungs- und Sicherheitseinrichtungen dienen dazu den Motor möglichen Schäden zu schützen. Fest steht aber, dass ein zu tiefer Verflüssigungsdruck schwerwiegende Nachteile für die Kälteanlage mit sich bringt, denn durch das Expansionsventil läuft nicht mehr der erforderliche Kältestrom und der Kühler wird nicht ausreichend versorgt. Dies führt zu einer Minderleistung der Kälteanlage. D.h., dass die Leistung der Anlage nur so lange ansteigt, solange der Verflüssigungsdruck, über den am niedrigsten zulässigen Druck des Expansionsventils gesenkt wird.

8.1.2 Luftgekühlter Verflüssiger und ihre Kältemittelseitige Regelung

Sollte der Soll-Verflüssigungsdruck unterschritten werden, so leitet der Regler mithilfe eines Bypasses des Verflüssigers den zu heißen Kältemitteldampf genau in den Flüssigkeitssammler. Dies führt zu einer Stauung des flüssigen Kältemittels im Verflüssiger, d.h., dass der Flüssigkeitssammler für das verflüssigte Kältemittel versperrt ist. Die führt zu einem höheren Verflüssigungsdruck.

Allerdings sollte für diese Regelung eine große Füllmasse und damit ein großer Flüssigkeitssammler vorhanden sein, damit auch bei geflutetem Verflüssiger im Flüssigkeitssammler immer noch der minimale Stand der Flüssigkeit vorhanden ist.

„Auf einen gewünschten Verflüssigungsdruck einstellbare Regler werden zwischen Verflüssiger und Flüssigkeitsraum eingebaut. Sinkt der Druck am Eintritt unter den eingestellten, schließt der Regler und regelt damit den Verflüssigungsdruck. Hier ist ein großer Flüssigkeitssammler zu wählen.“ (Kulterer, Beschreibung eines Kälteprozesses 2007, 22)

Für das Arbeiten der Kälteanlage ist auch der Druck vor dem Expansionsventil wichtig. Der Druck sollte nicht zu niedrig sein. Sollte der Flüssigkeitssammler im Freien aufgestellt werden, so ist mit einer sinkenden Temperatur der Umgebung zu rechnen. Somit ist auch der Sättigungsdruck der Flüssigkeit niedriger. Aus diesem Grund sollte ein zusätzliches Konstant-Druckventil im Bypass zwischen Verflüssiger und Regler eingebaut werden. Die Nachteile von großen Flüssigkeitssammler können eine höhere Umweltbelastung durch zusätzliche Füllung an Kältemittel sein (Kulterer, Beschreibung eines Kälteprozesses 2007, 22).

8.1.3 Luftseitige Regelung

Die luftseitige Regelung vermeidet die Beeinträchtigung der kältemittelseitigen Regelung, denn bei dieser Regelung werden kurzerhand Lüfter an die Druckschalter, die wiederum an

die Druckleitung angeschlossen sind, entweder aus- oder eingeschaltet. Lüfter können auch abhängig von der Außenluft, thermostatisch angesteuert werden, da die Thermostate für die einzelnen Lüfter gestuft eingestellt werden können. Folgende Details, wie die plötzliche Senkung des Verflüssigungsdrucks sollte vermieden werden und es ist auf den Abluftstrom jedes einzelnen Lüfters zu achten, da deren Abluftstrom nicht durch die abgeschalteten Lüfter laufen sollte. Jedoch können drehfrequenzgeregelter Lüfter in Abhängigkeit mit dem Verflüssigungsdruck kontinuierlich gesteuert werden, da durch diesen Prozess abrupte Veränderungen des Drucks reduziert werden können. Die Vorteile von Axialventilatoren sind hier die längere Lebenserwartung der Antriebsmotoren, der geringere Schalleistungspegel und der geringe Verbrauch an Energie.

8.2 Wassergekühlte Verflüssiger

Der wassergekühlte Verflüssiger dient dazu, dass die Wärme des kondensierenden Kältemittels durch das Kühlwasser aufgenommen wird. Genauso wie beim luftgekühlten Verflüssiger kühlt sich das gasförmige Kältemittel ab und kondensiert erst später. Die Temperatur des Verflüssigers sollte immer höher sein als die Temperatur des Kühlwassereintritts, da die Abfuhr der Wärme dadurch gewährleistet wird. Das Kühlwasser sollte immer kälter als die Luft sein, somit wird auch gewährleistet, dass die Verflüssigungstemperatur und Druck auch niedriger gehalten werden können. Damit können höhere Leistungsziffern für Verdichter mit wassergekühlten Verflüssigern erzielt werden. Der Druck der Verflüssigung stellt sich aus der Kühlwassereintrittstemperatur und der Kühlwasseraustrittstemperatur zusammen, der auch mit der Oberfläche des Verflüssigers und der zu kondensierenden Menge an Kältemittel zusammenhängt. Durch eine größere Oberfläche des Verflüssigers ist es also möglich den Verflüssigungsdruck geringer zu halten und gleichzeitig die Leistung der Kälteanlage zu optimieren und zu steigern.

Steigt die Wassermenge an, so kann mehr Wärme aufgenommen werden und somit ist auch der Anstieg der Kühlwassertemperatur geringer. Sobald die Zufuhr von Wasser blockiert wird, steigt die mittlere Wassertemperatur und die Verflüssigungstemperatur an. Die passende Menge an Wasser sollte durch ein Regulierungsventil für das Kühlwasser dosiert werden. Dieses Ventil kann die Wassermenge, abhängig vom Verflüssigungsdruck, regeln.

Sollte das Wasser jedoch verschmutzt sein oder die Rohre des Verflüssigers verkalkt sein, ist es wichtig mindestens einmal im Jahr eine Reinigung der Rohre durchzuführen. Hier spricht man auch von einem sogenannten Verschmutzungsfaktor, dieser gilt berücksichtigt zu werden.

8.2.1 Kühltürme | Kühlwasser-Rückkühler

„Kühltürme ermöglichen es, den Wasserverbrauch für wassergekühlte Verflüssiger, um bis zu 95% zu reduzieren. Das vom Verflüssiger kommende Wasser wird zum oberen Teil des

Kühlturms gepumpt und versprüht. Ein kleiner Prozentsatz des Wassers verdunstet und entzieht dabei dem übrigen Wasser die Wärme, die Luft nimmt den Wasserdampf auf. Am Boden des Kühlturms wird das Wasser gesammelt und wieder zum Verflüssiger gepumpt. Während Kühltürme mit statischer Belüftung nur für sehr große Kälteleistungen zu finden sind, unterscheidet man bei den zwangsbelüfteten solche die axial- oder radial belüftet werden.

Klarerweise sollte ein Kühlturm nur dort aufgestellt werden, wo:

- Genügend freier Raum zur Luftzirkulation vorhanden ist
- Die austretende Luft keine Kondensation auf anderen Flächen verursacht
- kein Warmluftstrom oder stark verschmutzte Luft vorhanden ist

Der Stromverbrauch für Pumpen und Lüfter (Ventilatoren) stellen bei dieser Technologie den überwiegenden Teil des Energieverbrauchs dar. Die Ventilatoren zur Regelung des Luftstroms im Kühlturm könnten in Abhängigkeit der erforderlichen Kälteleistung durch polumschaltbare Elektromotoren, Ein- Ausschaltregelung oder Frequenzumrichter geregelt werden.

Im Falle einer gewünschten Teilkälteleistung oder einer niedrigeren Temperatur kann der Kühlwassereintrittstemperatur auch erhöht werden, indem durch Bypass der aus dem Verflüssiger kommende Wasserstrom wieder in den Verflüssiger zurückströmt.“ (Kulterer, Beschreibung eines Kälteprozesses 2007, 23)

8.2.2 Kühlturm des Fallbeispiels

Das Kältesystem des Fallbeispiels verfügt über einen Kühlturm. In diesem Kühlturm werden große Mengen an Wasser gekühlt. Diese Wassermengen zirkulieren in dieser Kühlwasseranlage. Hier besteht der primäre Zweck der Anlage darin, dass Wärme durch das Verdampfen von Kühlwasser an die Außenluft abgegeben wird. Der Kühlturm wird mit dem erhitzten Wasser aus Quellen, z.B. aus dem Wasser der Maschinen oder dem Wasser, das zur Prozesskühlung dient, gespeist. Das Wasser wird im Kühlturm durch innenliegende Düsen versprüht, um für eine größere Verdunstungsfläche zu sorgen.

Hier kam es im Juli 2021 zu einem Defekt des Leitwertsensors, der als wartungsfrei deklariert wurde. Dieser Leitwertsensor dient in erster Linie zur Überwachung des Abschlämmens im Inneren des Kühlturms. Der defekte Leitwertsensor gab an das Kühlsystem den ständigen Befehl des Abschlämmens, was zu permanenten Störungen der größeren Kältemaschine (KM1) kam. Die größere Kältemaschine (KM1), mit einer Leistung von 3MW/h, ist in kurzen Abständen immer wieder in Pendelschaltung gefahren. In weiterer Folge verursachte diese Pendelschaltung einen Defekt an der Rückschlagklappe der Anlagen. Die KM1 musste daraufhin den restlichen Sommer außer Betrieb genommen werden. Mithilfe der beiden, 2019 auf Redundanz, umgebauten Wärmepumpen und der kleineren Kältemaschine (KM2), mit einer

Leistung von 750kW/h, konnten 2021 die darauffolgenden Hitzetage nur schwer überbrückt werden. Die KM2 fuhr fast täglich, wenn der Leistungsbedarf an Kälte stieg, immer durchgehend auf 100% Kälteleistung. Dies hatte wiederum zur Folge, dass auch hier die Rückschlagklappe dieser Anlage verschlissen wurde. (siehe auch S.38 – Problembeschreibung des Fallbeispiels).

In den folgenden Tagen und Wochen wurde viele Lösungsansätze durchbesprochen. Eine Möglichkeit wäre es gewesen einen zweiten Leitwertsensor im Kühlturm anzubringen. In Folge wären beide Leitwertsensoren auf die GLT aufgeschaltet worden, um einen Mittelwert für den Abschlämmprozess ermitteln zu können bzw. hätte der zweite Sensor den Zweck als Redundant erfüllt. Dieser Lösungsansatz wurde aus Gründen des minimalen Nutzens nicht umgesetzt. Erwähnt wird hier, dass erst durch die Maßnahme eines Probetriebes der Projektbeteiligten der Fehler bzw. der defekte Leitwertsensor ausgemacht werden konnte. Dieser wurde ersetzt und auch die beiden Kältemaschinen wurden repariert.

8.3 Verdunstungs-Verflüssiger

Die Lamellen bzw. die Verflüssigerrohrschlangen bei den Verdunstungsverflüssigern werden ergänzend zur Kühlung mit Wasser und Luft besprüht. Bei diesem Vorgang verdampft das Wasser und entzieht auf diese Weise dem Kältemittel die Wärme. D.h. der Verflüssiger ist eine Mischung aus Kühlturm und luftgekühltem Verflüssiger. Die frische Luft wird im Gegenstrom vom zerstäubten Wasser von unten angesaugt, gesättigt, erwärmt und strömt danach ab. Am Auslauf ist ein Tröpfchenabscheider montiert, der die Wassertröpfchen daran hindert mitgerissen zu werden. Die Druckdifferenz wird mithilfe eines Radiallüfters überbrückt. Die Steuerung verläuft über ein Schwimmerventil. Beim Schwimmerventil ist die Wasserhöhe exakt eingestellt, um die ein Überschwappen des Wassers aus der Sammelwanne zu verhindern. Für das Aufstellen im Freien und im Betrieb während des Winters sind eigene Maßnahmen zu treffen, denn vor allem im Winter fällt die Leistung auf ca. 50% herab, was eigentlich kaum zu Problemen führt, da eine geringere Leistung notwendig ist.

Bei Verdunstungsverflüssigern begrenzt sich die zu pumpende Menge an Wasser auf die versprühte Wassermenge. Die Antriebsleistung, die gebraucht wird, ist somit im Vergleich zu Kühltürmen mit gleicher Leistung schlechter. Für die beiden Anwendungen ist die Antriebsleistung für die Ventilatoren vergleichbar. Wenn der Verdunstungsverflüssiger so nahe wie möglich am Verdichter aufgestellt wird, können lange Wege des Kältemittels vermieden werden.

Eine Möglichkeit, um den Verflüssigungsdruck zu regeln ist die Ein- und Ausschaltung der Lüfter, da der Verflüssigungsdruck unter den eingestellten Soll-Wert sinkt und der Lüfter dadurch ausgeschaltet wird. Jedoch sollten die Pumpen für den Wasserstrom angeschaltet bleiben.

Es gibt aber auch die modulierenden Klappen. Diese Klappen sind in der Lage den Luftstrom am Eintritt in den Verflüssiger, abhängig vom notwendigen Verflüssigungsdruck, zu regeln.

Die Energieeffizienzkriterien eines Verflüssigers sind (Kulterer, Beschreibung eines Kälteprozesses 2007, 25):

- „Alle Arten von Verflüssigern haben einen relevanten Energieverbrauch, der berücksichtigt werden muss: Ventilatoren bei luftgekühlten Verflüssigern, Pumpen bei wassergekühlten Verflüssigern oder beides bei Verdunstungs-Verflüssigern.
- Je größer die Verflüssiger-Oberfläche, desto näher die Verflüssigungstemperatur an der Kühlmedium-Temperatur; diese niedrigere Temperatur führt zu höherer Effizienz (pro K rund 1-2% Energieeinsparung)
- Der Wärmeaustausch an der Verflüssiger-Oberfläche muss ungehindert erfolgen: Luftgekühlte Anlagen sollen daher frei von Schmutz sein; Rohre im Wasserkühler frei von Korrosion und Ablagerungen (Kühlwasser muss daher oft behandelt werden)
- Luft und Bestandteile im Kältemittel, die nicht kondensiert sind, verringern die Wärmeübertragung. Gute Installationen können dies vermeiden. Systeme mit Saugdrücken unter dem Umgebungsdruck müssen regelmäßig, am besten automatisch entlüftet werden.
- Um die Kondensationstemperatur an die Umgebungstemperatur anzupassen (Nacht, Winter), sollten entsprechende Regelungsmechanismen (z.B. elektronische Expansionsventile) eingesetzt werden. Diese verhindern Probleme mit starken Druckschwankungen im System, die bei einigen Expansionsventilen auftreten könnten.
- Weitere Regelungsmöglichkeiten wie drehzahlregelte Ventilatoren oder stufenweise Abschaltung von Ventilatoren sollen genutzt werden.“

9 Ventile

9.1 Entspannungsventile

Das flüssige Kältemittel wird im Expansionsventil aus dem Flüssigkeitssammler bzw. aus dem Verflüssiger von hoher Temperatur und hohem Druck auf niedrigere Temperaturen und auf einen niedrigeren Druck für den Verdampfer normalisiert. Darunter versteht man auch den Verdampfungsdruck und die Verdampfungstemperatur. Hier verdampft teilweise schon das Kältemittel und kühlt dabei das restliche Kältemittel ab. Dadurch, dass der Druck des Kältemittels absinkt, wird auch die Siedetemperatur herabgesetzt, da das Kältemittel später auch bei einer niedrigeren Temperatur wieder verdampfen kann. Hier ist es von Bedeutung, dass je nach Betriebszustand vom Kühler, Kältemittelstrom verfügbar ist, da dieser für die Verdampfung nötig ist, denn eine zu große Überhitzung während des Betriebs im Kühler bedeutet, dass der Kältemittelstrom des Kühlers geringer ist und hier eine ineffiziente Nutzung der Kühlerfläche besteht. Weitere Folgen können eine niedrigere Temperatur der Verdampfung und eine geringere Kältezahl sein.

Eine geringe Betriebsüberhitzung besagt einen hohen Kältemittelstrom und eine gute Ausnutzung der Fläche des Kühlers, sodass eine höhere Verdampfungstemperatur und eine höhere Kältezahl erreicht werden.

9.1.1 Handexpansionsventil

Ein handgesteuertes Expansionsventil wird vor allem in größeren Kältesystemen mit Gleichbleibender Last eingesetzt. Dieses Ventil muss nachgestellt werden, sobald es zu Veränderungen der Lasten kommt.

9.1.2 Automatisches Expansionsventil

Ein Expansionsventil, das automatisch arbeitet, wird nur in Kälteanlagen mit einem konstanten Wärmestrom zum Luftkühler eingesetzt, denn hier spielen die ökonomischen Aspekte eine eher geringe Rolle. Ein automatisches Expansionsventil kann den Verdampfungsdruck und auch die Temperatur bei sich wechselnden Betriebsbedingung der Kälteanlage selbstständig ausgleichen.

9.1.3 Konstant-Druckexpansionsventil

Dieses Ventil hält den Verdampfungsdruck und damit die Verdampfungstemperatur stabil. Hier ist es nicht von Bedeutung wie die Verhältnisse der Temperatur an der Kühlstelle sind, denn ein Teil der Oberfläche des Verdampfers wird bei einer Unterfüllung mit Kältemittel nicht für eine Wärmeübertragung gebraucht. Das Konstant-Druckexpansionsventil eignet sich bevorzugt für kleinere Kühlanlagen mit einem ausgewogenem Lastprofil.

9.1.4 Thermostatisches Expansionsventil

Das am meisten verwendete Ventil ist das TEV (thermostatische Expansionsventil) und es dient zur Regulierung einer einzustellenden Temperaturdifferenz zwischen dem Anfang des Verdampfers und dem Ende des Verdampfers, also sobald die Anlage überhitzt. Das Ventil sorgt dafür, dass ebenso viel Kältemittel dosiert wird, wie auch verdampft werden kann. Der Temperaturunterschied bleibt gleich, wobei die Verdampfungstemperatur und die Kühlstellentemperatur variieren. Die gesamte Oberfläche des Verdampfers wird zur Übertragung der Wärme benötigt. Das Ventil ist leider bei Verdampfern, in denen der Druckabfall groß ist, nicht geeignet (SCHIESSL Kältegesellschaft m.b.H 2013, 12).

9.1.5 Elektronisches Expansionsventil

Per Signal, das vom elektronischen Temperatursensor kommt, wird das Öffnen und Schließung der Ausflussöffnung veranlasst. Expansionsventile sind sehr kostspielig als herkömmliche Ventile, sie zahlen sich aber für größere Kälteanlagen und Systeme aus, denn mithilfe dieser Ventile ist es möglich die Überhitzung genauer einstellen zu können und über einen größeren Bereich von Kondensations- und Verdampfungsdrücken ausgleichen zu können (Rosenkranz 2020).

9.2 Niederdruck-Schwimmerventil

Der Niederdruckschwimmer ist auf der Niederdruckseite des Systems verortet, also exakt im überfluteten Verdampfer. Der Stand der Flüssigkeit in der Schwimmerkammer ist mit dem Verdampfer verbunden. Steigt die Last im Verdampfer an, wird mehr Kältemittel verdampft und der Flüssigkeitsspiegel fällt ab. Der fallende Schwimmer macht das Ventil auf, somit fließt mehr Flüssigkeit in den Verdampfer.

9.3 Hochdruck-Schwimmerventil

Das Hochdruck-Schwimmerventil dient als Blockade in Kälteanlagen mit nur einem Verdampfer und Verflüssiger. Es befindet sich auf der Hochdruckseite des Systems, also nach dem Verflüssiger. Das Ventil öffnet sich, sobald der Flüssigkeitsspiegel ansteigt. Hier sollte auf die exakte Menge an Kältemittel geachtet werden.

9.4 Kapillardrosselrohr

Die Kapillare bzw. das Kapillardrosselrohr stellt durch die Variation des Durchmessers und der Länge das angestrebte Verhältnis des Drucks und die angestrebte Masse des Durchstroms ein. Diese Rohre sind schlicht und ausfallsicher, allerdings nur für einen bestimmten Anwendungsbereich berechnet. Sie werden eher für kleinere Leistungen und gleichbleibende Betriebsverhältnisse eingestellt bzw. finden sich in Kombination mit anderen Drosselorganen. (Gewerbe- und Haushaltskühlschränke etc.) (Kulterer, Beschreibung eines Kälteprozesses 2007, 27).

10 Verdampfer

Mithilfe des Verdampfers wird das flüssige Kältemittel, das die Wärme aufnimmt, in den zu kühlenden Bereichen verdampft. In jeder Kälteanlage sollte die Leistung des Verdampfers bei der geplanten Verdampfungstemperatur dieselbe sein, wie die Leistung der Kälteanlage. Der Verdampfer sollte alle Wärmeströme, wie die Strahlung der Sonne, Wärmeströme von der Beleuchtung und von Menschen etc. erfassen. Dementsprechend wird im Verdampfer das flüssige Kältemittel zuerst bei gleichbleibender Verdampfungstemperatur verdampft. Erst bevor die gesamte Flüssigkeit verdampft ist, geht die Temperatur in der Überhitzungszone nach oben. Die Überhitzungszone ist deshalb wichtig, damit keine Flüssigkeit zum Kompressor zurückgelangt, jedoch sollte eine Überhitzung vermieden werden, da sie keine nachhaltige Methode ist, um Wärme aufzunehmen.

Die Leistung des Verdampfers ist abhängig von folgenden Kriterien:

- Von der Oberfläche des Verdampfers, d.h. die Summe aller Außenflächen in Quadratmetern und bei Lamellenverdampfern und Plattenverdampfern zählen beide Seiten.
- Wieviel Wärme in W/m^2 von der Oberfläche aufgenommen wird, sollte die Verdampfungstemperatur unter der Umgebungstemperatur liegen. Dieser Wert ist jedoch wiederum von der Temperatur der Verdampfung und z.B. das Tempo des vorbeiströmenden Mediums abhängig. Hier ist auf Vereisungen zu achten, da Flüssigkeiten eine höheren Wärmeübergang aufweisen
- Je größer der Temperaturunterschied zwischen Verdampfungstemperatur und Temperatur der Umgebung des Verdampfers ist, umso höher ist seine Leistungsfähigkeit.

Je kleiner der Verdampfer ist, desto größer muss die Temperaturdifferenz sein, um die gewünschte Leistung zu erreichen. Sollten die Oberflächen jedoch größer sein, so kann die Differenz der Temperatur geringer ausfallen.

Hier wird zwischen Luftkühler, Flüssigkeitskühler oder Berieselungskühlern unterschieden. Diese Kühler können entweder das Kühlmittel direkt über die Verdampfung des Kältemittels kühlen, also mittels direkter Verdampfung. Eine Zwischenschaltung eines weiteren Kühlmittels, das das Kühlmittel indirekt kühlt, also mittels indirekter Verdampfung, ist aber auch möglich (Kulterer, Beschreibung eines Kälteprozesses 2007, 29-30).

10.1 Verdampfungsverfahren

10.1.1 Trockene Verdampfung

Bei der trockenen Verdampfung wird in dem Verdampfer jedes Mal nur so viel Kältemittel eingespeist, wie akkurat verdampft werden kann. Dadurch ist im Verdampfer kaum flüssiges Kältemittel vorhanden (Kulterer und Mair, Leitfaden für Energieaudits in Kältesystemen 2015, 11).

10.1.2 Glattrohrverdampfer

Der Glattrohrverdampfer spitzt das Kältemittel in ein System aus glatten Kupferrohren ein. Hier verdampft das Kältemittel und kühlt die umgebende Luft oder Flüssigkeiten ab. Glattrohrverdampfer dienen dazu, um den Wärmeaustausch zu optimieren, d.h., dass sie das Öl zum Kompressor zurückführen und dadurch einen möglichst geringen Druckverlust erzeugen. Glattrohrverdampfer findet ihre Anwendung z.B. als Milchkühler, Speiseeiskühler, als Bierkühlung oder dienen auch als Luftkühlung von Kühlräumen etc. (Kulterer, Beschreibung eines Kälteprozesses 2007, 30).

10.1.3 Lamellenverdampfer

Bei den Lamellenverdampfer sind auf den Rohrbündeln Metalllamellen aufgezogen. Diese dienen dazu, um die Wärmeübertragung durch eine größere Oberfläche zu vereinfachen. Der erforderliche Abstand der Lamellen hängt vom Risiko der Reifbildung ab. Je mehr Kälte ein Raum benötigt, desto größer sollten die Abstände der Lamellen sein. Kälteanlagen, die bei Verdampfungstemperaturen unter 0°C arbeiten, sollten in regelmäßigen Intervallen abgetaut werden. Je kleiner diese Intervalle sind, desto geringer darf der Abstand der Lamellen sein (Kulterer, Beschreibung eines Kälteprozesses 2007, 30).

10.1.4 Plattenverdampfer

Plattenverdampfer bestehen aus zwei miteinander verbundenen Blechplatten. Hier bildet sich der Kanal durch die Ausrichtung der beiden Platten. Diese Verdampfer-Variante kann ebenso als überflutete oder als Trockenverdampfer eingesetzt werden. Plattenverdampfer benötigen nicht viel Platz. Plattenverdampfer, die für die Kühlung von Flüssigkeiten dienen, werden vor allem in der Industrie (Chemie, Kältetechnik, Nahrungsmittel) benutzt. Vom Vorteil sind vor allem der hohe Wärmeübertragungskoeffizient, der geringere Temperaturunterschied zwischen dem Kühlmedium und dem Kältemittel, die geringe Kältemittelfüllmasse, die geringe Verschmutzungsanfälligkeit, die geringe Anfälligkeit an Korrosion und die schlichte Wartung der Plattenverdampfer. Die Form der Plattenverdampfer eignen sich hervorragend für Baukastensysteme (Kulterer, Beschreibung eines Kälteprozesses 2007, 30).

10.1.5 Zwangsbelüftete Kühler

Axiallüfter können den Luftstrom durch die Kühlfläche drücken und saugen. Axiallüfter werden vor allem für größere Blasweiten benötigt. Sobald der Taupunkt an der Kühlerfläche unterschritten wird, kommt es zur Bildung von Schweißwasser, dass mittels einer Tropfwanne aufgefangen wird. Die Abstände der Lamellen der Kernrohre liegen zwischen 4,5 – 12 Millimetern und sollten abgetaut werden, sobald sie als Kälteanlage benutzt werden. Hier sind die Kriterien für eine höhere Energieeffizienz die Verwendung von hocheffizienten Motoren und effizienten Regelungsmöglichkeiten, wie z.B. mit einer Drehzahlregelung.

10.2 Ölabscheider

Mithilfe des Kältemittels wird das Öl des Kompressors über das gesamte System verteilt. Hier ist es wichtig, dass das Öl wieder zum Kompressor zurückgelangt, leider kann sich das Öl auch im Verdampfer ablagern. Für die bestmögliche Effizienz der Anlage ist es bedeutend, dass das Öl nicht zum Verdampfer gelangt, da Ablagerungen von Schmieröl die Wärmeübertragung mindern. Daher muss in Trockenverdampfern die Kältemittelgeschwindigkeit ausreichend sein, um das Schmieröl durch die Röhre zu transportieren. Sollte der Verdampfer einmal vom Öl übergehen bzw. geflutet werden, so ist notwendig das Öl je nach Kältemittel zu entfernen (Albers 2020, 2255).

Energieeffizienzkriterien eines Verdampfers:

- Die Verdampfungstemperatur sollte so hoch wie möglich sein - Mithilfe einer großen Verdampferfläche ist dies möglich.
- Im Luftkühlern sollte der Kühlblock immer schutzfrei sein und auch in regelmäßigen Abständen abgetaut werden.
- Im Rohrbündelverdampfer sollten die Rohre auch stets frei von Schmutz sein.
- Das Schmieröl sollte immer aus dem Verdampfer entfernt werden.
- Die Zufuhr von Kältemittel sollte geregelt sein, denn die Menge an Kältemittel sollte den Verdampfer nicht überfordern und nur eine geringe Überhitzung garantieren, damit eine hohe Effizienz gewährleistet werden kann.

10.3 Verteilnetz

Folgende Rohrleitungsabschnitte sind für eine Kälteanlage nötig (Kulterer, Beschreibung eines Kälteprozesses 2007, 36):

- „Die Saugleitung führt den unter Verdampfungsdruck stehenden Kältemitteldampf (Saugdampf) vom Verdampfer zum Verdichter.
- Die Druckleitung führt den überhitzten unter Verflüssigungsdruck stehenden Kältemitteldampf (Heißdampf) vom Verdichter zum Verflüssiger.
- Die Flüssigkeitsleitung führt das unter Verflüssigungsdruck stehende flüssige Kältemittel zum Drosselorgan.
- Weiters gibt es noch die Möglichkeit einer Kondensatleitung: Kondensat fließt darin aus dem Verflüssiger zum Flüssigkeitssammler während in umgekehrter Richtung Kältemitteldampf wieder zurückgeführt wird.“

Für das Netz gilt folgendes: für das Netz sind:

- Die Wahl des kürzesten Weges und eine gute Dämmung, denn dadurch wird eine geringe Gefahr von Undichtigkeiten garantiert. Daraus resultieren geringe Betriebs- und Anlagenkosten.
- Der Einbau von Schleifen und Biegungen, um die Vibrationen des Verdichters zu reduzieren.
- Der Kltemittelfluss ohne Abfall des Drucks, denn keine großen Höhenunterschiede, Reibungen, Biegungen, Verengung, oder zu kleine Rohrdurchmesser sollten vermieden werden.
- Das Schmieröl sollte bis zur Verdichterkurbelwanne zurückgeführt werden, daher sollten die Rohre etwas geneigt sein.
- Das Vermeiden von flüssigem Kältemittel oder Schmieröl im Zylinder des Verdichters bei Stillständen der Anlage.
- Die regelmäßige Entlüftung zur Vermeidung von CO₂-Einschlüssen oder Luft-einschlüssen sollte berücksichtigt werden.

10.3.1 Aufteilung des Netzes

Lasten mit vergleichbaren Ansprüchen an den Druck der Verdampfung sollten über ein gemeinsames Netz mit dem Verdichter ausgestattet werden. Diese Lasten brauchen einen sehr geringen Verdampfungsdruck, also niedrige Temperaturen und sollten deshalb über ein eigenes Netz mit einem zusätzlichen Kompressor verfügen oder für manche Lasten mit einem sogenannten Booster bzw. einer Drucksteigerungsanlage ausgestattet sein. Der Wirkungsgrad ist bei zentralen Anlagen im Vergleich zu kleineren Anlagen besser. Andererseits ermöglichen Dezentrale einen effektivere Leistungsanpassungen und die Rohrlänge kann dadurch auch reduziert werden.

10.4 Ortung von Leckagen

Sobald der Betriebsdruck über dem Umgebungsdruck liegt, wird eine Tauchprobe durchgeführt. Mithilfe der Tauchprobe wird hier das undichte Anlagenteil/Bauteil mit trockenem Stickstoff unter Druck gesetzt und im Anschluss in ein Wasserbad gelegt.

Es gibt aber noch den Seifenblasentest. Bei diesem Testverfahren wird eine stark konzentrierte Seifenlösung über die undichte Stelle aufgetragen. Elektronische Leckagenortungsgerte werden bei halogenierten Kohlenwasserstoffen verwendet.

10.5 Filter

Das Kältemittel sollte frei von Feuchtigkeit und Partikeln sein, um ein effizientes Arbeiten der Klteinlage zu garantieren, denn Feuchtigkeit kann zur Vereisung des Expansionsventils führen. Um dies zu vermeiden, wird in der Flüssigkeitsleitung ein Filter eingesetzt und diese Filter sollten regelmäßig getauscht werden.

10.6 Abtauen

Luftkühler sollten regelmäßig abgetaut werden, sobald sie in Temperaturbereichen arbeiten, in denen Reif entsteht.

10.6.1 Nachlauf des Lüfters

Sobald die Kühlraumtemperaturen über 3°C betragen, wird der Reif mittels des Luftstroms der Lüfter bei ausgeschalteter Kältemaschine abgetaut, dabei wird die Kältemaschine durch einen Thermostat im Raum oder auch mithilfe eines Niederdruckschalters ausgeschaltet. Bei diesem Vorgang bleibt der Lüfter mittels eines Raumthermostats oder Druckschalters, solange in Betrieb bis der Kühlerblock abgetaut ist. Steigt die Temperatur wieder an, so schaltet sich als erstes die Anlage wieder ein, sowie der Kühler kalt genug ist schaltet sich auch der Lüfter wieder ein.

