



INSTITUT FÜR
ENERGIETECHNIK UND
THERMODYNAMIK

Institute for Energy Systems and Thermodynamics

Diplomarbeit

Untersuchungen zur Steigerung der Energieeffizienz von Klimaanlagen in einem Industriebetrieb

*Investigations to enhance energy efficiency of HVAC-systems at an
industrial plant*

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines
Master of Science unter der Leitung von

Ao. Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Andreas Werner

und

Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Markus Haider

Institut für Energietechnik und Thermodynamik

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

Michael Pinczker, 11704934

Wien, April 2025

Vorname, Nachname

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass die vorliegende Arbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen von mir selbstständig erstellt wurde. Alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur, sind in dieser Arbeit genannt und aufgelistet. Die aus den Quellen wörtlich entnommenen Stellen, sind als solche kenntlich gemacht.

Das Thema dieser Arbeit wurde von mir bisher weder im In- noch Ausland einer Beurteilerin/einem Beurteiler zur Begutachtung in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt. Diese Arbeit stimmt mit der von den Begutachterinnen/Begutachtern beurteilten Arbeit überein.

Ich nehme zur Kenntnis, dass die vorgelegte Arbeit mit geeigneten und dem derzeitigen Stand der Technik entsprechenden Mitteln (Plagiat-Erkennungssoftware) elektronisch-technisch überprüft wird. Dies stellt einerseits sicher, dass bei der Erstellung der vorgelegten Arbeit die hohen Qualitätsvorgaben im Rahmen der geltenden Regeln zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis „Code of Conduct“ an der TU Wien eingehalten wurden. Zum anderen werden durch einen Abgleich mit anderen studentischen Abschlussarbeiten Verletzungen meines persönlichen Urheberrechts vermieden.

Ort und Datum

Unterschrift

Vorwort

Viele Menschen haben mich während der Entstehungsmonate dieser Arbeit mit Rat und Tat unterstützt.

Ich möchte zu allererst meinem Arbeitgeber meinen aufrichtigen Dank aussprechen. Nur durch die große Unterstützung und das hohe Interesse an Optimierung war es mir möglich, dieses große Projekt zu planen und an verschiedenen Varianten zu forschen.

Danke, Herr Professor Dr. tech. Andreas Werner, für Ihre großartige Betreuung, die vielen wertvollen Anregungen und Ihren inspirierenden Lehrstil.

Allen Freund:innen und Kolleg:innen danke für jeden ermutigenden Zuspruch, die stetige Unterstützung und den Glauben an dieses Projekt. Danke für jedes Bierchen und jeden Kaffee.

Danke meiner Familie, die mich während meines gesamten Studiums unterstützt hat und immer an mich glaubt. Besonders danke ich meiner Frau, die mir in unzähligen Lernstunden den Rücken freigehalten hat und immer für mich da ist. Theresa, ich liebe dich.

Kurzfassung

Das Projekt befasst sich mit der Umstellung zahlreicher kleiner und dezentral organisierter Klimaanlage in einem Industriebetrieb auf ein effektiveres Fernkältenetz. Das Hauptziel ist, eine nachhaltige Lösung zur Kühlung der Betriebsanlagen zu entwickeln und die bereits vorhandenen Ressourcen bestmöglich zu nutzen.

Die Zusammenführung einzelner Klimaanlage zu einem zentralen Fernkältenetz ermöglicht, Synergieeffekte zu nutzen: Damit sollen die Energieeffizienz erhöht und gleichzeitig die Betriebskosten gesenkt werden.

Mit der Umstellung auf ein Fernkältenetz sind mehrere Herausforderungen verbunden: Die vorhandenen Anlagen sollen integriert werden und die effektive Nutzung der verfügbaren Wärmeleistung von 800 kW soll gewährleistet werden.

Es benötigt technische Lösungen, die eine reibungslose Umstellung und gleichzeitig eine zuverlässige und effiziente Kühlung gewährleisten.

Das Ziel dieser Arbeit ist, ein Konzept für die Umstellung auf ein Fernkältenetz zu entwickeln, das sowohl ökologisch als auch finanziell sinnvoll ist. Hierfür werden verschiedene Faktoren wie Investitionskosten, Energieeffizienz, Betriebssicherheit und Umweltverträglichkeit berücksichtigt. Die Umsetzung dieses Konzepts hat nicht nur den Zweck, eine nachhaltige Lösung für die Kühlung des Industriebetriebs zu schaffen, sondern auch dazu beizutragen, eine umweltfreundliche und ressourcenschonende Wirtschaft zu fördern.

Inhaltsverzeichnis

Eidesstattliche Erklärung	1
Vorwort	2
Kurzfassung	3
Inhaltsverzeichnis	4
1 Abkürzungsverzeichnis	1
2 Einführung	2
3 Grundlagen der Kältetechnik und Investitionsrechnung	5
3.1 EER / ESEER.....	5
3.2 Treibhauspotential - Global Warming Potential.....	6
3.3 Kältemittel	7
3.4 TEWI-Wert	9
3.5 Rohrleitungsnetzvarianten.....	10
3.6 Capex / Opex	12
3.7 Statische Verfahren der Investitionsrechnung	13
4 Prozessarten für Kühltechnologien	14
4.1 Kompressionsprozess	14
4.2 Absorptionsprozess.....	16
4.3 Adsorptionsprozess.....	18
4.4 Offener Adsorptionsprozess	20
5 Aufgabenstellung	22
5.1 Fragestellung und Zielsetzung.....	22
5.2 Beschreibung der aktuellen Energiebereitstellung im Industriebetrieb	24
5.3 Beschreibung der aktuellen Kälteanlagen.....	26

5.4	Beschreibung des Klimatisierungsbedarfs	37
6	Lösungsvorschläge	39
6.1	Darstellung der 4 Varianten	39
6.1.1	Variante 1 (grün).....	42
6.1.2	Variante 2 (blau)	43
6.1.3	Variante 3 (orange).....	44
6.1.4	Variante 4 (rot).....	47
6.2	Bewertung der Varianten.....	47
6.2.1	Amortisationszeit.....	48
6.2.2	CO ₂ – Emissionen.....	52
6.2.3	Ausfallsicherheit.....	54
6.2.4	Bewertungsmatrix	55
6.3	Beschreibung der ausgewählten Varianten	57
6.3.1	Genau Beschreibung der bestbewerteten Variante 2 (blau)	57
6.3.2	Genau Beschreibung der Variante 4 (rot)	58
7	Zusammenfassung / Fazit	59
8	Ausblick.....	61
9	Tabellenverzeichnis.....	62
10	Abbildungsverzeichnis.....	63
11	Literatur	64

1 Abkürzungsverzeichnis

THG	Treibhausgasemissionen	Mio. t
KSG	Klimaschutzgesetz	Mio. t
EH	Emissionshandelsbereich	Mio. t
EER	Energy Efficiency Ratio	
ESEER	European seasonal Energy Efficiency Ratio	
GWP	Global Warming Potential	
TEWI	Total Equivalent Warming Impact	
L	Leckagerate	kg/a
n	Betriebszeit der Anlage	a
m	Kältemittel-Füllmenge	kg
$\alpha_{\text{Rückgewinnung}}$	Faktor für Rückgewinnung	0 bis 1
$E_{\text{jährlich}}$	Energieaufnahme	kW/a
β	spez. CO ₂ -Emission	kg/kWh
KA	Klimaanlage	
AB	Absorptionskältemaschine	
KKM	Kompressionskältemaschine	
CO ₂	Kohlenstoffdioxid	
kW	Kilowatt	
MW	Megawatt	
kWh	Kilowattstunde	

2 Einführung

Die globale Erderwärmung durch den Klimawandel zählt zu den drängendsten Herausforderungen unserer Zeit. In den letzten Jahrzehnten hat die Menschheit einen beispiellosen Anstieg der Durchschnittstemperaturen erlebt, der vor allem durch menschliche Aktivitäten im Zuge der Industrialisierung wie den übermäßigen Ausstoß von Treibhausgasen verursacht wurde. [1]

Besonders große Betriebe und Industrieunternehmen mit hohem Energiebedarf tragen sowohl durch ihre Produktionstätigkeiten, als auch durch den Einsatz ressourcenintensiver Klimatisierungssysteme maßgeblich zu diesem Problem bei. Diese Anlagen, die in großen Unternehmen zur Aufrechterhaltung angenehmer Arbeitsbedingungen und zur Sicherstellung von Produktionsprozessen erforderlich sind, verbrauchen enorme Energiemengen und setzen oft klimaschädliche Emissionen frei.

Die Klimatisierung von Gebäuden hat zwischen 1990 und 2016 den Energiebedarf mehr als verdreifacht und wächst schneller als jede andere Art der Endenergienutzung. Ebenso haben sich dadurch auch die weltweiten CO₂-Emissionen für die Gebäudekühlung seit 1990 verdreifacht und entsprechen mittlerweile den gesamten Emissionen Japans. Raumklimageräte selbst emittieren Treibhausgase vor allem dann, wenn Kältemittel austreten oder unsachgemäß entsorgt werden. Zusätzlich verursacht die Erzeugung von Elektrizität für Klimaanlage hohe CO₂-Emissionen, besonders in Ländern, die fossile Brennstoffe nutzen. [2]

Wie aus einem der neuesten Artikel und Abbildung 1 des Umweltbundesamts zu entnehmen ist, gibt es in Österreich dennoch einen erfreulichen Abwertstrend der Treibhausgasemissionen.

Nach diesen Berechnungen sind die Treibhausgas-Emissionen im Jahr 2023 um 6,5 % im Vergleich zum Jahr 2022 gesunken. Der größte Teil dieses Rückgangs ist Klimaschutzmaßnahmen und dem Einsatz erneuerbarer Energie zuzuschreiben. [3]

„Um diesen Weg fortzusetzen, ist es notwendig, konsequent weitere Maßnahmen zu setzen“ [3], äußert sich Günther Lichtblau, Klimaexperte im Umweltbundesamt.

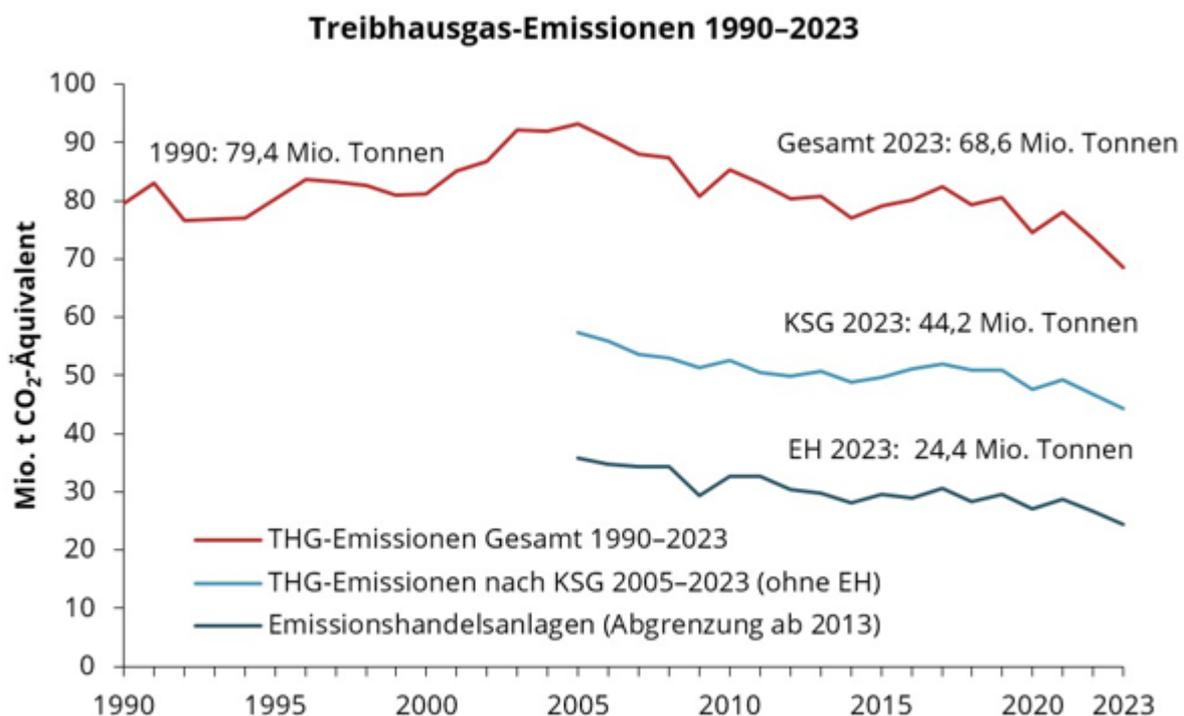


Abbildung 1: Übersicht der Treibhausgas-Emissionen 1990-2023 [3]

Die geopolitische Lage seit dem Beginn des Ukrainekriegs und die damit verbundene Energiekrise haben weltweit Auswirkungen auf die Energiepreise, insbesondere auf die Gaspreise. Die gestiegenen Kosten für fossile Brennstoffe stellen nicht nur private Haushalte, sondern auch Unternehmen vor enorme Herausforderungen. Im Rahmen dieser Arbeit wird der Energieverbrauch der Kälteerzeugung analysiert. Dabei wird festgestellt, dass die Kälteerzeugung in dem beauftragenden Industriebetrieb einen signifikanten Teil des gesamten Energieverbrauchs ausmacht. Angesichts der

aktuellen Energiekrise und der Notwendigkeit, sowohl wirtschaftlich als auch ökologisch effizienter zu werden, liegt der Fokus dieser Untersuchung auf der Überlegung, wie die Kälteerzeugung zentralisiert und in ein Gesamtnetzwerk integriert werden kann. Dies könnte nicht nur zur besseren Nutzung der derzeit ungenutzten Energie führen, sondern auch einen Beitrag zur Reduktion des CO₂-Ausstoßes leisten. Im Rahmen dieser Arbeit werden Konzepte entwickelt, die eine nachhaltige, energieeffiziente Lösung für die Kälteerzeugung im Unternehmen ermöglichen und gleichzeitig die Energie- und CO₂-Bilanz verbessern. [4]

Um den globalen Temperaturanstieg zu bremsen und eine nachhaltigere Zukunft zu sichern, müssen Unternehmen ihre Klimatisierungssysteme überdenken und konsequent Maßnahmen ergreifen, die den Energieverbrauch verringern und den Ausstoß von Treibhausgasen minimieren. Langfristig müssen politische Maßnahmen den Bau und Betrieb energieeffizienter Klimaanlage und Gebäude fördern, um den Energiebedarf zu senken. Investitionen in effizientere Geräte und strengere Vorschriften sind dringend erforderlich, um die potenziellen sozialen, ökologischen und ökonomischen Auswirkungen des wachsenden Kühlbedarfs zu minimieren. [2]

3 Grundlagen der Kältetechnik und Investitionsrechnung

3.1 EER / ESEER

Die Energy Efficiency Ratio (EER) ist eine Kennzahl zur Bewertung der Energieeffizienz von elektrisch betriebenen Kälteanlagen. Dabei wird das Verhältnis zwischen der erzeugten Kälteleistung und der dafür aufgewendeten elektrischen Energie angegeben. Die Messung der EER erfolgt unter festgelegten Bedingungen, 27 °C Innenlufttemperatur und 35 °C Außenlufttemperatur bei Vollastbetrieb. In die Berechnung fließen je nach Anlagentyp auch verschiedene Hilfsenergien ein, zum Beispiel für Pumpen, Regelungssysteme und Ventilatoren. Je höher der EER-Wert ist, desto effizienter ist die Anlage. [5]

Die European Seasonal Energy Efficiency Ratio (ESEER) ist eine Effizienzkennzahl für Kaltwassersätze und Klimaanlage, die im Gegensatz zur EER auch den Teillastbetrieb und klimatische Schwankungen berücksichtigt. [6]

Tabelle 1: Übersicht der Berechnungsgrundlage für die ESEER Kennzahl [7]

	Teillast- faktoren	Luft- temperatur	Wasser- temperatur	Bewertungs- anteil
Einheit	%	°C	°C	%
EER A	100	35	30	3
EER B	75	30	26	33
EER C	50	25	22	41
EER D	25	20	18	23

Die ESEER ermittelt die durchschnittliche Energieeffizienz anhand vier definierter Betriebszustände mit unterschiedlichen Lastprofilen (100 %, 75 %, 50 %, 25 %) und bei unterschiedlichen Umgebungstemperaturen. Diese gewichteten Teilbereiche sind in Tabelle 1 aufgelistet und bilden reale Nutzungsprofile europäischer Klimazonen ab. Die Berechnung erfolgt nach folgender Formel (1). [7]

$$ESEER = (3 * EER_{100\%} + 33 * EER_{75\%} + 41 * EER_{50\%} + 23 * EER_{25\%})/100 \quad (1)$$

3.2 Treibhauspotential - Global Warming Potential

Das Global Warming Potential (GWP) bezeichnet ein relatives Maß, um das Treibhauspotenzial verschiedener Gase über einen gewissen Zeitraum zu vergleichen. Es gibt an, wie viel Wärme eine bestimmte Masse eines Treibhausgases im Vergleich zu einer ähnlichen Masse Kohlendioxid (CO₂) über einen bestimmten Zeitraum in der Atmosphäre speichert. CO₂ hat per Definition ein GWP von 1.