10.6.2 Elektrische Heizstäbe

Sobald die Temperaturen in einem Kühlraum unter 3°C benötigt werden, sollte eine zusätzliche Heizung in der Kühlerfläche verbaut werden, denn die elektrischen Heizstäbe leiten die Wärme auf Lamellen weiter bis hin zum Reif. Der Wirkungsgrad ist wegen der schlechten Wärmeübertragung eher gering, aber die Technologie ist simpel und betriebssicher. Der Abfluss aus der Tropfwanne eines Tiefkühlers sollten eine Heizvorrichtung aufweisen.

Damit der Kühlerblock kalt genug bleibt, sollte der Lüfter nach dem Abtauen mit einer Verzögerung eingeschaltet werden. Hier ist darauf zu achten, dass der Abtauprozess nur verwendet werden sollte, wenn auch abgetaut werden muss bzw. wenn schon eine dicke Schicht an Reif existiert.

10.6.3 Abtauen durch Heiß- und Kaltdampf

Bei dieser Variante des Abtauens strömt Kältemitteldampf, der direkt vom Kältemittelverdichter herbeigeführt wird, in den Luftkühler, der abgetaut werden soll. Für diesen Vorgang wird eine Heißdampfleitung und Magnetventil gebraucht.

10.6.4 Abtauen durch warmes Wasser

Diese Methode zum Abtauen wird bei Anlagen mit großen Kälteleistungen angewendet. Mittels einer händischen oder automatischen Regelung wird der Kühler mit warmem Wasser besprüht, dieses warme Wasser stammt meist aus anderen Prozessen. Im Anschluss sollte das Wasser aus dem Kühler und dem Rohrnetz entfernt werden, bevor die Kälteanlage wieder in Betrieb geht.

Energieeffizienzkriterium Abtauung:

- Ein Abtauen sollte nur dann erfolgen, wenn die Kühlleistung abnimmt, daher ist von einer Zeitsteuerung der Anlage abzuraten.
- Die effizienteste Abtaumethode sollte angewendet werden.
- Die Wärme, die zum Abtauen benötigt wird, sollte gleichmäßig über den gesamten Kühlblock verteilt werden.
- Der Abtauprozess sollte beendet werden, sobald der Kühlblock vom Eis befreit ist.

10.7 Weitere Effizienzmaßnahmen

10.7.1 Wärmerückgewinnung

„Das kondensierende Kältemittel in einem Kältesystem ist wärmer als die Umgebungstemperatur. Die Wärmemenge, die im Kondensator abgegeben wird, ist die Summe der abzuführenden Wärme aus dem Kühlraum (Kälteenergie) und die Verdichtungsenergie, also der eingesetzten elektrischen Energie zum Antrieb des Kompressors.

Theoretisch kann es sinnvoll sein, eine etwas höhere Kondensationstemperatur in Kauf zu nehmen und damit die Effizienz des Kältesystems zu verschlechtern; dafür aber die größere Menge an Abwärme zu nutzen. Wichtig sind dabei die verfügbare und benötigte Energiemenge und Temperaturniveaus in Abhängigkeit des zeitlichen Anfalls.

Bei der Verwendung der Abwärme zur Brauchwasserbereitung, die ganzjährig anfällt, wird lediglich ein Wärmetauscher parallel oder in Serie zum Kondensator geschaltet. Temperaturniveaus von 25°C sind damit erreichbar.

Je höher das Druckverhältnis ist (Tiefkühlbereich) desto größer wird auch der Enthitzungsanteil des Kältemittels an der gesamten Verflüssigerleistung, umso interessanter damit für eine WRG. Bei Schraubenkompressoren fällt ein Teil der Verdichtungswärme (in Abhängigkeit des Kältemittels bis zu 40% der Motorleistung bzw. 15 % der der Kondensationswärme) bei der Ölkühlung an und ist damit zur WRG verfügbar. Mit dieser Überhitzungswärme des Kältemittels in einem eigenen Wärmeübertrager ist es dann möglich, Heißwasser bei 55 °C zu produzieren.“ (Kulterer, Beschreibung eines Kälteprozesses 2007, 40)

11 Kältebedarf

11.1 Kriterien an der Energieeffizienz des Kältebedarfs

Reduktion des Wärmeeintrags:

- Betrieb von Anlagen in Kühlräumen prüfen und Herunterfahren der Maschinerie in Betriebspausen
- Verortung der Antriebe und Pumpen, wenn möglich nicht in den Kühlräumen
- Überprüfen, welche Abschnitte und Räume, welchen Anspruch an Kühlung benötigen
- Verwendung von energieeffizienten Leuchtmitteln
- Kühlräume vor Wärmeschutz, d.h. durch Dämmung, Jalousien oder außenliegenden Sonnenschutz
- Den Abtauwärmestrom minimieren
- Raumanordnungen evaluieren

Minimierung des Luftwechsels (Pech und Jens, Heizung und Kühlung 2005, 118):

- Mithilfe durch Schleußen oder schnell zu öffnende Tore den Luftwechsel verringern
- Reduktion des Luftwechsels auf den nötigen Minimalwert, mithilfe einer Drehzahlregelung
- Ausstattung von Lüftungsanlage mit Kälterückgewinnung.

11.1.1 Ermittlung von Einflussfaktoren und Leistungskennzahlen

Lt. Kulterer und Mair werden Anpassungsfaktoren wie folgt beschrieben: (Kulterer und Mair, Leitfaden für Energieaudits in Kältesystemen 2015, 19) „Anpassungsfaktoren (lt. EN 16247, hier Einflussfaktoren genannt) sind quantifizierbare Parameter, die einen Einfluss auf den Energieverbrauch haben. Für Kältesysteme sind dies in vielen Fällen die Wetterbedingungen (ausgedrückt in Kühlgradtagen). Durch Gegenüberstellung des Energieverbrauchs für Kälteanlagen (bzw. die Menge an kaltem Wasser) kann die Abhängigkeit des Kälteverbrauchs von diesem Parameter z.B. graphisch dargestellt werden (über eine Regressionsgerade) und im Zeitverlauf z.B. zum Monitoring des Energieverbrauchs der Kälteanlage aber auch zum Nachweis für die Wirksamkeit von Effizienzmaßnahmen genutzt werden: Bei geringeren Kühlgradtagen vermindert sich auch der Kältebedarf, vermindert er sich aber stärker als erwartet, kann dieser Effekt den Einsparmaßnahmen zugerechnet werden.“

Beispiele sind hier:

- Kühlgradtage
- Produktionszeit, gekühlte Produktmenge
- Lagerfläche

Generell sollte im Rahmen eines Energieaudits eine oder mehrere Leistungskennzahlen festgelegt werden, die über die Effizienz des Kältesystems beurteilt werden können. Beispiele für mögliche Leistungskennzahlen, in Abhängigkeit der Datenverfügbarkeit, sind unten angeführt, weitere sind in diesem Leitfaden beschrieben.

- Energieverbrauch Kälteerzeugung [kWh]
- Energieverbrauch Kälteerzeugung pro Kühlgradtag [kWh/KGT]
- Energieverbrauch zur Kälteerzeugung, pro erzeugtem Produkt [kg/t]
- COP Kälteanlage [-]"

Diese Form der Ermittlung von Anpassungsfaktoren trifft haargenau auf das, ab Kapitel 15, beschriebene Fallbeispiel zu.

11.2 Kühlzellen

11.2.1 Maßnahmen für die Energieeffizienz von Kühlzellen

- Das verwendete Gut sollte Luftstrom zu/vom Verdampfer nicht beeinträchtigen
- Regelmäßige Überprüfung der Temperatur im Kühlraum: Tiefkühlzellen mit -24°C anstatt von -18°C sind im Durchschnitt 30% energieaufwändiger
- Die Kondensatoren sollte in regelmäßigen Abständen geputzt werden und benötigen eine gute Luftzirkulation
- Kontrolle, ob die Option zur Abwärmenutzung besteht, z.B. für Vorwärmeboiler

11.2.2 Wärmeeintrag reduzieren (Kulterer, Beschreibung eines Kälteprozesses 2007)

- Das Einbringen von warmen Speisen in die Kühlzelle sollte vermieden werden
- Räume die als Tiefkühlager genutzt werden, sollten nicht zum Gefrieren verwendet werden, denn dadurch werden Temperaturschwankungen und benötigte Leistung beschränkt und Energie bewahrt
- Energiebedarf von Tiefkühlvorgängen und Auftauvorgängen darf nur ca. 0,2 kWh/kg betragen
- Die Türen und ihre Abdichtungen sollten in eine intakte Beschaffenheit aufweisen
- Der Wärmeeintrag minimiert sich, wenn die Türen geöffnet sind
- Eine effiziente Strategie für das Abtauen sollte ausgearbeitet werden, wie z.B. mithilfe einer Zeitschaltuhr in der Niedrigverbrauchsperiode und das Abtauwasser in Ablauf bringen, anstatt es verdunsten zu lassen.
- Glühbirnen mit Bewegungsmeldern oder Energiesparlampen, die abseits der Arbeitszeiten abgeschaltet werden
- In Tiefkühlhäuser ist es ratsam eine effiziente Fördertechnik anzuwenden (Kulterer, Beschreibung eines Kälteprozesses 2007, 41)

11.2.3 Kühlstellenregelung

Kühlstellenregelungen erlauben die Durchführung bzw. Umsetzung einiger erwähnter Effizienzmaßnahmen, wie z.B. das Regeln der Temperatur an der Kühlstelle in einem engen Temperaturband, oder das Regeln des Verdampfer-Lüfters, das aktive Abtauen und auch das Regeln des Expansionsventils. Die Kombination aus Verbundregelungen, deren Saug- und Verflüssigungsdruck optimiert und mehrere Verdichter zur selben Zeit angesteuert werden können, macht es möglich, dass Kälteanlagen effizient betrieben werden können.

11.3 Kältespeicher

Die Aufgabe von Kältespeichern liegt darin, die Erzeugung von Kälte zeitlich vom Verbrauch zu entkoppeln. Mittels dieses Vorgangs können Leistungsspitzen umgangen werden, daher kann vorrätige Kälte erzeugt werden und kann somit bei Kältebedarf mit höheren Leistungen gefordert werden. Zum Beispiel können dank dieses Vorgangs in Molkereien und Brauereien nur ein paar wenige Stunden am Tag große Mengen an Milch und Bier gekühlt werden, da Klimazentralen vor allem an den Nachmittagen eine höhere Kälteleistung benötigen.

Vorteile:

- Die Kosten bleiben gering, da kleinere Kälteerzeugungsanlagen zum Einsatz kommen.
- Es sind nur mehr kleinere Kältevolumen notwendig.
- Die elektrischen Anschlusskosten sind gering
- Durch Nachtstrom ist ein geringerer Leistungspreis bzw. geringerer Arbeitspreis möglich
- Durch den Betrieb in der Nacht kann eine geringerer Kondensationstemperatur erreicht werden und dies führt wiederum zu einer höheren Effizienz und kann Speicherverluste teilweise wieder gut machen.

Nachteile:

- Mit zusätzlichen Speicherverlusten und Umwandlungsverlusten ist zu rechnen.
- Zusätzliche Pumpen, Rohre und Ventile sind notwendig.
- Zusätzliche Regelungsaufwände und Steuerungsaufwände sind notwendig.
- Für den Speicher wird Platz benötigt, daher eher kostspielig.

Eisspeicher sind die am weitesten verbreiteten Kältespeicher. Hier wird zwischen direkten und indirekten Kältesystemen unterschieden. Bei dem direkten System passiert die Wärmeabfuhr gleich durch die Verdampfung des Kältemittels. Beim indirekten System wird z.B. ein Glykol-Kreislauf zwischengeschaltet.

Auch sehr weit verbreitet ist das Eisbausystem. Hier wird an der Oberfläche des Verdampfers in Plattenausführung Eis aufgebaut. Dieses Eis wird über Heißgas abgesprengt und sammelt sich im Eiswasserbecken oder in einem Eiswasserturm.

Der Vorteil eines solchen Kältespeichers liegt hier meist bei der Einsparung an Betriebskosten und nicht an der Einsparung des Energieverbrauchs.

12 Kälteerzeugung

Die Kältemaschinen oder Kälteanlagen, die im Allgemeinen für die Kälteerzeugung zuständig sind, sind im Großen und Ganzen stufenlos steuerbar und können mit veränderbaren Wasservolumenstrom im Kreislauf des Verdampfers betrieben werden. Hydraulisch, d.h. unter Mitwirkung von Wasser oder anderen Flüssigkeiten betrieben, werden die Kälteanlagen parallelgeschaltet. In Bedingtheit vom Bedarf an Kälte werden die einzelnen Anlagen ab- und zugeschaltet. Diese Bedienung kann von der Temperatur abhängig z.B. mithilfe von Temperaturfühler an der hydraulischen Weiche, die die Aufgabe hat, einen oder mehrere Kälteerzeuger von den Verbrauchern einer Kälteanlage zu entkoppeln, oder die Steuerung erfolgt lastabhängig z.B. über Kälte- bzw. Volumenstromzähler erfolgen.

Hier ist es von großer Bedeutung, dass die Entwicklung für eine smarte Strategie der Steuerung für die Folgeschaltung vorhanden ist. Da ein ständiges Ein- und Ausschalten von Kältemaschinen vermieden werden sollte und gleichzeitig ein energieoptimierter Betrieb mit großen Wirkungsgraden bzw. Teillastbetrieb garantiert werden sollte.

Jede Abwandlung der Last und jedes An- bzw. Abschalten von Kälteanlagen bringt hier eine Abänderung des Volumenstroms im System mit sich. Hier ist es wichtig, dass die zulässigen Volumenströme des Verdampfers eingehalten werden. Die angegebenen Grenzwerte der Durchfluss- und der Änderungsrate von den Anlagenherstellern, sollten zur Erreichung einer konstanten Steuerung in allen Betriebsbedingungen befolgt werden. Kommt der Volumenstrom eines Verdampfers der Mindestdurchflussrate näher, sollte über eine Bypass-Leitung erneut Wasser zurückgeführt werden. Mithilfe dieses Vorgangs können Schwankungen im festgelegten Areal gehalten werden. Für diese Regelung ist hier auch eine direkte Messung der Verdampferdurchflüsse, mit eingestellten Komponenten (Anton Pech 2005, 65).

13 Fallbeispiel

Um das Problem besser zu veranschaulichen, wird in dieser Arbeit immer wieder ein bestimmtes Fallbeispiel herangezogen, auf sich die Autorin in dieser Arbeit fokussiert. Die Autorin hat sich für einen Universitätsbau in Graz entschieden, der aufgrund sensibler Daten anonym gehalten wird. Das Gebäude, das aus mehreren Trakten besteht, wurde 2017 errichtet bzw. fertiggestellt und misst insgesamt eine Fläche von über 44.000 m². Im Sommer 2023 folgt im 2. Bauabschnitt die Zuschaltung des 2. Gebäudekomplexes, das auch aus mehreren Trakten besteht und eine zusätzliche Fläche von über 40.000 m² besitzt. Nach Fertigstellung des 2. Gebäudekomplexes beträgt die neue Gesamtfläche rund 85.000 m².

Die Trakte des 1. Gebäudekomplexes beinhalten primär Hörsäle, Seminarräume, Labore, Forschungsräume, Technikräume und Haustechnik. Die Trakte des 2. Gebäudekomplexes beinhalten Büros, Labore, Werkstätten, Technikräume und eine Kantine. Die Haustechnik und auch Kühlleistung des 1. Universitätskomplexes wurde 2013 so konzipiert, dass ab Sommer 2023 der 2. Universitätskomplex problemlos aufgeschaltet werden kann. Leider passiert dieses Szenario frühestens ab Sommer 2023. Das Kühlsystem ist aber jetzt schon auf beide Gebäudekomplexe ausgelegt, versorgt aber seit über 5 Jahren nur den 1. Gebäudekomplex mit Kühlung.

13.1 Problembeschreibung des Fallbeispiels

Anhand dieses Fallbeispiels werden die davor genannten Probleme weiter erläutert. Seit der Inbetriebnahme 2017 häufen sich die Probleme mit der Kühlung. Hauptproblem ist, dass das Kühlsystem für beide Module mit einer Gesamtfläche von über 85.000 m² ausgelegt ist, aber davon seit 2017 nur die 44.000 m² des 1. Gebäudekomplexes gekühlt werden. Ein weiteres Problem ist auch das ständige Hoch- und Niederfahren der großen Kältemaschine.

Seit fast fünf Jahren wird durch verschiedene Faktoren das Kühlsystem in diesem Universitätsgebäude nicht effizient genutzt und dies hat einen erheblichen Einfluss auf die Nachhaltigkeit und CO₂-Bilanz des Bauwerks.

Das Kühlsystem ist hier auf eine GLT (Gebäudeleittechnik) aufgeschaltet. Diese Software überwacht und steuert das Gebäude und die darin verbaute Haustechnik. Mithilfe dieses Programmes ist eine Zu- und Wegschaltung an Kühlleistung in bestimmten Räumen möglich. Diese Anwendung erfolgt vor allem, wenn an Hochsommertagen in kritischen Räumen, wie Prosektur, Tierbiologie, Sezierräumen, Büros oder Laboren, die Innentemperaturen zu hoch sind. Niedrigere Raumtemperaturen sind hier von großer Dringlichkeit, um die Betriebsprozesse aufrechtzuerhalten.

Da die Maschinerie erst bei Außentemperaturen von 31°C am effizientesten läuft, ist der Verschleiß der Maschinen wesentlich höher. Der Grund dafür ist, dass zwei Kältemaschinen mit unterschiedlichen Leistungen vorhanden sind. Eine große Kältemaschine mit einer Leistung von 3MW und eine kleinere Kältemaschine mit einer Leistung von 750kW.

Die kleine Kältemaschine (KM2) wurde 2018 nachträglich errichtet, da es, wie schon erwähnt, seit der Inbetriebnahme im Jahr 2017 zu Problemen mit der Kühlung des Gebäudes gekommen ist. Die kleine Kältemaschine erbringt an Tagen mit einer Außentemperatur von unter 31 Grad genügend Kühlung für den gesamten 1. Gebäudekomplex mit 44.000m². Sobald die Außentemperaturen über 31°C ansteigen, schaltet sich die große Kältemaschine (KM1) automatisch dazu. Leider läuft das Gerät nur einige wenige Minuten, da die Fläche des Gebäudes zu klein für die 3MW starke Anlage ist. Infolge von diesen kurzen Betriebsintervallen ist die Abnutzung sehr hoch und die Anlage verschleißt schneller, d. h., dass die Reparaturen sich häufen und der Betrieb dadurch kostenintensiver wird.

13.2 Pufferspeicher des Fallbeispiels

Das Kältesystem des Fallbeispiels verfügt über zwei Pufferspeicher, einer für die Niedertemperaturkälte (19.270 Liter; D*H= 2500*4290mm) und der andere für die Hochtemperaturkälte (13.380 Liter; D*H= 2500*3090mm). Die Kältemaschinen beziehen ihre Leistung vom Niedertemperaturpufferspeicher zwischen Temperaturen von 7°C – 17°C. Der Niedertemperaturpufferspeicher hat drei unterschiedliche Temperaturstufen bzw. Abnehmerkreise, sogenannte Zortströme. Die 1. Temperaturstufe liegt bei 7°C, die 2. Temperaturstufe liegt bei 13°C und die 3. Temperaturstufe liegt bei 17°C, siehe Abbildung 5. Bei Hochtemperaturpufferspeicher liegen die Temperaturen zwischen 15°C und 20°C, siehe Abbildung 6. Die beiden Kälteanlagen sind an den Niedertemperaturpufferspeicher gekoppelt.

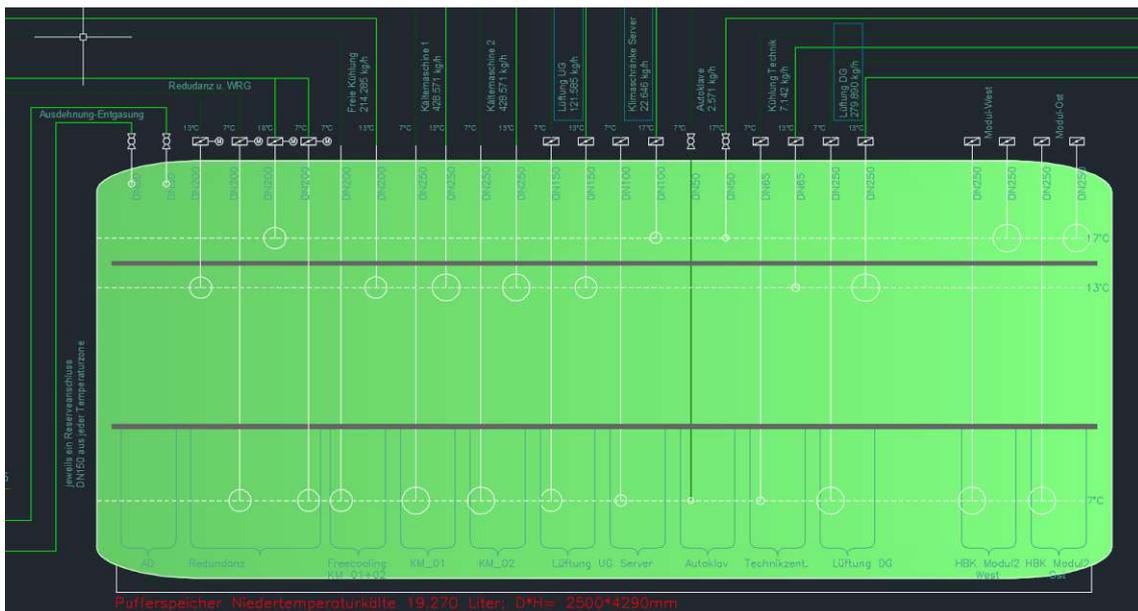


Abbildung 5.: Pufferspeicher für Niedertemperaturkälte – Fallbeispiel, erstellt am 18.07.2017 in AutoCAD (Quelle: Originaldokument des Gebäudes, anonymisiert)



Abbildung 6.: Pufferspeicher für Hochtemperaturkälte – Fallbeispiel, erstellt am 18.07.2017 in AutoCAD (Quelle: Originaldokument des Gebäudes, anonymisiert)

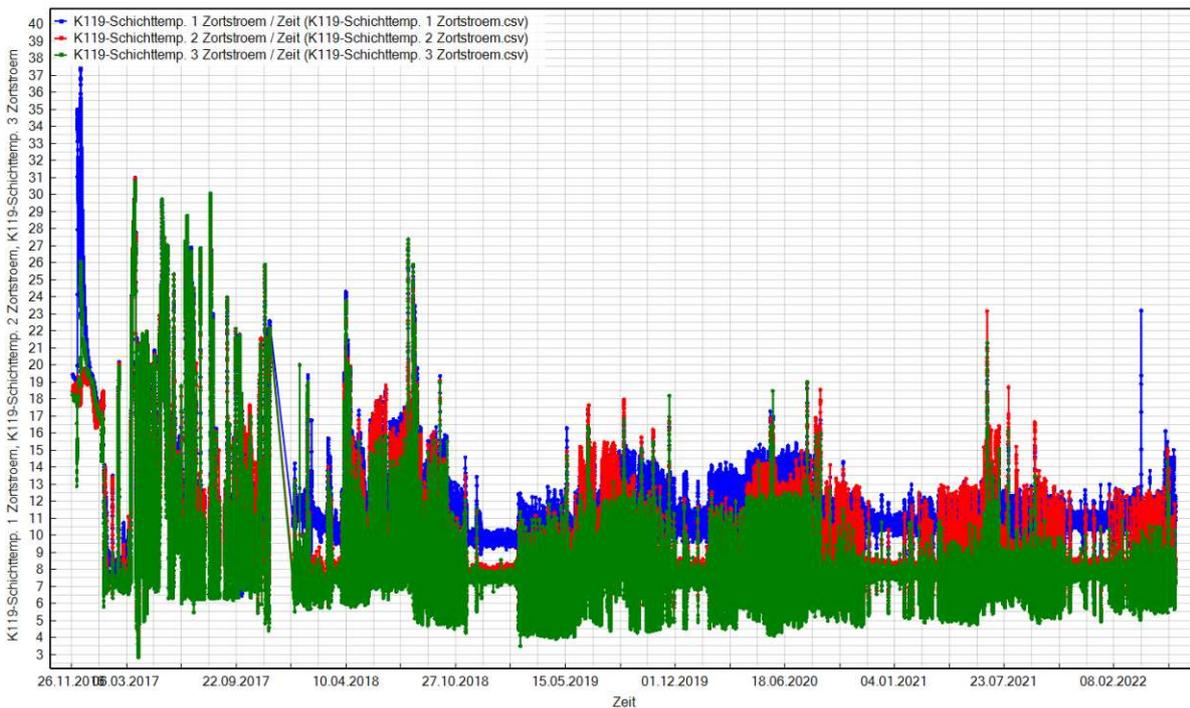


Abbildung 7.: Auswertung der Schichttemperaturen bzw. der 3 Temperaturstufen im Niedertemperaturpufferspeicher vom 26.11.2016 bis 31.05.2022, – 1. Gebäudekomplex, Fallbeispiel, Grafik erstellt am 12.06.2022 (Quelle: Melanie Krisper, Auswertung Originaldokumente des Gebäudes bzw. Auswertung anhand eines Auszugs aus der GLT, 2022)

Anhand der Auswertung siehe Abbildung 7, ist zu sehen, dass der Niedertemperaturpufferspeicher sehr hohe Temperaturschwankungen über die letzten 5,5 Jahre aufweist. Wie schon

erwähnt beziehen die Kältemaschine 1 und 2 ihre Kälte aus diesem Pufferspeicher. Die 1. Temperaturstufe mit 7°C (in der Abbildung mit der Farbe Grün dargestellt) wies in den Jahren 2016 – 2018 starke Schwankungen auf, mit Temperaturspitze zwischen 27°C und 31°C. Ab 2019 nehmen diese Temperaturspitzen ab und liegen zwischen 18°C und 21°C. Dasselbe Szenario weisen die 2. (13°C) und 3. Temperaturstufe (17°C) auf (in der Abbildung in den Farben Rot und Blau dargestellt).

13.3 Hitzetage | Fallbeispiel

Seit der Fertigstellung des 1. Gebäudekomplexes im Frühjahr 2017 bis zum 31.05.2022 hat es am Standort des Fallbeispiels insgesamt 138 Hitzetage mit über 31°C Außentemperatur gegeben. Mithilfe dieser Daten siehe Abbildung 8 - 9, sind diese Hitzetage pro Monat und Jahr, aus den Balkendiagrammen ablesbar.

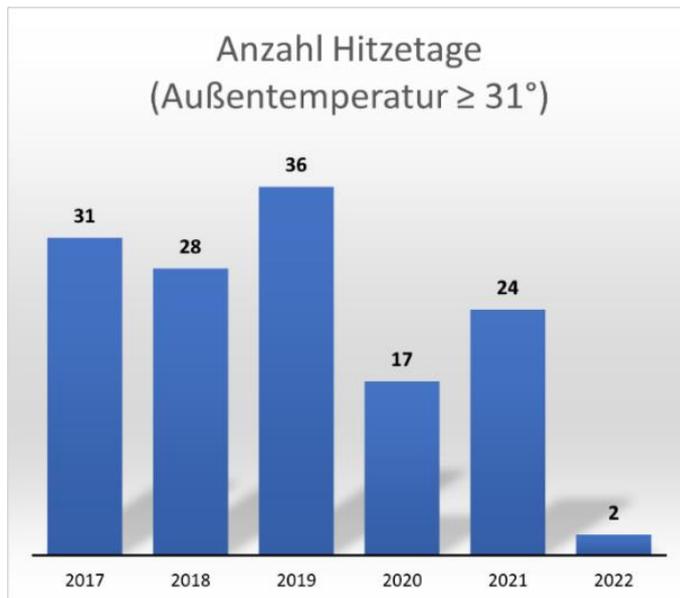


Abbildung 8.: Auswertung der Hitzetage 2017 – Ende Mai 2022, – 1. Gebäudekomplex, Fallbeispiel, Grafik erstellt am 12.06.2022 (Quelle: Melanie Krisper, Auswertung Originaldokumente des Gebäudes bzw. Auswertung anhand eines Auszugs aus der GLT, 2022)

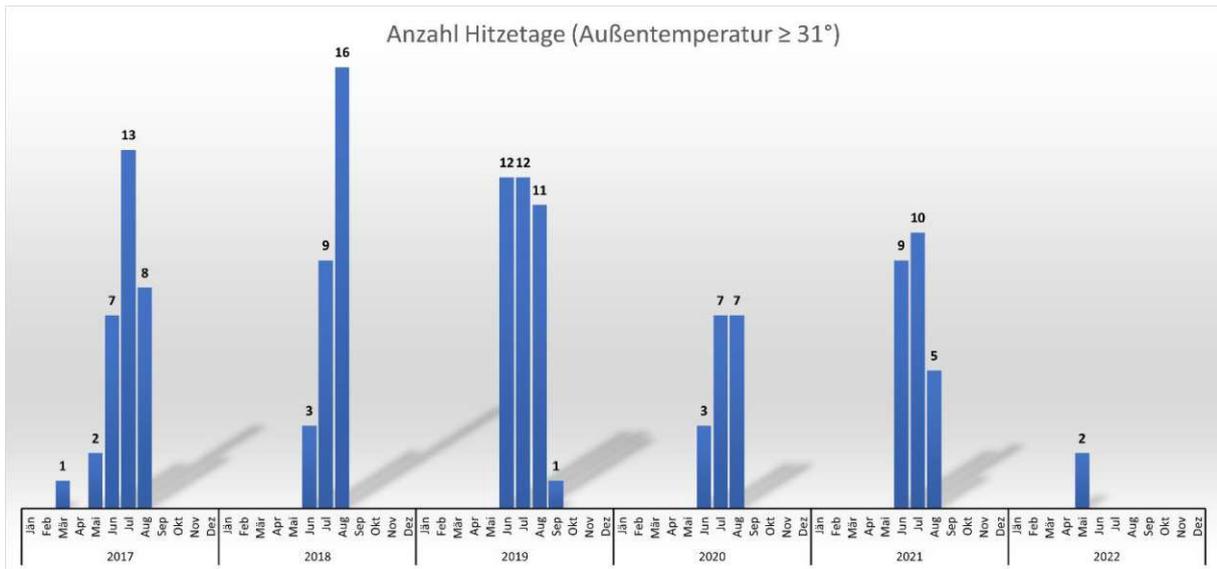


Abbildung 9.: Auswertung der Hitzetage 01/2017 – 05/2022 – 1. Gebäudekomplex, Fallbeispiel, Grafik erstellt am 12.06.2022 (Quelle: Melanie Krisper, Auswertung Originaldokumente des Gebäudes bzw. Auswertung anhand eines Auszugs aus der GLT, 2022)

13.4 Betriebszeiten der großen Kälteanlage (KM1) des Fallbeispiels

13.4.1 Normalbetrieb – KM1 schaltet sich nach Erreichung des Leistungsziels aus

Wie die Abbildung 10 zeigt, läuft die Kältemaschine 1 (KM1) am 13.08.2020 im Normalbetrieb. Die Außentemperatur erreicht knapp 30°C . Nachdem sich die kleine Kältemaschine 2 (KM2) ausgeschaltet hat, weil sie ihr Leistungsziel erreicht hat, geht die große Kältemaschine automatisch in Betrieb. Aufgrund der Überdimensionierung der Kältemaschine 1 mit 3MW bei 44.000m^2 zu kühlender Fläche schaltet sich die Kältemaschine immer wieder aus, um dann wieder bis zu einer 85%igen Leistung hochzufahren. Nach ungefähr fünf Stunden schaltet sich die Kältemaschine 1 aus und die kleine Kältemaschine 2 schaltet sich wieder ein. Am Abend um 19 Uhr ist die Kühlleistung der Kältemaschine 2 stabil und beträgt absinkend bis in die Morgenstunden zwischen 50% und 20%.

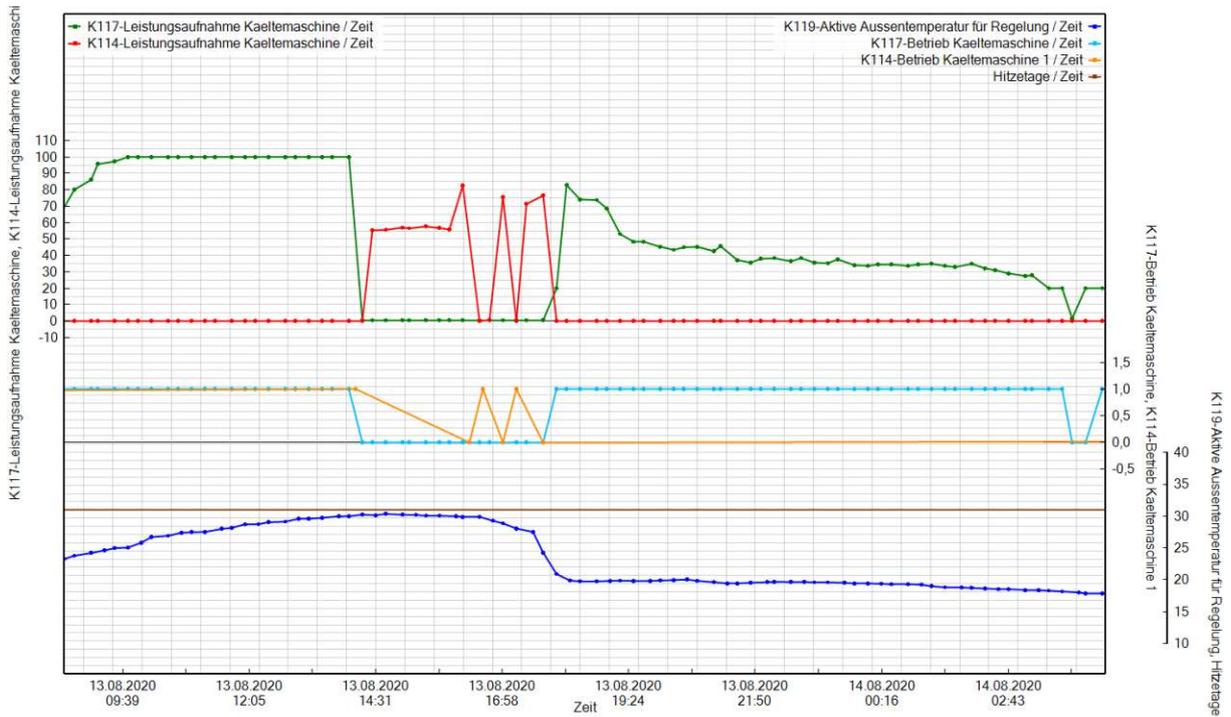


Abbildung 10.: KM1 in Normalbetrieb – 1. Gebäudekomplex, Fallbeispiel, Grafik erstellt am 14.06.2022 (Quelle: Melanie Krisper, Auswertung Originaldokumente des Gebäudes bzw. Auswertung anhand eines Auszugs aus der GLT, 2022)

Legende:

- **K117 Grün:** Prozentuale Leistung, Kältemaschine 2 (KM2)
- **K114 Rot:** Prozentuale Leistung, Kältemaschine 2 (KM2)
- **K119 Blau:** Außentemperatur
- **K117 Türkis:** Betrieb, Kältemaschine 2 (KM2)
- **K114 Orange:** Betrieb, Kältemaschine 1 (KM1)
- **Braun:** Hitzetage über 31°C Außentemperatur

13.4.2 Störfall 1 – KM1 schaltet sich nicht ein

Störfall 1 beschreibt folgende Situation, in der sich die große Kältemaschine 1 (KM1), mit 3 MW Leistung, an einem Hitzetag mit über 31°C nicht automatisch einschaltet, um die kleine Kältemaschine 2 (KM2) zu entlasten. Die Kältemaschine 2, mit einer Leistung von 750kW Leistung, läuft somit tagsüber über 14 Stunden lang bei 100%iger Leistung – siehe Abb. 11.

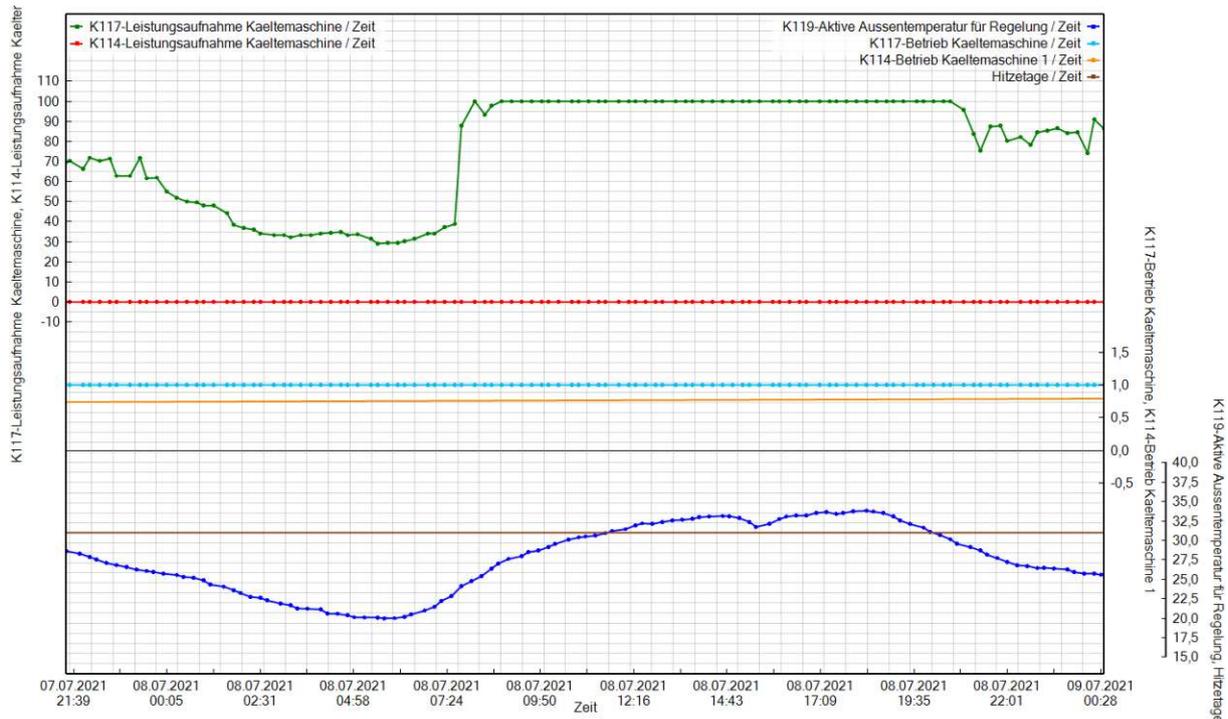


Abbildung 11.: KM1 schaltet sich an einem Hitzetag nicht ein – 1. Gebäudekomplex, Fallbeispiel, Grafik erstellt am 14.06.2022 (Quelle: Melanie Krisper, Auswertung Originaldokumente des Gebäudes bzw. Auswertung anhand eines Auszugs aus der GLT, 2022)

Legende:

- **K117 Grün:** Prozentuale Leistung, Kältemaschine 2 (KM2)
- **K114 Rot:** Prozentuale Leistung, Kältemaschine 2 (KM2)
- **K119 Blau:** Außentemperatur
- **K117 Türkis:** Betrieb, Kältemaschine 2 (KM2)
- **K114 Orange:** Betrieb, Kältemaschine 1 (KM1)
- **Braun:** Hitzetage über 31°C Außentemperatur

13.4.3 Störfall 2 – KM1 ist eingeschaltet erzielt aber keine Leistung

Störfall 2 beschreibt folgende Situation, in der sich die große Kältemaschine 1 (KM1) immer wieder einschaltet, aber keine Leistung erzielt. Sie schaltet sich zwar ein, wenn die kleine Kältemaschine 2 (KM2) sich nach ihrer Leistungserbringung wieder abschaltet. Jedoch kann die große Kältemaschine 1 keine Leistung verzeichnen. Diese Messung und Aufzeichnung erfolgt an einem Sommernachmittag, Ende Juli 2020 bei Außentemperaturen von bis zu 27°C – siehe Abbildung 12.

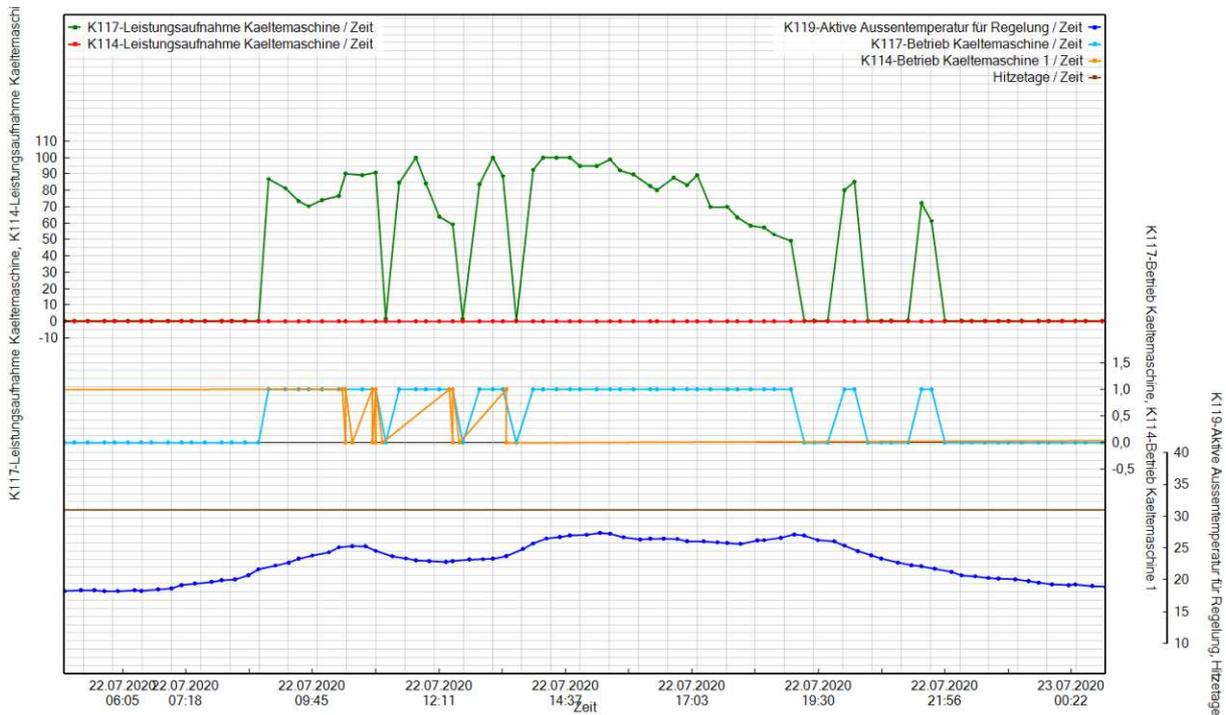


Abbildung 12.: KM1 ist in Betrieb, erzielt aber keine Leistung – 1. Gebäudekomplex, Fallbeispiel, Grafik erstellt am 14.06.2022 (Quelle: Melanie Krisper, Auswertung Originaldokumente des Gebäudes bzw. Auswertung anhand eines Auszugs aus der GLT, 2022)

Legende:

- **K117 Grün:** Prozentuale Leistung, Kältemaschine 2 (KM2)
- **K114 Rot:** Prozentuale Leistung, Kältemaschine 1 (KM1)
- **K119 Blau:** Außentemperatur
- **K117 Türkis:** Betrieb, Kältemaschine 2 (KM2)
- **K114 Orange:** Betrieb, Kältemaschine 1 (KM1)
- **Braun:** Hitzetage über 31°C Außentemperatur

13.4.4 Störfall 3 – KM1 geht in Pendelschaltung

Störfall 3 beschreibt folgende Situation, in der die große Kältemaschine 1 in Pendelschaltung geht, sich aber nicht mehr automatisch regulieren kann. Die Außentemperaturen steigen tagsüber bis 34°C an, sogar abends um 20 Uhr betragen die Außentemperaturen über 31°C. Die Anlage (KM1) bleibt eingeschaltet, aber erzielt keine Leistung. Die Kleine Kältemaschine 2 (KM2) schaltet sich nach längerer 100%iger Leistungserbringung aus. Daraufhin schaltet sich die große Kältemaschine 1 (KM1) ein, erzielt in einer kurzen Betriebszeit bis zu 60% Leistung und schaltet sich aus. Die Pendelschaltung der großen Kältemaschine 1 (KM1) zieht sich über fast 4 Stunden hinweg, bis sich die Anlage (KM1) nicht mehr selbsttätig regulieren kann - eingeschaltet bleibt, aber keine Kälte produziert. – siehe Abbildung 13.

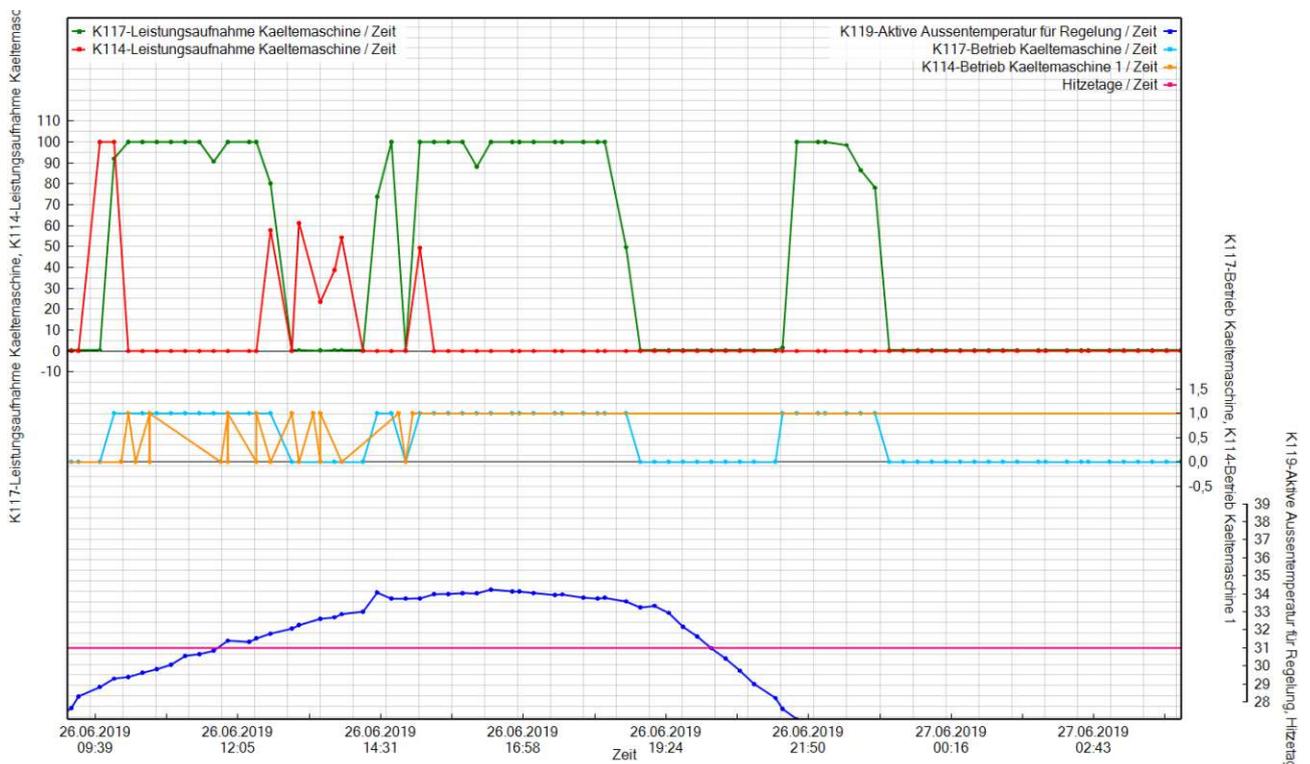


Abbildung 13.: Auswertung Pendelschaltung der KM1 an Hitzetagen < 31°C – 1. Gebäudekomplex, Fallbeispiel, Grafik erstellt am 11.06.2022 (Quelle: Melanie Krisper, Auswertung Originaldokumente des Gebäudes bzw. Auswertung anhand eines Auszugs aus der GLT, 2022)

Legende:

- **K117 Grün:** Prozentuale Leistung, Kältemaschine 2 (KM2)
- **K114 Rot:** Prozentuale Leistung, Kältemaschine 2 (KM2)
- **K119 Blau:** Außentemperatur
- **K117 Türkis:** Betrieb, Kältemaschine 2 (KM2)
- **K114 Orange:** Betrieb, Kältemaschine 1 (KM1)
- **Braun:** Hitzetage über 31°C Außentemperatur

13.5 Betriebszeiten der kleinen Kälteanlage (KM2)

13.5.1 Normalbetrieb – KM2 schaltet sich nach Erreichung des Leistungsziels aus

Wie Abbildung 15 zeigt, läuft die kleine Kältemaschine 2 (KM2) am 22.08. – 24.08.2021, während der regulären Betriebszeiten des Gebäudes, im Normalbetrieb. Die Außentemperaturen steigen innerhalb dieser beiden Tage bis zu 31°C an. Die kleine Kältemaschine produziert genügend Kälte für den 44.000m² großen 1. Gebäudekomplex und erreicht während ihrer Betriebszeiten Leistungsspitzen zwischen 40% und 85%. Aus diesem Grund schaltet sich die große Kältemaschine (KM1) nicht automatisch an.

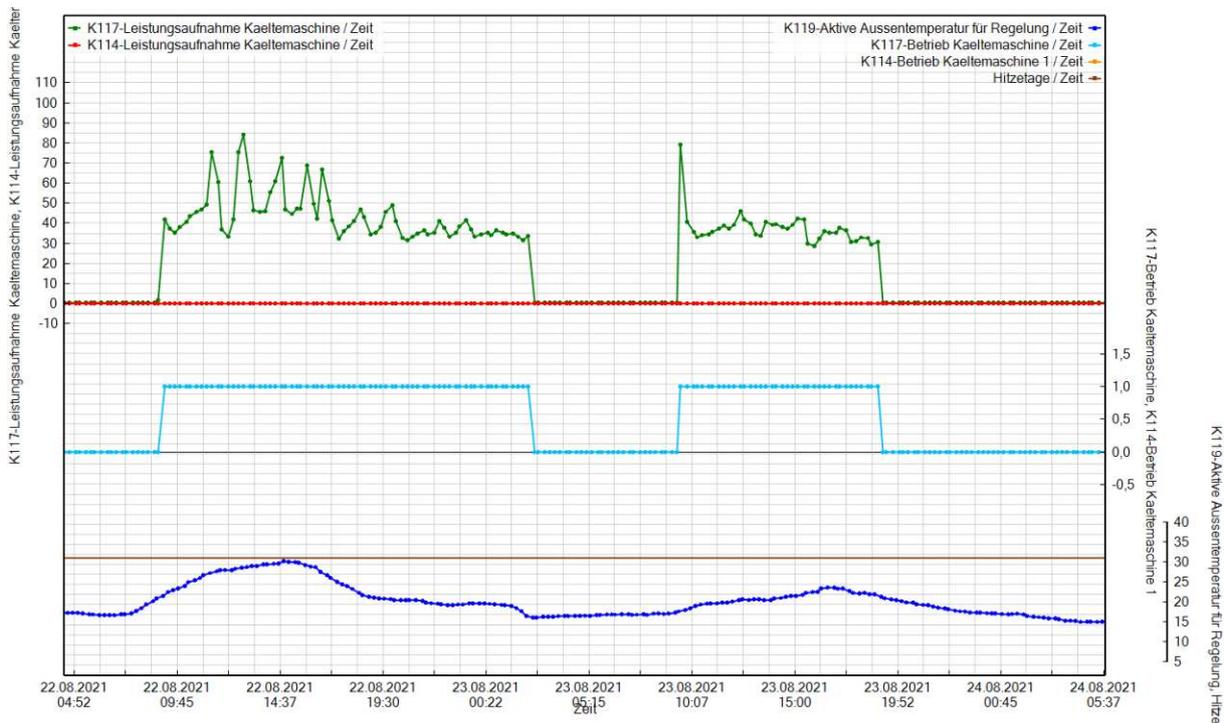


Abbildung 14.: KM2 in Normalbetrieb – 1. Gebäudekomplex, Fallbeispiel, Grafik erstellt am 14.06.2022 (Quelle: Melanie Krisper, Auswertung Originaldokumente des Gebäudes bzw. Auswertung anhand eines Auszugs aus der GLT, 2022)

Legende:

- **K117 Grün:** Prozentuale Leistung, Kältemaschine 2 (KM2)
- **K114 Rot:** Prozentuale Leistung, Kältemaschine 2 (KM2)
- **K119 Blau:** Außentemperatur
- **K117 Türkis:** Betrieb, Kältemaschine 2 (KM2)
- **K114 Orange:** Betrieb, Kältemaschine 1 (KM1)
- **Braun:** Hitzetage über 31°C Außentemperatur

13.5.2 Störfall 1 – KM2 geht in Pendelschaltung

Störfall 1 beschreibt folgende Situation, in der die kleine Kältemaschine 2 (KM2) in Pendelschaltung übergeht. Die Höchsttemperaturen an diesem Tag (04.08.2020) betragen um die 25°C. Nachdem sich die kleine Kälteanlage 2 (KM2) immer wieder ein- und ausschaltet, schaltet sich die große Kältemaschine 1 (KM1) automatisch dazu. Ab den frühen Nachmittag beträgt die Außentemperatur rund 17°C. Das Gebäude verfügt über genügend Kälte, deshalb schalten sich beide Anlagen aus.

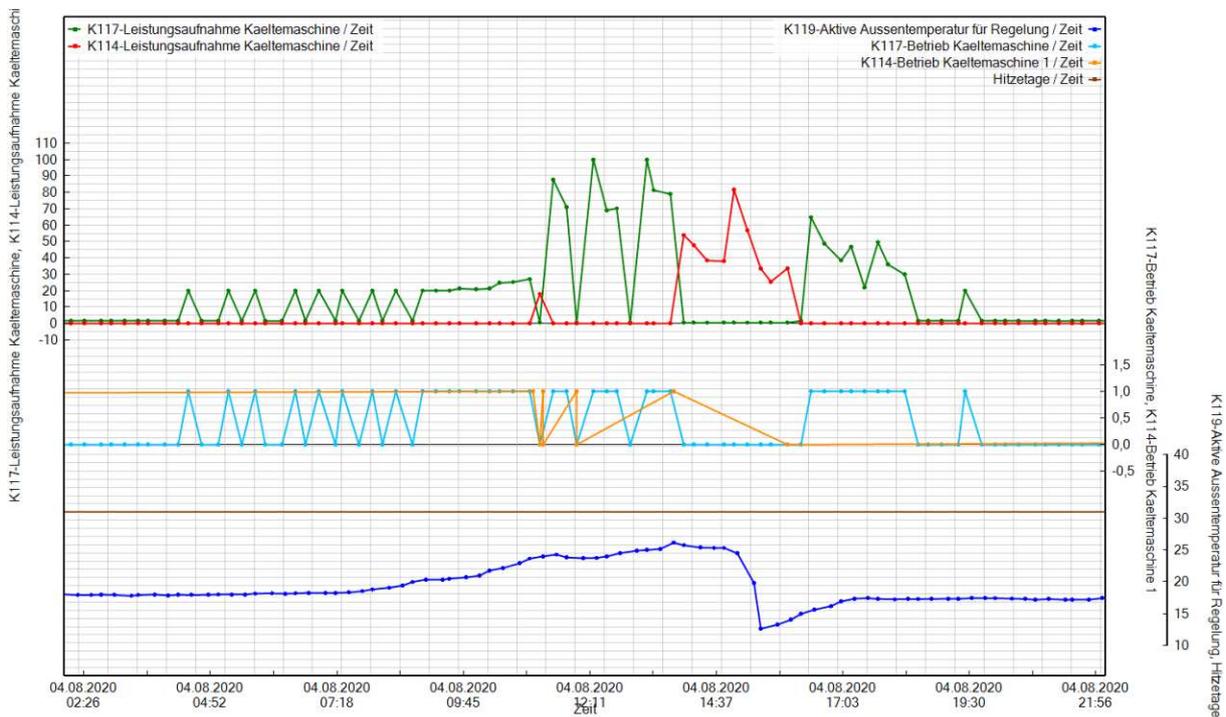


Abbildung 15.: KM2 geht in Pendelschaltung und KM1 korrigiert – 1. Gebäudekomplex, Fallbeispiel, Grafik erstellt am 14.06.2022 (Quelle: Melanie Krisper, Auswertung Originaldokumente des Gebäudes bzw. Auswertung anhand eines Auszugs aus der GLT, 2022)

Legende:

- **K117 Grün:** Prozentuale Leistung, Kältemaschine 2 (KM2)
- **K114 Rot:** Prozentuale Leistung, Kältemaschine 2 (KM2)
- **K119 Blau:** Außentemperatur
- **K117 Türkis:** Betrieb, Kältemaschine 2 (KM2)
- **K114 Orange:** Betrieb, Kältemaschine 1 (KM1)
- **Braun:** Hitzetage über 31°C Außentemperatur

13.5.3 Störfall 2 – KM2 schaltet sich wegen Überlastung aus

Störfall 2 beschreibt folgende Situation, in der sich die kleine Kältemaschine 2 (KM2) wegen Überlastung, d.h., dass sie über mehrere Stunden (ca. 6 Stunden) auf 100% Leistung gearbeitet hat, ausschaltet. Daraufhin schaltet sich die große Kältemaschine (KM1) automatisch ein und entlastet dadurch die kleine Kältemaschine (KM2). Es ist angedacht bzw. sind die Anlagen so kalibriert, dass die große Kältemaschine (KM1) die kleine Kältemaschine bei Überlastung ablöst. Die Außentemperaturen betragen zu diesem Zeitpunkt fast 30°C und der 1. Gebäudekomplex des Fallbeispiels benötigt an diesem Tag (13.08.2020) während der regulären Betriebszeiten mehr Kälte. Ab 18:00 Uhr fällt die Außentemperatur rasant ab und die kleine Kältemaschine (KM2) arbeitet über Nacht störungsfrei bzw. problemlos bei ca. 35% Leistung. Die große Kältemaschine (KM1) bleibt zu diesen Zeiten ausgeschaltet.

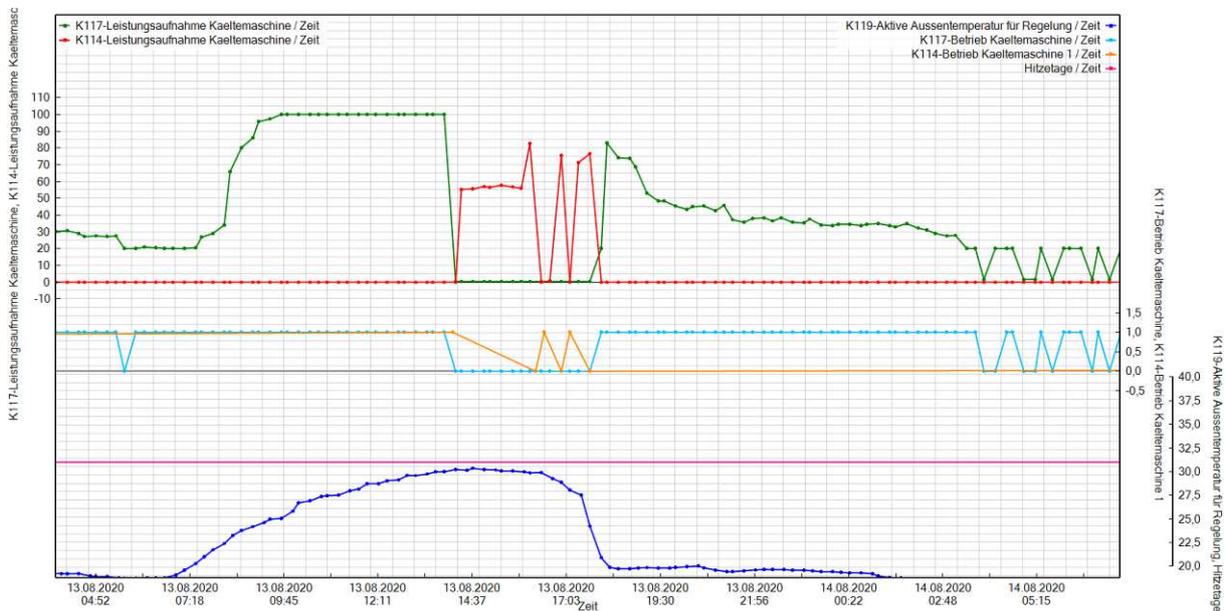


Abbildung 16.: KM2 schaltet sich wegen Überlastung aus und KM1 schaltet sich dazu – 1. Gebäudekomplex, Fallbeispiel, Grafik erstellt am 14.06.2022 (Quelle: Melanie Krisper, Auswertung Originaldokumente des Gebäudes bzw. Auswertung anhand eines Auszugs aus der GLT, 2022)

Legende:

- **K117 Grün:** Prozentuale Leistung, Kältemaschine 2 (KM2)
- **K114 Rot:** Prozentuale Leistung, Kältemaschine 2 (KM2)
- **K119 Blau:** Außentemperatur
- **K117 Türkis:** Betrieb, Kältemaschine 2 (KM2)
- **K114 Orange:** Betrieb, Kältemaschine 1 (KM1)
- **Braun:** Hitzetage über 31°C Außentemperatur

14 Vorläufige Lösungsansätze

Grundsätzlich gibt es eine Vielzahl an Möglichkeiten zur idealen Dimensionierung der Haustechnik – die Einfachsten bzw. Logischsten wären: Entweder man passt die Haustechnik an die Anforderungen des Gebäudes an, oder man passt das Gebäude an die Möglichkeiten der Haustechnik an. Idealerweise werden beide Aspekte gemeinsam geplant und aufeinander abgestimmt, was jedoch nicht heißt, dass es für immer passt, da sich die Anforderungen von Gebäuden über den Lebenszyklus oftmals ändern (z.B. Um- und Zubauten).

Maßnahmen am Gebäude, sowie an der Haustechnik können helfen die Balance wieder herzustellen, um eine effiziente und nachhaltige Nutzung zu ermöglichen. Ziel von dieser Abstimmung ist es, dass die Kühlanlagen am effizientesten arbeiten können und trotzdem den Ansprüchen des Gebäudes gerecht zu werden.

Es besteht aber auch die Möglichkeit ein Kältesystem mehrstufig, wie beim Fallbeispiel, oder einstufig auszuführen. Eine einstufige Ausführung des Kältesystem lässt nur vereinzelte globale Optimierungen zu. Eine mehrstufige Ausführung des Systems lässt jedoch mehrere lokale Optimierungen zu.

In den nächsten Absätzen werden zuerst Maßnahmen für das Kühlsystem und dann für das Gebäude selbst behandelt.

14.1 Maßnahmen für das Kühlsystem

In den folgenden Abschnitten werden mögliche Maßnahmen für das Kühlsystem beschrieben.

14.1.1 Neukonzeption der Kühlsysteme

Der naheliegendste Ansatz wäre es, die Kühlsysteme auf die gegebene Fläche anzupassen, oder die Fläche auf das vorhandene Kühlsystem anzupassen. Dieser Punkt erfordert bauliche und kostenintensive Maßnahmen und sollten so früh als möglich, also bereits in der Planungsphase, erfolgen.

14.1.2 Vermeiden von Ein- und Ausschaltvorgängen der Kühlanlage

Ein- und Ausschaltvorgänge führen zu hohem Verschleiß der Kühlanlagen. Um dies zu vermeiden wäre ein weiterer Lösungsansatz, die kleine Maschine komplett auszuschalten und nur die große Kältemaschine permanent in Betrieb zu halten. In diesem Szenario läuft die Anlage zwar auf geringer Leistung, aber sie würde sich nicht ständig nach wenigen Minuten ein- und ausschalten. Somit ist auch der Verschleiß der Maschine geringer.

14.1.3 Priorisierung der Kühlleistung auf kritische Bereiche

Im Fallbeispiel des 1. Gebäudekomplexes wäre eine effektive Methode, die Kälte von unbenutzten Räumen mithilfe der GLT wegzuschalten, um sie in die kritischen Bereiche zu leiten.