Das GWP wird berechnet, indem der Strahlungsantrieb (Radiative Forcing) einer momentanen Freisetzung von 1 kg eines bestimmten Stoffes relativ zum Strahlungsantrieb von 1 kg CO₂ berechnet wird. Der betrachtete Zeitraum beträgt typischerweise 20, 50 oder 100 Jahre. [8] S. 710-715

Es wurde verbindlich festgelegt, dass für die internationale Emissionsberichterstattung die GWP₁₀₀-Werte herangezogen werden, um eine Vergleichbarkeit zu generieren. Aktuell gültig sind die GWP₁₀₀-Werte des vierten Sachstandsberichtes des Weltklimarats. [9]

Ein anschauliches Beispiel hierfür ist Methan (CH₄). Es weist über einen Zeitraum von 100 Jahren ein GWP auf, das etwa 28-mal höher ist als das von CO₂. Dies verdeutlicht, dass Methan auf Molekülebene eine wesentlich stärkere

wärmespeichernde Wirkung hat als Kohlendioxid. Im Vergleich dazu hat das im Industriebetrieb meist eingesetzte teilhalogenierte Fluorkohlenwasserstoff Kältemittelgemisch R410A einen GWP von 2088 und trägt damit 2088-mal so stark zur Erderwärmung bei wie CO₂. [10]

Die GWP-Werte von Kältemittelmischungen werden anhand eines festgelegten Berechnungsverfahrens ermittelt, dieses ist in Formel (2) ersichtlich.

$$GWP = \sum (Stoff\ X\ \% * GWP) + (Stoff\ Y\ \% * GWP) + \dots + (Stoff\ N\ \% * GWP) \quad (2)$$

Diese Formel ermöglicht es, das Gesamttreibhauspotenzial einer Kältemittelmischung zu bestimmen, indem die GWP-Werte der einzelnen Bestandteile entsprechend ihres Anteils in der Mischung berücksichtigt werden. [11]

3.3 Kältemittel

Ein Kältemittel wird in einem Kältekreislauf verwendet, um dort die notwendigen Zustandsänderungen herbeizuführen, die wiederum zur Erzeugung von Kälte erforderlich sind. [12] S.62

Sowohl in Verdichterkältemaschinen als auch in Sorptionskältesystemen kommen solche Kältemittel zum Einsatz. Viele Kältemittelmedien zeigen bei den benötigten Temperaturen den erforderlichen Phasenwechsel. Durch praktische Anforderungen wie Effizienz, Sicherheit und Umweltverträglichkeit reduzieren sich die wirklich einsetzbaren Stoffe auf eine überschaubare Auswahl. Die temperaturabhängige Dampfdruckkurve ist die zentrale technische Kenngröße der Effizienz von Kältemitteln. Diese typische Beziehung zwischen Druck und Temperatur unterliegt thermodynamischen Prinzipien. [13] S. 343-371

Um die Brandgefahren und die Toxizität der Kältemittel zu beurteilen, werden diese in Gruppen klassifiziert. [14]

Die vierte Generation von Kältemitteln wurde seit 2015 durch politische Vorschriften wie das Kyoto-Protokoll und die F-Gas-Verordnung vorangetrieben, um Kältemittel mit hohem Treibhauspotential schrittweise zu reduzieren. [15] S. 542-554

Ab 1. Januar 2020 wurden Kältemittel mit einem GWP größer 2500 für die Wartung oder Instandhaltung von großen Kälteanlagen, die mindestens 40 Tonnen CO₂-Äquivalent enthalten, verboten. [16] S. 5

Die Bezeichnung der Kältemittel ergibt sich aus der Anzahl bestimmter Atome und einem führendem R aus dem Englischen für „refrigerant“ (Kältemittel). 1.Ziffer: Anzahl der Kohlenstoffatome C, vermindert um 1; 2.Ziffer: Anzahl der Wasserstoffatome H, erhöht um 1; 3.Ziffer: Anzahl der Fluoratome F. Es gibt noch weitere detaillierte Bezeichnungen. Zum Beispiel werden Isomere mit kleinen nachgestellten Buchstaben bezeichnet und anorganische Kältemittel mit einer vorangestellten 7 sowie folgenderen Molmasse in kg/kmol. [12] S. 62-63

In Tabelle 2 sind die am häufigsten eingesetzten Kältemittel im Industriebetrieb dargestellt.

Tabelle 2: Übersicht verschiedener Kältemittel, welche im Industriebetrieb zum Einsatz kommen [10]

[17]

Kältemittel	Anlagenanzahl	Gemisch	Summenformel	Kältemittelmenge	GWP
Einheit				kg	kg CO ₂ -Äq.
R410A	21	R32 R-125	50 %CH ₂ F ₂ 50 %C ₂ HF ₅	190,75	2088
R32	9		100% CH ₂ F ₂	17,85	675

R407F	6	R125 R134a R32	20,51 % C ₂ HF ₅ 32,17 % C ₂ H ₂ F ₄ 47,32 % CH ₂ F ₂	107,00	1825
R407C	3	R32 R125 R134a	23 % CH ₂ F ₂ 25 % C ₂ HF ₅ 52 % C ₂ H ₂ F ₄	426,30	1774
R404a	3	R134a R125 R143a	4 % C ₂ H ₂ F ₄ 44 % C ₂ HF ₅ 52 % C ₂ H ₃ F ₃	55,00	3922
R134a	2		100 % C ₂ H ₂ F ₄	120,50	1430
R449A	2	R32 R125 R1234yf R134a	24 % CH ₂ F ₂ 25 % C ₂ HF ₅ 25 % C ₃ H ₂ F ₄ 26 % C ₂ H ₂ F ₄	57,00	1391
R454B	1	R1234yf R32	31,1 % C ₃ H ₂ F ₄ 68,9 % CH ₂ F ₂	11,00	466

Aus Tabelle 2 wird klar ersichtlich, dass nur einige wenige Kältemittel zum Einsatz kommen können, welche aufgrund unterschiedlich benötigter Eigenschaften in verschiedensten Gemischen auf den Markt kommen.

3.4 TEWI-Wert

TEWI steht für Total Equivalent Warming Impact und ist ein Index, der nicht nur den direkten CO₂-Ausstoß, bewirkt durch den Verbrauch an elektrischer Energie, betrachtet, sondern die Gesamtauswirkung einer Kälteanlage auf den Treibhauseffekt. Der Index bezieht sich auf den gesamten Lebenszyklus der Kälteanlage. Die Berechnung des TEWI-Wertes erfolgt nach Formel (3). [14]

$$TEWI = GWP * L * n + [GWP * m * (1 - \alpha_{Rückgewinnung})] + n * E_{jährlich} * \beta \quad (3)$$

Dabei ist

$GWP * L * n$	die Auswirkung von Leckageverlusten
$GWP * m * (1 - \alpha_{Rückgewinnung})$	die Auswirkung von Rückgewinnungsverlusten
$n * E_{jährlich} * \beta$	die Auswirkung des Energieverbrauchs

Der TEWI-Wert berücksichtigt die Emissionen, welche durch Undichtigkeiten in der Kälteanlage entstehen, darunter fallen die Art und Menge des verwendeten Kältemittels, sowie die Leckrate des verwendeten Kältemittels. [18]

Die Verluste der Rückgewinnung werden mit einem Recyclingfaktor berücksichtigt. Die indirekten Emissionen der Kälteanlagen werden in der TEWI-Berechnung mit der Anlagenlaufzeit in Jahren sowie den Energieverbrauch der Anlage berücksichtigt. Auch der größte Brocken der CO₂-Emissionen wird in den indirekten Emissionen berücksichtigt und bezieht sich auf den verwendeten Strommix. Strom, erzeugt durch Heizöl oder Erdgase, hat eine anderes CO₂-Äquivalent pro kWh als Strom, der aus erneuerbaren Energien erzeugt wurde. [19]

3.5 Rohrleitungsnetzvarianten

Das Fernkältenetz ist dafür verantwortlich, dass bei allen Kälteverbrauchern genügend Kälte ankommt. Diese Kälteverbraucher sind über ein Rohrleitungsnetz miteinander verbunden. Je nach Größe des Kältenetzes gibt es drei unterschiedliche Netzvarianten, diese sind in Abbildung 2 ersichtlich. Das Strahlennetz ist das einfachste Netz, die Rohrleitungen gehen dabei in mehreren Verästelungen vom Wärme-/Kälteerzeuger aus. Dieses Netz lässt sich leicht regeln und ist für kleinere

Netze gut geeignet. Die Nachteile sind, dass künftige Erweiterungen bereits für jeden Strang vorab in ausreichend großem Maß berücksichtigt werden müssen und dass bei einer Störung oder Erweiterungen immer das gesamte Netz stillgelegt werden muss. [20]

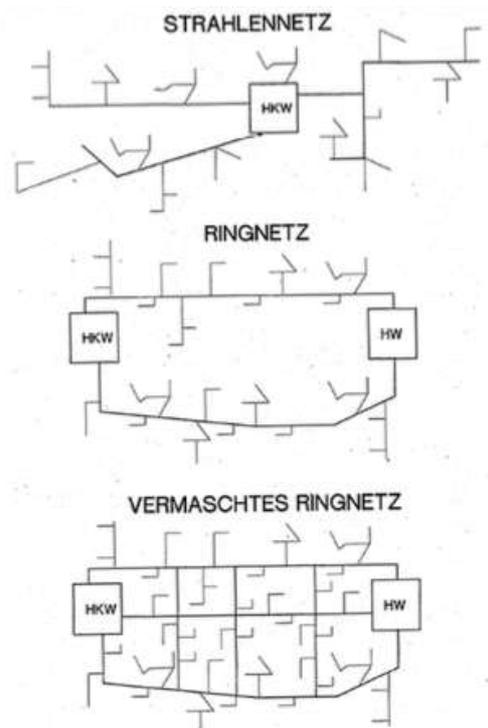


Abbildung 2: 3 mögliche Fernwärme/-kälte Netzvarianten [20] S. 78

Bei Einspeisungen aus mehreren Wärme- / Kälteerzeugern und ab einer gewissen Größe ist es vorteilhafter ein Ringnetz vorzusehen. In der Gesamtheit gesehen ist ein Strahlennetz zwar günstiger als ein Ringnetz. Ringnetze bieten aber einige Vorteile: Bei Wartungsarbeiten müssen nur kurze Teilstrecken stillgelegt werden und Störungen wirken sich durch die unterschiedlichen Wärme- und Kälteerzeuger weniger drastisch aus. Aus diesem Grund ist heutzutage eine Kombination aus Ring- und Strahlennetzen üblich. [20] S. 77-78

Bei der Planung einer Rohrleitung müssen zahlreiche mechanische und thermische Beanspruchungen berücksichtigt werden. Bei der Konstruktion muss die Auslegung von Auflagerungen, Füge-techniken und Isolierungen beachtet werden. Einbauvorschriften und Druckproben sind entscheidend, um die Betriebssicherheit zu gewährleisten und unter realen Betriebsbedingungen nachzuweisen. [21] S. 559-585

3.6 Capex / Opex

CAPEX ist die Abkürzung für „capital expenditures“ (Investitionsausgaben) und bezeichnet die finanzielle Aufwendung für langfristige Vermögenswerte eines Unternehmens. Beinhaltet sind Anschaffungen wie Produktionsanlagen, Immobilien, technische Infrastruktur sowie initiale Ausstattung und wesentliche Ersatzteile. Als bedeutende Bilanzkennzahl bestimmen CAPEX-Investitionen die zukünftige Leistungsfähigkeit des Unternehmens. Diese Ausgaben erhöhen den Wert der bilanzierten Aktiva und unterliegen einer langfristigen Abschreibung über die Nutzungsdauer der erworbenen Güter. [22]

OPEX ist Abkürzung für „operational expenditures“ (Betriebsausgaben). Sie umfassen alle laufenden Kosten, die für den Geschäftsbetrieb eines Unternehmens anfallen. Im Unterschied zu langfristigen Investitionen, wie bei CAPEX, beinhalten OPEX kurzfristige und wiederkehrende Ausgaben. Dazu zählen unter anderem Aufwendungen für Rohmaterialien, Verbrauchsgüter, Personalkosten, Miet- oder Leasingzahlungen oder Energiekosten. Diese Betriebsausgaben sind wichtig für die Aufrechterhaltung der Geschäftstätigkeit und werden in der Bilanz vollständig als Aufwand in dem Zeitrahmen ihres Entstehens erfasst. [23]

3.7 Statische Verfahren der Investitionsrechnung

Die statische Investitionsrechnung umfasst mehrere Methoden, die den zeitlichen Aspekt von Investitionen nur unvollständig oder gar nicht berücksichtigen. Die wichtigsten Verfahren sind folgende:

Die Kostenvergleichsrechnung: Bei diesem Verfahren wird die Alternative mit den geringsten Kosten empfohlen. Es bietet sich vor allem für Ersatz- und Rationalisierungsinvestitionen an, bei denen die Erlöse weniger wichtig sind.

Die Gewinnvergleichsrechnung: Bei dieser Methode werden sowohl Kosten als auch Erlöse berücksichtigt. Jene Alternative mit dem höchsten Gewinn wird empfohlen. Der Gewinn ergibt sich aus der Differenz zwischen Umsatz und Kosten.

Die Amortisationsrechnung: Wird auch als Pay-back-Methode, Pay-off-Methode oder Pay-out-Methode bezeichnet. Dabei wird ermittelt, nach welcher Zeit sich der Kapitaleinsatz amortisiert. Das Projekt mit der kürzesten Amortisationsdauer wird bevorzugt.

Die Rentabilitätsrechnung: Als Entscheidungskriterium wird bei dieser Methode die Periodenrentabilität verwendet. Die Rentabilität setzt den Gewinn ins Verhältnis zum Kapitaleinsatz. Jene Investition mit der höchsten Periodenrentabilität wird als bevorzugte Alternative vorgeschlagen. [24] S. 146-150

4 Prozessarten für Kühltechnologien

4.1 Kompressionsprozess

Der Kompressionsprozess ist ein Kaltdampfprozess, der durch die Zuführung von mechanischer Verdichterarbeit realisiert wird. Der Kompressionsprozess enthält wie alle Kälteprozesse als Energieträger umlaufende Fluide, sogenannte Kältemittel. [25] Wie in Kapitel 3.3 Kältemittel erwähnt, werden üblicherweise Fluorderivate, beispielsweise R134a, ein Fluorderivat des Ethans (1,1,1,2-Tetrafluorethan (CH_2FCF_3)), für Verdampfungstemperaturen zwischen 0 °C und -25 °C eingesetzt. Tiefere Temperaturen können durch Mischungen mit anderen fluorierten Kohlenwasserstoffen (HFKW, FKW) erzeugt werden. [10]

In Abbildung 3 ist ein Schaltbild sowie ein verlustbehaftetes $\log p / h$ – Diagramm ersichtlich. Die Leitungen und der Verdichter sind idealisiert perfekt wärmegeklämt. Im Zustandspunkt 1-2 ist der Strömungsdruckabfall bedingt durch die Leitungslänge zwischen Verdampfer und Verdichter erkennbar. Im Zustandspunkt 2-3 wird mit

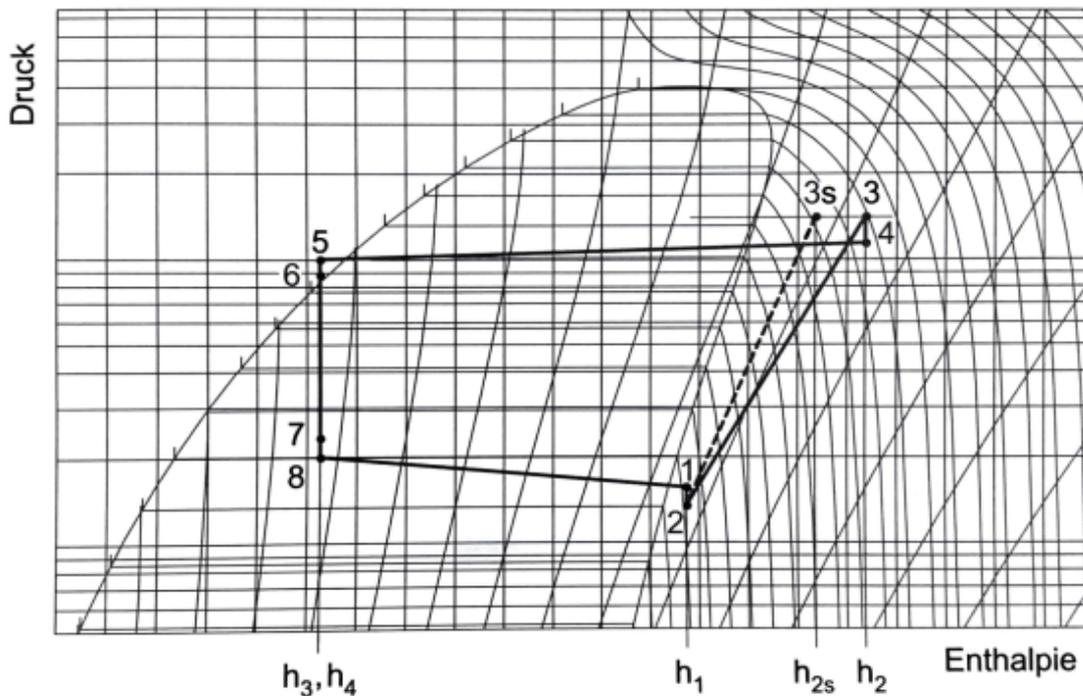
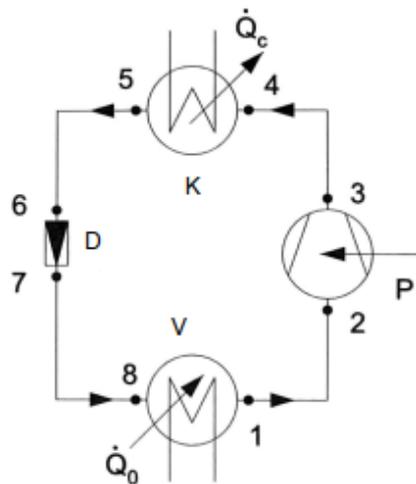


Abbildung 3: Schaltbild und log p/ h - Zustandsdiagramm für eine einstufige Kompressionsmaschine.

V Verdampfer, K Kondensator, D Drossel [13] S. 63

mechanischer Arbeit im Verdichter der Druck gesteigert und Wärme zugeführt. Dadurch steigt die Enthalpie des Kältemittels. Durch die verlustbehaftete Verdichtung ist die benötigte Antriebsleistung größer als dies beim theoretischen Vergleichsprozess der Fall ist. Zustandspunkt 3-4 beschreibt wieder den Leitungsdruckabfall in der Rohrleitung zwischen Verdichter und Kondensator.

Im Zustandspunkt 4-5 im Kondensator wird die aufgenommene Wärme des Kältemittels an die Umgebung abgegeben. Dadurch kommt es zu einer vollständigen Kondensation des Kältemittels und einer Enthalpieabnahme. Der Druckabfall ergibt sich durch den technisch bedingten Druckabfall im Kondensator. Im Zustandspunkt 5-6 kommt es zu einem Verlust durch den Druckabfall in der Rohrleitung. Beim Zustandspunkt 6-7 wird das flüssige Kältemittel im Drosselventil isenthalp entspannt. Zustandspunkt 7-8 ergibt sich aus der Länge der Rohrleitung und dem damit verbundenen Druckverlust. Schlussendlich kommt es im Zustandspunkt 8-1 im Verdampfer zu einer Wärmeaufnahme aus der zu kühlenden Umgebung. Das Kältemittel nimmt hier Wärme auf und erwärmt sich über die Verdampfungstemperatur. Durch das vollständige Verdampfen des Kältemittels gelangt es in den Ausgangszustand zurück. Die Wärmeaufnahme ergibt eine Erhöhung der Enthalpie, der Druckverlust im Verdampfer führt zu einem Druckabfall, wie im $\log p / h$ Diagramm in Abbildung 3 ersichtlich. [13] S. 71

4.2 Absorptionsprozess

Eine Absorptionskältemaschine ist ein System zur Kälteerzeugung. Diese basiert auf dem Prinzip des Kaltdampfprozesses. Thermische Energie wird zur Kälteerzeugung genutzt. Im Gegensatz zu Kompressionskältemaschinen, die mechanische Energie verwenden, nutzt die Absorptionskältemaschine Wärme als Antrieb. [26] S. 137-139

Eine Absorptionskältemaschine besteht aus einem Kälteteil, ähnlich wie bei einer Kompressionskältemaschine, mit Verdampfer, Verflüssiger und einem Lösungsmittelkreislauf. Dieser ersetzt den mechanischen Kompressor durch einen

Absorber, einen Desorber oder Austreiber, eine Lösungsmittelpumpe, eine Drossel und einem Wärmetauscher. [27] S.360-362

In Abbildung 4 ist ein Schaltbild einer kontinuierlichen Absorptionskältemaschine abgebildet. In diesem Fall wird das Stoffpaar Wasser / Lithiumbromid verwendet. In Punkt 1 gelangt das dampfförmige Wasser über eine Rohrleitung zum Verflüssiger. Unter Wärmeabgabe wird das Kältemittel Wasser in Punkt 2 verflüssigt. Das flüssige Wasser gelangt über eine Rohrleitung in Punkt 3 zum Expansionsventil und wird dort im Punkt 4 isenthalp entspannt. Im Verdampfer, Punkt 5, geschieht die eigentliche Kälteerzeugung: Bei sehr niedrigem Druck verdampft das Kältemittel Wasser und nimmt Wärme aus dem Kühlkreislauf auf. Das verdampfte Wasser gelangt über eine Rohrleitung in Punkt 6 zum Absorber.

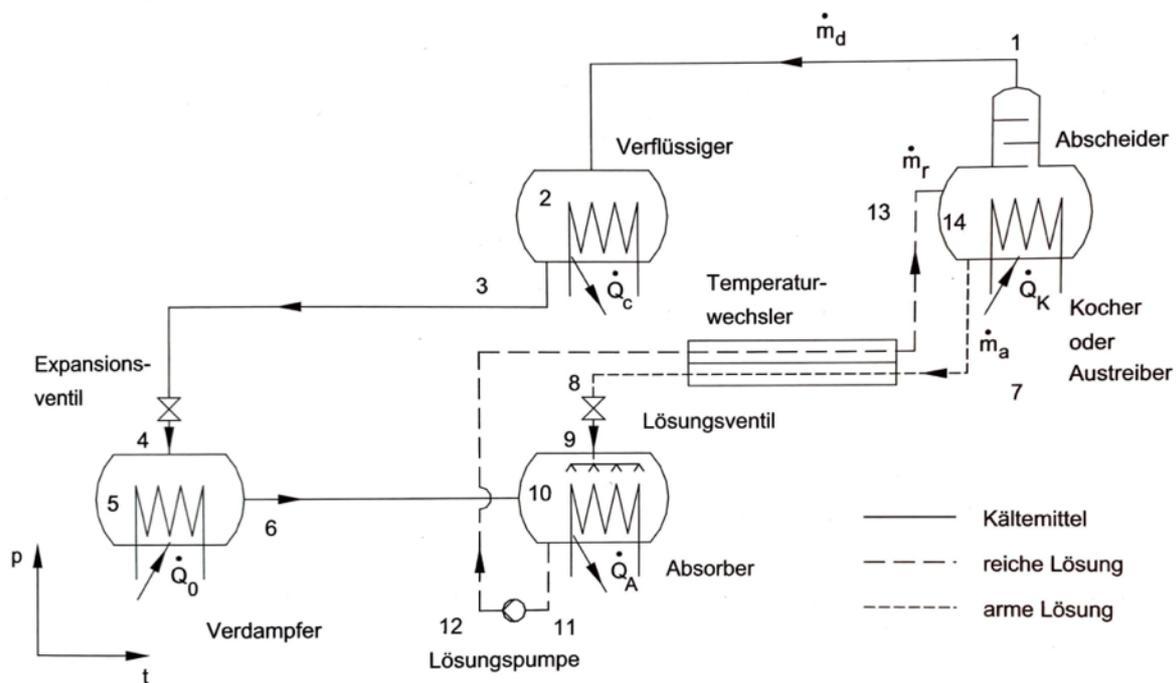


Abbildung 4: Kontinuierliche H₂O-LiBr-Absorptionskältemaschine [13] S. 151

Im Absorber, Punkt 10, kondensiert das dampfförmige Wasser mit dem flüssigen Lösungsmittel Lithiumbromid auf der Lösungsmitteloberfläche. Die dabei entstehende

Wärme wird über einen Wärmeübertrager im Absorber abgeführt. Je besser diese Abkühlung funktioniert, desto schneller kommt es zur Absorption von Kältemittel und Lösungsmittel. Das unterkühlte flüssige Kältemittel ist nun reich an Lithiumbromid-Lösungsmittel und wird im Punkt 11 mittels Lösungsmittelpumpe durch eine Rohrleitung, Punkt 12, zum Temperaturwechsler befördert. Für eine wirtschaftliche Funktionsweise der Absorptionskältemaschine ist dieser Wärmetauscher von großer Bedeutung. Hier wird das kalte, lösungsmittelreiche Kältemittel im Gegenstrom mit dem heißen, kältemittelarmen Lösungsmittel vorgewärmt. Je besser diese Wärmeübertragung funktioniert, desto weniger Wärmeenergie muss im Kocher für die Austreibung des Lösungsmittel, die sogenannte Desorption, eingesetzt werden. Das lösungsmittelreiche Kältemittel wird im Kocher beziehungsweise Austreiber, Punkt 14, soweit erwärmt, dass das leichter flüchtige Kältemittel verdampft und möglichst frei von Lösungsmittel in den Abscheider und dann zurück an den Anfang des Kreislaufs gelangt. Das flüssige Lösungsmittel wird gesammelt, über den Gegenstromtemperaturwechsler von Punkt 7 zu Punkt 8 geführt und isenthalp im Lösungsventil entspannt. Danach wird das Lösungsmittel wieder über eine Rohrleitung und ein Aufgabesystem dem Absorber, Punkt 10, zugeführt. Somit ist auch der Lösungsmittelkreislauf geschlossen. [13] S. 141-151

4.3 Adsorptionsprozess

Die Adsorptionskältemaschine ist eine Technologie zur Klimakälteerzeugung, die zur Sorptionstechnik gehört. Die Sorptionstechnik nutzt Wärme als Antriebsenergie und stellt eine Alternative zur herkömmlichen Klimakälteerzeugung dar. [28]

Für den Antrieb von Sorptionsanlagen können Wärmequellen wie zum Beispiel Abwärme aus technologischen Prozessen, Wärme aus Kraft-Wärme-Kopplung, Solarwärme oder Geothermie genutzt werden. Es werden dabei natürliche Kältemittel eingesetzt. Die Sorptionstechnologie steht somit für ein moderneres energie- und umweltpolitisches Denken. [29]

Eine Adsorptionskältemaschine ist eine thermisch betriebene Sorptionsmaschine, bei der eine thermische Verdichtung des Stoffpaares Kältemittel/Lösungsmittel stattfindet – im Vergleich zur Kompressionskältemaschine, bei der eine mechanische Verdichtung des Kältemittels stattfindet. [30] S. 84-90

Beim Adsorptionsprozess wird neben dem Kältemittel ein Sorptionsmittel (Adsorbens) benötigt, das aus einem festen Stoff besteht. Der geschlossene Adsorptionsprozess arbeitet mit den Stoffpaaren Wasser/Zeolith und Wasser/Silicagel und findet seine Anwendung hauptsächlich in der Klimakälte. Das Stoffpaar Wasser/Zeolith wird für Raumheizung, Warmwasserbereitung, Lebensmittel- und Getränkekühlung sowie für Raum- und Fahrzeugklimatisierung im kleinen Leistungsbereich eingesetzt und ist auch für die Bereitstellung von Kaltwasser von größerer Bedeutung. Die eingesetzten Kältemittel bzw. Lösungsmittel in der Sorptionstechnologie stellen keine globalen Umweltbelastungen dar (Ozonschicht-Abbaupotential (ODP) = Null, Treibhauspotential (GWP) = Null) [29]

In Abbildung 5 wird eine typische Adsorptionskältemaschine gezeigt, dieser Zyklus läuft in unterschiedlichen Schritten ab. Das adsorbierte Kältemittel wird im Wärmeübertrager 2 mithilfe von Heißwasser, durch Wärmezufuhr (q_H), ausgetrieben. Das Kältemittel wird über den Kondensator geführt, hierbei wird die Kondensationswärme (q_C) über das Kühlwasser abgeführt. Das anfallende Kondensat wird im Sammelbehälter gesammelt und unter Unterdruck über ein Sprühsystem im

Verdampfer verteilt. In diesem Verdampfer wird die zugeführte Wärme (q_0) entzogen und steht als Nutzkälte zur Verfügung. Anschließend wird im Wärmeübertrager 1 der anfallende Kältemitteldampf vom Sorptionsmittel adsorbiert, diese entstehende Wärme wird über das Kühlwasser (q_A) abgeleitet. [31] S. 658-662

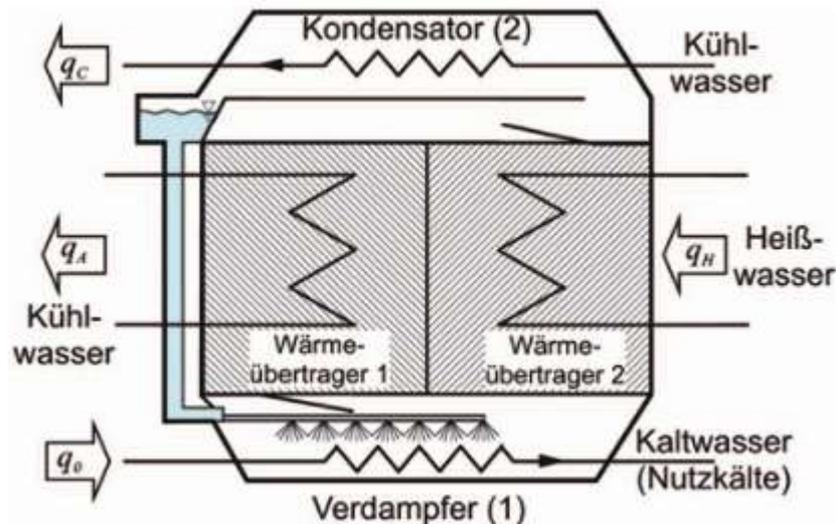


Abbildung 5: Schema einer Adsorptionskältemaschine [31] S. 660

Dieser Ablauf in der Adsorptionskältemaschine ist reversibel und kann zyklisch umgeschaltet werden. Nach der vollständigen Adsorption in einem Wärmerübertrager wird umgeschaltet und es erfolgt eine Regeneration des hygroskopischen Feststoffs. [32] S.293-295

4.4 Offener Adsorptionsprozess

Der offene Adsorptionsprozess, im englischen Sprachgebrauch als Desiccative and Evaporative Cooling (DEC) bekannt, ist ein Verfahren zur solarunterstützten Kühlung, das sich vom geschlossenen Adsorptionsverfahren wesentlich unterscheidet. Statt

solare Wärme in kaltes Wasser umzuwandeln, wird hier die Zuluft eines raumluftechnischen Systems direkt konditioniert. [31] S. 662-668

Das zentrale Element dieses Systems ist ein Sorptionsrad, das die Außenluft trocknet, um deren Verdunstungspotential zu erhöhen. Die Abluft des Raumes wird dabei bis zur Sättigungsgrenze befeuchtet, wodurch ihre Temperatur sinkt. Nach einer Wiedererwärmung der Luft kann diese erneut Feuchtigkeit aufnehmen und dadurch die Außenluft entfeuchten. Durch eine abschließende Befeuchtung der Zuluft wird deren Temperatur weiter gesenkt, sodass unter Berücksichtigung von Behaglichkeitskriterien (relative Feuchte maximal 60–65 %) angenehme Zulufttemperaturen von 20–21 °C erreicht werden können. [32] S. 293-296

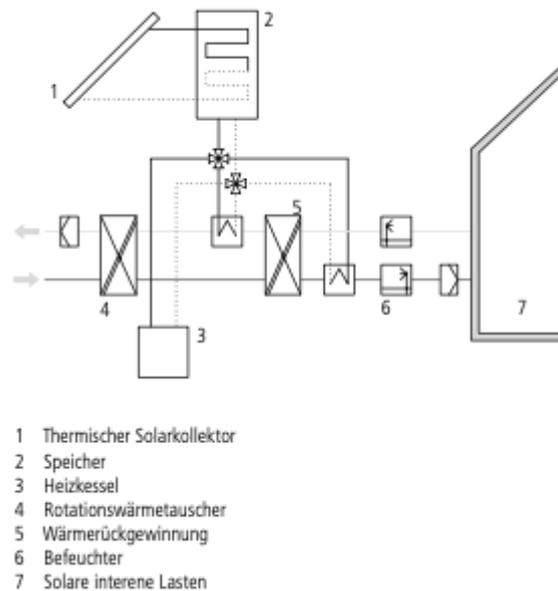


Abbildung 6: Schema eines offenen Adsorptionsprozesses zur Kühlung von Gebäuden [32] S. 296

In Abbildung 6 ist ein schematischer Aufbau eines solchen solarunterstützten Systems ersichtlich. Es besteht aus einem thermischen Solarkollektor (1), einem Speicher (2), einem Heizkessel (3), einem Rotationswärmetauscher (4), einer Wärmerückgewinnungseinheit (5), einem Befeuchter (6) und dem Raum der gekühlt

werden soll, hier als Solare interne Lasten (7) bezeichnet. Die solarthermische Energie wird hier für die erforderliche Regenerationstemperatur genutzt, um diese im Sorptionsrad zu erreichen. Im Prozess wird die Trocknung der Außenluft im Sorptionsrad, die anschließende Kühlung durch Wärmerückgewinnung und Verdunstung sowie die Aufnahme der Kühllast des Raumes erreicht. [32] S. 293-297

Im Vergleich zu geschlossenen Sorptionssystemen zeichnet sich die DEC-Anlage durch ihren offenen Aufbau aus, bei dem Luft und Kältemittel direkt mit der Umgebung in Kontakt stehen. Dies erlaubt eine direkte Konditionierung von Temperatur und Feuchte der Raumluft. Die entscheidende Zustandsänderung erfolgt durch die Wärmerückgewinnung. Die erzielbare Kühlleistung hängt von verschiedenen Faktoren ab, darunter die Effizienz des Sorptionsmaterials und die Kombination von passiver adiabater Kühlung mit aktiver thermischer Entfeuchtung. [31] S. 662-668

5 Aufgabenstellung

5.1 Fragestellung und Zielsetzung

In dieser Arbeit werden zwei wichtige Aufgabenstellungen eines Industriebetriebes einer gründlichen Untersuchung unterzogen. Erstens soll untersucht werden, ob es eine sinnvolle Nutzung der im Sommer verfügbaren Wärmeenergie gibt, um diese für den Kühlbedarf des Werks zu verwenden. Aktuell wird diese mithilfe von Brunnenwasser aufwendig gekühlt, dadurch geht die Wärme sowie eine Unmenge an Wasser verloren. Zweitens stellt sich die Frage, ob es sinnvoll ist, die aktuellen, leistungsschwachen, Klimaanlage durch leistungsstärkere zu ersetzen, dabei aber die Gesamtzahl der Anlagen erheblich zu reduzieren. Die potentiellen Vorteile in

Bezug auf Energieeffizienz, Klimaschutz und Wartungsintensität sollen analysiert werden. Um sich dieser komplexen Aufgabenstellung zu nähern, wird anfangs eine umfassende Datenerhebung und -analyse der aktuellen baulichen Gegebenheiten und bestehenden Klimaanlage durchgeführt. Dies umfasst auch eine gründliche Analyse der bestehenden Klimaanlage hinsichtlich der Leistung, Effizienz und der in den einzelnen Anlagen verwendeten Kältemittel und deren Leckageverlusten.