Dadurch kann die Kühlung der kritischen Bereiche gewährleistet werden, aber die Konsequenz ist, dass die unkritischen Bereiche nicht mehr ausreichend versorgt werden, was zu Unmut bei den Nutzern führen kann.

14.1.4 GLT in der Cloud

Ein modernes Konzept ist die GLT in der Cloud. Diese ermöglicht im Störfall bzw. Notfall über Fernzugriff auf die GLT zuzugreifen. Die Lösung besteht hier aus einer Standortvernetzung und dem Fernzugriff.

Die Prozesse der gebäudetechnischen Anlagen sind heutzutage überwiegend automatisiert. Die Systeme der GLT erleichtert nicht nur die Überwachung des Gebäudes, die Abbildung und die Steuerung der haustechnischen Abläufe rund ums Heizen, Kühlen, Belüften, Befeuchten, sie vereinfachen auch die Steuerung der Beleuchtung des Gebäudes. Diese Steuerungssysteme werden direkt vor Ort vom Techniker bedient und die Messdaten werden dazu auf einem lokalen Netzwerkserver bzw. auch auf anderen Storage-Medien gespeichert. Diese herkömmlichen Betriebsmodelle bringen leider auch Nachteile mit sich, wie z.B. der Wartungsaufwand ist hoch, die Kosten bei einer Investition in Soft- und Hardware sind auch hoch und zusätzlich ist der Fernzugriff und die Fernüberwachung bei diesen klassischen Betriebsmodellen nur schwer möglich. Diese negativen Kriterien haben Auswirkung auf das effiziente Betreiben von großen Anlagen und auch auf das gesamte Gebäude. (Hühren 2018, 12)

GLT-Systeme verwenden Sensoren, um die Betriebssysteme mit Daten versorgen zu können. Mithilfe dieser Sensoren ist es dem System möglich die klimatischen Bedingungen z.B. die Temperaturen und Luftfeuchtigkeit in den Innenräumen eines Gebäudes zu steuern. Diese Messpunkte, die das System bereitstellen kann, sind deshalb für den Techniker vor Ort hilfreich, da er die raumklimatischen Bedingungen besser nachverfolgen kann. Die Nachverfolgung bei älteren GLT-Systemen erweist sich oft als schwierig, da eine Schnittstelle zwischen der GLT und Drittsystemen sehr kostenintensiv ist. (May 2018, 314)

Um die anfallenden Kosten besser budgetieren zu können, die GLT flexibler nutzen zu können und eine höhere Skalierbarkeit den Betreibern der Anlagen zu ermöglichen, können Cloud-Dienste für die Steuerung und Überwachung der haus- und gebäudetechnischen Anlagen hilfreich sein. Denn die Cloud-Anbieter stellen spezielle Anforderungen, Applikationen oder Ressourcen zur Verfügung, die optimal auf die Bedürfnisse der Anwender abgestimmt sind. Die standardisierte Abwicklung und Lösung ermöglichen den Betreiber der haus- und gebäudetechnischen Anlagen eine einfache, rasche und auch sichere Anwendung und Zugriff auf alle Daten der Maschinen und Geräte. Diese Anwendung kann sowohl lokal, dezentral wie auch mobil über ein Tablet oder Smartphone erfolgen. (Hühren 2018, 12)

Zu hohe Ausgaben für das Betreiben eigener Serverinfrastrukturen und die dazugehörige Betreuung, wie auch die Instandhaltung entfallen mithilfe einer auf einer Cloud-basierenden GLT. Durch die GLT in der Cloud ist es dem Betreiber möglich zusätzliche Dienste und Funktionen ganz nach eigenem Bedarf zuzubuchen oder zu stornieren. Der Nutzungszeitraum ist klar definiert und somit ist auch die Kostentransparenz der bedarfsorientierten Abrechnung gegeben. Die Nutzung der GLT in der Cloud ist rund die Uhr und unabhängig von der Tages- und Nachtzeit, wie auch der Örtlichkeit, möglich. Das Einsehen, Überwachen und Eingreifen, ist so bei einer gegebenen Internetverbindung von überall auf der Welt möglich. Das Sicherheitsniveau bei Cloud-basierten Diensten ist durch die bestimmte Zuweisung von Berechtigungen und die Zuteilung von Zugangsdaten und Passwörtern bzw. Kennwörtern an nur autorisierte Personen, sehr hoch. (Hühren 2018, 13)

Energie-Monitoring, Remote- Management und Alarm-Management über die Cloud

Ein Cloud-basiertes Monitoring-Tool stellt den NutzerInnen und Betreibern Haus- und gebäudetechnischer Anlagen alle Funktionen für die Visualisierung und das Benchmarking komplexer Gebäudeprozesse zu Verfügung. Zudem ermöglicht ein Remote-Management über die Cloud dem Betreiber oder Nutzer ein schnelles und sicheres Zugreifen auf die Anlagen, wenn dieser nicht vor Ort ist. Dieser Service ermöglicht dem Betreiber, dass dieser über einen bestimmten Zeitpunkt alle aktuellen Messdaten und Gegebenheiten zu überwachen und bei Bedarf anzupassen. Cloudbasierte Stör- und Alarmmeldungen stehen dem Nutzer per App auch zur Verfügung, damit eine optimale GLT-Überwachung garantiert werden kann. Die automatischen Sicherheits- und Funktionsupdates gewährleisten dem Nutzer und Betreiber der Cloud-GLT einen reibungslosen und sicheren Gebäudebetrieb. Der Nutzer der GLT in der Cloud kann von diesem Betriebsmodell nur profitieren, da es transparent, flexibel, und bedarfsgerecht ist. (Hühren 2018, 13)

15 Klimawandel und das Fallbeispiel

15.1 Der Klimawandel in Europa und den Städten

Nicht nur innerhalb von Europa gibt es regionale Lufttemperaturunterschiede, es gibt diese auch zwischen den verschiedenen Jahreszeiten. In den Wintermonaten, Dezember bis Februar, sind die stärksten Außentemperaturzunahmen in Nordosteuropa von 4°C, sowie im Sommer, Juni bis August, in Südeuropa von 3°C zukünftig zu erwarten. (ZAMG 2022)

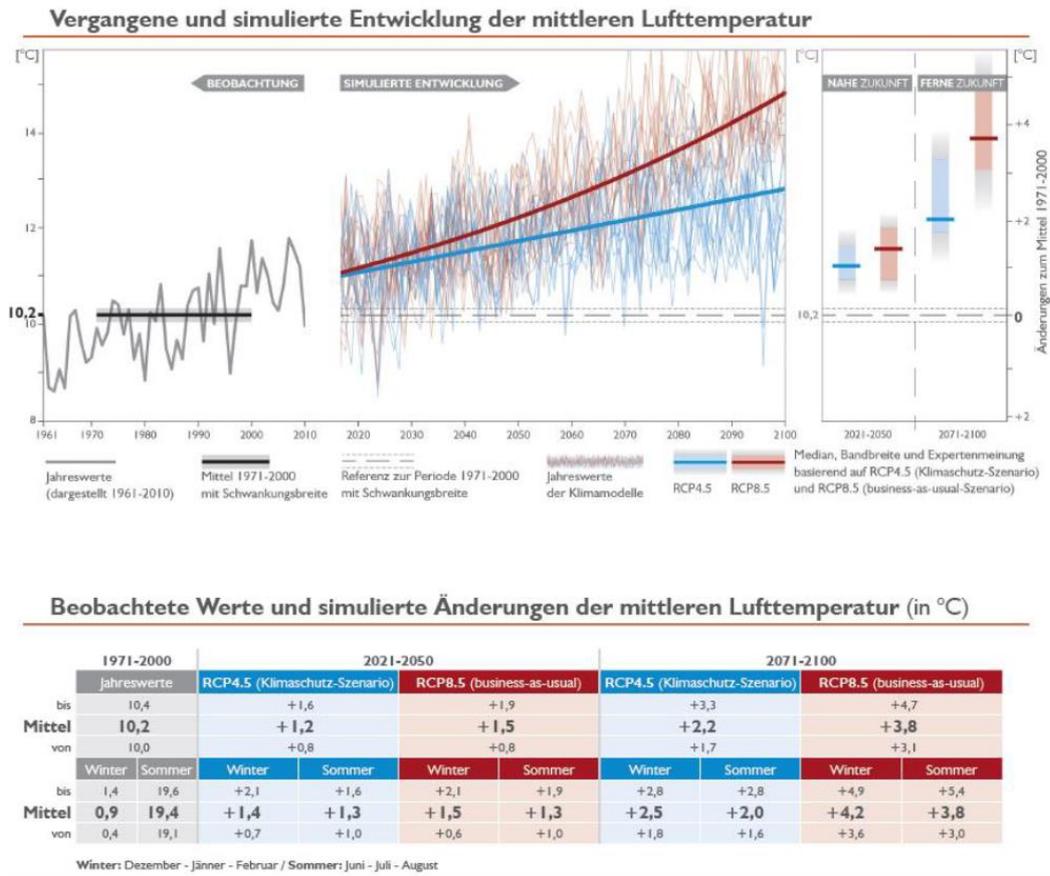


Abbildung 17.: Klimaszenarien 2021 – 2050 und 2071 – 2100, (CCCA Data Centre 2022).

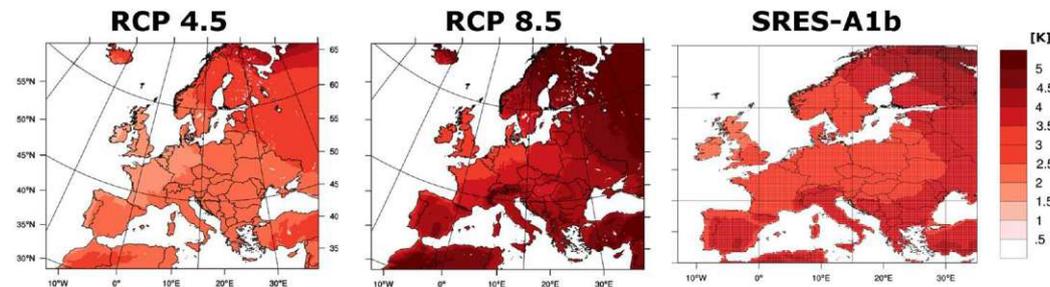


Abbildung 18.: Mögliche zukünftige Änderung der Temperatur 2071-2100 im Vergleich zu heute (1971-2000) in °C für unterschiedliche Treibhausgas-Konzentrationen. (Jacob, et al. 2014)

Vor große Herausforderungen stellt der Klimawandel auch die Städte als urbane Lebensräume, denn die Risiken für die BewohnerInnen, die kommunale Infrastruktur und die Grünflächen der Städte werden durch hochsommerliche Extremtemperaturen, Starkregenereignisse, Trocken- bzw. Dürreperioden und monsunartige Stürme weiter ansteigen.

Auch der Wärmeinseleffekt (UHI = urban heat island) in den Städten ist infolge des Klimawandel eine spezifische Begleiterscheinung, denn in urbanen Ballungsräumen sind im Unterschied zur ländlichen Umgebung bodennah höhere Lufttemperaturen festzustellen und zu erwarten. Diese Überwärmung der Städte wird als städtische Wärmeinsel bzw. UHI beschrieben. Maßgeblich an diesen Hitzeinseleffekt in den Städten sind anthropogene Wärmequellen, wie z.B. die Abwärme von Gebäuden, der Industrie und dem Verkehr, der reduzierter Anteil der Vegetation, der erhöhte Wärmespeicher von künstlichen Oberflächen, die dunklen Oberflächen der Städte, da diese die Sonnenstrahlung stärker absorbieren, die versiegelte Flächen, die zur Erwärmung und Bodentrockenheit beitragen und die langwellige Strahlung der Sonne bleibt in Straßenschluchten über längere Zeit bestehen. (Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie 2020)

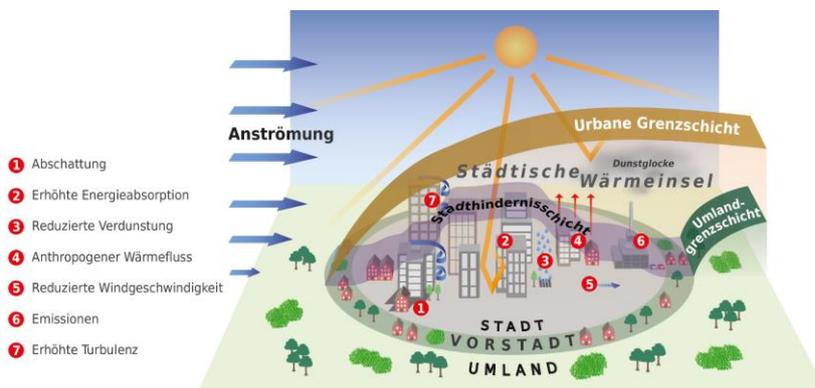


Abbildung 19.: Der Hitzeinseleffekt - Urban Heat Island-Effekt (UHI), (Deutscher Wetterdienst 2022).

Diese spürbaren und auch messbaren Fakten sind besorgniserregend und geben und das alarmierende Signal, dass der Klimaschutz zukünftig durch Klimawandelanpassungsmaßnahmen angepasst werden sollten. (Lazar 2022)

15.2 Anpassung des Fallbeispiels an den Klimawandel

Anhand des allgemeinen bauphysikalischen Haustechniknachweises des Fachplaners wurde mit dem Stand vom 15.06.2012 folgende meteorologischen Bemessungswerte festgelegt:

Meteorologische Bemessungswerte:

Winter - 11,2°C, 80 % rel. F., entsprechend ÖNORM H 7500 (OIB-382-010/99)

Sommer + 32,0 °C, 50 % rel. F.

Regenspende: 300 l/s*ha Starkniederschläge für den Raum Graz
Dauerstufe 15 min, jährlichkeit 5

Abbildung 20.: BAU- UND AUSSTATTUNGSBESCHREIBUNG (inklusive aller technischen Berichte) für die Vorlage des Entwurfs vom 05.11.2012, S.206 - Daten zum Fallbeispiel (Quelle: Originaldokument des Gebäudes, anonymisiert)

Der bauphysikalische Haustechniknachweis des Fallbeispiels wurde vor über zehn Jahren von dem damals beauftragten und zuständigen Fachplaner berechnet und angefertigt. Heute, zehn Jahre später und fast auf den Tag genau, machen sich die Folgen des fortschreitenden Klimawandel auch beim Fallbeispiel in Graz bemerkbar. Wie schon in dieser Arbeit erwähnt, werden ab 2023 auf den 1. Gebäudekomplex mit rund 44.000m² Gebäudefläche, der 2. Gebäudekomplex mit rund 41.000m² haustechnisch aufgeschaltet. Bei dieser Aufschaltung ist natürlich auch das Kältesystem inkludiert. Das bedeutet, dass ab dem Sommer 2023 die Überdimensionierung des Kältesystems im 1. Gebäudekomplex nicht mehr das Problem der ineffizienten Nutzung der Kälteanlagen darstellen wird, da der 2. Gebäudekomplex ab diesen Zeitpunkt auch mit Kälte versorgt wird und die Auslegung von 3MW Leistung der großen Kältemaschine 1 somit wieder ausbalanciert ist.

Eine neue Herausforderung ist hier durch den Klimawandel und den steigenden Außen- bzw. Lufttemperaturen geboten. Der Rückkühler am Dach des 1. Gebäudekomplexes ist nicht auf die derzeitig steigenden Temperaturen im Außenbereich ausgelegt und somit unterdimensioniert. Da bei der Planung des Kältesystems vor rund zehn Jahren mit niedrigeren meteorologischen Bemessungswerten ausgegangen wurde, siehe Abbildung 52. In den nächsten Jahren rechnen wir in den Städten mit einem Lufttemperaturanstieg von rund 3°C und einer Luftfeuchtigkeit von ca. 60%. Das derzeitige Kältesystem des Fallbeispiels ist auf solche Hitzetage im Sommer nicht ausgelegt und der Rückkühler müsste somit verdoppelt werden.

Zukünftig könnten man aber auch die Kältemaschinen auf mehr Leistung fahren lassen, dieses Szenario ist zwar kostengünstiger, verringert aber die Lebenszeit der Kälteanlage, da dies vor allem eine Überhitzung des Kältemittels und Öls zur Folge haben kann, bzw. können Kältemittel und Öl zu kochen beginnen. Im Großen und Ganzen bedeutet das, dass wenn die Maschinerie auf mehr Leistung fährt, dass die Kälteanlage über weniger Leistung verfügt. Auf mehr Leistung zufahren bedeutet hier nicht gleich mehr Effizienz – im Gegenteil, das Kältesystem des Fallbeispiels läuft somit wieder ineffizienter, da der Rückkühler unterdimensioniert ist und bei einem Leistungsanstieg der Anlage die Lebenszeit erheblich reduziert wird.

15.3 Maßnahmen für das Gebäude

In den folgenden Abschnitten werden mögliche Maßnahmen für das Gebäude beschrieben.

15.3.1 Gebäudehülle

Der Aufbau der Gebäudehülle ist ausschlaggebend für die Bauphysik des gesamten Baukörpers. Die Effizienz eines Kühlsystems hängt immer von der Dämmung und den bauphysikalischen Eigenschaften der Außenhülle eines Gebäudes ab. Auch die Jahreszeit spielt hier einen großen Faktor. Sowohl die produzierte Wärme im Inneren eines Gebäudes im Winter wie auch die durch Kälteanlagen produzierte Kälte im Sommer sollen so lange wie möglich im Gebäudeinneren gehalten werden. Vor allem Wärmebrücken sind hier ein großes Problem und sollten vermieden werden.

15.3.2 Fassadensanierung während des Lebenszyklus

Die Fassade als Teil der Gebäudehülle trägt einen maßgeblichen Anteil zur Isolierung bei und muss daher genau betrachtet werden. Hier wird als Beispiel die Vorklinik in der Harrachgasse 21 in Graz diskutiert. Dieses Gebäude steht am Campus der Karl-Franzens-Universität, gehört aber zu den Bestandsgebäuden der Medizinischen Universität, enthält Hörsäle, Büros, Sezierräume, Labore, Technikräume, eine Tiefgarage und Kühlkammern/-zellen für die Aufbewahrung der Leichen. Die Gebäudesubstanz stammt aus dem Jahre 1978 und beinhaltet HFCKW-haltige Dämmstoffe, die selbst nach der Sanierung von 2003, nicht ausgetauscht wurden. Damals entschied man sich, unter anderem auch aus Kostengründen, dass die Dämmstoffe im eingebauten Zustand weniger Schaden anrichten würden, als wenn sie durch nachhaltigere Dämmstoffe ersetzt werden würden. Interessant hierbei ist, dass die HFCKW-haltigen Dämmstoffe das Gebäude im Jahre 2003 ausreichend gedämmt haben. Das Gebäude ist aber am Ende seines Lebenszyklus und bekommt daher keinen weiteren Energieausweis mehr. Eine weitere Sanierung der Gebäudehülle wäre zu aufwendig und kostenintensiv. Nach heutigen Standards gemessen, gilt die Vorklinik als Energiefresser und die Gebäudehülle ist ineffizient, was die bauphysikalischen Aspekte betrifft. Heute, im Jahr 2022, entspricht die Vorklinik bauphysikalisch nicht mehr den Standards und wird daher 2023 rückgebaut.

15.3.3 Fallbeispiel: Gebäudehülle

Die Gebäudehülle des Fallbeispiels ist bauphysikalisch in einem sehr guten Zustand, siehe Abbildung 4. Der 1. Gebäudekomplex wurde 2017 nach den ÖGNI-Kriterien erbaut und auch mit Platin ausgezeichnet, d.h. der 1. Gebäudekomplex wurde nach sechs nachhaltigen Qualitäten errichtet:

1. Ökologische Qualität
2. Ökonomische Qualität
3. Soziokulturelle und funktionale Qualität

4. Technische Qualität
5. Prozessqualität
6. Standortqualität

Um den bauphysikalischen und technischen Kriterien in Bezug auf die Außenhülle gerecht zu werden, wurde vor Übergabe des Gebäudes an die NutzerInnen ein Blower-Door-Test durchgeführt. Mit diesem Differenzdruck-Messverfahren wurde die Luftdichtheit des Gebäudes gemessen. Anhand dieses Verfahrens wurde analysiert bzw. kontrolliert, ob sich Lecks in der Gebäudehülle befinden, und um die tatsächliche Luftwechselrate bestimmen zu können.

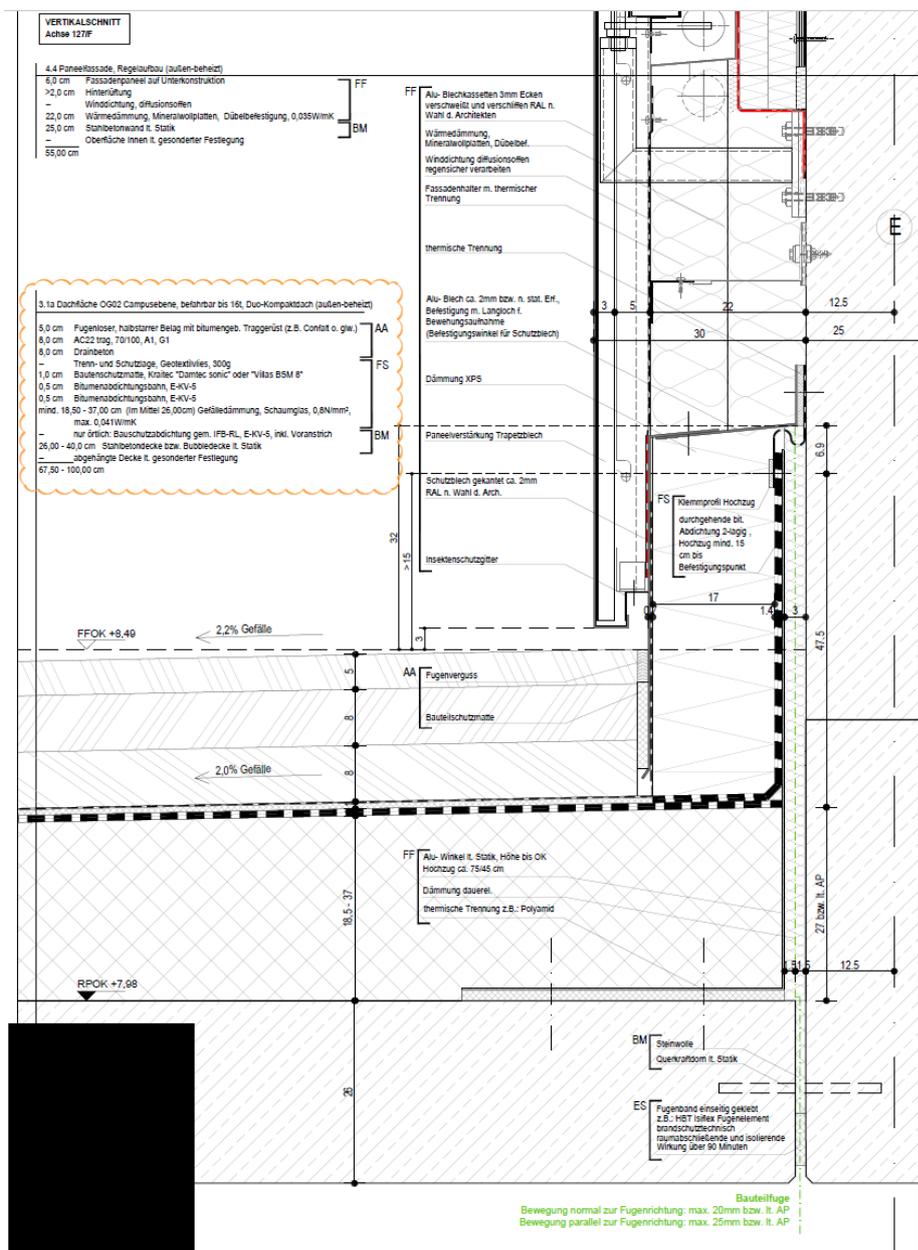


Abbildung 21.: Schnitte durch Regelfassade und Dachfläche der Campusebene des 1.Gebäudekomplexes (Quelle: Originaldokument des Gebäudes, anonymisiert)

Auch wurden Nachweise hinsichtlich des Wärmeschutzes und der Dampfdiffusion des Gebäudekomplexes erbracht, siehe die Abbildungen 19 – 24 (Nachweise Wärmedurchgang und Dampfdiffusion) und die Abbildungen 25 - 28 (Nachweise des Wärmeschutzes, U-Werte), diese zeigen, dass die Gebäudehülle bzw. die verschiedenen Aufbauten der Gebäudeteile nicht nur nachhaltig, sondern auch energieeffizient gebaut wurden.

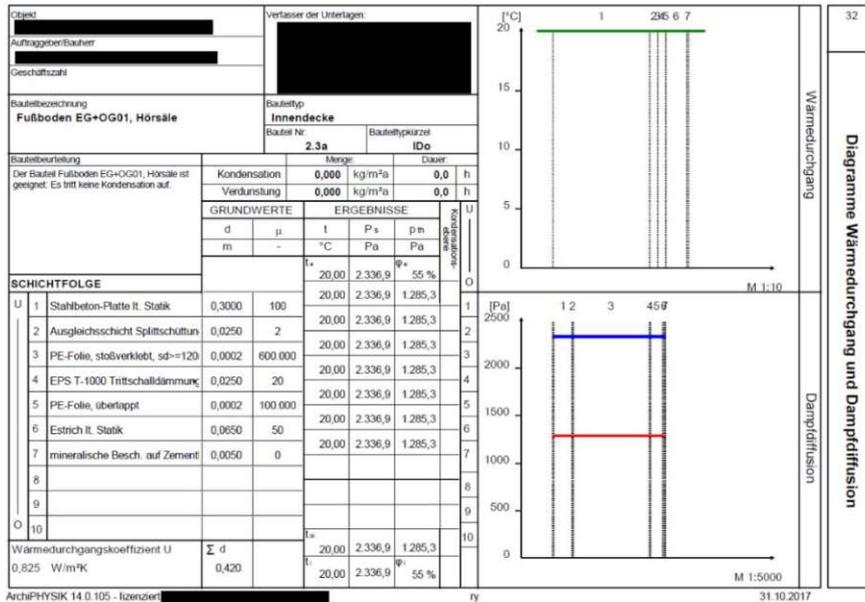


Abbildung 22.: Fußboden EG und 1.OG der Hörsäle, Diagramm Wärmedurchgang und Dampfdiffusion, Berechnung nach ArchiPHYSIK 14.0.105, 31.10.2017 (Quelle: Originalauswertungen des Gebäudes, anonymisiert)



Abbildung 23.: Erdberührende Außenwände 1.UG, EG und 1.OG, Diagramm Wärmedurchgang und Dampfdiffusion, Berechnung nach ArchiPHYSIK 14.0.105, 31.10.2017 (Quelle: Originalauswertungen des Gebäudes, anonymisiert)

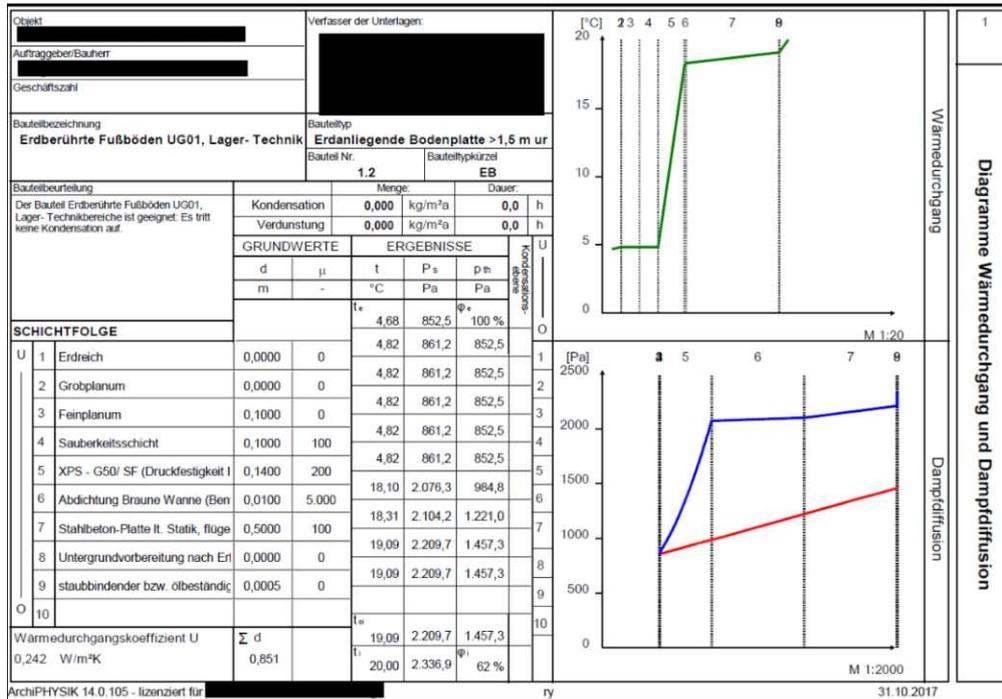


Abbildung 24.: Erdberührte Fußböden im 1.UG, Lager- und Technikbereiche, Diagramm Wärmedurchgang und Dampfdiffusion, Berechnung nach ArchiPHYSIK 14.0.105, 31.10.2017 (Quelle: Originalauswertungen des Gebäudes, anonymisiert)

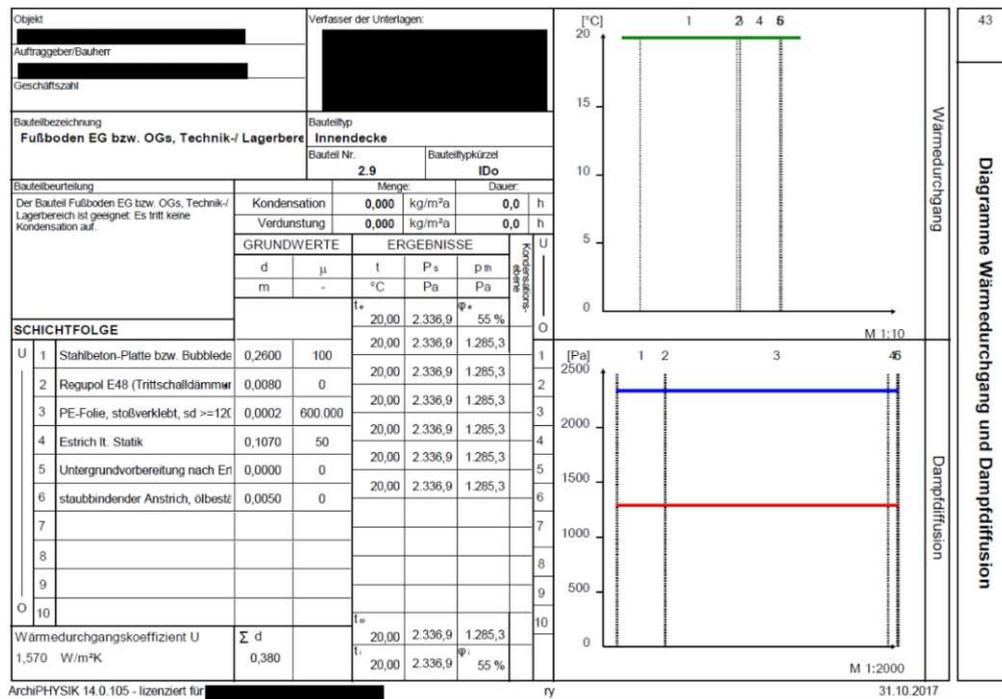


Abbildung 25.: Fußböden EG bzw. OGs, Lager- und Technikbereiche, Diagramm Wärmedurchgang und Dampfdiffusion, Berechnung nach ArchiPHYSIK 14.0.105, 31.10.2017 (Quelle: Originalauswertungen des Gebäudes, anonymisiert)