Im nächsten Schritt sollen verschiedene Varianten entwickelt und bewertet werden um nachvollziehbar die Effizienz und Nachhaltigkeit der Kühlanlagen im Werk zu erhöhen. In die Analyse fließen die Überlegung zum Nutzen der bestehenden Energie, die Umstellung auf effizientere Klimageräte bzw. das Zusammenfassen mehrerer Klimageräte, sowie der Aufbau eines zentralen Fernkältenetzes mit ein. Die umfassende Analyse liefert nützliche Erkenntnisse darüber, wie die gesetzten Maßnahmen den Energieverbrauch mindern, den Klimaschutz fördern, den Wartungsaufwand für Mitarbeitende sowie die Wartungskosten senken können.

Das Ziel dieser Untersuchung ist es, durch die Anwendung verschiedener Bewertungsmethoden festzustellen, ob eine Umrüstung auf ein zentrales Fernkältenetz sinnvoll ist. Durch die Verwendung dieser Bewertungen sollte es möglich sein, das aktuelle Kühlsystem mit dem neu geplanten Fernkältenetz gründlich zu vergleichen. Für diesen Vergleich wurden verschiedene technische, ökologische und ökonomische Kriterien zur Bewertung herangezogen. Das Ziel ist es, die Vor- und Nachteile der unterschiedlichen Varianten durch eine sorgfältige Analyse mithilfe reproduzierbarer, objektiver Kriterien zu untersuchen.

Diese Arbeit leitet aus den Ergebnissen Empfehlungen zur Wirtschaftlichkeit und Machbarkeit einer Umrüstung auf ein zentrales Fernkältenetz ab. Diese Empfehlungen sollen dem Unternehmen helfen, anhand objektiver Bewertungskriterien fundierte Entscheidungen zu treffen und die Weichen für eine effiziente und nachhaltige Kühlung zu stellen.

5.2 Beschreibung der aktuellen Energiebereitstellung im Industriebetrieb

Ein Betrieb im Großraum St. Pölten betreibt ein Werk zur Holzverarbeitung, in dem 24 Stunden täglich, an 365 Tagen im Jahr, im 4-Schichtbetrieb die Produktion läuft. Bis auf kurze Wartungsintervalle oder Reparaturstillstände ist das Werk somit durchgehend in Betrieb. Die Energiebereitstellung erfolgt durch zwei Biomassekessel. Der Biomassekessel 1, Baujahr 2000, hat eine thermische Leistung von 40 MW und eine elektrische Leistung von 2 MW. Der Wasserrohrkessel verfügt über eine Kesselnennleistung von 56,34 t/h und einen Betriebsdruck von 90 bar. Die Feuerungen bestehen aus einem Deckenbrenner mit 30 MW für Erdgas- und Holzstaubbetrieb und einem Vorschubrost mit 21 MW. Dieser wird mit Festbrennstoff betrieben: zwei Einblasfeuerungen mit je 7 MW für Holzgranulat und einem Anlassbrenner mit 3 MW für Erdgas. Diese Anlage ist als Naturumlaufkessel mit drei Zügen und fünf Eco-Paketen konzipiert.

Der Biomassekessel 2, Baujahr 2006, hat eine thermische Leistung von 40 MW und eine elektrische Leistung von 10 MW. Der Wasserrohrkessel besitzt eine Kesselnennleistung von 45 t/h und einen Betriebsdruck von 65 bar. Ein eigenständiger Economiser wird mit einem höchstzulässigen Druck von 120 bar betrieben. Die Anlage

verfügt über einen Vorschubrost mit 30 MW für Festbrennstoff, drei Einblasfeuerungen mit je 7 MW für Holzgranulat und zwei Anlassbrenner mit je 3 MW für Erdgas. Es handelt sich um einen Naturumlaufkessel mit drei Zügen und sieben Eco-Paketen.

Der benötigte Brennstoff wird unter anderem aus intern anfallenden Schleif- und Abkantabfälle sowie den verpflichtend zu kaufenden Rinden- und Spanabfällen bereitgestellt.

Die Dampfmotorenanlage für die Stromproduktion wird von der Biomassekesselanlage 1 mit 60 t/h Sattedampf versorgt. Der Sattedampf wird von 85 bar auf 65 bar reduziert. Die Anlage beinhaltet sechs Zylinder, die beidseitig mit Sattedampf beaufschlagt werden, wodurch elektrische Energie von maximal zweimal 1 MW erzeugt wird.

Der Biomassekessel 2 treibt eine Dampfturbine, eine Kondensationsturbine vom Typ MARC2-C11 an, und wird mit 45 t/h Heißdampf versorgt, wobei der Dampf eine Temperatur von 450 °C hat. Die Turbine läuft mit einer Drehzahl von 10.000 U/min und erzeugt eine elektrische Energie von 10 MW. Der Generator stammt von der Firma Leroy Somer Motors & Drives. [33]

Nach den Dampfmotoren ist ein Brüdenkondensator von APL Apparatebau verbaut, mithilfe dessen aktuell die überschüssige Wärme mittels Rücklaufanhebung zur Werksheizung verwendet wird. Im Sommer besteht an diesen 500 kW Wärmeleistung kein Bedarf. Nach der betrieblich notwendige Absalzung von beiden Biomassekesseln wird das abgesalzte Kesselwasser aktuell mit Brunnenwasser abgekühlt, um dieses Wasser in den Kanal einleiten zu dürfen. So geht wertvolle Wärmeenergie verloren. Hier wird von 170 kW Wärmeenergie, vom Biomassekessel 1, und von 130 kW, beim Biomassekessel 2, ausgegangen.

Die Stromentstehungskosten belaufen sich im Industriebetrieb auf rund 100 €/MWh.

Benötigter Strom, der die eigene Produktion übersteigt, wird zu Teilen auf dem Terminmarkt sowie auf dem Spotmarkt zugekauft. Dieser Strompreis belief sich im Jahr 2023 auf 139 €/MWh. [34]

5.3 Beschreibung der aktuellen Kälteanlagen

In dem Industriebetrieb sind aktuell 71 Klimageräte im Betrieb, welche in Tabelle 3 ersichtlich sind. Die kleinste Anlage hat eine Kälteleistung von 2 kW, die größte Anlage eine Kälteleistung von 571,2 kW. Von diesen 71 Klimageräten sind 49 Stück Kompressions-Splitgeräte, welche zumeist nur einen Raum kühlen. Lediglich 5 Geräte kühlen mehrere Räume, 3 Geräte sind mit 3 Innenräumen verbunden, ein Gerät mit 4 Innenräumen und ein Gerät ist zum Kühlen von 7 Innenräumen vorgesehen. Die 71 Klimageräte sind von verschiedensten Herstellern: Daikin, Danfoss, Toshiba, Fujitsu, Atlas Copco, KTK, Mitsubishi, Shining, Sanyo, Modine, RC Group, Teko, Tecumseh, Technibel und Gea.

12 Geräte wurden noch nicht getauscht und laufen seit dem Bau des Industriebetriebs. Die restlichen 59 Geräte wurden bereits mindestens einmal neu angeschafft oder zu einem späteren Zeitpunkt ergänzt.

Tabelle 3: Übersicht der Klimageräte im Industriebetrieb mit der jeweiligen Kälteleistung [35]

Nr.	Int. Nr.	Hersteller	Modell	Aufstellungsort	Kälteleistung [kW]
1	KA-01	KTK	TWA 342-SKP	Objekt 05/06 Controll/Endfert. - Schalträume 8,9,10,11	326,0
2	KA-02	KTK	JWA101 SKP	Objekt 03 Trockner - Schaltraum 5	85,3
3	KA-03	KTK	JEE 101 S/K/P	Objekt 02 Nassspanaufbereitung - Schaltraum 3	87,4
4	KA-04	Mitsubishi	FDC250VSA + FDE125VH	Objekt 11 - Schaltraum 14	24,0
5	KA-05	KTK	JWA 061 ST	Objekt 12 KT2 - Ölkühler	54,9
6	KA-06	Danfoss	Maneurop MTZ320-4T (FLK-KT 1/3)	Objekt 12 KT1/KT 3 - Flüssigkeitskühler	69,2
7	KA-07	Modine	PCV72M33.2194 + GCE355A4	Objekt 12 KT5 - Schaltraum 13	42,7
8	KA-08	KTK	JWA 061 ST	Objekt 12 KT5 - Ölkühler	54,9
9	KA-09	Tecumseh	TAG4561Z	Objekt 08 Blocklager - NSHV KT Schaltraum 12	13,0
10	KA-10	RC Group	Frigo.A 675-S 2	Objekt 05 Controll - Mischerkühler	216,0
11	KA-11	Fujitsu	AOHG54LATT + ABHG54LRTA	Objekt 11 Schelling - Schaltraum 15	14,0
12	KA-12	Daikin	RZAG71M7V1B + FCAHG71GV	Objekt 11 Schelling - Schaltwarte	6,8
13	KA-13	Daikin	RXF35A5V1B + FTXF35C5V1B	Objekt 10 Rechnercontainer - Bahnwaage	3,3
14	KA-14	Fujitsu	AOHG 24LAT3 + ASYG14LMCA	Objekt 13 Lehrwerkstatt	6,8
15	KA-15	Fujitsu	AOHG45LATT + ABHG45LRTA	Objekt 16 Instandhaltung - Steuerungstechnik	12,5
16	KA-16	Shining	KFR70QW + CH24EQW	Objekt 16 Instandhaltung - Techn. Einkauf	7,0
17	KA-17	C&H	CH-19-ENS	Objekt 17 Holzübernahme - Büro	5,0

5 Aufgabenstellung

18	KA-18	Tecumseh	SILAGV4568ZTZ	Objekt 01 Sägespäne - Schaltraum 4	12,5
19	KA-19	Daikin	RZQ71C7V1B + FCQ71C	Objekt 05 Controll - GOURMET-Küche	7,1
20	KA-20	Fujitsu	AOHG45LATT + ABHG45LRTA	Objekt 16 Instandhaltung - IT-Raum (Anlage 2)	12,5
21	KA-21	Danfoss	Maneurop MTZ160HW4	Objekt 12 KT2 - Schaltraum 16	39,0
22	KA-22	Daikin	RZAG50A2V1B + FCAG50B	Objekt 12 - Sozialraum KT5	5,0
23	KA-23	Daikin	RXF20B5V1B + FTXF20B5V1B	Objekt 12 KT5 - Pausenraum bei Presse	2,0
24	KA-24	Mitsubishi	FDC125VSA-W + FDE125VH	Objekt 11 Schelling - Büroebene 1. OG	12,5
25	KA-25	Sanyo	SAP-CMRV3144EH	Objekt 11 Schelling - Büroebene 1. OG	8,0
26	KA-26	Daikin	2MXS40H2V1B + FTXS20K2V1B	Objekt 11 Schelling - Betriebslabor Messraum 1.OG	4,0
27	KA-27	Daikin	EWAD240TZXLB1001	Objekt 15 Kesselhaus 2 - Schalträume	239,5
28	KA-28	Mitsubishi	FDC125VSA-W + FDE125VH	Objekt 11 - Betriebslabor 1. OG	12,5
29	KA-29	Mitsubishi	MXZ-4A71VA + 3 Innengeräte	Objekt 16 Instandhaltung - Techn.Reserve, Reserve Raum	7,1
30	KA-30	Fujitsu	AOHG45LATT + ABHG45LRTA	Objekt 16 Instandhaltung - IT-Raum (Anlage 1)	12,5
31	KA-31	Daikin	RXS50L2V1B	Objekt 16 Instandhaltung - Besprechungsraum	5,0
32	KA-32	Shining	KFR50QW + CH18EQW	Objekt 16 Instandhaltung - Abteilung Mechanik	5,0
33	KA-33	Daikin	RZASG125M7V1B + FCAG125AVEB	Objekt 05 Aufenthaltsraum - Rohplattenproduktion	12,1
34	KA-34	Daikin	RKS50G2V1B + 1x FCQ50C7VEB	Objekt 05 Controll - Büro Rohspan	5,0
35	KA-35	Mitsubishi	MXZ-8A140VA + 2 Innengeräte	Objekt 4 Hauptbüro EG (1)	14,0
36	KA-36	Mitsubishi	MXZ-8A140VA + 2 Innengeräte	Objekt 4 Hauptbüro EG (2)	14,0

5 Aufgabenstellung

37	KA-37	Mitsubishi	MXZ-5A100VA + 1 Innengerät	Objekt 4 Hauptbüro 1. OG (1)	10,0
38	KA-38	Mitsubishi	MXZ-5A100VA + 1 Innengerät	Objekt 4 Hauptbüro 1. OG (2)	10,0
39	KA-39	Mitsubishi	MXZ-4A71VA + 1 Innengerät	Objekt 4 Hauptbüro 2. OG (1)	7,1
40	KA-40	Mitsubishi	MXZ-4A71VA + 1 Innengerät	Objekt 4 Hauptbüro 2. OG (2)	7,1
41	KA-41	Mitsubishi	MXZ-2A52VA + SLZ-KA35, SEZ-KA35	Objekt 18 Portier	5,2
42	KA-42	Technibel	GR8F98R5IAA	Objekt 15 Kesselhaus - CO-Messstelle	2,9
43	KA-43	Fujitsu	AOHA24LALL + AUHF24LBL	Objekt 17 Holzübernahme - Warte	7,1
44	KA-45	Atlas Copco	FD-700 (Ser.-Nr. AIQ751142)	Objekt 06 Endfertigung - Kompressorstation	18,0
45	KA-46	Atlas Copco	FD-700 (Ser.-Nr. AIQ751140)	Objekt 06 Endfertigung - Kompressorstation	18,0
46	KA-47	Atlas Copco	FD-700	Objekt 06 Endfertigung - Kompressorstation	14,9
47	KA-48	Atlas Copco	FD-850 (Ser.-Nr. AIF089053)	Objekt 06 Endfertigung - Kompressorstation	25,0
48	KA-49	Fujitsu	AOHG45LATT	Objekt 4 Hauptbüro Serverraum (Klima 1)	12,5
49	KA-50	Fujitsu	AOHG45LATT	Objekt 4 Hauptbüro Serverraum (Klima 2)	12,5
50	KA-51	Mitsubishi	MUZ-GE25UA + 1 Innengerät	Objekt 4 Hauptbüro EG Großküche	2,5
51	KA-52	Mitsubishi	MXZ-5D102UA + 5 Innengeräte	Objekt 4 Hauptbüro Holzeinkauf 2. OG	10,2
52	KA-53	Gea	BOCK SHGX4/650-4SL	Objekt 02b RC-Erweiterung - Schaltraum 21	45,0
53	KA-54	Fujitsu	AOHG45LATT + AUYG18LVLB	Objekt 02b RC-Erweiterung - Bedienwarte	5,2
54	KA-55	Daikin	J&E Hall JEHSCU0680CM3	Objekt 12 KT1 - Schaltraum 22	10,4
55	KA-56	Danfoss	OP-MPUM 162M + 2x GHF 040.2F/24	Objekt 12 KT1 - Schaltraum 23	25,0

5 Aufgabenstellung

56	KA-57	Danfoss	OP-MPUM 162M + 1x GHF 040.2F/24	Objekt 09b KT Verpackung - Schaltraum 24	25,0
57	KA-58	Fujitsu	AOHG45LBT8 + 4 AUHG12LVLB	Objekt 12 KT1 - Büros	15,4
58	KA-59	Fujitsu	AOYG09LLCC	Objekt 16 Instandhaltung - Elektro-Werkstatt Büro	2,5
59	KA-61	Fujitsu	AOHG18LAC2 + 2 ASHG09LMCA	Objekt 9.1 Händlerlager	5,0
60	KA-62	Airwell	Airwell Trio 72 DCI	Endfertigung Pausenraum	7,2
61	KA-63	Fujitsu	AOHG54LATT	Objekt 11 Betriebslabor Zuluftkanal	14,0
62	KA-64	Fujitsu	AOYG18LALL	Objekt 09b Aufenthaltsraum KT-Verpackung	5,2
63	KA-65	Fujitsu	AOYA72LALT + ARYC72LHTA	Objekt 09b Umkleideräume KT-Verpackung Lüftung	20,3
64	KA-66	Teko	TS-Z40 126Y-40-X2	Objekt 22 Schaltraum Hochregallager	30,0
65	KA-67	Toshiba	RAV-GM561ATP-E + RAV-RM561MUT-E	Objekt 18 Expedit	5,0
66	KA-71	Mitsubishi	MUZ-AP25VG + 1 Innengerät	Objekt 4 Hauptbüro WL Logistik	2,5
67	KA-72	Mitsubishi	MUZ-AP25VG + 1 Innengerät	Objekt 4 Hauptbüro Umwelt/Sicherheit	2,5
68	KA-76	Daikin	4MXM68N + 4 FTXM Innengeräte	Objekt 9a Verladebüro	6,8
69	KA-77	Mitsubishi	MUZ-AP20VG + 1 Innengerät	Objekt 4 Hauptbüro WL Finanzen	2,0
70	KA-78	Daikin	RXF35C5V1B	Objekt 16 Magazin Büro	3,3
71	KA-79	Mitsubishi	SRC 60 ZSX-W1 + FDTC60VH	Objekt 16 Technische Projekte	5,6

Zur internen Kennzeichnung wurde eine fortlaufende Nummerierung der Klimageräte eingeführt. Diese dient der schnellen, eindeutigen Identifizierung. KA steht hier für das Wort Klimaanlage, gefolgt von einer fortlaufenden Nummerierung KA-01 bis KA-79.

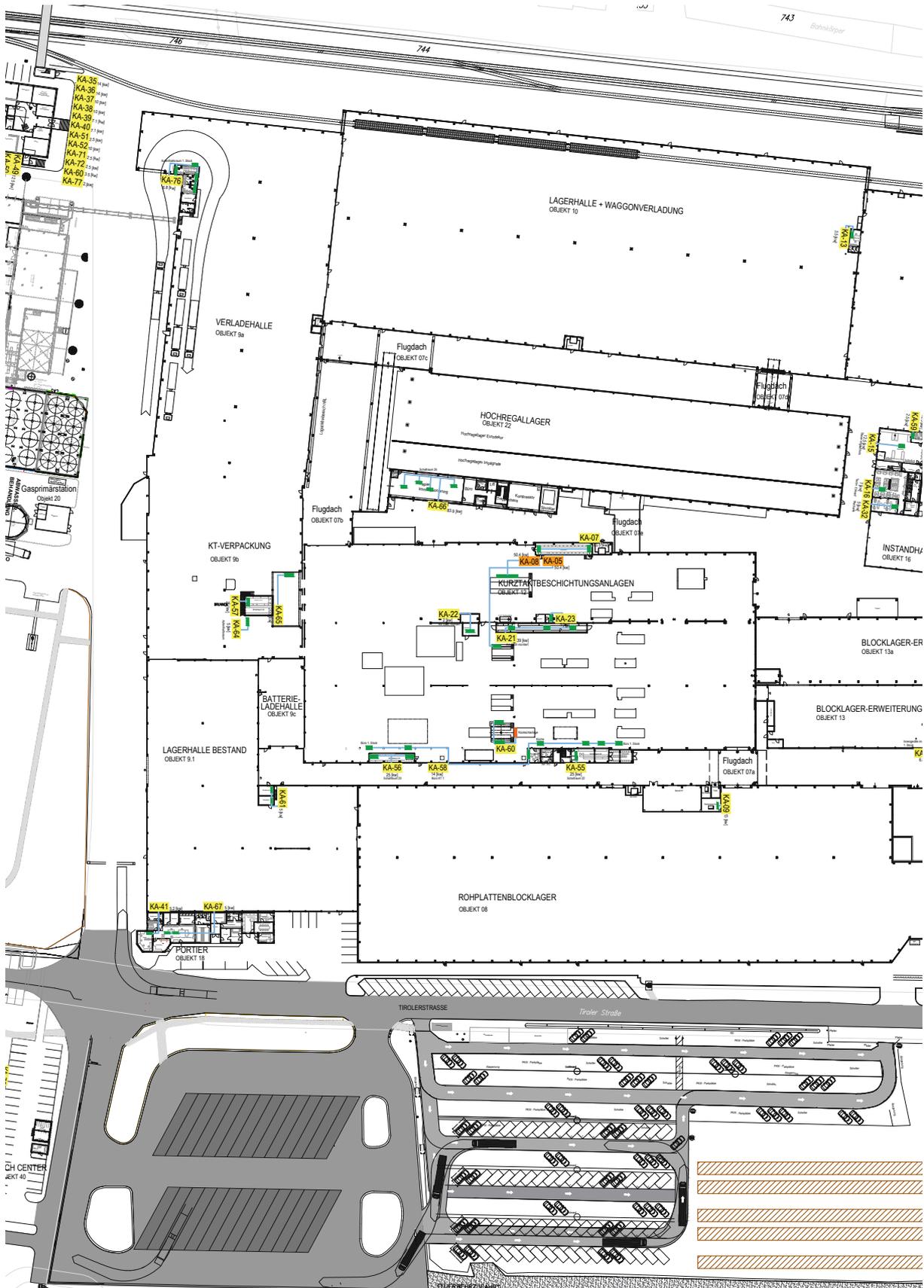
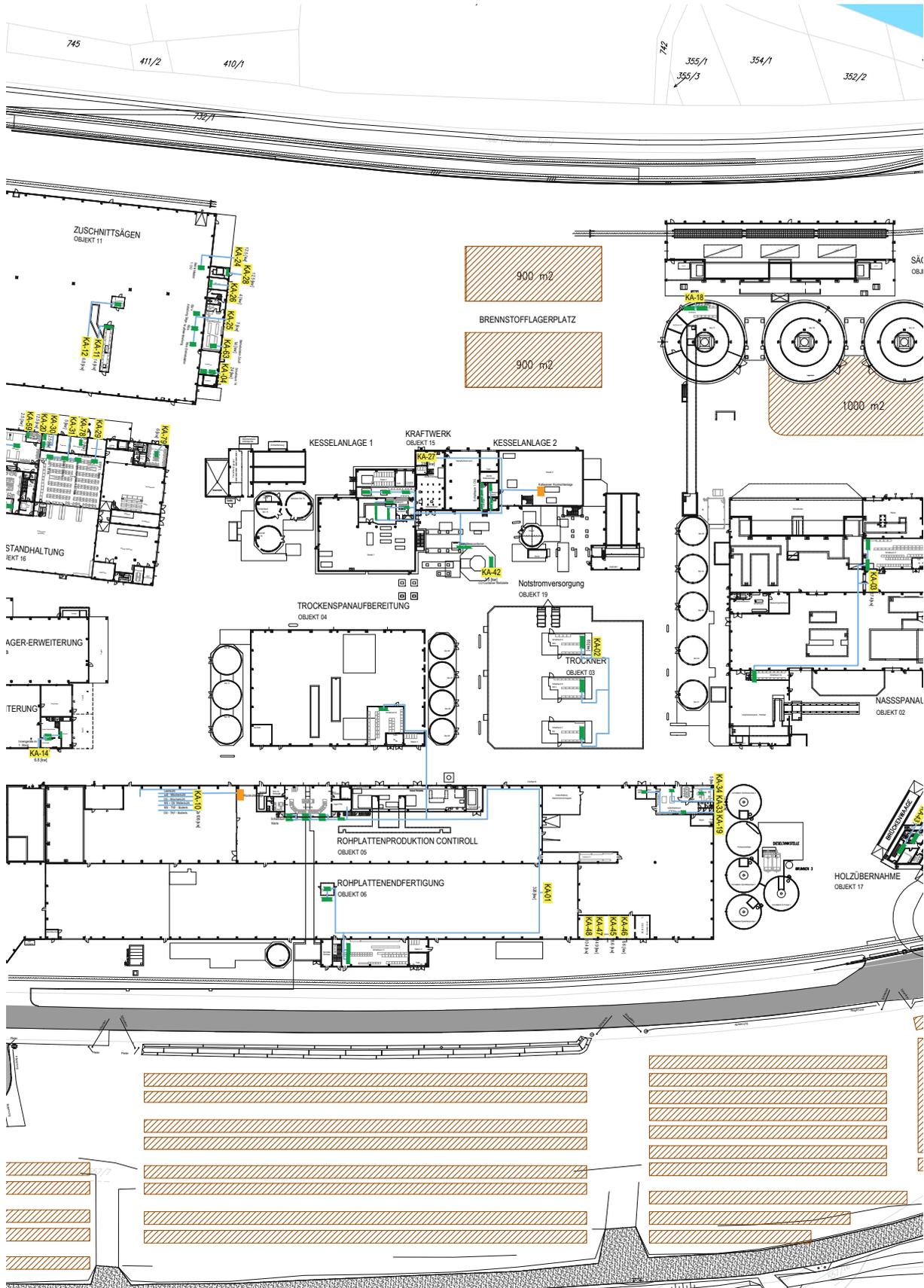


Abbildung 7: Lageplan der Klimageräte im Industriebetrieb



Aufgrund einer bereits in Bau befindlichen Investition im Objekt 16 werden die Klimageräte KA-15, KA-16, KA-20, KA-29 bis KA-32, KA-59, KA-78, KA-79 in Kürze durch eine luftgekühlte Trane Conquest-Wasserkühlmaschine ersetzt und werden in weiteren Überlegungen bereits mit dem neuen Klimagerät KA-80 berücksichtigt.

Aufgrund der weiten Entfernung zum Kesselhaus, der damit einhergehenden Unwirtschaftlichkeit und einer bereits geplanten Investition in einen luftgekühlten Flüssigkeitskühler im Objekt 4, einem Bürogebäude, werden die Klimageräte KA-35 bis KA-40, KA-49 bis KA-52, KA-71, KA-72, KA-77 in weiteren Überlegungen nicht berücksichtigt.

Aufgrund der erst kürzlich errichteten Objekte 40 und 41, der weiten Entfernung zum Kesselhaus und der damit einhergehenden Unwirtschaftlichkeit beim Anschluss an das Fernkältenetz wurden die Klimageräte KA-44, KA-68 bis KA-70, KA-73 bis KA-75 nicht dokumentiert und von Anfang an aus den Betrachtungen gestrichen.

Die Klimageräte KA-47 und KA-62 sind defekt und wurden nicht neu angeschafft beziehungsweise durch andere Geräte ausgeglichen. [36]

Daraus ergeben sich 47 Klimageräte, welche für die Überlegung eines Fernkältenetzes näher untersucht und berücksichtigt werden, diese sind in Tabelle 4 aufgelistet. Diese 47 Klimageräte haben einen Gesamtkältebedarf von 2098 kW. Eine Vorgabe des Unternehmens war, zu diesem Gesamtkältebedarf eine Sicherheit von 20 % der aktuell benötigten Kälteleistung vorzusehen, um die steigende Nachfrage an Kühlungsoptionen längerfristig gewährleisten zu können.

Tabelle 4: Übersicht potenziell geeigneter Klimageräte für den Einsatz im angedachten Fernkältenetz
im Industriebetrieb [35]

Nr.	Int. Nr.	Hersteller	Modell	Aufstellungsort	Kälteleistung [kW]
1	KA-01	KTK	TWA 342-SKP	Objekt 05/06 Controll/Endfert. - Schalträume 8,9,10,11	326,0
2	KA-02	KTK	JWA101 SKP	Objekt 03 Trockner - Schaltraum 5	85,3
3	KA-03	KTK	JEE 101 S/K/P	Objekt 02 Nassspanaufbereitung - Schaltraum 3	87,4
4	KA-04	Mitsubishi	FDC250VSA + FDE125VH	Objekt 11 - Schaltraum 14	24,0
5	KA-05	KTK	JWA 061 ST	Objekt 12 KT2 - Ölkühler	54,9
6	KA-06	Danfoss	Maneurop MTZ320-4T (FLK-KT 1/3)	Objekt 12 KT1/KT 3 - Flüssigkeitskühler	69,2
7	KA-07	Modine	PCV72M33.2194 + GCE355A4	Objekt 12 KT5 - Schaltraum 13	42,7
8	KA-08	KTK	JWA 061 ST	Objekt 12 KT5 - Ölkühler	54,9
9	KA-09	Tecumseh	TAG4561Z	Objekt 08 Blocklager - NSHV KT Schaltraum 12	13,0
10	KA-10	RC Group	Frigo.A 675-S 2	Objekt 05 Controll - Mischerkühler	216,0
11	KA-11	Fujitsu	AOHG54LATT + ABHG54LRTA	Objekt 11 Schelling - Schaltraum 15	14,0
12	KA-12	Daikin	RZAG71M7V1B + FCAHG71GV	Objekt 11 Schelling - Schaltwarte	6,8
13	KA-13	Daikin	RXF35A5V1B + FTXF35C5V1B	Objekt 10 Rechnercontainer - Bahnwaage	3,3
14	KA-14	Fujitsu	AOHG 24LAT3 + ASYG14LMCA	Objekt 13 Lehrwerkstatt	6,8
15	KA-17	C&H	CH-19-ENS	Objekt 17 Holzübernahme - Büro	5,0
16	KA-18	Tecumseh	SILAGV4568ZTZ	Objekt 01 Sägespäne - Schaltraum 4	12,5
17	KA-19	Daikin	RZQ71C7V1B + FCQ71C	Objekt 05 Controll - GOURMET-Küche	7,1

5 Aufgabenstellung

18	KA-21	Danfoss	Maneurop MTZ160HW4	Objekt 12 KT2 - Schaltraum 16	39,0
19	KA-22	Daikin	RZAG50A2V1B + FCAG50B	Objekt 12 - Sozialraum KT5	5,0
20	KA-23	Daikin	RXF20B5V1B + FTXF20B5V1B	Objekt 12 KT5 - Pausenraum bei Presse	2,0
21	KA-24	Mitsubishi	FDC125VSA-W + FDE125VH	Objekt 11 Schelling - Büroebene 1. OG	12,5
22	KA-25	Sanyo	SAP-CMRV3144EH	Objekt 11 Schelling - Büroebene 1. OG	8,0
23	KA-26	Daikin	2MXS40H2V1B + FTXS20K2V1B	Objekt 11 Schelling - Betriebslabor Messraum 1.OG	4,0
24	KA-27	Daikin	EWAD240TZXLB1001	Objekt 15 Kesselhaus 2 - Schalträume	239,5
25	KA-28	Mitsubishi	FDC125VSA-W + FDE125VH	Objekt 11 - Betriebslabor 1. OG	12,5
26	KA-33	Daikin	RZASG125M7V1B + FCAG125AVEB	Objekt 05 Aufenthaltsraum - Rohplattenproduktion	12,1
27	KA-34	Daikin	RKS50G2V1B + 1x FCQ50C7VEB	Objekt 05 Controll - Büro Rohspan	5,0
28	KA-41	Mitsubishi	MXZ-2A52VA + SLZ-KA35, SEZ-KA35	Objekt 18 Portier	5,2
29	KA-42	Technibel	GR8F98R5IAA	Objekt 15 Kesselhaus - CO-Messstelle	2,9
30	KA-43	Fujitsu	AOHA24LALL + AUHF24LBL	Objekt 17 Holzübernahme - Warte	7,1
31	KA-45	Atlas Copco	FD-700 (Ser.-Nr. AIQ751142)	Objekt 06 Endfertigung - Kompressorstation	18,0
32	KA-46	Atlas Copco	FD-700 (Ser.-Nr. AIQ751140)	Objekt 06 Endfertigung - Kompressorstation	18,0
33	KA-48	Atlas Copco	FD-850 (Ser.-Nr. AIF089053)	Objekt 06 Endfertigung - Kompressorstation	25,0
34	KA-53	Gea	BOCK SHGX4/650-4SL	Objekt 02b RC-Erweiterung - Schaltraum 21	45,0
35	KA-54	Fujitsu	AOHG45LATT + AUYG18LVLB	Objekt 02b RC-Erweiterung - Bedienwarte	5,2
36	KA-55	Daikin	J&E Hall JEHSCU0680CM3	Objekt 12 KT1 - Schaltraum 22	10,4

5 Aufgabenstellung

37	KA-56	Danfoss	OP-MPUM 162M + 2x GHF 040.2F/24	Objekt 12 KT1 - Schaltraum 23	25,0
38	KA-57	Danfoss	OP-MPUM 162M + 1x GHF 040.2F/24	Objekt 09b KT Verpackung - Schaltraum 24	25,0
39	KA-58	Fujitsu	AOHG45LBT8 + 4 AUHG12LVLB	Objekt 12 KT1 - Büros	15,4
40	KA-61	Fujitsu	AOHG18LAC2 + 2 ASHG09LMCA	Objekt 9.1 Händlerlager	5,0
41	KA-63	Fujitsu	AOHG54LATT	Objekt 11 Betriebslabor Zuluftkanal	14,0
42	KA-64	Fujitsu	AOYG18LALL	Objekt 09b Aufenthaltsraum KT-Verpackung	5,2
43	KA-65	Fujitsu	AOYA72LALT + ARYC72LHTA	Objekt 09b Umkleieräume KT-Verpackung Lüftung	20,3
44	KA-66	Teko	TS-Z40 126Y-40-X2	Objekt 22 Schaltraum Hochregallager	30,0
45	KA-67	Toshiba	RAV-GM561ATP-E + RAV-RM561MUT-E	Objekt 18 Expedit	5,0
46	KA-76	Daikin	4MXM68N + 4 FTXM Innengeräte	Objekt 9a Verladebüro	6,8
47	KA-80	Trane	Conquest CGAX 36 SE SN	Objekt 16 Instandhaltung	85,9

5.4 Beschreibung des Klimatisierungsbedarfs

Der Klimatisierungsbedarf im Unternehmen ist in den 15 Schalträumen der Produktionshallen am höchsten, darauf entfallen 48,56 % der installierten Kälteleistung. Wie in Abbildung 8 und Abbildung 9 ersichtlich, sind hier unterschiedlichste Anlagen vorgesehen, um die Klimakälte bereitzustellen.