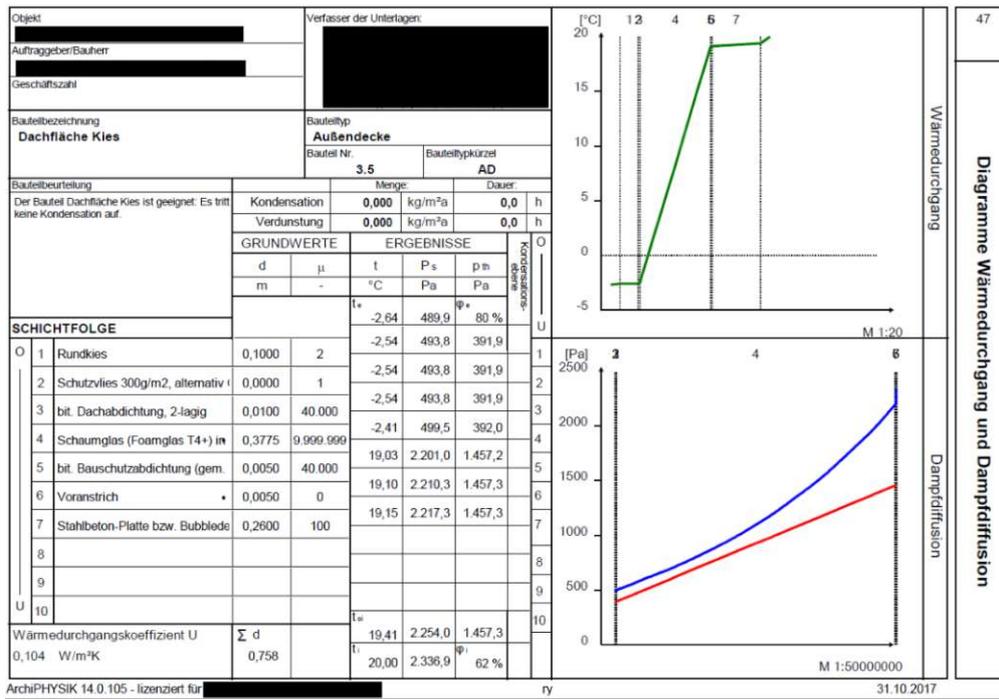


Abbildung 26.: Dachfläche 6.OG bekiest, Diagramm Wärmedurchgang und Dampfdiffusion, Berechnung nach ArchiPHYSIK 14.0.105, 31.10.2017 (Quelle: Originalauswertungen des Gebäudes, anonymisiert)

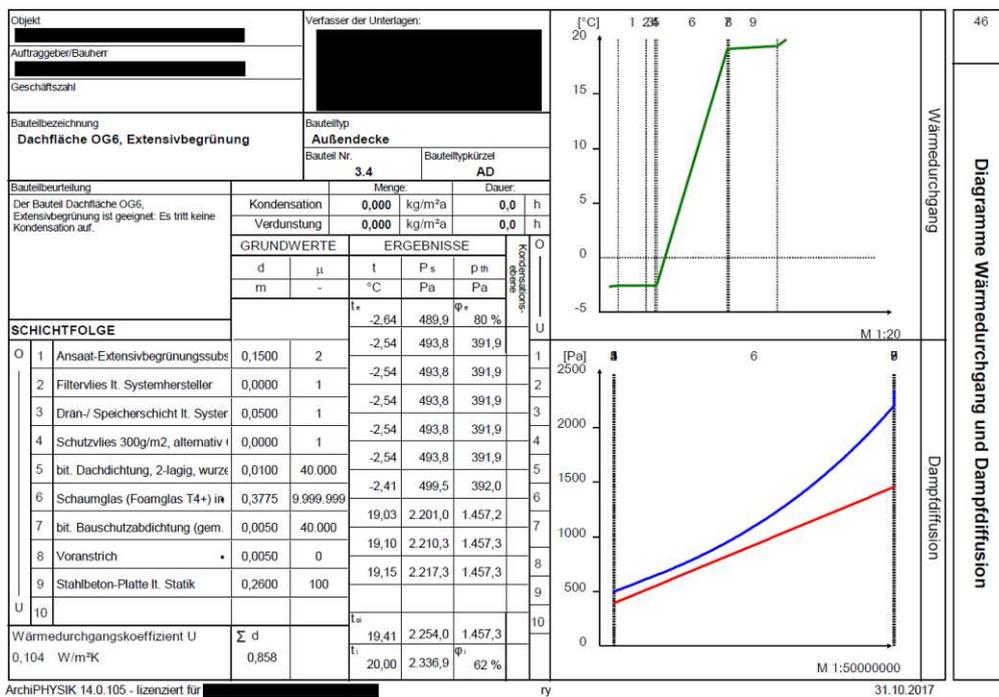


Abbildung 27.: Dachfläche 6.OG extensiv begrünt, Diagramm Wärmedurchgang und Dampfdiffusion, Berechnung nach ArchiPHYSIK 14.0.105, 31.10.2017 (Quelle: Originalauswertungen des Gebäudes, anonymisiert)

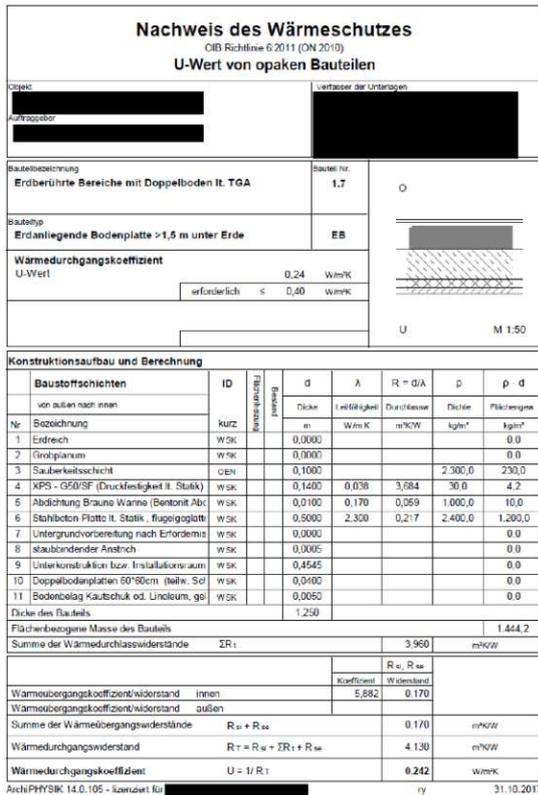


Abbildung 28.: Nachweis des Wärmeschutzes – U-Wert für erdberührte Bereiche mit Doppelboden lt. TGA, Berechnung nach ArchiPHYSIK 14.0.105, 31.10.2017 (Quelle: Originalauswertungen des Gebäudes, anonymisiert)

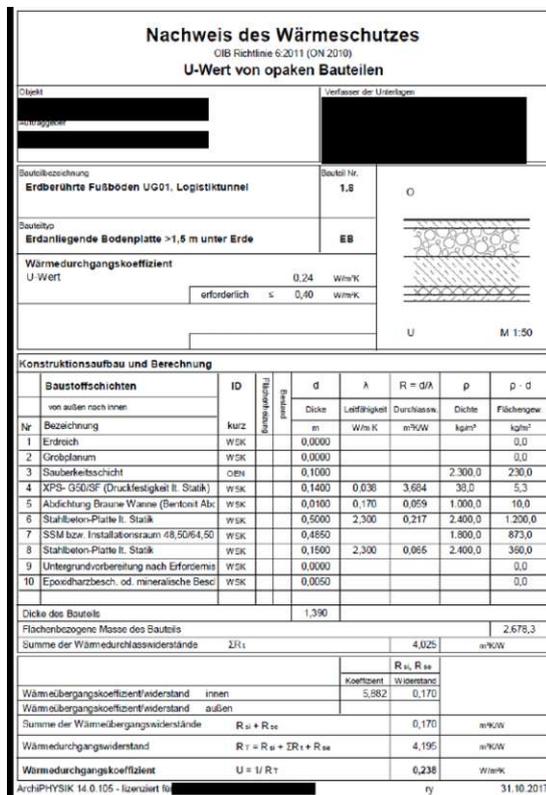


Abbildung 29.: Nachweis des Wärmeschutzes – U-Wert für erdberührte Fußböden im 1.UG - Logistiktunnel, Berechnung nach ArchiPHYSIK 14.0.105, 31.10.2017 (Quelle: Originalauswertungen des Gebäudes, anonymisiert)

Nachweis des Wärmeschutzes									
OIB Richtlinie 6:2011 (ON 2010)									
U-Wert von opaken Bauteilen									
Objekt		Ladung der Lüftung							
Auftraggeber									
Bauteilbezeichnung		Bauteil Nr.							
Fußboden EG, Technik-/ Lagerbereich (zu unbeheizt)		2.21							
Bauteiltyp		DQÜo							
Decke gg unbeheizte Gebäudeteile		DQÜo							
Wärmedurchgangskoeffizient		0,18 W/mK							
U-Wert		erforderlich ≤ 0,40 W/mK							
				U M 1:20					
Konstruktionsaufbau und Berechnung									
Baustoffschichten									
Nr	Bezeichnung	ID	kurz	Dicke m	Leitfähigkeit W/mK	R = d/λ m²K/W	ρ kg/m³	p · d kg/m²	p · d kg/m²
1	Taktfließen AZ E-31-036/2 (15,0 cm)			0,1600	0,035	4,285	150,0	22,5	
2	Stahlbeton-Platte lt. Statik, 30cm	WSK		0,3000	2,300	0,130	2.400,0	720,0	
3	Ausgleichsschicht Spitzschüttung (geb.)	WSK		0,0750	0,700	0,107	1.800,0	135,0	
4	PE-Folie, stoßverklebt, sd=120m	WSK		0,0002	0,230	0,001	1.500,0	0,3	
5	EPS T-1000 Trittschalldämmung (Druck)	Austh		0,0250	0,038	0,658	12,0	0,3	
6	PE-Folie, überlappt	WSK		0,0002	0,230	0,001	1.500,0	0,3	
7	Estrich lt. Statik	WSK		0,0650	1,400	0,046	2.000,0	130,0	
8	Untergrundvorbereitung nach Erfordernis	WSK		0,0000				0,0	
9	staubbindender bzw. ölbeständiger Anstr.	WSK		0,0050				0,0	
Dicke des Bauteils				0,620					
Flächenbezogene Masse des Bauteils						5,229		m²K/W	
Summe der Wärmedurchlasswiderstände				ΣR _t					
						R _{si} , R _{se}			
Wärmeübergangskoeffizient/widerstand innen				Koeffizient		Widerstand			
				5,882		0,170			
Wärmeübergangskoeffizient/widerstand außen						5,882		0,170	
Summe der Wärmeübergangswiderstände				R _{si} + R _{se}		0,340		m²K/W	
Wärmedurchgangswiderstand				R _T = R _{si} + ΣR _t + R _{se}		5,569		m²K/W	
Wärmedurchgangskoeffizient				U = 1/R _T		0,180		W/mK	
ArchIPHYSIK 14.0.105 - lizenziert für						ry		31.10.2017	

Abbildung 30.: Nachweis des Wärmeschutzes – U-Wert für Fußböden EG der Technik- und Lagerbereiche, Berechnung nach ArchiPHYSIK 14.0.105, 31.10.2017 (Quelle: Originalauswertungen des Gebäudes, anonymisiert)

Nachweis des Wärmeschutzes									
OIB Richtlinie 6:2011 (ON 2010)									
U-Wert von opaken Bauteilen									
Objekt		Ladung der Lüftung							
Auftraggeber									
Bauteilbezeichnung		Bauteil Nr.							
Fußboden OGs, Besprechung/ Büros		2.17b							
Bauteiltyp		DDh							
Decke üb Durchfahrt hinterlüftet		DDh							
Wärmedurchgangskoeffizient		0,14 W/mK							
U-Wert		erforderlich ≤ 0,20 W/mK							
				U M 1:50					
Konstruktionsaufbau und Berechnung									
Baustoffschichten									
Nr	Bezeichnung	ID	kurz	Dicke m	Leitfähigkeit W/mK	R = d/λ m²K/W	ρ kg/m³	p · d kg/m²	p · d kg/m²
1	Fassadenelement auf UK	WSK	saalbock	0,0600				0,0	
2	Hinterlüftung	WSK	saalbock	0,1000				0,0	
3	Mineralfolle FDP, kaschert, Döbelbefest.	WSK		0,2200	0,035	6,285	50,0	11,0	
4	Stahlträger HEB1000 lt. Statik/ Luftraum	WSK		1,8000				0,0	
5	Stahlbeton-Platte lt. Statik	WSK		0,2600	2,300	0,113	2.400,0	624,0	
6	Ausgleichsschicht Spitzschüttung (geb.)	WSK		0,0250	0,700	0,035	1.800,0	45,0	
7	PE-Folie, stoßverklebt (sd=120m)	WSK		0,0002	0,230	0,001	1.500,0	0,3	
8	EPS T-1000 Trittschalldämmung (Druck)	Austh		0,0200	0,038	0,526		0,0	
9	PE-Folie, überlappt	WSK		0,0002	0,230	0,001	1.500,0	0,3	
10	Estrich lt. Statik	WSK		0,0650	1,400	0,046	2.000,0	130,0	
11	Lamellenparkettboden	WSK		0,0100			700,0	7,0	
Dicke des Bauteils				1,840					
Flächenbezogene Masse des Bauteils						7,009		m²K/W	
Summe der Wärmedurchlasswiderstände				ΣR _t					
						R _{si} , R _{se}			
Wärmeübergangskoeffizient/widerstand innen				Koeffizient		Widerstand			
				5,882		0,170			
Wärmeübergangskoeffizient/widerstand außen						5,882		0,170	
Summe der Wärmeübergangswiderstände				R _{si} + R _{se}		0,340		m²K/W	
Wärmedurchgangswiderstand				R _T = R _{si} + ΣR _t + R _{se}		7,349		m²K/W	
Wärmedurchgangskoeffizient				U = 1/R _T		0,136		W/mK	
ArchIPHYSIK 14.0.105 - lizenziert für						ry		31.10.2017	

Abbildung 31.: Nachweis des Wärmeschutzes – U-Wert für Fußböden OGs – Besprechungsräume und Büros, Berechnung nach ArchiPHYSIK 14.0.105, 31.10.2017 (Quelle: Originalauswertungen des Gebäudes, anonymisiert)

15.4 Fensterelemente – Sonnenschutz

Einen wesentlichen Faktor, um eine sommerliche Überhitzung der Räume eines Gebäudes zu minimieren, spielt die Ausrichtung des Gebäudes und die in der Fassade verbauten Fensterelemente. Fenster können über die Art der Verglasung sowie über die Art des eingebauten Sonnenschutzes zur Abstrahlung bzw. Abschirmung von Sonnenwärme beitragen.

Damit im Sommer die Wärme nicht in das Gebäudeinnere gelangt, ist ein außenliegender Sonnenschutz am effektivsten. Dieser garantiert, dass die Wärme im Sommer bereits außen vor dem Fenster abgefangen wird und sich somit nicht innerhalb eines Gebäudes aufstauen kann. Auch die Verglasung ist relevant, denn eine Isolierverglasung, 2-fach oder 3-fach Verglasung mit Edelgasfüllung in den Zwischenkammern, hält an Sommertagen die durch Kühlsystemen produzierte Kälte im Rauminnen und die Hitze im Außenbereich. Hier ist ein geringer U-Wert der Fensterelemente/Verglasung ausschlaggebend, um eine Wärmeübertragung möglichst gering zu halten.

Ein innenliegender Sonnenschutz ist für Räume mit einer Süd-West-Ausrichtung nicht ratsam, da die Wärmeentwicklung an Sommertagen im Außenbereich sehr hoch ist. Durch einen innenliegenden Sonnenschutz staut sich die Hitze hinter dem Glas eines Fensterelementes. Sobald das der Fall ist, muss die Wärme wieder aus dem betroffenen Raum herausgeleitet werden durch Lüftungs- bzw. Kühlsysteme. Dies hat zur Folge das mehr Kühllast für diesen Raum benötigt wird und der Energieaufwand steigt.

15.4.1 Fallbeispiel: Außen- und innenliegender Sonnenschutz

Im Fallbeispiel des 1. Gebäudekomplexes wurden alle Fensterelemente mit einer 3-fach Sonnenschutzverglasung verbaut. Ein Sensoren-gesteuerter außenliegender Sonnenschutz, der je nach Sonneneinfall die Verdunkelung selbst steuert und schließt, wurde vor alle Fensteröffnungen in die Fassade verbaut. Zusätzlich wurden von den NutzerInnen als Blendschutz ein innenliegender Sonnenschutz integriert. Bei Bedarf ist es der Technischen Betriebsführung mit Hilfe der GLT möglich den außenliegenden Sonnenschutz je nach Witterung und Jahreszeit selbstständig zu steuern. Um auch an Hitzetagen den außenliegenden Sonnenschutz tagsüber geschlossen zu halten, siehe Abbildung 15.

Im Gegensatz dazu wurde bei der Fassade des 2. Gebäudekomplexes Vorbaurollläden verbaut, um die Kosten gering zu halten. Die NutzerInnen können diese jederzeit selbstständig bedienen. An den innenliegenden Blendschutz bestehend aus Baumwollpaneelen, wurde aber bei jedem Fensterelement gedacht. Wie auch beim 1. Gebäudekomplex wurde beim 2. Gebäudekomplex eine 3-fach Sonnenschutzverglasung verbaut.

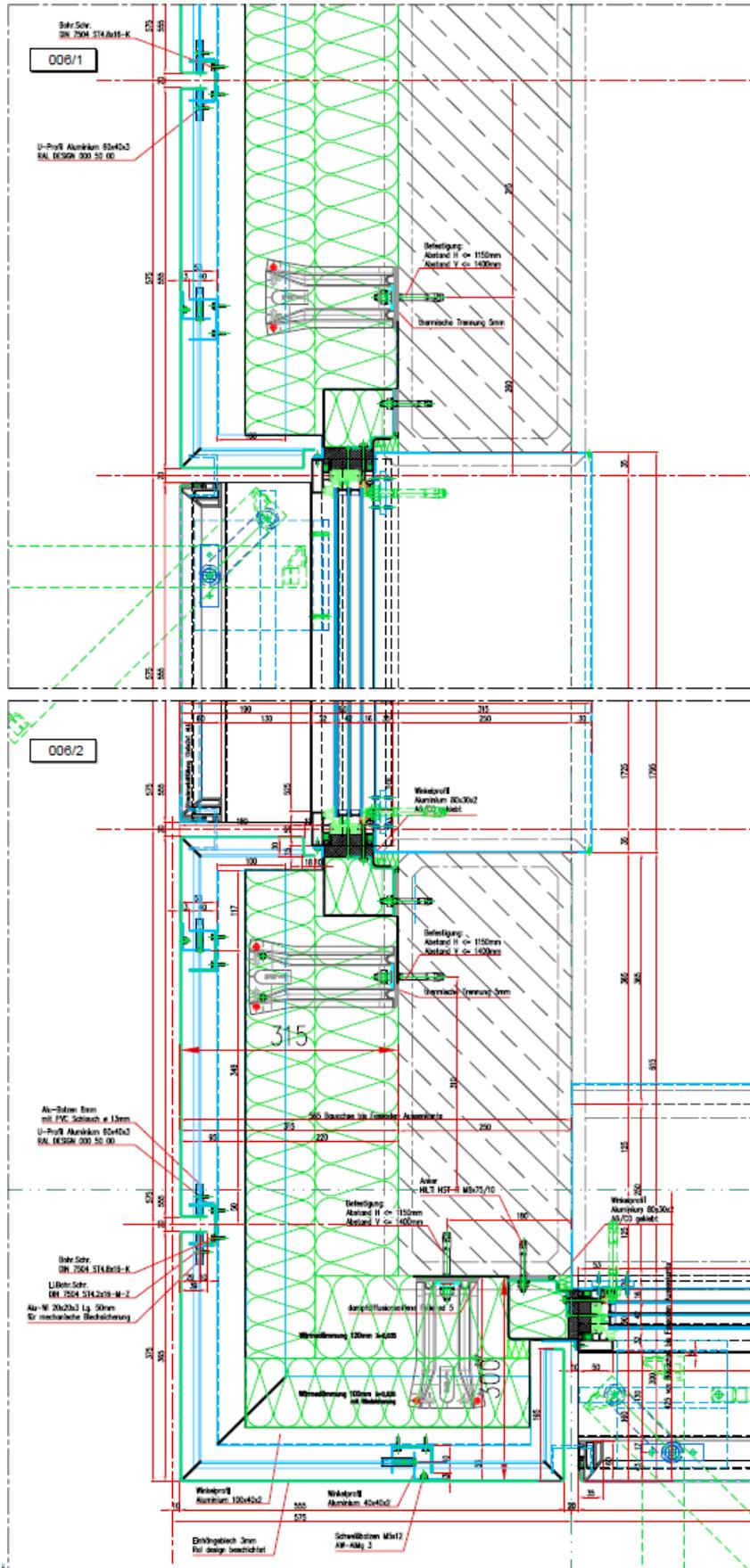


Abbildung 32.: Schnitt durch 3-fach Isolierfenster, mit außenliegendem, sensorgesteuertem Sonnenschutz (Quelle: Originaldokument des Gebäudes, anonymisiert)

176

BAUPHYSIKALISCHER NACHWEIS

A15 - Wohnbauförderung

TY AF	BAUTEIL: 3-fach-Sonnenschutzglas (NormgröÙ)	VERFASSER DER UNTERLAGEN: <div style="background-color: black; width: 100%; height: 40px;"></div>	WBf 6c
----------	--	--	--------

Geschäftszahl:	Bauvorhaben: <div style="background-color: black; width: 100%; height: 20px;"></div>
----------------	--

Bauteilbeschreibung - Fenstergröße		Normgröße		
Breite des Fensters	(Stockaußenmaß)	B	m	1,23
Höhe des Fensters	(Stockaußenmaß)	H	m	1,48
Fenstergröße	(Stockaußenmaß)	B x H	m ²	1,8204
Verglasungsfläche		A _g	m ²	1,27
Rahmenfläche		A _f	m ²	0,55
Verglasungsart gemäß ÖNORM B 8110-1 / Tabelle B.2				
Bezeichnung des Glases: 3-fach-Sonnenschutzglas, neutral beschichtet				
Wärmedurchgangskoeffizient der Verglasung		U _g	W/m ² K	0,60
GesamtenergiedurchlaÙ des Glases		g	-	0,300
Korrekturkoeffizient für die 2D-Wärmebrücke zwischen Rahmen und Verglasung		ψ	W/mK	0,043
Art des Fensterrahmens				
Materialangabe Aluminiumfenster, HI- Profil				
Wärmedurchgangskoeffizient des Rahmens		U _f	W/m ² K	1,40
Korrekturkoeffizient für die 2D-Wärmebrücke zwischen Rahmen und Verglasung		ψ	W/mK	0,043
Länge der Wärmebrücke, für die psi zutrifft		l	m	4,54
Der WÄRMEDURCHGANGSKOEFFIZIENT U_w des FENSTERS beträgt gemäß ÖNORM B 8110-1				
$U_w = (U_g \cdot A_g + U_f \cdot A_f + l \cdot \psi) / (A_f)$		U _w	W/m ² K	0,95
<p>Es ist zu beachten, daß die Summe von (A_g + A_f) für das Bauprodukt Fenster nicht ident sein muss mit der durch die Architekturlichte gegebenen Fensterfläche. Für die Bestimmung von A_g, A_f, l und die Werte psi siehe ÖNORM B 8110-1 und ÖNORM EN 10077-1. Sofern keine genaueren Werte für psi zur Verfügung stehen, ist der Wert 0,08 W/m²K einzusetzen.</p>				

Der WÄRMEDURCHGANGSKOEFFIZIENT U_w des FENSTERS beträgt gemäß Gutachten			
des/der:		U _w	W/m ² K
Zahl :	vom:		0,95

ArchiPHYSIK 14.0.105 - lizenziert für 31.10.2017

Abbildung 33.: Nachweis des Wärmeschutzes – U-Wert für 3-fach Sonnenschutzglas, neutral beschichtet (Quelle: Originalauswertungen des Gebäudes, anonymisiert)

15.5 Verteilung von Hitzequellen

Ein Lösungsansatz für die Umnutzung von Räumlichkeiten wäre die Wärmequellen nicht zu sehr an einem Ort zu konzentrieren, sondern aufzuteilen. Dadurch kann die Abwärme leichter abtransportiert werden und es kommt nicht zu Hitzestaus in einzelnen Räumen.

15.5.1 Tages- und Kunstlicht im Rauminnen

Weiters ist auf das Tages- und Kunstlicht im Rauminnen zu achten, denn diese tragen zusätzlich auch zur Wärmeentwicklung in Räumen bei. Ratsam ist es, um weitere Wärmequellen gering zu halten, bestehende Leuchtkörper durch LED-Lampen bzw. LED-Paneele oder LED-Röhren auszutauschen, um den Stromverbrauch zu verringern und um eine zusätzliche Kühlung in den Räumen zu vermeiden. Außerdem wird auch der Wartungsaufwand verringert, da diese eine höhere Lebensdauer aufweisen als Leuchtstoffröhren. LEDs haben im Vergleich zu Leuchtstoffröhren einen mehr als 50% niedrigeren Energieverbrauch: Eine LED mit 19W entspricht der Lichtleistung einer 58W Leuchtstoffröhre (Leuchtmittelmarkt 2022, Vergleich). LEDs haben außerdem eine viel längere Lebensdauer: 40.000 Betriebsstunden LED vs. 15.000 Betriebsstunden Leuchtstoffröhre (ED Tipps 2022). Außerdem beinhalten LEDs kein Quecksilber was der Umweltbelastung bei der Entsorgung zugutekommt (Leuchtmittelmarkt 2022, Entsorgung). Einzig die Anschaffungskosten von LED sind um einiges höher, was sich jedoch bereits nach 3 Jahren durch die Energieeinsparungen wieder amortisiert (Ledaxo 2022).

An der Universität Siegen (Deutschland) wurde als Pilotprojekt 2014 ein Hörsaal mit 160 Sitzplätzen komplett mit LED-Leisten bestückt, wofür damals ein Budget von 20.000 Euro zur Verfügung stand. In der Zwischenzeit ist die LED-Technologie bereits weiter fortgeschritten und daher könnte so ein Projekt wahrscheinlich heutzutage viel billiger durchgeführt werden. (Universität Siegen 2014)

15.5.2 Fallbeispiel: Künstliche Lichtquellen

Im Fallbeispiel des 1. Gebäudekomplexes entschieden sich die Projektbeteiligten aus Kostengründen gegen LED-Lampen und LED-Paneele. Eine einfache Umrüstung auf LED-Licht ist leider nicht möglich, denn es müssten nicht nur die Leuchten, sondern auch die Fassungen ausgetauscht werden. Die Kosten sind enorm und übersteigen sogar die Millionengrenze. Messungen an Tagen mit einer hohen Außentemperatur ergaben, dass die kritischen Räume, wie Labore, Prosektur und Hörsäle, einer Wärmeentwicklung von zusätzlichen 2,2 Grad durch die Beleuchtung ausgesetzt sind. Speziell in diesen Räumen ist es daher von großer Bedeutung, dass die Kühlleistung ausreichend ist.

15.5.3 Leuchtstoff vs. LED

Früher war die Leuchtstoffröhre auch als Neonröhre bekannt, da die Röhren ehemals das Gas Neon enthalten haben. Dieses Gas wurde aber durch Quecksilbergas und zusätzlich durch

Argon ersetzt wurde. Die ultraviolette Strahlung wird von der Leuchtstoffbeschichtung in erkennbares Licht geändert, diese werden nun aber auf dem Markt verstärkt durch LED-Leuchtmittel und LED-Paneele ersetzt. (smart-rechner.de 2022)

Die Anzahl der Lumen je Watt (lm/W), das ist Maßzahl wieviel Helligkeit erzeugt wird, beträgt bei Leuchtstoffröhren in der Regel zwischen 60 und 100 lm/W. Bei der Umrechnung der Wattanzahl bzw. des Bedarfs an Watt bei LED-Leuchtkörpern wird im Bezug zu Leuchtstoffröhren immer der Mittelwert herangezogen, also 80lm/W. Zur Veranschaulichung, man stellt sich eine Leuchtstoffröhre mit 10 Watt und einer Helligkeit von 800 Lumen vor, somit ist die Leuchtstoffröhre ca. 1,4mal weniger effizient als eine LED-Leuchte und benötigt somit auch 1,4mal mehr Energie als die LED-Leuchte (smart-rechner.de 2022). Damit ist LED nicht nur effizienter als die Leuchtstoffröhre, sie weist auch eine längere Lebensdauer auf. So kommt die LED-Leuchte je nach Modell auf 30.000 bis 50.000 Betriebsstunden und die Leuchtstoffröhre im Vergleich auf nur ca. 15.000 Betriebsstunden. Auch bei der Wärmeentwicklung und Abgabe unterscheiden sich die Leuchtstoffröhre und die LED-Leuchte. Laut einer Studie vom TEC-Institut (Die TEC Innovation GmbH & Co. KG ist seit 2004 ein kompetenter Partner für Auftragsforschung, Qualitätssicherung und Produktentwicklung im elektrotechnisch-energetischen Bereich) weisen beide Produkte gravierende Differenzen bei der Wärmeentwicklung in Betrieb auf – z.B. erreichte eine 150cm lange getestete Leuchtstoffröhre nach ca. 30 Minuten Betriebszeit eine Temperatur von ca. 55° Celsius auf. Vergleichsweise wurde parallel zur Leuchtstoffröhre auch eine LED-Röhre mit derselben Länge getestet, diese blieb allerdings für längere Zeit stabil unter 40° Celsius. LED-Leuchten sind umweltfreundlicher, da sie anders als die Leuchtstoffröhre, kein Quecksilber enthalten. LED-Leuchtkörper können sogar recycelt werden, da sie keine giftigen Inhaltstoffe aufweisen und somit auch kein Gefahrgut darstellen. (led-leuchtstofflampe.de 2016)

15.6 Passive Wärmelasten reduzieren – Interne Wärmelasten vermeiden

Auch jede weitere Wärmequelle abseits der Beleuchtung sollte reduziert bzw. vermieden werden, um die Kühlsysteme nicht unnötig zu strapazieren. Der Betrieb und die Benützung von Computern spielen hier eine Rolle. Es könnten einerseits energiesparende Komponenten verwendet werden, die Betriebszeiten eingeschränkt werden, oder aber die Computer könnten ganz aus dem Gebäude verbannt werden: Eine vielversprechende Methode stellt hier Cloud-Computing dar, denn Cloud Computing ist das Outsourcen von Soft- und Hardware zu einem externen Anbieter im Internet. Cloud Computing stellt somit eine Optimierung für viele Arbeits-, Geschäfts- und Betriebsprozesse in Unternehmen dar. Verschiedene IT-Leistungen und auch IT-Infrastrukturen, wie etwa Speicherplatz, Anwendungssoftware und Rechenkapazitäten, werden per Internet als Service angeboten und bereitgestellt. Unter Cloud Computing versteht man eine virtuelle Wolke, die aus miteinander verbundenen externen Computern und Servern

besteht. Der Zugriff auf die Computing Cloud-System erfolgt für die NutzerInnen per Login. Die Nutzung und der Bezug von Cloud Computing erfolgt dynamisch, d.h., dass die Abrechnung später erfolgt und dass auch nur nach dem tatsächlichen Nutzen. (salt-solutions.de 2022)

Andererseits könnte die Abwärme aber auch genutzt werden, wie es zum Beispiel Lösungen der Firma Cloud & Heat machen: Die Abwärme wird hier einem Warmwasserkreislauf zugeführt, welches wiederum zum Heizen oder Warmwasseraufbereitung benutzt werden kann (t3n.de 2022).