Abbildung 8: KA-07 und KA-66 - Beispiele für typische Schaltraumkühlungen im untersuchten Industriebetrieb

Der größte Anteil der in Betrieb befindlichen Anlagen mit in Summe 25 Geräten entfällt auf die Büro- und Aufenthaltsraumklimatisierung. Die benötigte Kälteleistung beträgt

hier aber nur 12,77 %. In Abbildung 9 sind zwei Beispiele eines typischen im Industriebetrieb eingesetzten Klima-Splitgerätes zur Büro- oder Aufenthaltsraumkühlung zu sehen.



Abbildung 9: KA-22 und KA-64 - Beispiele für eingesetzte Büro- und Aufenthaltsklimageräte

7 Klimageräte sind für die benötigte Kältebereitstellung in der Produktion vorgesehen. Diese Geräte benötigen auch einen wesentlichen Teil, nämlich 38,67 % der Kälteleistung. In Abbildung 10 sind zwei Beispiele an verwendeten Klimageräten im Industriebetrieb zu sehen.



Abbildung 10: KA-05 und KA-10 - zwei Beispiele für Klimageräte, die im Produktionsprozess benötigt werden

6 Lösungsvorschläge

Aufgrund der Vorgaben des Industriebetriebs und allgemeiner Überlegungen wurden verschiedene Lösungsvorschläge mit dem Industriebetrieb diskutiert und ausgearbeitet. Schlussendlich wurden 4 verschiedene Varianten ausgewählt, detaillierter betrachtet und zur Bewertung herangezogen.

6.1 Darstellung der 4 Varianten

In Abbildung 11 ist der Lageplan des Industriebetriebs sichtbar, inklusive der 4 verschiedenen Varianten. Auch ist die geplante Rohrleitungsführung sowie die Gesamtlänge der Varianten sichtbar.

Die nachfolgende Tabelle 5 dient als Übersicht über die Klimaanlage, die bei der jeweiligen Variante in die Überlegungen eines Kältenetzwerkes einbezogen werden und welche im ersten Schritt nicht an dieses Netzwerk angeschlossen sind. Eine Markierung bei der Variante zeigt an, dass die benötigte Kälteleistung zukünftig vom Kältenetzwerk bereitgestellt werden soll. Ein zusätzliches Häkchen in der Tabelle bedeutet, dass diese Maschine weiterhin am Standort im Betrieb bleibt und die Kälteleistung liefert, aber in das geplante Fernkältenetz eingebunden wird.

Tabelle 5: Kategorisierung der betroffenen Klimaanlage je Variante. Die Haken dabei zeigen an, dass diese Kältemaschinen bei Ausführung der Variante weiterhin in Betrieb bleiben [35]

Nr.	Int. Nr.	Hersteller	Modell	Kälteleistung [kW]	Var. 1	Var. 2	Var. 3	Var. 4
1	KA-01	KTK	TWA 342-SKP	326,0	✓	✓		✓
2	KA-02	KTK	JWA101 SKP	85,3	✓	✓		✓
3	KA-03	KTK	JEE 101 S/K/P	87,4	✓			✓
4	KA-04	Mitsubishi	FDC250VSA + FDE125VH	24,0				
5	KA-05	KTK	JWA 061 ST	54,9			✓	
6	KA-06	Danfoss	Maneurop MTZ320-4T (FLK-KT 1/3)	69,2				
7	KA-07	Modine	PCV72M33.2194 + GCE355A4	42,7				
8	KA-08	KTK	JWA 061 ST	54,9			✓	
9	KA-09	Tecumseh	TAG4561Z	13,0				
10	KA-10	RC Group	Frigo.A 675-S 2	216,0				
11	KA-11	Fujitsu	AOHG54LATT + ABHG54LRTA	14,0				
12	KA-12	Daikin	RZAG71M7V1B + FCAHG71GV	6,8				

13	KA-13	Daikin	RXF35A5V1B + FTXF35C5V1B	3,3			
14	KA-14	Fujitsu	AOHG 24LAT3 + ASYG14LMCA	6,8			
15	KA-17	C&H	CH-19-ENS	5,0			
16	KA-18	Tecumseh	SILAGV4568ZTZ	12,5			
17	KA-19	Daikin	RZQ71C7V1B + FCQ71C	7,1			
18	KA-21	Danfoss	Maneurop MTZ160HW4	39,0			
19	KA-22	Daikin	RZAG50A2V1B + FCAG50B	5,0			
20	KA-23	Daikin	RXF20B5V1B + FTXF20B5V1B	2,0			
21	KA-24	Mitsubishi	FDC125VSA-W + FDE125VH	12,5			
22	KA-25	Sanyo	SAP-CMRV3144EH	8,0			
23	KA-26	Daikin	2MXS40H2V1B + FTXS20K2V1B	4,0			
24	KA-27	Daikin	EWAD240TZXLB1001	239,5	✓		✓
25	KA-28	Mitsubishi	FDC125VSA-W + FDE125VH	12,5			
26	KA-33	Daikin	RZASG125M7V1B + FCAG125AVEB	12,1			
27	KA-34	Daikin	RKS50G2V1B + 1x FCQ50C7VEB	5,0			
28	KA-41	Mitsubishi	MXZ-2A52VA + SLZ-KA35, SEZ-KA35	5,2			
29	KA-42	Technibel	GR8F98R5IAA	2,9			
30	KA-43	Fujitsu	AOHA24LALL + AUHF24LBL	7,1			
31	KA-45	Atlas Copco	FD-700 (Ser.-Nr. AIQ751142)	18,0			
32	KA-46	Atlas Copco	FD-700 (Ser.-Nr. AIQ751140)	18,0			

33	KA-48	Atlas Copco	FD-850 (Ser.-Nr. AIF089053)	25,0				
34	KA-53	Gea	BOCK SHGX4/650-4SL	45,0				
35	KA-54	Fujitsu	AOHG45LATT + AUYG18LVLB	5,2				
36	KA-55	Daikin	J&E Hall JEHSCU0680CM3	10,4				
37	KA-56	Danfoss	OP-MPUM 162M + 2x GHF 040.2F/24	25,0				
38	KA-57	Danfoss	OP-MPUM 162M + 1x GHF 040.2F/24	25,0				
39	KA-58	Fujitsu	AOHG45LBT8 + 4 AUHG12LVLB	15,4				
40	KA-61	Fujitsu	AOHG18LAC2 + 2 ASHG09LMCA	5,0				
41	KA-63	Fujitsu	AOHG54LATT	14,0				
42	KA-64	Fujitsu	AOYG18LALL	5,2				
43	KA-65	Fujitsu	AOYA72LALT + ARYC72LHTA	20,3				
44	KA-66	Teko	TS-Z40 126Y-40-X2	30,0				
45	KA-67	Toshiba	RAV-GM561ATP-E + RAV-RM561MUT-E	5,0				
46	KA-76	Daikin	4MXM68N + 4 FTXM Innengeräte	6,8				
47	KA-80	Trane	Conquest CGAX 36 SE SN	85,9	✓		✓	✓

6.1.1 Variante 1 (grün)

Variante 1 ist die umfangreichste Umsetzung des Kältenetzwerkes. Diese ist in Abbildung 11 in grün dargestellt und verläuft durch das gesamte Firmenareal. Alle bestehenden Kälteabnehmer werden in dieser Variante an die Fernkälte angeschlossen. Die Maschinenanzahl reduziert sich von den betrachteten 47 Kälteanlagen auf 9 Kälteanlagen, exklusive einem Rückkühlwerk, das für die

Absorptionskältemaschine benötigt wird, verteilt entlang der geplanten Rohrleitung. Bei dieser Variante werden eine 950 m lange DN250 Rohrleitung sowie einige Stichleitungen mit unterschiedlicher Dimensionierung vorgesehen. Die Stichleitungen werden je nach benötigter Kälteleistung entlang der Route mit unterschiedlichen Querschnitten ausgeführt. Bei dieser Variante ergibt sich ein aktueller Gesamtkältebedarf von 2098 kW Kälteleistung. Mit den geforderten 20 % Sicherheit, die seitens des Unternehmens vorgegebenen wurden, ergibt sich eine benötigte Kälteleistung von 2517,6 kW. Die Klimaanlage KA-01, KA-02, KA-03, KA-05, KA-08, KA-27 und KA-80 bleiben aufgrund ihrer Zuverlässigkeit und Größe, gemessen an der Kälteleistung, bestehen und werden in das Kältenetzwerk eingebunden. Diese 7 Kälteanlagen ergeben eine Kälteleistung von 933,9 kW. Daraus ergibt sich ein benötigter Kältebedarf von 1583,7 kW. Dieser Kältebedarf wird einerseits mit einer 500 kW Absorptionskälteanlage und andererseits mit einem 1066 kW großen Flüssigkeitskühler bereitgestellt. Die geringe Unterschreitung der benötigten 20 % Sicherheit ist durch die Baureihe der Flüssigkeitskühler technisch bedingt.

6.1.2 Variante 2 (blau)

Variante 2 ist die kleinste Ausführung des Kältenetzwerkes. Hier werden nur 213 m Rohrleitung in der Dimension DN250 geplant. Diese Variante ist in blau in Abbildung 11 dargestellt und verläuft von der Absorptionskälteanlage über die bestehende Rohrbrücke zu Objekt 4 und weiter zu Objekt 5, wo sie in dieser Ausbaustufe bei der Kälteanlage KA-10 endet. Die Maschinenanzahl reduziert sich von den betrachteten 47 Kälteanlagen auf 41 Kälteanlagen. Bei dieser Variante ergibt sich ein aktueller Gesamtkältebedarf von 712,5 kW Kälteleistung. Mit den geforderten 20 % Sicherheit ergibt sich eine Kälteleistung von 855 kW. Die Klimaanlage KA-01 und KA-02 bleiben wie auch bei Variante 1 aufgrund ihrer Zuverlässigkeit und Größe, gemessen an der

Kälteleistung, bestehen und werden in das Kältenetzwerk eingebunden. Diese 2 Kälteanlagen ergeben eine Kälteleistung von 411,3 kW. Daraus ergibt sich ein benötigter Kältebedarf von 443,7 kW. Dieser Kältebedarf wird vollständig mit einer 500 kW Absorptionskälteanlage bereitgestellt.

6.1.3 Variante 3 (orange)

Bei der Variante 3 wird die Anzahl der Maschinen von 47 Klimaanlage auf 30 Anlagen reduziert. Die benötigte Rohrleitung für diese Variante beläuft sich auf 368 m und hat ebenso aufgrund der gewünschten Vorbereitung auf einen Vollausbau eine Dimension von DN250. In Abbildung 11 ist diese Variante in orange dargestellt. Sie verläuft von der Absorptionskältemaschine in Richtung Norden zum Objekt 11, danach Richtung Objekt 10 und verläuft beim Übergang Objekt 7d weiter zum Hochregallager Objekt 22. An der Fassade von Objekt 22 verläuft sie zum Objekt 7e und weiter zum Objekt 12. Bei dieser Routenführung sind 18 Anlagen in direkter Nähe und somit zur Anbindung an das Kältenetzwerk vorgesehen. Bei dieser Variante ergibt sich aufgrund der vielen kleinen Kältemaschinen ein Gesamtbedarf an Kälteleistung von 533,44 kW. Mit der gefordertern Sicherheit von 20 % werden 640,13 kW benötigt. Die Kälteanlagen KA-05, KA-08 und KA-80 bleiben bestehen und liefern eine Kälteleistung von 195,7 kW. Dies ergibt einen erforderlichen Kältebedarf von 444,43 kW, welcher ohne Probleme von der geplanten 500 kW Absorptionskältemaschine abgedeckt werden kann.

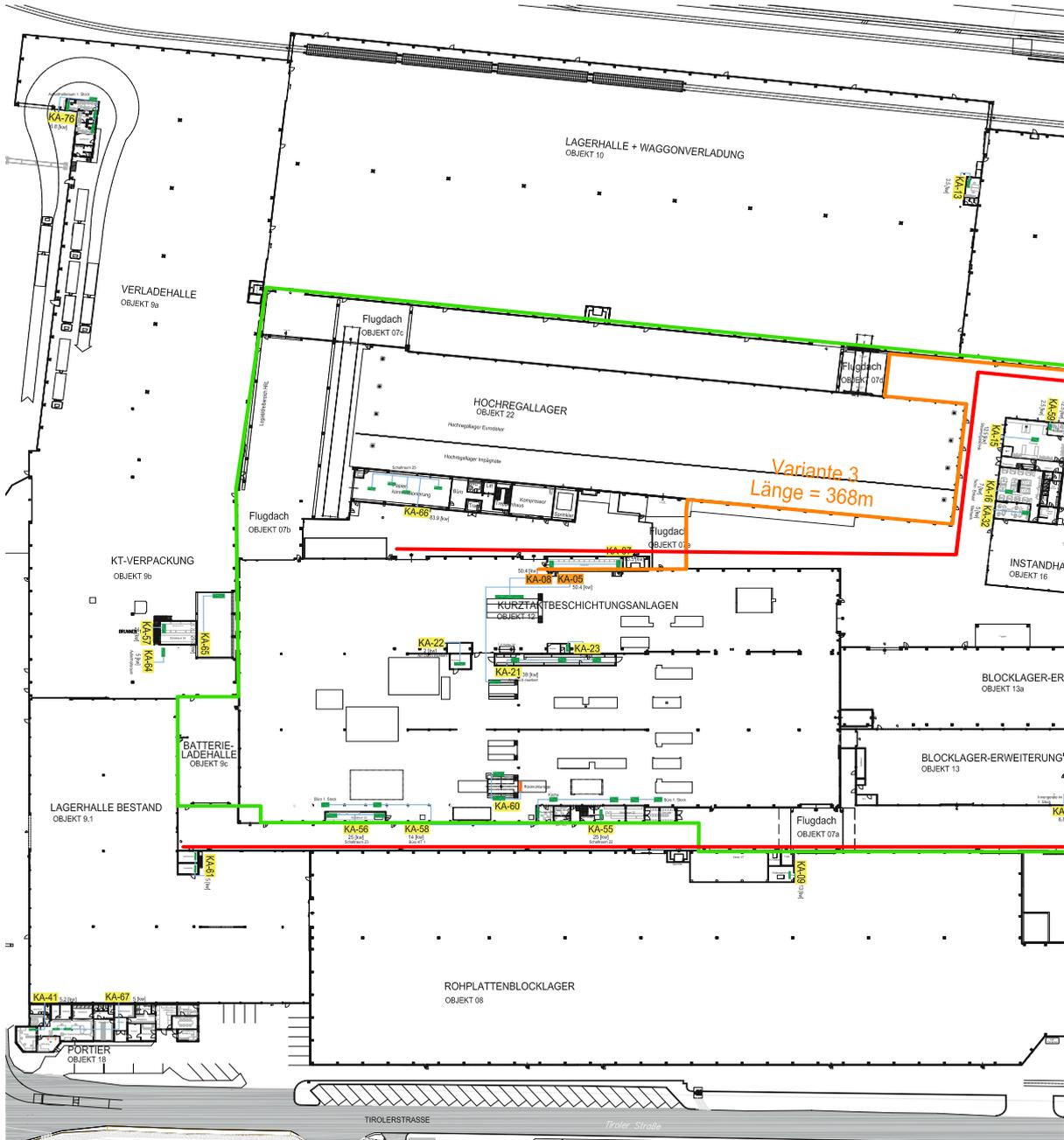
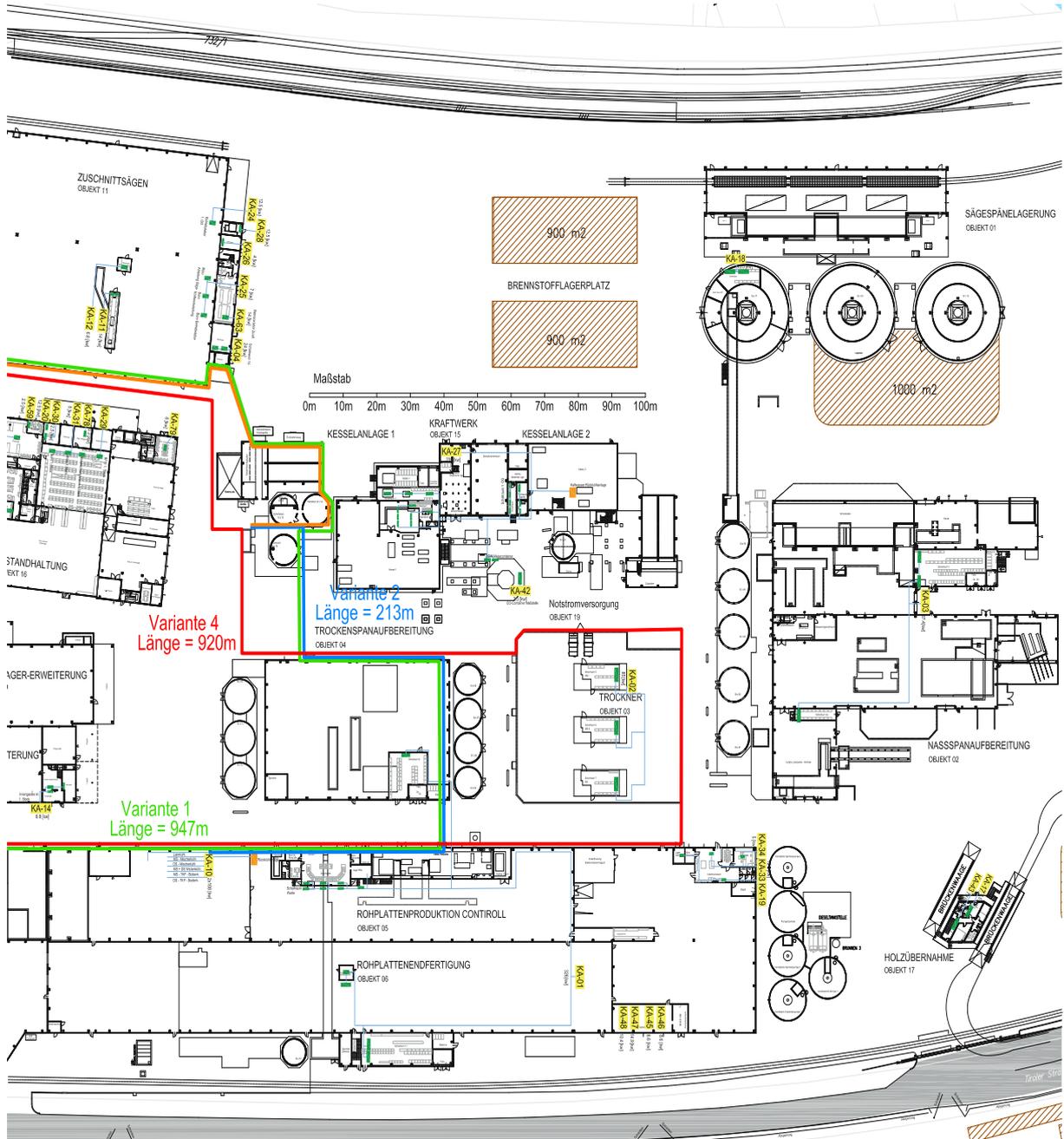


Abbildung 11: Darstellung der 4 möglichen Varianten im Lageplan des Industriebetriebs



6.1.4 Variante 4 (rot)

Variante 4 unterscheidet sich von Variante 1 nur in einigen wenigen Punkten. Der größte Unterschied ist die unterirdisch verlegte Rohrleitung mit einer Dimension von DN 250. In Abbildung 11 ist die Variante in rot dargestellt und verläuft zwischen Objekt 12 und Objekt 22 in Richtung Objekt 16, danach Richtung Norden zwischen Objekt 11 und Objekt 16 weiter zum Aufstellungsort der Absorptionskältemaschine. Von dieser Position verläuft die Rohrleitung zwischen dem Kesselhaus und Objekt 4 und Objekt 3 entlang und danach in Richtung Süden. Bei Objekt 6 angekommen verläuft die Rohrleitung weiter zwischen mehreren Objekten in Richtung Westen, bis diese schließlich wieder am Westende von Objekt 12 ankommt. Von dort wird oberirdisch die Rohrleitung wie in Variante 1 geführt und am Beginn der Rohrführung der Variante wieder eingebunden. Der Gesamtkältebedarf beläuft sich wie in Variante 1 auf 2098 kW, inklusive der 20 % Sicherheit.

6.2 Bewertung der Varianten

Für die Bewertung der verschiedenen Varianten wird ein systematischer Ansatz gewählt, der auf drei zentralen Kriterien basiert: Amortisationszeit, CO₂-Emissionen ermittelt über den TEWI-Wert und die Ausfallsicherheit. Abschließend werden die Ergebnisse in einer Bewertungsmatrix zusammengeführt, um eine transparente und vergleichbare Entscheidungsgrundlage zu schaffen.

6.2.1 Amortisationszeit

Um eine Bewertung hinsichtlich der laufenden Kosten, Betriebskosten und weiteren Kosten vornehmen zu können, musste eine umfassende Datenbeschaffung vorgenommen werden. Die Datenblätter der einzelnen Kälteanlagen wurden in eine tabellarische Form gebracht, um einen Vergleich der Effizienz und des Verbrauchs ziehen zu können. Mit Fachfirmen und den zuständigen Personen im Unternehmen wurden Kennzahlen festgelegt und Angebote eingeholt. Dadurch konnte eine detaillierte Bewertung der Investitionskosten sowie der möglichen Ersparnisse an Betriebskosten, Wartungen und Reparaturen vorgenommen werden.

In der Tabelle 6 sind die notwendigen Investitionskosten (CAPEX) der unterschiedlichen Varianten zusammengefasst. Für die Absorptionskältemaschine wurde eine 15 % Förderung aus dem Fördertopf der Kommunalkredit Public Consulting berücksichtigt, diese wird aktuell auf die Installation von Anlagen zur Klimatisierung von betrieblich genutzten Gebäuden und Anlagen gewährt. [37]

Tabelle 6: Übersicht aller notwendigen Investitionen zur Realisierung der unterschiedlichen Varianten [35]

CAPEX	Variante 1 grün	Variante 2 blau	Variante 3 orange	Variante 4 rot
Absorptionskältemaschine	238 000 €	238 000 €	238 000 €	238 000 €
Rückkühlturm Absorber	136 000 €	136 000 €	136 000 €	136 000 €
luftgekühlter Flüssigkeitskühler	318 760 €	- €	- €	318 760 €
Stichleitungen zu den Verbrauchern	66 635 €	- €	7 604 €	66 635 €
Ringleitung DN 250	2 445 841 €	762 930 €	1 068 938 €	574 440 €
Summe Angebotskosten	3 205 236 €	1 136 930 €	1 450 542 €	1 333 835 €
Steuerungs- und Regelungstechnik	80 131 €	28 423 €	36 264 €	33 346 €
Elektroinstallation	32 052 €	11 369 €	14 505 €	13 338 €
Statikberechnung	6 410 €	2 274 €	2 901 €	2 668 €
Summe Investitionskosten	6 529 065 €	2 315 926 €	2 954 754 €	2 717 021 €

Der Rückkühlturm sowie der erforderliche Flüssigkeitskühler für die benötigte Kälteleistung wurden bei mehreren Firmen angefragt und das technisch korrekte sowie kostengünstigste Angebot in die Kalkulation aufgenommen. Die Ringleitung sowie die Stichleitungen wurden bei einer Fachfirma angefragt, bei welcher der Industriebetrieb einen Rahmenvertrag für Rohrleitungsinstallationen hat. Diese Rohrleitungen sind mitunter auch die größten Kostenfaktoren für dieses Projekt. Dies wird in der erdverlegten Variante 4 (920 m) deutlich, bei der lediglich ein Bruchteil an Kosten anfällt, obwohl eine ähnliche Leitungslänge wie in Variante 1 (947 m) vorgesehen wurde. Aus den zuständigen Fachabteilungen des Industriebetriebs gab es Inputs, in welcher Höhe die Kosten für die Steuerung-, und Regelungstechnik (2,5 %), sowie für notwendige Elektroinstallationen (1 %) und die Statikberechnung (0,2 %) berücksichtigt werden müssen. Hier wird mit Prozentsätzen zum Investitionsvolumen gerechnet. Aus diesen Angeboten und Kostenschätzungen ergab sich eine Gesamtinvestitionssumme für die vier unterschiedlichen Varianten.

In Tabelle 7 sind die Auswirkungen auf die Wartungs-, Strom- sowie Reparaturkosten übersichtlich dargestellt. Die laufenden Kosten für die Bereitstellung der Industriekälte sind zu einem großen Teil abhängig von den Stromkosten, die aktuell im Betrieb anfallen. Die geplanten Wartungen sind bei dieser Vielzahl an unterschiedlichen Geräten und Typen ebenso in die Betrachtung miteinzubeziehen und werden mit sinkender Anzahl an Kälteanlagen auch geringer.

Tabelle 7: Gegenüberstellung der aktuellen laufenden Ist-Kosten im Vergleich zu den vier ausgewählten Varianten [35]

OPEX	Einheit	Ist-Zustand	Variante 1	Variante 2	Variante 3	Variante 4
Wartungskosten	€/a	19 241 €	12 943 €	18 936 €	16 332 €	12 943 €
Stromkosten	€/a	342 930 €	279 816 €	234 731 €	308 911 €	279 816 €
Reparaturkosten	€/a	85 733 €	27 982 €	35 210 €	46 337 €	27 982 €
Summe	€/a	447 904 €	320 741 €	288 876 €	371 580 €	320 741 €

Die jährlichen Reparaturkosten wurden mit der Einkaufsabteilung evaluiert und machen im Ist-Zustand einen erheblichen Anteil der jährlichen Kosten aus. Mit sinkender Anzahl an Kälteanlagen und moderneren Anlagen besteht die Möglichkeit diese Kosten auf rund ein Drittel bzw. die Hälfte je nach Variante zu senken.

In Tabelle 8 sind die Investitionskosten der unterschiedlichen Varianten sowie die Summe der laufenden Kosten ersichtlich. Bei allen Varianten konnte eine Einsparung an laufenden Kosten realisiert werden. Die Höhe der Einsparung ergibt sich vorrangig aus der Reduktion des Verbrauchs an elektrischer Energie und damit einhergehender Reduktion der Stromkosten.

Tabelle 8: Amortisation der unterschiedlichen Varianten in Jahren [35]

	Einheit	Ist-Zustand	Variante 1	Variante 2	Variante 3	Variante 4
Summe Investitionskosten	€	- €	6 529 065 €	2 315 926 €	2 954 754 €	2 717 021 €
Summe laufende Kosten	€/a	447 904 €	320 741 €	288 876 €	371 580 €	320 741 €
Ersparnis gegenüber Ist-Zustand	€/a		127 162 €	159 027 €	76 323 €	127 163 €
Amortisation in Jahren	a		51,3	14,6	38,7	21,4

Leider zeigt sich aber auch sehr eindrucksvoll, dass eine Umsetzung der Fernkälteleitung aus rein kaufmännischer Sicht sich nicht ausreichend schnell rentieren würde. Im Industriebetrieb sind Amortisationszeiten von maximal 10 Jahren für Projekte dieser Größenordnung vorgesehen.

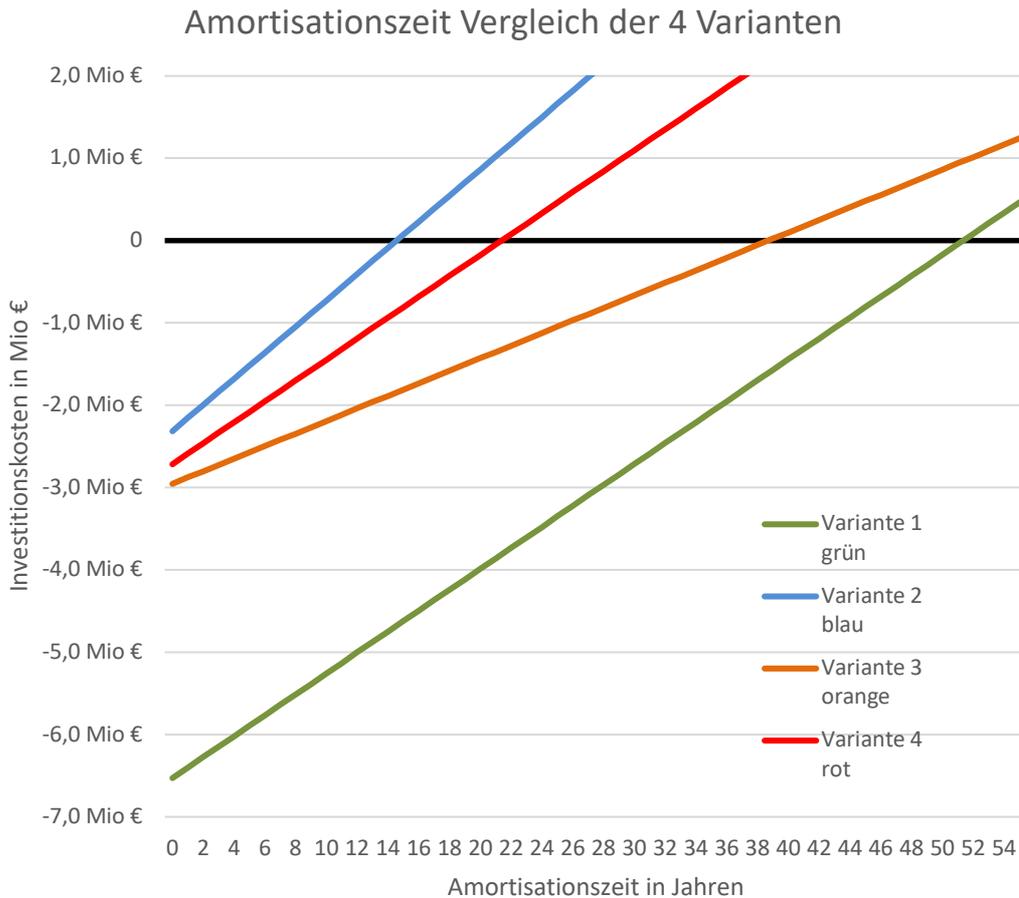


Abbildung 12: Amortisationszeit in Jahren im Vergleich über die 4 ausgewählten Varianten [35]

6.2.2 CO₂ – Emissionen

Zur Bewertung der CO₂-Emissionen durch die aktuelle Kälteerzeugung und dem Einsparungspotential des neuen Kältemittelkreislaufs wurde die sogenannte TEWI-Kennzahl herangezogen.

Der eigens im Industriebetrieb erzeugte Strom wird hauptsächlich aus Biomasse gewonnen. Der zugekaufte Strom wird auf unterschiedlichen Märkten gehandelt. Daraus ergibt sich ein CO₂-Äquivalent von 0,028 kg/kWh. Dieser Wert wurde aus Daten und Unterlagen der Umweltabteilung des Industriebetriebs ermittelt und festgelegt.

Der Recyclingfaktor wurde in Abstimmung mit der Umweltabteilung des Industriebetriebs ermittelt und festgelegt. Hier wird von einer Recyclingquote der Klimageräte von 0 % ausgegangen. Diese Quote ist nicht nur im untersuchten Industriebetrieb Stand der Technik, sondern global vergleichbar. [8]

Aus diesen Quellen, Unterlagen und Festlegungen wurde für jede Klimaanlage im Betrieb der TEWI-Wert errechnet. Beispielhaft zeigt sich in Tabelle 9 eine Berechnung für die KA-01. Die KA-01 ist ein luftgekühlter Flüssigkeitskühler der Firma KTK, Modell TWA 342-SKP, mit einer Kälteleistung von 326 kW.

Tabelle 9: benötigte technische Daten zur TEWI-Berechnung [38]

<i>Interne- Nummer</i>	<i>Kälte- leistung</i>	<i>Elektrische Leistung</i>	<i>EER</i>	<i>Betriebs- stunden</i>	<i>Kälte- mittel</i>	<i>Kältemittel- menge</i>
Einheit	kW	kW		h/a		kg
KA-01	326	114	2,93	3591	R410A	60

Tabelle 10: Beispielhafte TEWI-Berechnung eines luftgekühlten Flüssigkeitskühlers [35]

Interne- Nummer	GWP	L	L	n	m	α	E	β	TEWI/ n	TEWI/ a
Einheit	kgCO ₂	%	kg	a	kg	-	kWh/ a	kgCO ₂ / kWh	kgCO ₂ / n	kgCO ₂ / a
KA-01	2088	0,0133	0,798	15	60	0	399545	0,028	318082	21205

Um die 4 verschiedenen Varianten hinsichtlich ihres CO₂-Ausstoßes bewerten zu können, wurde für alle eingesetzten und geplanten Kälteanlagen der TEWI-Wert berechnet, danach wurden je nach Variante alle Kälteanlagen, die sich weiterhin im Betrieb befinden sowie auch die neu installierten Kälteanlagen summiert und in Tabelle 11 bewertet.

Tabelle 11: Vergleich des Ist-Zustands mit den Varianten 1-4 mithilfe des TEWI-Werts [35]

Variante	Kälte- leistung	elektrische Leistung	Jahresenergie- verbrauch	TEWI/ n	TEWI/ a	TEWI/a /kW	CO ₂ - Einsparung
Einheit	kW	kW	kWh/ a	kgCO ₂ / n	kgCO ₂ / a	kgCO ₂ /a /kW	%
Ist- Zustand	2098,0	733,1	2 467 121	3 569 513	237 968	113,42	
Variante 1	2499,9	645,0	1 573 127	1 356 203	90 413	36,17	68,11
Variante 2	2101,5	672,2	2 430 839	2 132 725	142 182	67,66	40,35
Variante 3	1905,1	604,39	1 500 690	2 617 546	174 503	91,60	19,24
Variante 4	2499,9	645	1 573 127	1 356 203	90 413	36,17	68,11

Da sich der TEWI-Wert auf die gesamte Anlagenlaufzeit berechnet, wurde dieser zuerst auf ein Jahr berücksichtigt und in weitere Folge aufgrund der unterschiedlichen zur Verfügung stehenden Kälteleistungen noch auf 1 kW Kälteleistung bezogen. Dadurch zeigt sich eine CO₂-Einsparung von 68,11 % bei Variante 1 und Variante 4, das gleiche Einsparungspotential ist hier durch den identen Ersatz der Kälteanlagen gegeben. Bei Variante 2 zeigt sich eine CO₂-Verminderung von 40,35 % im Gegensatz zum Ist-Zustand. Bei Variante 3 kann im Vergleich am wenigsten CO₂ eingespart

werden, nämlich nur 19.24 %. Dies ist bedingt durch den weiterhin hohen Anteil an einzeln laufenden Kälteanlagen sowie dem fehlenden Austausch ineffizienter Kälteanlagen mit einem niedrigen EER.