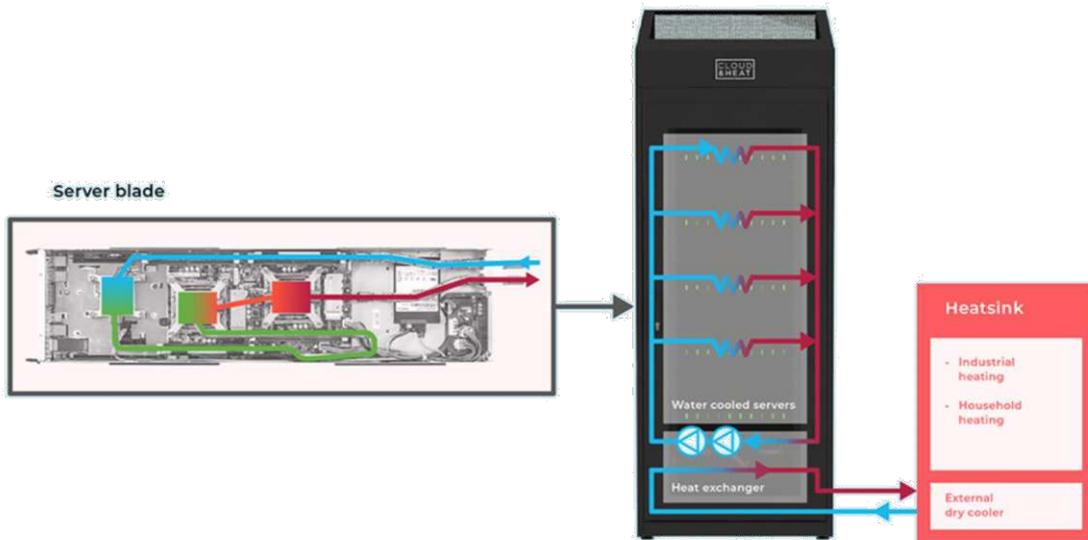


Abbildung 34.: Cloud and Heat Hardware (Cloud & Heat GmbH 2022)

15.6.1 Überhitzung von Serverräumen vermeiden

Es existieren noch andere energiesparende Systeme, um eine Überhitzung von Serverräumen zu vermeiden, ohne auf Fan Coils und andere Kühlsysteme zurückzugreifen. Zum Beispiel bei passiv gekühlten Serverschränken wird ungekühlte Luft verwendet, welche durch Öffnungen wie Lüftungsschlitzen oder perforierte Türen in den Schrank geleitet wird, sodass ein natürlicher Luftstrom erzeugt wird, der die Server, Router und Switches kühlt hält.

16 Temperaturhaushalt | Allgemeine Lösungen

In diesem Kapitel werden allgemeine Maßnahmen zur Regulierung des Temperaturhaushaltes von Gebäuden beschrieben.

16.1 Bauteilaktivierung

Beton weist eine hohe Massendichte auf. Mit diesen Eigenschaften eignet sich Beton als hervorragender Wärme- und Kältespeicher. Genau aus diesem Grund wird die thermische Bauteilaktivierung (TBA) vorzugsweise in Büro- und Verwaltungsgebäuden, verwendet. Die TBA eignet sich sehr gut, um in den Innenräumen ein angenehmes Raumklima zu erzeugen. Die Entscheidung bei Wohnhäusern und Wohnbauten fällt hier meist auf Fußbodenheizungen, da diese die Heizkörper und Kollektoren ersetzen und somit mehr Nutzfläche bieten. Leider kann die dünne Estrichschicht, die in der Regel 6-8cm dick ist, nicht so viel Energie aufnehmen können, ist es vom Vorteil die Heiz- und Kühlrohre in den massigeren Betonbauteilen zu verlegen. Diese Variante wird vor allem bei Passivhäusern ausgeführt bzw., wenn zusätzlich Photovoltaikanlagen oder auch Wärmepumpen am oder im Gebäude betrieben werden, da die gewonnene Energie in Form von Wärme über längerer Zeit gespeichert werden kann und in späterer Folge auch phasenversetzt abgegeben werden kann. Hinzu kommt auch, dass ein thermisches Betonkernaktivierungssystem vor allem an Hitzetagen auch zur Kühlung des Gebäudes verwendet werden kann. (Friembichler, et al. 2016)

16.2 Variationsmöglichkeiten zur Optimierung der TBA

Es gibt viele Varianten um Beton als Energiespeicher sinnvoll in ein Planungskonzept eines Gebäudes einzubeziehen. Da die thermische Bauteilaktivierung über beachtlichen Eigenschaften verfügt, ist es möglich sie mit unterschiedlichen Systemen zu koppeln. Angefangen bei der Gebäudehülle und Bausubstanz bis hin zur Regelung der Wärmeerzeugung, handelt es sich hier um ein optimiertes Zusammenwirken, damit die Speichermasse des Baukomplexes optimal und energieeffizient genutzt werden kann. Die Herausforderung stellt die Berücksichtigung der Zusammenhänge zwischen der Haustechnik und der Bautechnik während der Planung und der späteren Ausführung dar – dies sollte immer beachtet werden.

Die Richtlinien, die bei der Entscheidung der unterschiedlichen Bestandteile der Systeme zu berücksichtigen sind, um eine optimale Wahl des gesamten Systems zu erlangen, siehe Abbildung 19 - 25. (Friembichler, et al. 2016)

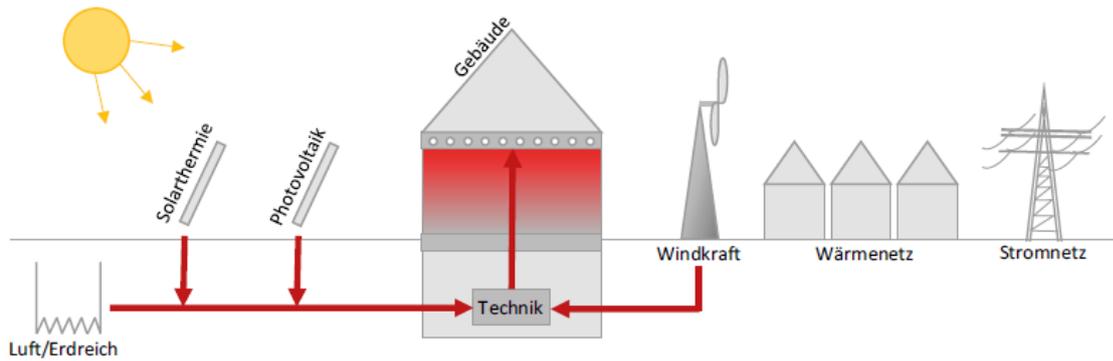


Abbildung 35.: Beladung des Speichers mit Wärme aus Umweltenergien (Friembichler, et al. 2016, 36, Abb. 14|1)

Die aus unterschiedlichen Energiequellen produzierte Wärme kann im Inneren des Gebäudes gespeichert werden, siehe Abbildung 35.

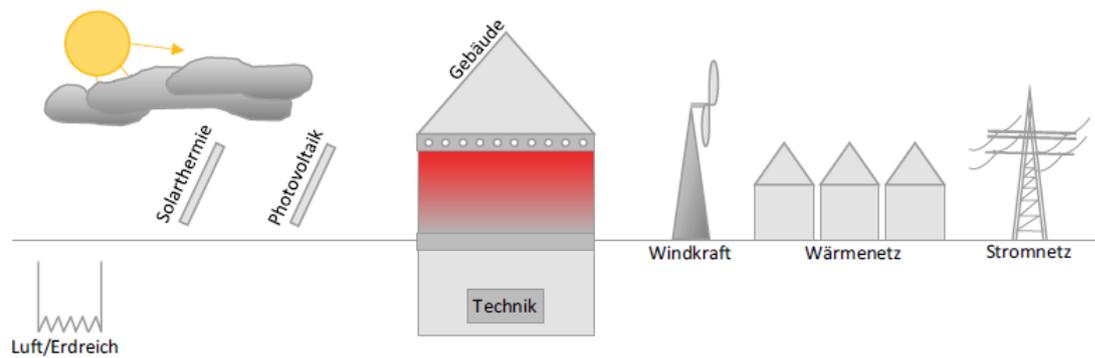


Abbildung 36.: Deckung der Wärmeverluste durch gespeicherte Energie - Keine Umweltenergie nutzbar (Friembichler, et al. 2016, 36, Abb. 14|2).

Sobald keine Wärmequellen zur Verfügung stehen, wird mithilfe der eingelagerten Wärme die Abdeckung von Wärmeverlusten des Gebäudes garantiert, siehe Abbildung 36.

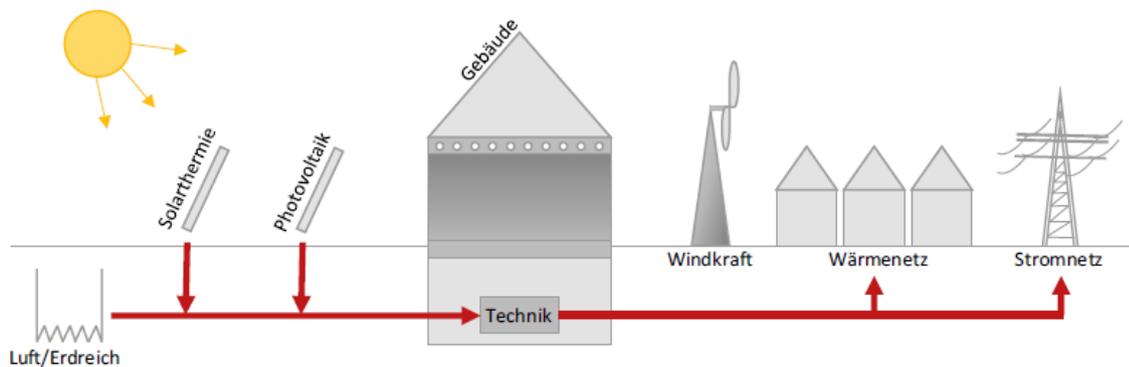


Abbildung 37.: Einspeisung von vor Ort erzeugter Energie in öffentliche Netze, wenn Speicher vollständig geladen ist (Friembichler, et al. 2016, 36, Abb. 14|3).

Sobald kein Bedarf an Wärme oder auch nicht die Option besteht weitere Wärme im Inneren des Gebäudes zu speichern, so besteht die Möglichkeit, dass diese überschüssige Energie in andere Netze z.B. in das öffentliche Netz, eingespeist wird. Der Nutzer kann hier eine Strom-Gutschreibung erhalten, siehe Abbildung 37.

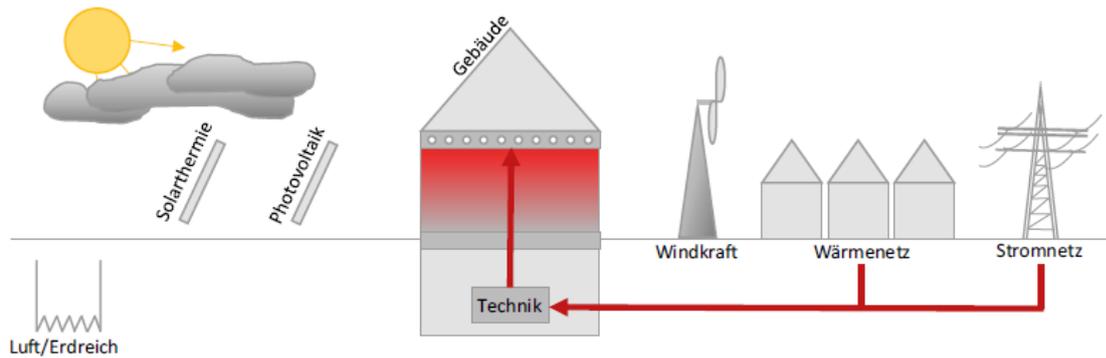


Abbildung 38.: Bezug von Energie aus öffentlichen Netzen – keine Umweltenergie nutzbar (Friembichler, et al. 2016, 37, Abb. 14|4).

Sobald die Speicherung an Wärme im Gebäude abfällt bzw. sinkt und die Verfügbarkeit von Umweltenergie auch nicht gegeben ist, so wird das muss der Nutzer/Betreiber des Gebäudes auf die öffentliche Wärme- und Stromversorgung zurückgreifen, bis es ihm wieder möglich ist seine Energien aus der Umwelt zu beziehen, siehe Abbildung 38.

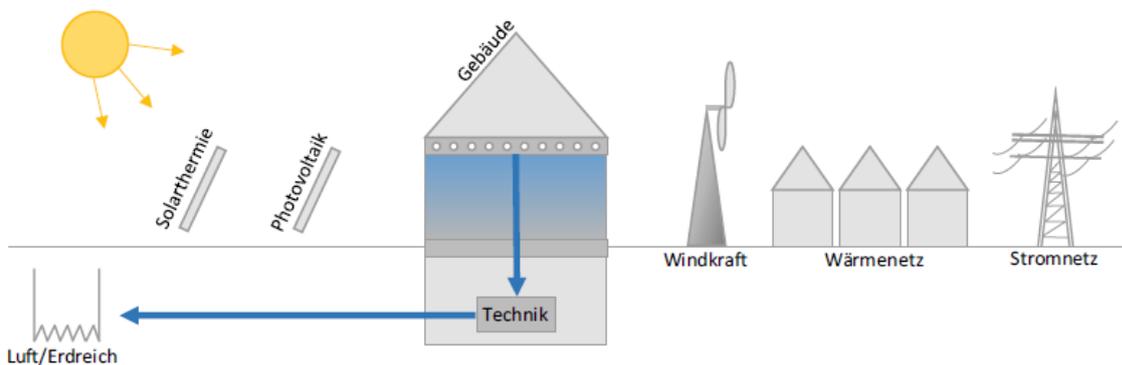


Abbildung 39.: Passive Kühlung – Betrieb einer Umwälzpumpe (Friembichler, et al. 2016, 37, Abb. 14|5).

Der Bedarf an Energie für den Umwälzpumpenbetrieb des Free-Cooling-Prozesses ist gering. Um die Wärmepumpe betreiben zu können, werden größtenteils Energiequellen aus erneuerbaren Energien verwendet, z.B. aus Windstrom oder PV-Anlagen, siehe Abbildung 39.

16.3 Die Variantenvielfalt der TBA

Zur Auswahl stehen drei unterschiedliche Systeme, deren Funktionsweisen und die sich daraus ergebenden Besonderheiten der verschiedenen Systeme werden hier angeführt und unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Planung erklären (Friembichler, et al. 2016, 44):

- Variante 1: Die Versorgung mit Energie erfolgt über eine Solarthermie
- Variante 2: Die Versorgung mit Energie erfolgt mittels Photovoltaikpanelle und einer Wärmepumpe
- Variante 3: Die Versorgung mit Energie erfolgt mittels Windenergie und einer Wärmepumpe

16.3.1 Belade- und Entladevorgänge, passiv und aktiv

Zur aktiven Wärmespeicherung eignen sich vor allem Energiespeicher auf Wasserbasis (z. B. Pufferspeicher) hervorragend. Die Entladungsprozesse des Speichers erfolgen durch aktive Beeinflussungen von außen. Sobald ein Wärme- oder Kältebedarf im Raum existiert, wird aktiv mittels Pumpen die Wärme aus dem Speicher herausgezogen.

Die Beladung der thermischen Bauteilaktivierung erfolgt ebenfalls aktiv, also mithilfe von Pumpen. Im Falle, dass Umweltenergie verfügbar ist, wird aktiv, also mithilfe der Durchleitung eines Wärmeträgers, Wärme, die in die Betonteile eingeführt und gespeichert. Dieser Prozess ermöglicht den NutzerInnen die eingelagerte Energie in den nächsten Tagen zur Heizung des Gebäudes zu nutzen. Diese Entladevorgänge des Speichers finden bei der thermischen Bauteilaktivierung passiv statt, ganz im Gegensatz zur Speicherung auf Wasserbasis. Sobald Betonbauteile zur Kühlung vom Gebäude und dessen Räume verwendet werden, drehen sich diese Prozesse um. Die Entladung der erwärmten Bauteile laufen aktiv ab, also mittels Pumpen, die die Wärme abführen. Anders erfolgt dieser Ablauf bei der Kühlung der Bauteile. Hier erfolgt die Beladung der gekühlten Bauteile passiv, also durch Entzug der Wärme aus den Räumen. (Friembichler, et al. 2016, 44)

16.3.2 Energieversorgung mittels Solarthermie – Variante 1

Wie eine Bauteilaktivierung mittels Solarthermie funktioniert, wird unter diesem Punkt kurz erläutert:

Sobald an sonnigen Tagen die Sonneneinstrahlung hoch ist, so ist auch der Betrag an Solarerträgen höher. So wird an diesen Tagen die von den Solarkollektoren abgegebene Wärme über ein verbautes Rohrregister in die thermisch aktivierten Bauteile eingeleitet und um sie dort zu speichern. Infolge dieses Prozesses steigt die Temperatur nicht nur in dem Bauteil, sondern im gesamten Gebäude. Sobald die Raumtemperatur unter die Temperatur der Umschließungsfläche fällt, wird die zwischengespeicherte Energie (Wärme) der Bauteile in die

Räume des Gebäudes abgegeben. Die Temperaturober- wie auch die Temperaturuntergrenzen können von den NutzerInnen selbstständig geregelt werden, somit ist es den NutzerInnen selbstständig möglich die Raumtemperatur an ihr Wohlempfinden anzupassen. Die Temperatur des Wärmespeichers darf aufgrund einer möglicher Kondensatbildung keinesfalls unter 19 Grad Celsius fallen. Die Energiemenge, die im Gebäude gespeichert ist, wird in der Regel nicht durch die gedämmten abgetrennten massiven Bauteile oder der zulässigen Temperaturspannung des Wärmespeichers bestimmt. (Friembichler, et al. 2016, 45)

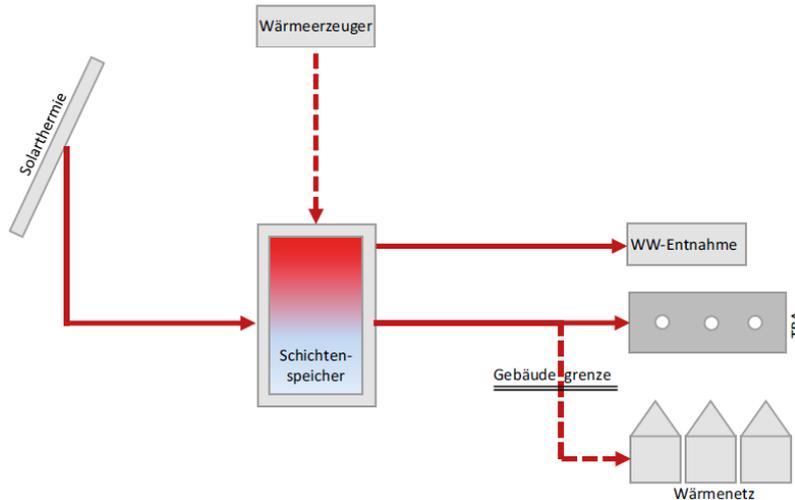


Abbildung 40.: Skizze Energieversorgung über Solarthermie (Friembichler, et al. 2016, 46)

Anhand der Abbildung 4 wird gezeigt, wie die TBA in der Kombination einer Solarthermie funktioniert. Der Einsatz von Flachkollektoren veranschaulicht umso mehr, dass dieser nicht nur wirtschaftlich, sondern auch technisch vom Vorteil ist. Zu beachten ist bei der Planung und Auslegung eines solchen Solarsystems die Dimensionierung des Wärmetauschers zwischen dem mit Glykol gefüllten Primärkreis der gesamten Anlage. Hier ist es empfehlenswert einen externen Wärmetauscher zu verbauen, da dieser in der Lage ist die Temperaturen im Primärkreis niedrig zu halten und somit auch den Wirkungsgrad der Kollektoren konstant zu halten. Es ist in der Regel eine großzügig dimensionierte Wärmeübertragungsfläche empfehlenswert. (Friembichler, et al. 2016, 47)

Mit einer thermischen Bauteilaktivierung in der Kombination mit einer Solarthermie ist es möglich hohe solare Deckungsgrade zu erzielen und die Investitionskosten sind im Vergleich niedrig. Leider ist die Kühlung eines Gebäudes mithilfe dieser Systemvariation nicht ohne zusätzlichen Systemkomponenten ausführbar. Bei diesem System ist es vor allem darauf zu achten, dass die sommerliche Überhitzung anhand bautechnischer Maßnahmen verhindert wird, sollten bautechnische Maßnahmen nicht genügen, so sind z.B. Erdsonden, Bodenkollektoren oder Brunnenanlagen als Energiesenken gute Alternativen bzw. Ergänzungen für die thermische Bauteilaktivierung. (Friembichler, et al. 2016, 48)

Schon in der Entwurfsphase muss mittels einer Analyse der meteorologischen und topografischen Randbedingungen und auch die geplante Nutzung des Gebäudes geprüft werden, ob eine TBA mit Solarthermie für das Projekt in Frage kommt. Oft führen die aufgeständerten Kollektoren am Dach zu unerwünschten Verschattungen in der näheren Nachbarschaft und Umgebung, daher kommt diese Systemvariation im innerstädtischen Bereich eher selten zum Einsatz. Bei Flachdächern ist auf die eigene Verschattung der einzelnen Kollektorelementen zu achten und bei den an Fassaden oder Steildächern angebrachten Kollektorflächen ist auf die Ausrichtung des gesamten Gebäudekomplexes zu achten. (Friembichler, et al. 2016, 48)

Zusammengefasst sind vor allem die positiven Aspekte für eine TBA mittels Solarthermie die überwiegen, wie z.B. die Sonnenenergie vor Ort, die hohen Deckungsgrade trotz geringem Pufferspeichervolumens und die damit verbundenen vergleichsweise niedrigen Investitionskosten, die einfache und robuste Technologie, die autarke Energieversorgung und der geringe Ausstoß an CO₂-Emissionen. Negative Aspekte gibt es auch, wie z.B., dass die Energieerträge im Sommer sehr oft nicht voll ausgeschöpft werden können, die aktive und die passive Kühlung ohne zusätzliche Systeme nicht möglich ist und die meteorologischen und topografischen Randbedingungen der Umgebung den Deckungsgrad bestimmen.

16.3.3 Energieversorgung über Photovoltaik und Wärmepumpe – Variante 2

Eine sehr beliebte TBA-Variante für die Energieversorgung eines Gebäudes stellen Photovoltaikanlage in Kombination mit einer Wärmepumpe dar. Anhand einer cleveren Steuerungsstrategie ist es dem System möglich eine möglichst hohe Beteiligung des Verbrauchs an Strom der Wärmepumpe mit der eigenständig produzierten PV-Energie abzudecken. Optimiert wird dieses System durch die Nutzung des Betons als Energiespeicher.

Im Gegensatz zu der TBA mittels Solarthermie wird bei dieser Variante der Energieversorgung die auf die PV-Paneele aufprallende Solarenergie nicht in Wärmeenergie, sondern in elektrische Energie umgewandelt. Weiters wird der durch dieses System produzierte Strom mittels einer Wärmepumpe in Wärme modifiziert, um so das Haus zu heizen. Die Wärmepumpe sollte nur dann betrieben werden, sobald genügend Strom aus der solaren Gewinnung zur Verfügung steht. Die TBA, also die aktivierten Bauteile aus Beton, sind hier vor allem vom Vorteil, um größere Intervalle ohne genügend PV-Stromproduktion überwinden zu können. Sowie das Gebäude über die angestrebte Kerntemperatur verfügt, wird die selbstproduzierte elektrische Energie nicht mehr für die Erzeugung der Wärme über die Wärmepumpe eingesetzt, sondern kann von weiteren Nutzern verwendet werden oder aber auch ins öffentliche Netz eingespeist werden. Im Zuge der Planung wird die Kerntemperatur ermittelt und festgelegt. (Friembichler, et al. 2016, 50)

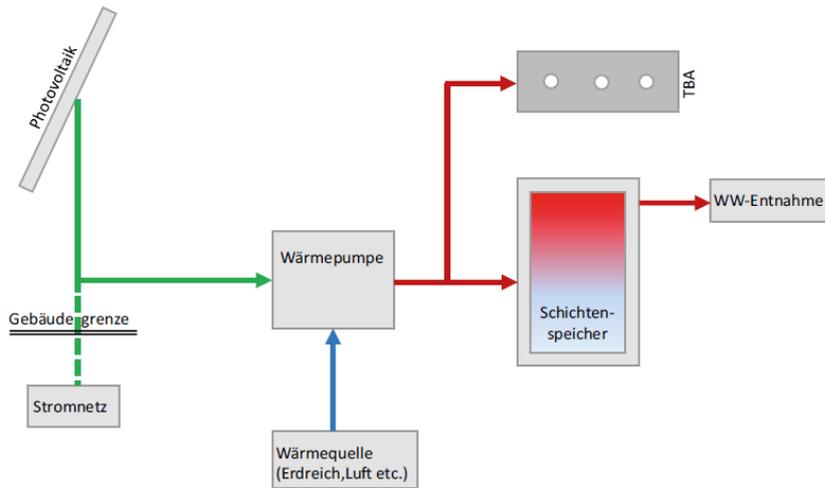


Abbildung 41.: Skizze Energieversorgung mittels PV-Wärmepumpe-Bauteilaktivierung (Friembichler, et al. 2016, 50, Abb. 21).

Bei diesem System ist es erforderlich einen Speicher für die Warmwasserversorgung bereitzustellen. Eine zu hohe Speichertemperaturen kann die Effizienz der Wärmepumpe beschränken, weiterum kann dies zu einem Konflikt mit den Richtlinien aus der ÖNORM B 5019 führen. Die ÖNORM B 5019 regelt die hygienerelevante Planung und Ausführung in öffentlichen Bauten von zentralen Trinkwasser-Erwärmungsanlagen.

Bei der dieser Variante der Energieversorgung sollte die Trinkwassererwärmung über eine Frischwasserstation durchgeleitet werden. Wie schon erwähnt nimmt die Effizienz der Wärmepumpe bei ansteigender Vorlauftemperatur massiv ab, vor allem damit den gängigsten Wärmepumpen nur Temperaturen von maximal 60 – 65 Grad Celsius erzielt werden können. Die Folge daraus ist, dass es nicht möglich ist die Wärme mithilfe einer massiven Temperaturerhöhung des Wassers zwischenspeichern. Anhand dieser Situation ist das Speichervolumen der Warmwasserbereitstellung eingeschränkt und stellt ein ausschlaggebendes Kriterium für die Effizienz des Gesamtsystems dar, um dem entgegenzuwirken ist es wichtig, dass ein Systemvolumen gewählt wird, das der Anlage entspricht, um auch über längere Zeiträume hinweg ohne PV-Strom auszukommen. (Friembichler, et al. 2016, 51)

Vom Vorteil ist die Anbringung der PV-Paneele, da diese im Vergleich zu den solarthermischen Kollektoren weniger steil aufgeständert werden müssen und die dadurch gewonnene Energie auch von anderen NutzerInnen verwendet werden kann. In der Regel werden die Module nach Süden ausgerichtet und in einem 30-Grad-Winkel aufgeständert, somit ist es möglich die höchsten Jahreserträge zu erreichen. Um die Leistungsfähigkeit im Winter zu gewährleisten ist es auch möglich die Module in einem Winkel von 60 Grad aufzuständern, denn somit kann auch gewährleistet werden, dass der Schnee von den PV-Paneelen abrutschen kann. (Friembichler, et al. 2016, 51)

Die Kombination aus PV-Wärmepumpe-TBA bringt sehr große Vorteile mit sich, wie z.B., dass nach der Wahl der Wärmesenke das Gebäude entweder passiv oder aktiv gekühlt werden kann. Der Kühlbedarf für ein Gebäude entsteht meist an strahlungsintensiveren Tagen, vor allem aber in den Sommermonaten. Hier ist vor allem schon in der Planungsphase darauf zu achten, dass die Aufnahme der Leistung der Wärmepumpe und auch die Größe der Photovoltaikanlage auf die Dimension der Wärmeversorgung des Hauses angeglichen ist. Somit kann in der Regel der Energiebedarf der Wärmepumpe abgedeckt werden. Beide Varianten der Kühlung, die aktive und die passive Kühlung, benötigen und verbrauchen Strom, daher ist die Kühlung über eine TBA nur als Erweiterung zu den bautechnischen Maßnahmen zu betrachten und sollte daher auch nur auf ein Minimum begrenzt werden. (Friembichler, et al. 2016, 52)

Zusammengefasst sind es vor allem die positiven Aspekte für eine TBA mittels Photovoltaik und Wärmepumpe die überwiegen, wie z.B. die Nutzung vor Ort der Solarenergie, die geringen Energiekosten, der voll verwertbare solare Energieertrag außerhalb der Heizperioden, mithilfe von geringen Investitionen ist auch eine aktive oder passive Kühlung möglich und es ist vor allem nur ein Energieträger für die gesamte Versorgung des Gebäudes notwendig. Leider sprechen auch zwei Punkte gegen das System, da zu einem der solare Ertrag nur zum Zeitpunkt der größten Nachfrage an Wärme begrenzt ist und zum anderen die meteorologischen und topografischen Randbedingungen der Umgebung beeinflussen die Systemleistung.

16.3.4 Energieversorgung durch Windenergie und Wärmepumpe – Variante 3

Nun gibt es noch die 3. Variante, um ein Gebäude mit Energie zu versorgen, und zwar jene die mithilfe von Windkraftanlagen und einer Wärmepumpe den Strom in das Bauteil einspeisen. Diese Systemvariante stützt sich nicht auf die Nutzbarmachung von Umweltenergien vor Ort, sondern kann auch abseits vom jeweiligen Bauplatz Wind- oder Sonnenenergie für die thermische Bauteilaktivierung und für die Warmwasserbereitstellung, beziehen. In Österreich werden Windkraftanlagen seit Jahren stetig ausgebaut und erweitert. Da Sonnen- und Windenergie nur zu gewissen Zeiten gewonnen werden kann dieser Umstand zu Schwankungen beim Strombedarf und Stromerzeugung kommen, diese Schwankungen spiegeln sich vor allem bei den Energiepreisen wider. Anhand dieser Tatsache werden einzelne Windräder vom Netz genommen und die Stromproduktion aus erneuerbaren Energien wird somit reduziert. Diese Handlung wird vor allem zur Verringerung von Netzspitzen umgesetzt. (Friembichler, et al. 2016, 53)

Die Speichermasse von Gebäuden kann Netzspitzen gegenüber als Ausgleich herangezogen werden, denn der produzierte Windstrom wird zu Zeiten von Netzspitzen mithilfe einer Wärmepumpe in Wärme umgeformt und über die aktivierten Bauteile im Gebäude eingelagert und auch zur Abdeckung der Wärmeverluste im Rauminnen verwendet. Diese Systemvariante

ermöglicht dem Gebäude als beeindruckender und preisgünstiger Energiespeicher für das öffentliche Stromnetz zu dienen und zudem stellt diese Art des Gebrauchs von Energieüberschüssen zukünftig für Energieversorgungsunternehmen einen bedeutenden Nutzen bzw. Bonus dar. (Friembichler, et al. 2016, 53-54)

16.3.5 Funktionsweise des Systems

Der jeweilige Strom- bzw. Energieversorger erteilt bei einer hohen Energieproduktion im Windpark grünes Licht und leitet seine Freigabe an die Gebäuderegulierung des Energieverbrauchers, also an den KundInnen oder NutzerInnen, mithilfe eines Fernsignals weiter.

Somit besteht für die Energieverbraucher während der Freigabezeiten die Möglichkeit Wärme im Betonspeicher einzulagern. Diese Stromerzeugungsvariante macht es möglich, die aus Windstrom produzierte Wärme wirtschaftlich und nachhaltig in den tragenden Bauteilen eines Gebäudes zwischenspeichern. Die zwischengespeicherte Energie wird nach den Normen der thermischen Bauteilaktivierung an das Rauminnere abgegeben, hier sollte man darauf achten, dass die Untergrenze der Innentemperatur in den Räumen in dem Zeitraum ohne Windfreigabe nicht abweicht bzw. unterschritten wird. Sobald jedoch die Temperatur unterschritten wird, bezieht die Wärmepumpe Strom aus der regulären Produktion und ist somit in der Lage das Gebäude auf der angestrebten bzw. gewünschten Raumtemperatur zu halten. Besonders in den Heizperioden hat sich gezeigt, dass Windenergie verstärkt zu Verfügung steht und es kaum notwendig ist Strom aus regulärer Produktion nachzuladen. Bei der Systemvariante der TBA, die mittels Windenergie und Wärmepumpe das Gebäude mit Energie versorgt, sollte eine höhere Leistung der Wärmepumpe vorgesehen werden, da bei einer Windfreigabe das System in der Lage sein muss, große Energiemengen binnen kürzester Zeit im Gebäude einzuspeichern. (Friembichler, et al. 2016, 54)

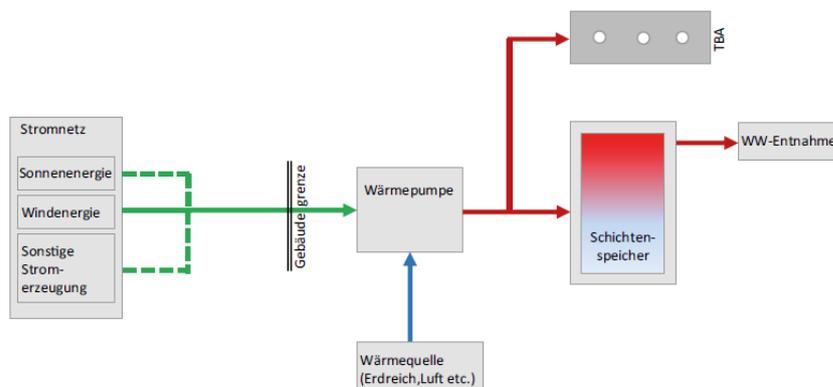


Abbildung 42.: Skizze Energieversorgung der TBA mittels Windenergie und Wärmepumpe (Friembichler, et al. 2016, 54, Abb. 23).

Wie in Abbildung 12 dargestellt unterscheiden sich die verwendeten Bestandteile des Systems nicht von denen einer gängigen Wärmepumpenanlage. Um den Informationsaustausch zwischen dem Stromversorger und der Haustechnikanlage zu managen, wird ausschließlich ein Freigabesignal gebraucht, das von einem technischen Modulator verarbeitet wird. Auch die Systemvariante 3 benötigt wie die Systemvariante 2 (PV-Wärmepumpe-TBA) eine ausreichende Dimensionierung des Speichers für die Bereitstellung von Warmwasser. Hier sollte ebenfalls auf eine hygienisch fehlerfreie Herstellung des Warmwassers achtgegeben werden. (Friembichler, et al. 2016, 55)

Zusammengefasst sind es vor allem die positiven Aspekte für eine TBA mittels Windenergie und einer Wärmepumpe die überwiegen, wie z.B. die schlichte und langlebige Technologie, die kostengünstige Anschaffung, die niedrigen Energiekosten, dass nur ein Energieträger für die vollständige Versorgung eines Gebäudes ausreicht, dass die passive und aktive Kühlung mit minimalen zusätzlichen Kosten machbar ist, dass die Architektur und das Erscheinungsbild des Gebäudes durch keine Solarkollektoren oder PV-Paneele beeinflusst wird und, dass die meteorologischen und topografischen Randbedingungen der Umgebung keinen Einfluss auf die Effizienz des Systems haben. Ein Manko wäre die Tatsache, dass man vom jeweiligen Energieversorger abhängig ist und, dass die Stromkosten immer von den jeweiligen Stromtarifen abhängen.

16.4 Die Solarthermie des Fallbeispiels

Die Warmwasseraufbereitung erfolgt im Fallbeispiel vom 1. Gebäudekomplex über eine Solarthermie. Die aufgeständerten Solarkollektoren am Flachdach des Gebäudes stellt über das gesamte Jahr hinweg Warmwasser sicher, siehe Abbildung 26 – 28. Die Solaranlage weist eine Leistung von 75kW auf, d.h. primär $52/38 = 5,380\text{m}^3/\text{h}$ und sekundär $50/36 = 4,607\text{m}^3/\text{h}$. Der 2. Gebäudekomplex wird zukünftig über PV-Paneele verfügen und der daraus gewonnene Strom wird direkt in das interne Gebäudenetz eingespeist.

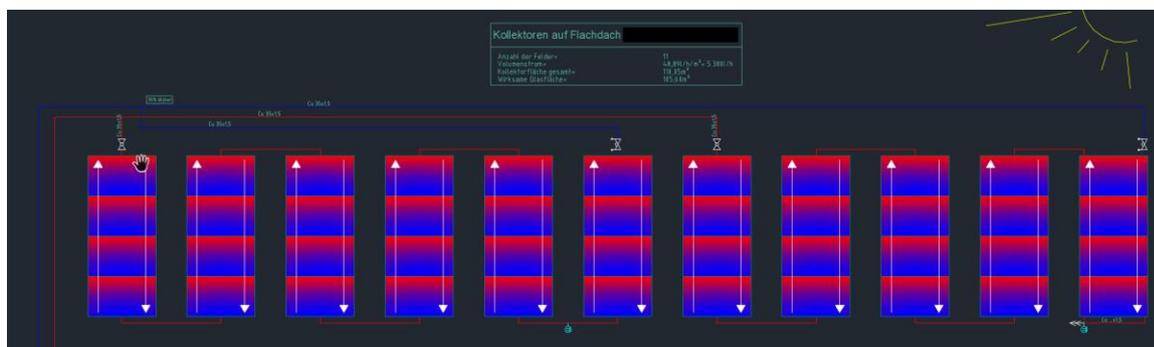


Abbildung 43.: Ausschnitt Schemata der Solarthermie des Fallbeispiels – Solarkollektoren, erstellt am 18.07.2017 in AutoCAD (Quelle: Originaldokument des Gebäudes, anonymisiert)

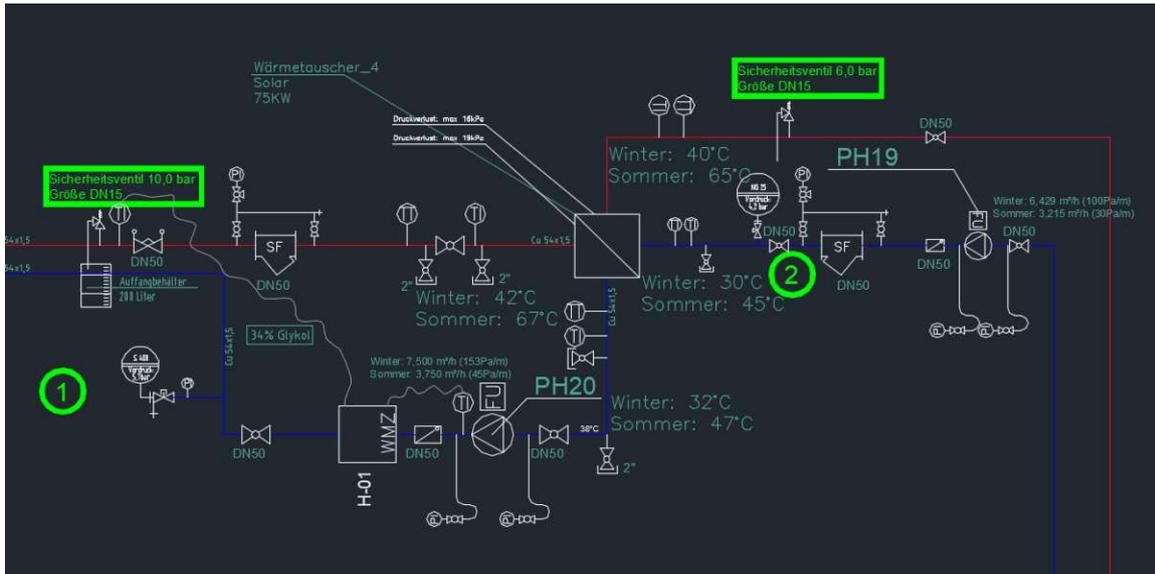


Abbildung 44.: Ausschnitt Schemata der Solarthermie des Fallbeispiels – Wärmetauscher, erstellt am 18.07.2017 in AutoCAD (Quelle: Originaldokument des Gebäudes, anonymisiert)

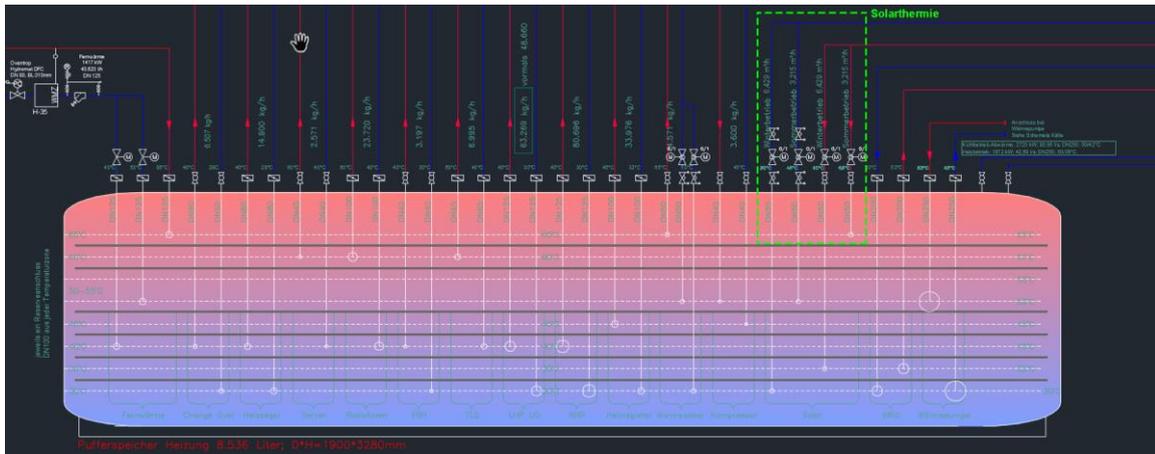


Abbildung 45.: Ausschnitt Schemata der Solarthermie des Fallbeispiels – Pufferspeicher Heizung, erstellt am 18.07.2017 in AutoCAD (Quelle: Originaldokument des Gebäudes, anonymisiert)

17 Aktive und passive Kühlung

Als eine aktive Kühlung wird die Kühlung von Bauten mit Kältemaschinen bzw. reversibel, also umkehrbar arbeitenden Wärmepumpen verstanden. Die maßgebende Funktionsweise der Wärmepumpe ist dieselbe wie bei ihrer Verwendung zum Heizen. Mithilfe eines elektrischen Verdichters wird das Niveau der Temperatur im Kältekreis verändert. Gegensätzlich zum Heizbetrieb wird hier im Falle des Kühlens durch die Umkehrung des Kreislaufes dem Gebäude bzw. den einzelnen Bauteilen Wärme entzogen. In der Folge wird diese Wärme an eine Wärmesenke abgegeben. Meistens wird eine reversibel arbeitende Wärmepumpe, oder auch Kältemaschine als Luft-Wasser-System betrieben. Die entzogene Wärme aus dem Gebäude wird bei dieser Abwicklung über die Wärmepumpe an die Außenluft übergeben. Nicht nur die Luft kann zur aktiven Kühlung genutzt werden, sondern auch das Grundwasser oder auch das Erdreich.

17.1 Aktive Kühlung

„Aktive Kühlung bezeichnet die Kühlung von Gebäuden mithilfe von Kältemaschinen bzw. reversibel arbeitenden Wärmepumpen. Die grundsätzliche Funktionsweise der Wärmepumpe ist gleich wie bei deren Betrieb zu Heizzwecken. Mittels eines elektrischen Verdichters wird das Temperaturniveau im Kältekreis verändert. Im Gegensatz zum Heizbetrieb wird beim Kühlen durch die Umkehrung des Kreislaufs den Bauteilen bzw. dem Gebäude Wärme entzogen und diese an eine Wärmesenke abgegeben. In den meisten Fällen wird eine reversibel arbeitende Wärmepumpe bzw. eine Kältemaschine als Luft-Wasser-System betrieben. Die Wärme aus dem Gebäude wird bei dieser Lösung über die Wärmepumpe an die Außenluft abgegeben. Neben der Luft kann aber gegebenenfalls auch das Erdreich oder das Grundwasser als Wärmesenke zur aktiven Kühlung genutzt werden.“ (Friembichler, et al. 2016, 41)

Mithilfe einer aktiven Kühlung können bei entsprechender Auslegung des Systems hohe Wärmeleistungen an die Außenluft abgegeben werden und das über längere Zeiträume. Weiters ist noch zu erwähnen, dass bei der Außenluftnutzung als Wärmesenke keine ausgewogene Bilanz zwischen der Entnahme von Wärme und dem Wärmeeintrag nötig ist. Dennoch gibt es Nachteile bei einer aktiven Kühlung. Zu einem der hohen Lärm- und Schallpegel der Luft-Wasser-Wärmepumpen. Diese Lärmbelastung belastet nicht nur die NutzerInnen, sondern auch das gesamte Umfeld. Ein weiteres Defizit stellt der Betrieb eines mit Strom angetriebenen Verdichters dar, da dieser zu einem erhöhten Energie- bzw. Stromverbrauch beiträgt. Hier ist es wichtig, dass der Kühlbedarf durch bautechnische Maßnahmen größtmöglich begrenzt wird. (Friembichler, et al. 2016, 42)

17.2 Passive Kühlung

Mithilfe einer geeigneten Wärmesenke wird die niedrige Temperatur als direkte Kühlung der Bauteile genutzt, dadurch ist die Verwendung bzw. der Betrieb eines Verdichters nicht notwendig.

Generell ist die Außenluft bei der Nutzung für Wohnungen und der vorhandene Kühlbedarf aufgrund zu großer Außentemperaturen nicht für eine passive Kühlung anwendbar. Daher sollten natürliche Wärmesenken mit einem niedrigen Temperaturniveau herangezogen werden. Hier können die gegebenen Ressourcen vor Ort in Frage kommen, wie z.B. das Erdreich, das Grundwasser, oder gegebenenfalls das Flusswasser in Frage. Diese Nutzungen sind jedoch genehmigungspflichtig. (Friembichler, et al. 2016, 42-43)

Ein positiver Aspekt, der für eine Nutzung einer passiven Kühlung spricht, ist z.B., dass keine reversiblen Kältemaschinen bzw. Wärmepumpen verbaut werden, denn es werden hier nur Umwälzpumpen benötigt. Bei einer passiven Kühlung ist auch der Energieverbrauch sehr gering. Erwähnenswert bei der Nutzung von Grundwasser ist auch, dass bei ausreichender Strömung und entsprechend geringem Temperaturniveau über einen längeren Zeitraum höhere Energieleistungen abgeführt werden. Aber auch Flachkollektoren bzw. Erdkollektoren stellen hier eine vereinfachte und wirtschaftliche Lösung dar.

Neben den positiven Aspekten gibt es auch Negative. Im Falle, dass die passive Kühlung über Erdkollektoren oder Erdsonden etc. erfolgt. Also das Gebäude über das Erdreich mit Kälte versorgt, ist darauf zu achten, dass sich der Boden durch die eingespeiste Wärme aus dem Gebäude aufwärmt. Sollte der Kühlbetrieb über längere Zeit in Anspruch genommen werden, so ist es möglich, dass die Temperatur im Boden über ein Free-Cooling brauchbares Temperaturniveau ansteigt. Der alleinige und längere Kühlbetrieb führt dazu, dass die Leistungsfähigkeit der passiven Kühlung über das Erdreich abnimmt. Um über die gesamte Lebensdauer hinweg sicherzustellen, dass die größtmögliche Leistungsfähigkeit des Erdreichs als Wärmesenke gegeben ist, sollte vor allem auf eine ausgeglichene Bilanz zwischen dem Wärmeentzug und dem Wärmeeintrag geachtet werden. Hier ist es ratsam, bei kälteren Temperaturen, aber vor allem im Winter mithilfe einer Wärmepumpe, die Wärmesenke als Wärmequelle fürs Heizen des Gebäudes zu nutzen. Die Kosten für die Erschließung einer geeigneten Wärmesenke liegt im Normalfall höher als beim Abtransport der Wärme an die Umwelt. (Friembichler, et al. 2016, 43)

17.3 Freie Kühlung / Free-Cooling

Die Freie Kühlung auch Free-Cooling genannt, ist bei wasser- und luftgekühlten Kaltwassersätzen ein deutlicher Bestandteil, um den Betriebskosten einer Kälteanlage zu reduzieren. Wenn es im Herbst und Winter zu kälteren Außentemperaturen kommt werden die Verdichter

ausgeschaltet, somit wird Energie nur für das Betreiben der Ventilatoren gebraucht. Man unterscheidet die Free-Cooling-Kaltwassersätze von den konventionellen Flüssigkeitskühlern durch ihren zusätzlichen Wasser-Luft-Wärmetauscher, der vor dem Verflüssiger-Register liegt. Die von den Verflüssiger-Lüftern angesaugte Luft strömt zuerst durch den Wasser-Luft-Wärmetauscher und danach durch den Verflüssiger des Kältekreislaufs. Bei der Verwendung dieses zusätzlichen Wärmetauschers ist es möglich mit der niedrigen Temperatur im Außenbereich das Wasser vor dem Eintritt in den Verdampfer zu kühlen. Es gibt drei Möglichkeiten wie Free-Cooling-Kaltwassersätze betrieben werden können:

1. Im normalen Betrieb als mechanische Kühlung
2. Als teilweise freie Kühlung, also als Mischbetrieb oder auch Hybridbetrieb
3. Als 100-prozentige freie Kühlung (tecchannel.de 2022)

Sinn macht die Nutzung von Free-Cooling-Systemen überall dort, wo das ganze Jahr über konstante Wärmelasten anstehen, wie z.B. in der Präzisions- und DV-Klimatisierung (Datenverarbeitungsklimatisierung), bei Internet-Serverfarmen, bei industriellen Prozessen und bei Telekommunikationsklimaanlagen. Hier hängt die Effizienz des Free-Cooling-Systems vom Temperaturunterschied der Außenluft und des Kaltwassers ab, daher ist dieses System auch für alle Anlagen, die nicht ganzjährig betrieben werden, geeignet. Diese Systeme benötigen wiederum eine hohe Vorlauftemperatur, um betrieben zu werden, wie z.B. bei Kühldecken in Büro- und Verwaltungsgebäuden oder Kühlbalken und Ähnlichem.^{Fehler! Textmarke nicht definiert.} (tecchannel.de 2022)

18 Geothermie

Unter einer Geothermie versteht man die Wärme aus dem Erdboden. Je tiefer man gräbt, desto höher werden die Temperaturen in der zunehmenden Tiefe.

Mittels der Geothermie können außerordentliche Mengen an Energie erschließen und für zahlreiche Zwecke genutzt werden. Dieser Form der Energiegewinnung steht in vielen Fällen die hohen Anforderungen, mit denen sie verbunden ist, gegenüber.

18.1 Grundsätze der Planung – oberflächennahe Geothermie

Die Planung und Nutzung der oberflächennahen Geothermie ist hauptsächlich unter dem Blickpunkt der verfügbaren niedrigeren Temperaturen abzuschätzen. Nur in Verbindung mit einer Wärmepumpe ist die Nutzung der oberflächennahen Geothermie möglich, da aus dem Erdreich nur eine geringe Menge an Wärme bzw. Temperatur entzogen werden kann. Die Anwendung dieser Geothermie-Variante hängt auch von der Tiefe der platzierten Sonden ab und den natürlichen Gegebenheiten im Erdreich, hier können zwischen 10 – 12 C° gewonnen werden. In weiterer Folge ist es den NutzerInnen mithilfe der Wärmepumpe möglich, die gewünschte Temperatur anzuheben bzw. selbstständig zu regulieren. (Stober und Bucher 2020, 76)

In der Regel werden die Wärmepumpen mit Strom betrieben, das kann dazu führen, dass der Betrieb sehr teuer werden kann. Es ist ratsam bereits während der Planung einer oberflächennahen Geothermie abzuklären, ob die Wärmepumpe auch in Verbindung mit erneuerbaren Systemen in Frage kommt bzw. umsetzbar ist, wie z.B. mit einer PV-Anlage am Dach des Gebäudes. Sollte eine PV-Anlage nicht in Frage kommen, so kann der Wärme- und Kältebedarf eines Gebäudes auch durch andere bauliche Maßnahmen gesenkt werden, wie z.B. Wärmedämmmaßnahmen der Fassade, der Dachgeschossdecke und Fenster. Um einen nachhaltigen Betrieb der Anlage über einen längeren Zeitraum zu ermöglichen, wird pro Heizperiode nur die Wärmemenge dem Erdreich mittels der Erdsonden entzogen, die dem Erdreich über das Jahr durch natürliche thermische Regeneration wieder erzeugen kann. Dies ist nur möglich, wenn keine zusätzliche Energie aus anderen Systemen eingespeist wird, wie z.B. aus einer Solarthermie. (Stober und Bucher 2020, 76)

18.2 Die oberflächennahe Geothermie

Eine ausschlaggebende Funktion bei der Wahl zwischen den Vorzügen und Nachteilen einer Geothermie stellt hier die Bodentiefe an die Planung der Haustechnik bzw. an das Heiz- und Kühlsystem eines Gebäudes. Fachplaner klassifizieren hier ausschließlich zwischen der oberflächennahen und der tiefen Geothermie. Unter einer oberflächennahen Geothermie wird hier eine Bohrung in den Untergrund von bis zu maximal 400m Tiefe verstanden. Daraufhin werden die Erdsonden in den Bohrlöchern verlegt. Die im Erdreich gespeicherte Erdwärme wird mittels

eines Wärmetauschers über die Sonden nach oben in das Gebäude geleitet. (Viessmann Climate Solutions SE 2021)

18.3 Erdsonden

Was kann man unter Erdsonden verstehen? Es handelt sich hier um Rohre, die mittels einer Bohrung ins Erdreich versenkt werden. In den Rohren zirkuliert eine Flüssigkeit bzw. ein Sondenfluid. Hier gilt es verschiedenen Typen an Erdsonden zu unterscheiden:

- Einfach-U-Rohrsonden
- Doppel-U-Rohrsonden
- Koaxialrohrsonden

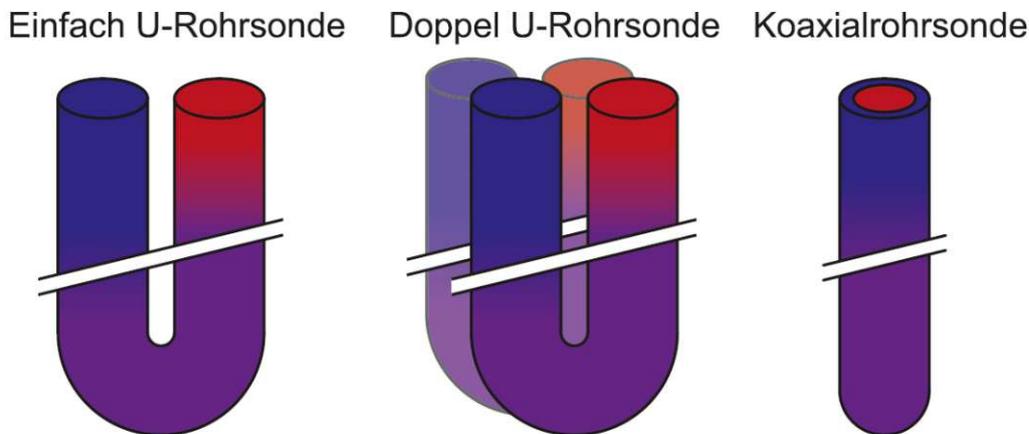


Abbildung 46.: Verschiedene Typen von Erdwärmesonden: Einfach- und Doppel-U-Rohr-Sonde sowie Koaxialrohrsonde (Stober und Bucher 2020, 77)

Die Einfach-U-Rohrsonden sind um sich geschlossene fließend gezogene Rohre aus Kunststoff mit einem U-förmigen Fuß. Die Doppel-U-Rohrsonden sind eine Kombination aus zwei voneinander unabhängigen Einfach-U-Rohrsonden, die jeweils mit kühlem Wasser befüllt sind. Das Wasser in den Doppel-U-Rohrsonden erwärmt sich während des Hinabfließens in das Erdreich und nimmt somit die Wärmeenergie aus dem Untergrund auf. Das erwärmte Wasser/Sondenfluid im jeweils zweiten U-Rohr führt direkt zur Wärmepumpe. Mithilfe der Wärmepumpe wird die Temperatur so lange gesteigert, dass die Heizungsanlage arbeiten kann. Die Koaxialrohrsonden verlaufen ineinander, d.h., dass sich das Rücklaufrohr zur Wärmepumpe innerhalb des absteigenden Sondenrohrs entlangzieht. In der äußeren Ringkammer befindet sich das kühle Wärmeträgermedium, welches nach unten in das Erdreich fließt und wiederum in der inneren Ringkammer aufsteigt, erwärmt und in weiterer Folge zur Wärmepumpe befördert wird. (Stober und Bucher 2020, 77)

Während des Betriebs entziehen Erdwärmesonden dem Erdreich bzw. dem Untergrund Energie in Form von Wärme. Der Bereich um die Sonde kühlt dadurch ab. Hier entsteht, gewissermaßen ein thermischer Trichter, siehe auch Abbildung 30 unten als Beispiel.

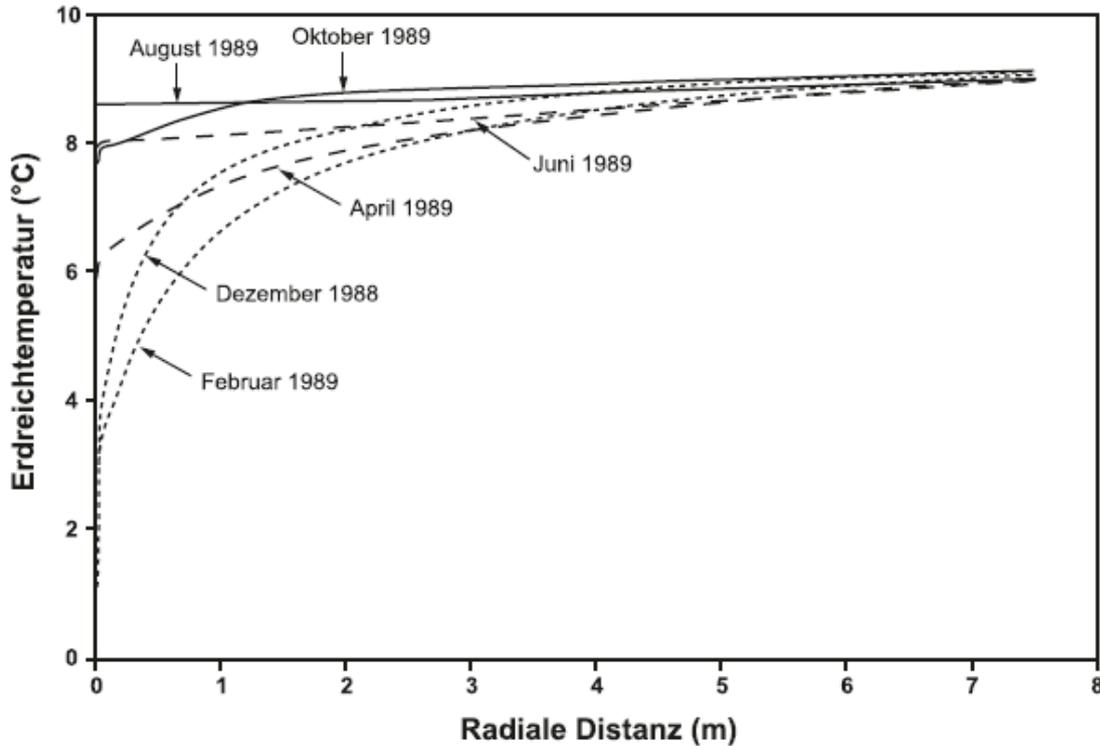


Abbildung 47.: Beispiel für die dynamischen Temperaturerniedrigungen um eine Erdwärmesonde nach Messungen und Berechnungen für die Anlage Elgg/Schweiz, Eugster 1998 (Stober und Bucher 2020, 79)

Erdwärmesonden-Systeme sind in sich geschlossen und im Inneren der Sonden zirkuliert eine Wärmeträgerflüssigkeit. Diese Gemische, die aus verschiedenen Fluiden und Wasser zusammengesetzt sind, besitzen einen niedrigeren Gefrierpunkt als klares sauberes Wasser und daher ist eine größere Temperaturdifferenz möglich, dadurch wird der Wärmepumpe ein höherer Temperaturentzug aus der zirkulierenden Wärmeträgerflüssigkeit ermöglicht. (Stober und Bucher 2020, 80)

Wärmeträgerflüssigkeit	dynam. Viskosität μ (kg/(m s) od. (Pa s))	spez. Wärmekapazität c (J/(kg K))	Dichte ρ (kg/m ³)	Wärmeleitfähigkeit λ (J/(s m K))
Wasser	0,0018	4217	1000	0,562
Ethylenglycol 25 %	0,0052	3795	1052	0,480
Ethanol 25 %	0,0046	4250	960	0,440
Propylenglycol 30 %	0,0108	3735	1038	0,450
Calciumchlorid 20 %	0,0037	3050	1195	0,530
Methanol 25 %	0,0040	4000	960	0,450

Abbildung 48.: Hydraulische und thermische Eigenschaften gebräuchlicher Wärmeträgerflüssigkeiten für isotherme Verhältnisse (nach Zapp & Rosinski, 2007). Günstige Eigenschaften sind rötlich hinterlegt, ungünstige grünlich. (Stober und Bucher 2020, 82)

18.3.1 Auslegung der Erdsonden

Während der Planung eines Gebäudes richtet sich die Auslegung der Geothermie ganz nach dem Wärmebedarf dessen Wärmebedarfs, der auch mithilfe der Geothermie ganzheitlich gedeckt werden soll. Die Entzugsleistung der Sonden ist vor allem von den thermischen und geologischen Verhältnissen des Erdreichs vor Ort, vom Ausbau der Sonde, vom Sondentyp und auch von der Wärmeträgerflüssigkeit in den Sonden abhängig. Hinzu kommt noch eine weitere Abhängigkeit durch die hydraulische Verbindung der Sonden mit einer Wärmepumpe. Zu beachten gilt es hier bzw. für der Haustechnikplaner, dass nur bei der Auslegung aller relevanter Parameter einer Geothermie, Wärmepumpenanlagen und Sonden auf längere Zeit ausfallsicher, effizient und ökonomisch arbeiten können, d.h. es muss hier auf die richtige Dimensionierung der Anlagen geachtet werden. (Stober und Bucher 2020, 85)

18.3.2 Kühlung durch Erdsonden

Erdwärmesonden sind durch ihre ausgewogenen Temperaturen, 10 – 12°C, im enthaltenen Bodenkörper auch für eine Kühlung des Gebäudes sehr gut geeignet, denn in der Verbindung mit einer Heizanlage erstrebenswerte Wechselwirkungen ergeben. Die Sommer anfallende Wärme lässt sich über die Sonden der Geothermie in das Erdreich einbringen. Diese überschüssige Wärmeenergie kann aus sommerlich überhöhten Raumtemperaturen herrühren, aus Haustechnikanlagen, oder auch die Wärme aus Fertigungsprozessen von EDV-Kühlungsanlage sein. Die sommerliche Einspeicherung von Wärme im Erdreich kann zu einer schnelleren thermischen Erholung des Untergrunds beitragen, denn es kann vorkommen, dass der Untergrund im Winter durch das Heizen des Gebäudes ausgekühlt. (Stober und Bucher 2020, 125)

Die Geothermie entzieht im Winter mithilfe ihrer Erdsonden dem Erdreich Wärme, um das Gebäude beheizen zu können. Das Erdreich um die Erdsonde herum ist gegen Ende der Heizperiode stark abgekühlt, da das Gebäude aber meist schon ab Frühsommer, spätestens aber im Sommer, gekühlt werden soll, so ist dies anfangs autonom durch das kühle Wasserträgermedium in den Sonden möglich. Das Wasserträgermedium wiederum erwärmt sich während der Kühlung des Gebäudes und gelangt über die Erdsonden wieder ins Erdreich. Bei diesem Vorgang bzw. Kreislauf erwärmt sich der Untergrund des Gebäudes wieder und kann sich somit wieder regenerieren. Im Spätsommer ist darauf zu achten, dass eine Umkehrung der Wärmepumpe stattfindet und betrieben wird, d.h., dass sie als Kältemaschine betrieben werden sollte, um die aus dem Gebäude überschüssige und abzuleitende Wärme in das Erdreich zu leiten. Durch diesen Prozess erwärmt sich das Erdreich unter dem Gebäude stetig und für diesen Prozess sind umschaltbare Wärmepumpen notwendig, die beide Betriebsarten können, Heizen und Kühlen. Erdsonden können andererseits auch zum Kühlen eines Gebäudes dienen. Hier ist vor allem auf eine nachhaltige Nutzung zu achten, denn die eingespeicherte Wärme bzw. Energie sollte während der Zeit des Stillstands der Anlage, also im Winter, abgeführt werden. Dies Wärmeabfuhr geschieht hier innerhalb von Grundwasserleitern (Aquiferen) meist konvektiv und auch konduktiv durch die Wärmeleitung des Erdreichs. Bei diesem Vorgang kann es zu Problemen kommen, wenn z.B. die Erdsonde im Boden hauptsächlich von tonigem oder bindigem Material umhüllt ist, siehe Tabelle – Abbildung 32: Wärmeleitfähigkeit, Wärmespeicherzahl und Entzugsleistung der verschiedenen Untergründe bzw. Gesteine.

Untergrund	Wärmeleitfähigkeit (λ) [W/mK]	Wärmespeicherzahl (s) [MJ/m ³ /K]	„Entzugsleistung“ [W/m]
Kies, Sand trocken	0,4	1,4 bis 1,6	20 bis 30
Kies, Sand feucht	0,6 bis 2,2	1,2 bis 2,2	30 bis 50
Kies, Sand (Wasser-führend)	1,8 bis 2,4	2,3 bis 3,0	55 bis 70
Moräne	1,7 bis 2,4	1,5 bis 2,5	40 bis 55
Ton, Lehm feucht	0,9 bis 2,2	1,6 bis 3,4	30 bis 50
Kalkstein massiv	1,7 bis 3,4	2,0 bis 2,6	45 bis 65
Mergel	1,3 bis 3,5	3	40 bis 60
Sandstein	1,3 bis 5,1	1,6 bis 2,8	40 bis 70
Nagelfluh	1,4 bis 3,7	2,1	40 bis 65
Granit	2,1 bis 4,1	2,1 bis 3,0	50 bis 70
Basalt	1,3 bis 2,3	2,3 bis 2,6	35 bis 55
Andesite	1,7 bis 2,2	2,4	45 bis 50
Quarzit	3,6 bis 6,0	2,1	65 bis 92
Breccia	2,2 bis 4,1	2,1	50 bis 70
Schiefer	1,5 bis 2,6	2,2 bis 2,5	40 bis 55
Gneis	1,9 bis 4,0	1,8 bis 2,4	50 bis 70

Abbildung 49.: Zusammenstellung der Wärmeleitfähigkeit (λ), der Wärmespeicherzahl (s) und der entsprechenden „Entzugsleistung“ für verschiedene Gesteine nach VDI 4640, 2001 (VDI = Gesellschaft Bauen und Gebäudetechnik) für Einzel-Erdwärmesonden und Betriebsdauer von 1800 Stunden. (Stober und Bucher 2020, 91)

Tonige und lehmige Untergründe weisen eine schlechte Wärmeleitfähigkeit und Wärmespeicherung – auch die Entzugsleistung der Erdsonden ist nicht optimal (Stober und Bucher 2020, 125).

18.4 Gute Ökobilanz als Vorteil der Geothermie

Die Nutzung einer Geothermie birgt noch weitere Vorteile in sich, wie z.B., dass bei der Kälte- und Wärmegewinnung nahezu kein CO₂ aufkommt. Zusätzlich ist bei der Geothermie die thermische Energie im Erdreich konstant vorhanden. Transporte die energieintensiver sind, wie z.B. bei Transport von Heizöl, ist bei der Wahl einer Geothermie nicht mehr nötig. Auch ist die Geothermie vielseitig einsetzbar, denn man kann sie auch zur Stromerzeugung heranziehen - Dies ist vor allem bei der tiefen Geothermie möglich. (Viessmann Climate Solutions SE 2021)

18.4.1 Wirtschaftlichkeit nicht immer gegeben

Bohrungen sind für die Gewinnung von Erdwärme unentbehrlich. Das Verlegen der dazugehörigen Erdsonden zählt hier auch dazu. Jeder Standort weist einen anderen Untergrund auf und daher variieren die Erdschichten sehr stark, was die Kosten einer Geothermie intensiviert. Vor allem bei einer tiefen Geothermie kann es sein, dass der Wärmespeicher im Untergrund

nicht ausreicht, um die notwendigen Mengen an Wärme für ein Gebäude zu liefern. Damit ist nicht nur die Wirtschaftlichkeit, sondern auch die Nachhaltigkeit automatisch nicht immer gleich gegeben. (Viessmann Climate Solutions SE 2021)

18.4.2 Fallbeispiel: Kombi aus oberflächennaher Geothermie & Solarthermie

Durch die Kombination aus Solarthermie und Geothermie sind bei dem 1. Gebäudekomplex des Fallbeispiels beachtliche Synergieeffekte möglich. Die Anzahl der Erdsonden beträgt ca. 200 Stück, die direkt unter dem 1. Gebäudekomplex platziert wurden. Die Bohrtiefe der Sonden beträgt bis zu 150 Metern. In den Sommermonaten, wenn die solaren Erträge am höchsten sind, benötigt der 1. Gebäudekomplex keine Heizung, daher wird die Solarenergie im Sommer nur für die Warmwasseraufbereitung benötigt. Das Positive beim Fallbeispiel ist, dass die Solaranlage richtig dimensioniert wurde, denn mithilfe der von den Solarkollektoren produzierten Solarerträge und Energie ist es während der gesamten Sommermonate möglich Warmwasser bereitzustellen. Ein weiterer positiver Aspekt der Kombination aus Solarthermie und Geothermie ist hier die Verbindung aus zwei Techniken für zur Nutzung erneuerbarer Energien, denn die Einspeisung solarer Wärme in den Sonden sorgt für eine rascherer Regeneration der Sonden. Im Winter, also wenn es darum geht das Gebäude zu heizen, wird mittels der Sonde dem Erdreich Wärme entzogen, das System ermöglicht daraufhin im Sommer dem Erdreich sich zu regenerieren. D.h., dass die Solaranlage den natürlichen thermischen Regenerationsprozess des Untergrunds, um den Sonden herum, im Winter unterstützt. Die Größe des Pufferspeichers des Fallbeispiels beträgt 6,23m³. Umso wichtiger ist es hier zu verstehen, dass je größer der thermische Speicher ist, umso höher ist auch die Effizienz des Pufferspeichers, dies wiederum ist auch eine Frage der Finanzierung. Hier stellt sich aber die Frage der einer ungenügenden Dimensionierung nicht, da der Speicher ausreichend dimensioniert wurde. Erwähnenswert ist ebenfalls die geringe Temperaturdifferenz zwischen dem Pufferspeicher und dem Untergrund, da die Wärmeverluste geringer sind.

19 Fazit

Auch wenn ein Gebäude über das neueste und beste Kältesystem verfügt, ist es wichtig zu verstehen, dass dieses System bzw. Technologie ab dem Zeitpunkt, ab dem sie in Instand gesetzt wurden, richtig betrieben werden sollte, um effizient und nachhaltig arbeiten zu können. Die Funktion und die Lebenserwartung dieses Systems, hängt von den regelmäßigen Wartungen, so wie vom optimalen Betrieb der Anlage ab. Das Betreiben solcher komplexen Anlagen benötigt ein fachgerechtes haustechnisches Wissen, um die gesamte Maschinerie mit ihren einzelnen Komponenten und deren Zusammenwirken, nachhaltig und effizient betreiben zu können.

Anzumerken ist auch, dass ein Gebäude, während seines Lebenszyklus, einem ständigen Wandel unterzogen ist. Ausbauten, Zubauten, Umbauten und Anpassungen der Raumnutzungen werden über die Jahre im und am Gebäude durchgeführt. Hier sind es vor allem die Raumänderungen und Raumadaptierungen die zu unerwünschten Wärmelasten führen können. Abhilfe können hier modulare Erweiterungen schaffen, die notwendig sind, um die Kühlung der Räume zu gewährleisten. Dadurch ist es möglich die Effizienz und die Nachhaltigkeit eines (öffentlichen) Gebäudes zu fördern. Essenziell sind hier auch die regelmäßigen Wartungen und Prüfungen, um die Anlagen ausfallsicher bzw. betriebssicher zu halten.

Im Falle der Gebäudetechnik bzw. Haustechnik des Fallbeispiels, die vor über zehn Jahren gemäß den damaligen Standards, inklusive des Kältesystems, ausgelegt und ausgeführt wurde, wurde die Planung von allen Beteiligten auf Nutzerwunsch bestmöglich umgesetzt. Viele Faktoren spielten bzw. spielen hier zusammen, die zu Ineffizienzen im System führten bzw. noch immer aktuell sind. Erwähnt wurden in dieser Arbeit viele, wie z.B. die Überdimensionierung der Kälteanlage 1 und die Nachrüstung der Kälteanlage 2 auf eine derzeitige Gesamtfläche des 1.Gebäudekomplexes von 44.000m². Auch die beiden Wärmepumpen, die 2019 zusätzlich auf Kühlung umgebauten wurden, sind in dieser Arbeit erwähnt und beschrieben worden. Das Aufzeigen von Maßnahmen, mögliche Lösungsansätze und andere verschiedene Beispiele wurden von hier angeführt und diskutiert. Nichtsdestotrotz benötigt diese gesamte hochkomplexe Maschinerie das nötige Know-How, um sie betreiben zu können. Viele allgemeine technische Prozesse, fachtechnische Prozesse und Einschätzungen zu den Anlagen wurden in dieser Arbeit dargestellt. Bei umfassender Betrachtung ist es dennoch der Betreiber, der die Gebäudetechnik genau hinterfragen muss. Er ist es, der immer vor Ort ist, und neben dem Errichter und Objektmanager, die Anlagen verstehen muss. Im Notfall liegt es vor allem am Betreiber, zu wissen wie das gesamte System aufgebaut ist, um am effizientesten eingreifen zu können. Denn das einzige Ziel, das es hier immer zu verfolgen gilt, ist die Aufrechterhaltung des Betriebs. Die GLT spielt hier natürlich auch eine Rolle, denn hier ist es auch von hoher Wichtigkeit und Dringlichkeit die Störmeldungen zu hinterfragen und sich das

Problem direkt vor Ort anzustehen. Nur so ist es möglich nachhaltige Lösungen und Effizienzen im System erarbeiten bzw. aufzeigen zu können und Ineffizienzen vermeiden bzw. niedrig zu halten. Eine Balance zwischen dem effizienten Betreiben eines Kühlsystems und dem ineffizienten Betreiben eines Kühlsystems zu finden, ist ein Drahtseilakt, den es über die gesamte Lebenszeit des Systems zu managen gilt.

Ausschlaggebend ist auch eine optimale Gebäudehülle, um eine Überhitzung des Gebäudes zu vermeiden, die, wie im Fallbeispiel beschrieben und dargelegt, gegeben ist. Viele nachhaltige Maßnahmen zur Vermeidung von Hitzequellen, wie vom Tausch der Leuchtmittel und Cloud Computing, wurde in dieser Arbeit beschrieben, bis hin zur Gewinnung von solaren Erträgen und die Einspeisung ins haustechnische System, wurden diskutiert und nach ihrer Effizienz behandelt. Viele dieser angeführten Themen sind relevant und können als zukünftige Maßnahmen auf das Fallbeispiel umgesetzt werden.

Die nachhaltige Nutzung von Kühlsystemen in öffentlichen Gebäuden erstreckt sich über den gesamten Lebenszyklus eines Gebäudes und dessen Haustechnik. Angefangen bei der Planung und Errichtung bis hin zur Instandsetzung, Instandhaltung und dem Rückbau des Gebäudes samt seiner gesamten Ausstattung. Mit Falle des Fallbeispiels kann selbst eine Platin-Zertifizierung lt. ÖGNI von 2017, d.h. die damals höchste Auszeichnung im nachhaltigen Bauen, dem Bauherrn und dem Nutzer nicht viel bringen, solange das Gebäude bzw. die haustechnischen Anlagen ineffizient und dadurch nicht nachhaltig betrieben werden.

Quellenverzeichnis

- Albers, Karl-Josef. *Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik: einschließlich Trinkwasser- und Kältetechnik sowie Energiekonzepte*. Herausgeber: Karl-Josef Albers, Hermann Recknagel und Eberhard Sprenger. Kleinaitingen: ITM InnoTech Medien GmbH, 2020.
- Anton Pech, Klaus Jens. „Baukonstruktionen Band 15 - Heizung und Kühlung.“ In *Baukonstruktionen Band 15 - Heizung und Kühlung*, von Klaus Jens Anton Pech, 153. Wien: Springer Verlag, Wien, 2005.
- BITZER Kühlmaschinen GmbH. „Competence in Capacity Control.“ Sindelfingen, Deutschland, 2016.
- Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie. „GRÜNSTATTGRAU - Bauwerksbegrünung Fassaden- und Dachbegrünung.“ 2020. https://www.agendajosefstadt.at/files/bezirk_8/projekte/2020/LA21-8_Webinar_Fassade_Dachbegruenung_GruenStattGrau_200513.pdf.
- CCCA Data Centre. „ÖKS15 Factsheets: Klimaszenarien für das Bundesland Wien.“ Vers. 1. *ÖKS15 Factsheets: Klimaszenarien für das Bundesland Wien*. 28. 7 2022. <https://hdl.handle.net/20.500.11756/0218e9b1>.
- Cloud & Heat GmbH. *Hardware*. 2022. <https://www.cloudandheat.com/hardware/> (Zugriff am 28. 7 2022).
- Dehli, Martin. *Energieeffizienz in Industrie, Dienstleistung und Gewerbe: energietechnische Optimierungskonzepte für Unternehmen*. Wiesbaden [Heidelberg]: Springer Verlag, 2020.
- Deutscher Wetterdienst. *Wetter- und Klimalexikon*. 2022. <https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?nn=103346&lv2=102248&lv3=744502> (Zugriff am 28. 7 2022).
- ED Tipps. *Leuchtstoffröhre gegen LED im Vergleich: Was ist besser?* 2022. <https://ledtipps.net/leuchtstoff-led-vergleich> (Zugriff am 12. 3 2022).
- Friembichler, Felix, Simon Handler, Klaus Krec, und Harald Kuster. *Thermische Bauteilaktivierung - Planungsleitfaden Energiespeicher Beton*. BMVIT, 2016.
- Greenhouse Media GmbH. *Technik und Funktion von Wärmepumpen-Verdampfern*. 7. 8 2021. <https://www.energie-experten.org/heizung/waermepumpe/technik/verdampfer> (Zugriff am 23. 7 2022).

- Hühren, Frank. „Die Cloud erobert die Gebäudeautomation.“ In *BTGA-Almanach*. Bonn: Bundesindustrieverband Technische Gebäudeausrüstung e.V., 2018.
- Humitec AG. *Dampf lampen*. 2022. <https://humitec.ch/web/project/humitec-dampf lampen/> (Zugriff am 28. 7 2022).
- Infraserv GmbH & Co. Höchst KG. *Das Kältemittel R 134a, seine Eigenschaften und Alternativen*. Herausgeber: Infraserv GmbH & Co. Höchst KG. 2022. <https://www.infraserv.com/de/leistungen/facility-management/expertenwissen/f-gase/kaeltemittel/spezifische-kaeltemittel/r-134a.html> (Zugriff am 28. 07 2022).
- . *Das Kältemittel R 410A: Eigenschaften und mögliche Alternativen*. 2022. <https://www.infraserv.com/de/leistungen/facility-management/expertenwissen/f-gase/kaeltemittel/spezifische-kaeltemittel/r-410a.html> (Zugriff am 28. 07 2022).
- Jacob, Daniela, et al. „EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research.“ *Regional Environmental Change*, 4 2014: 563-578.
- Kulterer, Konstantin. *Beschreibung eines Kälteprozesses*. Energieeffizienz in Kälte systemen, klima:aktiv Energieeffiziente Betriebe, Wien: Österreichische Energieagentur, 2007.
- Kulterer, Konstantin. *Energieeffizienz in Kälte systemen*. Wien: Österreichische Energieagentur – Austrian Energy Agency, 2007, 43.
- Kulterer, Konstantin, und Oskar Mair. *Leitfaden für Energieaudits in Kälte systemen*. Wien: Österreichische Energieagentur, 2015.
- Lazar, Reinhold. *Klimawandelanpassung*. Herausgeber: Stadt Graz. 2022. <https://www.umwelt.graz.at/cms/beitrag/10258902/6703509/> (Zugriff am 28. 7 2022).
- Ledaxo. *Schnell gespartes Geld – Die Wirtschaftlichkeit von LED-Beleuchtung*. 2022. <https://www.ledaxo.de/wirtschaftlichkeit-von-led> (Zugriff am 12. 3 2022).
- led-leuchtstofflampe.de. *5 Gründe warum die LED Leuchtstofflampe effizienter ist als die klassische Röhre*. 22. 11 2016. <http://led-leuchtstofflampe.de/led-leuchtstofflampe-effizienter/> (Zugriff am 28. 7 2022).
- Leuchtmittelmarkt. *Der Vergleich: Leuchtstoffröhren vs. LED-Röhren*. 2022. <https://leuchtmittelmarkt.com/ratgeber/led-roehren-leuchtstoffroehren/> (Zugriff am 12. 3 2022).
- . *Entsorgung von Leuchtstoffröhren und LED-Röhren*. 2022. <https://leuchtmittelmarkt.com/ratgeber/led-roehren-leuchtstoffroehren/> (Zugriff am 12. 3 2022).

May, Michael. *CAFM-Handbuch: Digitalisierung im Facility Management erfolgreich einsetzen*. 4. Wiesbaden: Springer Verlag, 2018.

Munters GmbH. 2022. <https://www.munters.com/de/munters/Produkte/coolers--humidifiers/munters-fa6-evaporative-humidifier-and-cooler> (Zugriff am 28. 7 2022).

Pech, Anton, und Klaus Jens. *Heizung und Kühlung*. Wien: Springer, 2005.

—. *Heizung und Kühlung*. Bd. Baukonstruktionen. 15 Bde. Wien: Springer, 2005.

Rosenkranz, Alexander. *Expansionsventil: Funktion und Einsatz*. Herausgeber: heizung.de. 27. 5 2020. <https://heizung.de/waermepumpe/wissen/expansionsventil-funktion-und-einsatz/> (Zugriff am 28. 7 2022).

salt-solutions.de. *Definition von Cloud Computing*. 2022. <https://www.salt-solutions.de/lexikon/cloud-computing.html> (Zugriff am 28. 7 2022).

SCHIESSL Kältegesellschaft m.b.H. „Drosselorgane bei direkt verdampfenden Kälteanlagen und Sekundär-Druckregler.“ *Drosselorgane bei direkt verdampfenden Kälteanlagen und Sekundär-Druckregler*. WKO, 2013.

smart-rechner.de. *Leuchtstoffröhren durch LED ersetzen*. 22. 6 2022. https://www.smart-rechner.de/lumen_watt_umr/infothek/leuchtstoffroehre_led.php (Zugriff am 28. 7 2022).

Stober, Ingrid, und Kurt Bucher. *Geothermie*. 386. Berlin: Springer Spektrum, 2020.

Strobel Verlag. *Wie funktioniert eigentlich ... ein Dampfbefeuchter?* 2005. ikz.de.

SWEP International AB. *Economizers*. 2019. <https://www.swep.de/losungen/economizers> (Zugriff am 28. 07 2022).

t3n.de. *Cloud & Heat macht Abwärme im Rechenzentrum zu Heizenergie*. 2022. <https://t3n.de/news/startup-cloud-heat-rechenzentrum-energie-1346494/> (Zugriff am 12. 3 2022).

tecchannel.de. *Intelligentes Klimatisierungskonzept, Free Cooling - Energiekosten in Rechenzentren und Serverräumen senken*. 2022. <https://www.tecchannel.de/a/free-cooling-energiekosten-in-rechenzentren-und-serverraeumen-senken> (Zugriff am 13. 3 2022).

Universität Siegen. *Erster Hörsaal erstrahlt in LED-Licht*. 25. 6 2014. <https://www.uni-siegen.de/start/news/oef-fentlichkeit/587465.html> (Zugriff am 12. 3 2022).

Viessmann Climate Solutions SE. *Die Geothermie und ihre Vor- und Nachteile*. 10. November 2021. <https://heizung.de/heizung/wissen/die-geothermie-und-ihre-vor-und-nachteile/>.

ZAMG. *Lufttemperatur*. 2022. <https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/informationsportal-klimawandel/klimazukunft/europa/lufttemperatur> (Zugriff am 28. 7 2022).

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.: Beschreibung eines Kälteprozesses (Kulterer, Beschreibung eines Kälteprozesses 2007, 8).	6
Abbildung 2.: Kenndaten der verschiedenen Kältemittel (Kulterer, Energieeffizienz in Kältesystemen 2007, 33).	9
Abbildung 3.: Die Bauteile einer Kompressions-Kälteanlage (Pech und Jens, Heizung und Kühlung 2005, 67).....	13
Abbildung 4.: Hubkolbenverdichter vs. Schraubenverdichter (BITZER Kühlmaschinen GmbH 2016, 4).....	21
Abbildung 5.: Pufferspeicher für Niedertemperaturkälte – Fallbeispiel, erstellt am 18.07.2017 in AutoCAD (Quelle: Originaldokument des Gebäudes, anonymisiert)	42
Abbildung 6.: Pufferspeicher für Hochtemperaturkälte – Fallbeispiel, erstellt am 18.07.2017 in AutoCAD (Quelle: Originaldokument des Gebäudes, anonymisiert).....	43
Abbildung 7.: Auswertung der Schichttemperaturen bzw. der 3 Temperaturstufen im Niedertemperaturpufferspeicher vom 26.11.2016 bis 31.05.2022, – 1. Gebäudekomplex, Fallbeispiel, Grafik erstellt am 12.06.2022 (Quelle: Melanie Krisper, Auswertung Originaldokumente des Gebäudes bzw. Auswertung anhand eines Auszugs aus der GLT, 2022)	43
Abbildung 8.: Auswertung der Hitzetage 2017 – Ende Mai 2022, – 1. Gebäudekomplex, Fallbeispiel, Grafik erstellt am 12.06.2022 (Quelle: Melanie Krisper, Auswertung Originaldokumente des Gebäudes bzw. Auswertung anhand eines Auszugs aus der GLT, 2022)	44
Abbildung 9.: Auswertung der Hitzetage 01/2017 – 05/2022 – 1. Gebäudekomplex, Fallbeispiel, Grafik erstellt am 12.06.2022 (Quelle: Melanie Krisper, Auswertung Originaldokumente des Gebäudes bzw. Auswertung anhand eines Auszugs aus der GLT, 2022)	45
Abbildung 10.: KM1 in Normalbetrieb – 1. Gebäudekomplex, Fallbeispiel, Grafik erstellt am 14.06.2022 (Quelle: Melanie Krisper, Auswertung Originaldokumente des Gebäudes bzw. Auswertung anhand eines Auszugs aus der GLT, 2022).....	46
Abbildung 11.: KM1 schaltet sich an einem Hitzetag nicht ein – 1. Gebäudekomplex, Fallbeispiel, Grafik erstellt am 14.06.2022 (Quelle: Melanie Krisper, Auswertung Originaldokumente des Gebäudes bzw. Auswertung anhand eines Auszugs aus der GLT, 2022)	47
Abbildung 12.: KM1 ist in Betrieb, erzielt aber keine Leistung – 1. Gebäudekomplex, Fallbeispiel, Grafik erstellt am 14.06.2022 (Quelle: Melanie Krisper, Auswertung Originaldokumente des Gebäudes bzw. Auswertung anhand eines Auszugs aus der GLT, 2022)	48

Abbildung 13.: Auswertung Pendelschaltung der KM1 an Hitzetagen < 31°C – 1. Gebäudekomplex, Fallbeispiel, Grafik erstellt am 11.06.2022 (Quelle: Melanie Krisper, Auswertung Originaldokumente des Gebäudes bzw. Auswertung anhand eines Auszugs aus der GLT, 2022) 49

Abbildung 14.: KM2 in Normalbetrieb – 1. Gebäudekomplex, Fallbeispiel, Grafik erstellt am 14.06.2022 (Quelle: Melanie Krisper, Auswertung Originaldokumente des Gebäudes bzw. Auswertung anhand eines Auszugs aus der GLT, 2022)..... 50

Abbildung 15.: KM2 geht in Pendelschaltung und KM1 korrigiert – 1. Gebäudekomplex, Fallbeispiel, Grafik erstellt am 14.06.2022 (Quelle: Melanie Krisper, Auswertung Originaldokumente des Gebäudes bzw. Auswertung anhand eines Auszugs aus der GLT, 2022) 51

Abbildung 16.: KM2 schaltet sich wegen Überlastung aus und KM1 schaltet sich dazu – 1. Gebäudekomplex, Fallbeispiel, Grafik erstellt am 14.06.2022 (Quelle: Melanie Krisper, Auswertung Originaldokumente des Gebäudes bzw. Auswertung anhand eines Auszugs aus der GLT, 2022) 52

Abbildung 17.: Klimaszenarien 2021 – 2050 und 2071 – 2100, (CCCA Data Centre 2022).56

Abbildung 18.: Mögliche zukünftige Änderung der Temperatur 2071-2100 im Vergleich zu heute (1971-2000) in °C für unterschiedliche Treibhausgas-Konzentrationen. (Jacob, et al. 2014)..... 56

Abbildung 19.: Der Hitzeinseleffekt - Urban Heat Island-Effekt (UHI), (Deutscher Wetterdienst 2022). 57

Abbildung 20.: BAU- UND AUSSTATTUNGSBESCHREIBUNG (inklusive aller technischen Berichte) für die Vorlage des Entwurfs vom 05.11.2012, S.206 - Daten zum Fallbeispiel (Quelle: Originaldokument des Gebäudes, anonymisiert)..... 58

Abbildung 21.: Schnitte durch Regelfassade und Dachfläche der Campusebene des 1.Gebäudekomplexes (Quelle: Originaldokument des Gebäudes, anonymisiert) . 60

Abbildung 22.: Fußboden EG und 1.OG der Hörsäle, Diagramm Wärmedurchgang und Dampfdiffusion, Berechnung nach ArchiPHYSIK 14.0.105, 31.10.2017 (Quelle: Originalauswertungen des Gebäudes, anonymisiert) 61

Abbildung 23.: Erdberührende Außenwände 1.UG, EG und 1.OG, Diagramm Wärmedurchgang und Dampfdiffusion, Berechnung nach ArchiPHYSIK 14.0.105, 31.10.2017 (Quelle: Originalauswertungen des Gebäudes, anonymisiert) 61

Abbildung 24.: Erdberührte Fußböden im 1.UG, Lager- und Technikbereiche, Diagramm Wärmedurchgang und Dampfdiffusion, Berechnung nach ArchiPHYSIK 14.0.105, 31.10.2017 (Quelle: Originalauswertungen des Gebäudes, anonymisiert) 62

Abbildung 25.: Fußböden EG bzw. OGs, Lager- und Technikbereiche, Diagramm Wärmedurchgang und Dampfdiffusion, Berechnung nach ArchiPHYSIK 14.0.105, 31.10.2017 (Quelle: Originalauswertungen des Gebäudes, anonymisiert) 62

Abbildung 26.: Dachfläche 6.OG bekiest, Diagramm Wärmedurchgang und Dampfdiffusion, Berechnung nach ArchiPHYSIK 14.0.105, 31.10.2017 (Quelle: Originalauswertungen des Gebäudes, anonymisiert) 63

Abbildung 27.: Dachfläche 6.OG extensiv begrünt, Diagramm Wärmedurchgang und Dampfdiffusion, Berechnung nach ArchiPHYSIK 14.0.105, 31.10.2017 (Quelle: Originalauswertungen des Gebäudes, anonymisiert) 63

Abbildung 28.: Nachweis des Wärmeschutzes – U-Wert für erdberührte Bereiche mit Doppelboden lt. TGA, Berechnung nach ArchiPHYSIK 14.0.105, 31.10.2017 (Quelle: Originalauswertungen des Gebäudes, anonymisiert) 64

Abbildung 29.: Nachweis des Wärmeschutzes – U-Wert für erdberührte Fußböden im 1.UG - Logistiktunnel, Berechnung nach ArchiPHYSIK 14.0.105, 31.10.2017 (Quelle: Originalauswertungen des Gebäudes, anonymisiert) 64

Abbildung 30.: Nachweis des Wärmeschutzes – U-Wert für Fußböden EG der Technik- und Lagerbereiche, Berechnung nach ArchiPHYSIK 14.0.105, 31.10.2017 (Quelle: Originalauswertungen des Gebäudes, anonymisiert) 65

Abbildung 31.: Nachweis des Wärmeschutzes – U-Wert für Fußböden OGs – Besprechungsräume und Büros, Berechnung nach ArchiPHYSIK 14.0.105, 31.10.2017 (Quelle: Originalauswertungen des Gebäudes, anonymisiert)..... 65

Abbildung 32.: Schnitt durch 3-fach Isolierfenster, mit außenliegendem, sensorgesteuertem Sonnenschutz (Quelle: Originaldokument des Gebäudes, anonymisiert) 67

Abbildung 33.: Nachweis des Wärmeschutzes – U-Wert für 3-fach Sonnenschutzglas, neutral beschichtet (Quelle: Originalauswertungen des Gebäudes, anonymisiert) 68

Abbildung 34.: Cloud and Heat Hardware (Cloud & Heat GmbH 2022) 71

Abbildung 35.: Beladung des Speichers mit Wärme aus Umweltenergien (Friembichler, et al. 2016, 36, Abb. 14|1)..... 73

Abbildung 36.: Deckung der Wärmeverluste durch gespeicherte Energie - Keine Umweltenergie nutzbar (Friembichler, et al. 2016, 36, Abb. 14|2)..... 73

Abbildung 37.: Einspeisung von vor Ort erzeugter Energie in öffentliche Netze, wenn Speicher vollständig geladen ist (Friembichler, et al. 2016, 36, Abb. 14|3). 74

Abbildung 38.: Bezug von Energie aus öffentlichen Netzen – keine Umweltenergie nutzbar (Friembichler, et al. 2016, 37, Abb. 14|4)..... 74

Abbildung 39.: Passive Kühlung – Betrieb einer Umwälzpumpe (Friembichler, et al. 2016, 37, Abb. 14|5). 74

Abbildung 40.: Skizze Energieversorgung über Solarthermie (Friembichler, et al. 2016, 46)76

Abbildung 41.: Skizze Energieversorgung mittels PV-Wärmepumpe-Bauteilaktivierung (Friembichler, et al. 2016, 50, Abb. 21)..... 78

Abbildung 42.: Skizze Energieversorgung der TBA mittels Windenergie und Wärmepumpe (Friembichler, et al. 2016, 54, Abb. 23)..... 80

Abbildung 43.: Ausschnitt Schemata der Solarthermie des Fallbeispiels – Solarkollektoren, erstellt am 18.07.2017 in AutoCAD (Quelle: Originaldokument des Gebäudes, anonymisiert) 81

Abbildung 44.: Ausschnitt Schemata der Solarthermie des Fallbeispiels – Wärmetauscher, erstellt am 18.07.2017 in AutoCAD (Quelle: Originaldokument des Gebäudes, anonymisiert) 82

Abbildung 45.: Ausschnitt Schemata der Solarthermie des Fallbeispiels – Pufferspeicher Heizung, erstellt am 18.07.2017 in AutoCAD (Quelle: Originaldokument des Gebäudes, anonymisiert) 82

Abbildung 46.: Verschiedene Typen von Erdwärmesonden: Einfach- und Doppel-U-Rohr-Sonde sowie Koaxialrohrsonde (Stober und Bucher 2020, 77) 87

Abbildung 47.: Beispiel für die dynamischen Temperaturerniedrigungen um eine Erdwärmesonde nach Messungen und Berechnungen für die Anlage Elgg/Schweiz, Eugster 1998 (Stober und Bucher 2020, 79) 88

Abbildung 48.: Hydraulische und thermische Eigenschaften gebräuchlicher Wärmeträgerflüssigkeiten für isotherme Verhältnisse (nach Zapp & Rosinski, 2007). Günstige Eigenschaften sind rötlich hinterlegt, ungünstige grünlich. (Stober und Bucher 2020, 82)..... 89

Abbildung 49.: Zusammenstellung der Wärmeleitfähigkeit (λ), der Wärmespeicherzahl (s) und der entsprechenden „Entzugsleistung“ für verschiedene Gesteine nach VDI 4640, 2001 (VDI = Gesellschaft Bauen und Gebäudetechnik) für Einzel-Erdwärmesonden und Betriebsdauer von 1800 Stunden. (Stober und Bucher 2020, 91) 91