6.2.3 Ausfallsicherheit

Das vorliegende Konzept zur Ausfallsicherheit von Kälteanlagen im Industriebetrieb zeigt überlegte Ansätze, um die Kälteversorgung jederzeit zu gewährleisten. Das Konzept berücksichtigt die kritische Anforderung, dass bei einem Ausfall aufgrund einer technischen Störung einer Anlage die benötigte Kälteleistung für alle sicherheitskritischen Abnehmer ohne Zusatzmaßnahmen sichergestellt wird. Tabelle 12 zeigt die verfügbare Kälteleistung und die Unterschreitung der benötigten Kälteleistung im Störfall für verschiedenen Varianten. Für jede Variante werden die Kälteleistungen der einzelnen Komponenten (KA, AB, KKM) sowie die Gesamtkälteleistung (Σ) dargestellt. Zudem ist ersichtlich, wie stark die benötigte Kälteleistung im Störfall unterschritten wird.

Tabelle 12: Systemkritische Kälteleistung je nach Variante [35]

Redundanz- konzept	Kälte- leistung	krit. Kälte- leistung	Bestand KA	AB	KKM	Σ verfügbare Kälteleistung	Unterschreitung Kälteleistung im Störfall
Einheit	kW	kW	kW	kW	kW	kW	%
Variante 1	2098	1873,5	933,9	500	1066	2499,9	23
Variante 2	1067,7	1043,5	897,2	500		1397,2	14
Variante 3	533,44	495,57	195,7	500		695,7	61
Variante 4	2098	1873,5	933,9	500	1066	2499,9	23

Durch die Akzeptanz einer teilweisen Unterschreitung der maximalen Kälteleistung in Ausnahmesituationen kann ein ausgewogenes Verhältnis zwischen Betriebssicherheit

und Wirtschaftlichkeit erreicht werden. Dies ermöglicht eine kosteneffiziente Redundanzstrategie, die dennoch die Kernprozesse des Industriebetriebs zuverlässig absichert. Bei Ausfall der kritischsten Komponente, in Variante 1 und Variante 4 ist dies der angedachte Luftkühler, und in Variante 2 und Variante 3 die Absorptionskältemaschine, unterschreitet die verfügbare Kälteleistung die benötigte Kapazität unterschiedlich stark: Variante 1 und Variante 4 um 23 %, Variante 2 um 14 %, Variante 3 um 61 %. Besonders Variante 3 zeigt ein deutliches Risiko, da die Leistung im Störfall um über 60 % einbricht. Die übrigen Varianten bewegen sich im vertretbaren Bereich.

6.2.4 Bewertungsmatrix

Tabelle 13 ist eine Bewertung der vier Varianten anhand dreier Kriterien (Amortisationszeit, CO₂-Emissionen und Ausfallsicherheit). Die Bewertung erfolgt nach einem Punkteschema, wobei 5 die beste Bewertung darstellt. Die maximale erreichbare Punktzahl beträgt 500 Punkte.

Variante 2 (blau) erreicht in der Bewertungsmatrix die beste Platzierung mit insgesamt 300 Punkten. Sie erzielt mittlere Werte bei der Amortisationszeit (180 Punkte) und Ausfallsicherheit (40 Punkte) und erreicht bei den CO₂-Emissionen 80 Punkte.

Variante 4 (rot) belegt den zweiten Platz mit 280 Punkten. Sie zeigt eine ausgewogene Leistung in allen Bereichen, mit besonders guten Ergebnissen bei den CO₂-Emissionen (100 Punkte).

Variante 3 (orange) landet auf dem dritten Platz mit 200 Punkten. Sie zeichnet sich durch eine hervorragende Ausfallsicherheit aus (100 Punkte), hat aber Schwächen bei den CO₂-Emissionen (40 Punkte).

Variante 1 (grün) ist in der Bewertungsmatrix letztgereiht mit 160 Punkten. In der Kategorie Amortisationszeit bekommt diese Variante 0 Punkte, da sie sehr hohe Investitionskosten von mehr als 6,5 Millionen Euro hat.

Tabelle 13: Bewertungsmatrix der 4 Varianten mit prozentueller Gewichtungsverteilung anhand dreier Kriterien [39]

				Variante 1 grün	Variante 2 blau	Variante 3 orange	Variante 4 rot					
Bewertungs- grundlage	Kriterien		ω	Max. Punkte	Gesamt Punkte	Gesamt Punkte	Gesamt Punkte	Gesamt Punkte				
Amortisations- zeit [Jahre]	5	<10	60	300	0	0	3	180	1	60	2	120
	4	$10 > x < 19$										
	3	$20 > x < 29$										
	2	$30 > x < 39$										
	1	$40 > x < 50$										
	0	>50										
CO ₂ -Emission Einsparung [%]	5	>40	20	100	5	100	4	80	2	40	5	100
	4	$40 < x > 30$										
	3	$30 < x > 20$										
	2	$20 < x > 10$										
	1	<10										
Ausfall- sicherheit [%]	5	<10	20	100	3	60	2	40	5	100	3	60
	4	$10 > x < 20$										
	3	$20 > x < 30$										
	2	$30 > x < 40$										
	1	>40										
Platzierung / Punkte				$\Sigma 500$	4	160	1	300	3	200	2	280
Punkte-, Prozentunterschied zu Nr. 1					-140	32 %	0	60 %	-100	40 %	-20	56 %

Die Gewichtung (ω) der Kriterien, die im Industriebetrieb festgelegt wurde, spielt eine wichtige Rolle bei der Gesamtbewertung: Die Amortisationszeit macht 60 % der Gesamtpunktzahl aus, während CO₂-Emissionen und Ausfallsicherheit jeweils 20 %

beitragen. Diese Gewichtung erklärt, warum Variante 2 trotz mittlerer Werte in zwei Kategorien insgesamt am besten abschneidet.

6.3 Beschreibung der ausgewählten Varianten

Die Auswertung mithilfe der in Tabelle 13 dargestellten Bewertungsmatrix zeigt, dass Variante 2 (blau) die höchste Gesamtbewertung erlangen konnte. Aufgrund der geringfügig schlechteren Bewertung der Variante 4 (rot) und der signifikant großen Unterschiede dieser beiden Varianten werden beide in diesem Kapitel nochmal genauer diskutiert.

6.3.1 Genaue Beschreibung der bestbewerteten Variante 2 (blau)

Die Variante 2 (blau) ist mit einer Länge von 213 m die kürzeste Fernkälteleitung. Sie wurde von der Position der angedachten Absorptionskältemaschine weggeplant um vor allem im Objekt 5 im Süden des Industriebetriebs die Kälteerzeuger zu ersetzen. Die Rohrleitung führt über mehrere Rohrbrücken zuerst zum Objekt 4, dort an der Außenmauer entlang zum Objekt 5. Bei dieser Variante wurde angedacht, zuerst eine kleine Anzahl an Klimaanlagen in einem kurzen Fernkältenetz einzubinden und somit die Investitionskosten niedrig zu halten, gleichzeitig aber die verlorene Wärmeenergie effizient nutzen zu können. Die beiden Flüssigkeitskühler der Firma KTK sind zuverlässige Klimageräte, die nahezu störungsfrei im Industriebetrieb seit 2015 (KA-01) und 2017 (KA-02) im Betrieb sind. [36]

Die angedachte Absorptionskältemaschine würde bei der zur Verfügung stehenden Wärmemenge und Temperaturen von 90 °C rund 500 kW Kälteleistung liefern. [40]

Somit könnten 6 Klimaanlage eingespart werden. Dies ist auch gleichzeitig der größte Nachteil dieser Variante, da 41 Kältererzeuger weiterhin in Betrieb bleiben.

Unter der Vorgabe einer möglichen späteren Erweiterung wurde die Fernkälterrohrleitung der Variante 2 trotz der vorerst kleinen Ausführung mit Rohrleitungsdurchmessern, welche die gesamte benötigte Kälteleistung des Industriebetriebs decken könnten, ausgelegt.

6.3.2 Genaue Beschreibung der Variante 4 (rot)

Die Variante 4 (rot) unterscheidet sich von allen anderen Varianten grundlegend, da das Fernkältenetz nicht oberirdisch entlang von Gebäudemauern oder über Rohrbrücken geführt werden soll, sondern unterirdisch, frostsicher verlegt. Dieser Unterschied führt zu weitaus niedrigeren Investitionskosten im direkten Vergleich mit der Variante 1 (grün). Während die Variante 1 (grün) mehr als 6,5 Millionen Euro kosten würde, kommt die Variante 4 (rot) auf 2,7 Millionen Euro Investitionskosten.

[35]

Auch die Variante 4 (rot) würde an eine Absorptionskältemaschine angeschlossen werden und so 500 kW Kälteleistung aus überschüssiger Wärme bereitstellen. 5 Kälteerzeuger im Industriebetrieb würden weiter in Betrieb bleiben und an das Fernkältenetz angeschlossen werden. Diese sind in Tabelle 5 ersichtlich und ergeben in Summe eine Kälteleistung von 824,1 kW. Mit einem Flüssigkeitskühler wird die noch benötigte Kälteleistung bereitgestellt. Dieser liefert bei einem sehr effizienten EER von 3,26 [7] und einem ESEER von 6,85 eine Kälteleistung von 1066 kW. [41]

7 Zusammenfassung / Fazit

Diese Arbeit untersucht Möglichkeiten zur Steigerung der Energieeffizienz von Klimaanlageanlagen in einem Industriebetrieb. Es wird eine Umstellung der aktuell zahlreichen kleinen, dezentral organisierten Klimaanlageanlagen auf ein zusammenhängendes, miteinander regelbares Fernkältenetz als überlegtes Gesamtkonzept vorgeschlagen.

Hierzu wird zuerst die aktuelle Kälteversorgung im Werk untersucht und die potentiellen Kälteabnehmer identifiziert. Daraus ergibt sich, dass 47 Kälteanlagen in eine nähere Betrachtung miteinbezogen werden können.

Aus dieser Betrachtung werden vier Lösungsvorschläge erarbeitet, die jeweils unterschiedliche Ansätze verfolgen. Während Variante 1 (grün) und Variante 4 (rot) ein gesamtes Fernkältenetz durch den gesamten Industriebetrieb vorsehen, sind die Varianten 2 (blau) und 3 (orange) als Teil einer ersten Ausbaustufe zu sehen. Der Industriebetrieb legte 3 Kriterien zur Bewertung fest: die Amortisationszeit, die CO₂-Emissionen und die Ausfallsicherheit. Die Ergebnisse zeigen, dass Variante 2 (blau) am besten bewertet wird, gefolgt von Variante 4 (rot). Diese beiden Varianten werden daher nochmal detailliert beschrieben.

Die Arbeit kommt zu dem Schluss, dass die Umstellung auf ein zentrales Fernkältenetz erhebliches Potential zur Optimierung der Energieeffizienz und zur Senkung der Betriebskosten, sowie zur Senkung des Aufwands der Instandhaltung im Industriebetrieb bietet. Die hohen Investitionskosten lassen aber eine wirtschaftliche Umsetzung des Fernkältenetzes bei den aktuell Gegebenheiten nicht zu.

Eine sukzessive Umstellung auf größere Anlagen, welche mehrere Räume und Maschinen gleichzeitig mit Kälte versorgen können, wäre eine Option für die Zukunft.

Eine Implementierung vieler Strahlennetze senkt zwar die auf einmal fälligen

Investitionskosten, löst aber die aktuellen Probleme nicht. Das Strahlennetzsystem bietet auch unzureichende Ausfallsicherheit, da eine Maschine viele Kälteabnehmer versorgt. Außerdem ist eine weitere Implementierung von Kälteanlagen bei steigendem Kältebedarf bei dieser Art von Netz nicht möglich. Dies erfordert bei einem nicht bedachten Kältebedarf oder einer Änderung der Umweltbedingungen schnell eine Neuplanung des Strahlennetzes und geht damit wieder mit mitunter hohen Investitionskosten einher.

8 Ausblick

In zukünftigen Überlegungen sollte man sich über die unterirdische Rohrverlegung für kleinere Ausführungen Gedanken machen. Hier wäre die Ausführung der Variante 3 (orange) mit erdverlegten Rohren genauer zu prüfen, da bei Variante 3 (orange) 16 Kälteanlagen mit Kälteleistungen zwischen 2 kW und 30 kW betroffen wären. So könnten unterschiedlichste Anlagen mit teils sehr schlechten EER von nur 1,74 außer Betrieb genommen werden, gleichzeitig aber auch eine erste Ausbaustufe des Fernkältenetzes realisiert werden, da die hohen Investitionskosten der oberirdischen Fernkälteleitung wegfallen würden.

Es sollte geprüft werden, inwieweit eine andere Ausführung des angedachten 1066 kW Luftkühlers eine Verbesserung in der Ausfallsicherheit und beim Redundanzkonzept bringt. Möglicherweise ist eine doppelte Ausführung mit je rund 500 kW investitionskostentechnisch nicht soviel teurer, hat aber bei plötzlicher Störung einer Maschine den großen Vorteil, dass auf einen Schlag nur 500 kW Kälteleistung fehlen und nicht wie bei Variante 1 (grün) und Variante 4 (rot) die angedachten 1066 kW.

Wenn keine der angedachten Lösungen umsetzbar scheint, könnte zumindest die aktuell verloren gegangene Wärmeenergie einem Nutzen zugeführt werden.

9 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht der Berechnungsgrundlage für die ESEER Kennzahl [7].....	5
Tabelle 2: Übersicht verschiedener Kältemittel, welche im Industriebetrieb zum Einsatz kommen [10] [17]	8
Tabelle 3: Übersicht der Klimageräte im Industriebetrieb mit der jeweiligen Kälteleistung [35]	27
Tabelle 4: Übersicht potenziell geeigneter Klimageräte für den Einsatz im angedachten Fernkältenetz im Industriebetrieb [35].....	34
Tabelle 5: Kategorisierung der betroffenen Klimaanlage je Variante. Die Haken dabei zeigen an, dass diese Kältemaschinen bei Ausführung der Variante weiterhin in Betrieb bleiben [35].....	40
Tabelle 6: Übersicht aller notwendigen Investitionen zur Realisierung der unterschiedlichen Varianten [35]	48
Tabelle 7: Gegenüberstellung der aktuellen laufenden Ist-Kosten im Vergleich zu den vier ausgewählten Varianten [35]	50
Tabelle 8: Amortisation der unterschiedlichen Varianten in Jahren [35]	50
Tabelle 9: benötigte technische Daten zur TEWI-Berechnung [38]	52
Tabelle 10: Beispielhafte TEWI-Berechnung eines luftgekühlten Flüssigkeitskühlers [35].....	52
Tabelle 11: Vergleich des Ist-Zustands mit den Varianten 1-4 mithilfe des TEWI-Werts [35].....	53
Tabelle 12: Systemkritische Kälteleistung je nach Variante [35].....	54
Tabelle 13: Bewertungsmatrix der 4 Varianten mit prozentueller Gewichtungverteilung anhand dreier Kriterien [39]	56

10 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Übersicht der Treibhausgas-Emissionen 1990-2023 [3].....	3
Abbildung 2: 3 mögliche Fernwärme/-kälte Netzvarianten [20] S. 78	11
Abbildung 3: Schaltbild und $\log p/h$ - Zustandsdiagramm für eine einstufige Kompressionsmaschine. V Verdampfer, K Kondensator, D Drossel [13] S. 63.....	15
Abbildung 4: Kontinuierliche H ₂ O-LiBr-Absorptionskältemaschine [13] S. 151	17
Abbildung 5: Schema einer Adsorptionskältemaschine [31] S. 660.....	20
Abbildung 6: Schema eines offenen Adsorptionsprozesses zur Kühlung von Gebäuden [32] S. 296.....	21
Abbildung 7: Lageplan der Klimageräte im Industriebetrieb	31
Abbildung 8: KA-07 und KA-66 - Beispiele für typische Schaltraumkühlungen im untersuchten Industriebetrieb	37
Abbildung 9: KA-22 und KA-64 - Beispiele für eingesetzte Büro- und Aufenthaltsklimageräte	38
Abbildung 10: KA-05 und KA-10 - zwei Beispiele für Klimageräte, die im Produktionsprozess benötigt werden.....	39
Abbildung 11: Darstellung der 4 möglichen Varianten im Lageplan des Industriebetriebs	45
Abbildung 12: Amortisationszeit in Jahren im Vergleich über die 4 ausgewählten Varianten [35].....	51

11 Literatur

- [1] Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, „Der Klimawandel und seine Folgen“, Apr. 2024. Zugegriffen: 23. März 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://www.oesterreich.gv.at/themen/umwelt_und_klima/klima_und_umweltschutz/Seite.1000200.html
- [2] F. Birol, „The Future of Cooling Opportunities for energy- efficient air conditioning“, 2018. Zugegriffen: 23. März 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.iea.org/reports/the-future-of-cooling>
- [3] A. Thürr, „Rückgang der Treibhausgas-Emissionen 2023 um 6,5%“, Jan. 2025. Zugegriffen: 23. März 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.at/news250115-treibhausgas-bilanz-2023>
- [4] Rat der Europäischen Union, „Marktauswirkungen der Invasion der Ukraine durch Russland: Reaktion der EU“, Jan. 2024. Zugegriffen: 23. März 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.consilium.europa.eu/de/policies/eu-response-russia-military-aggression-against-ukraine-archive/impact-of-russia-s-invasion-of-ukraine-on-the-markets-eu-response/>
- [5] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, „Energy Efficiency Ratio (EER)“. Zugegriffen: 22. März 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.energieforschung.de/de/glossar/Energy+Efficiency+Ratio+%28EER%29>
- [6] Deutsche Norm, *DIN EN 14825:2022 Luftkonditionierer, Flüssigkeitskühlsätze und Wärmepumpen mit elektrisch angetriebenen Verdichtern zur Raumbeheizung und -kühlung, gewerblichen Kühlung und Prozesskühlung – Prüfung und Leistungsbewertung unter Teillastbedingungen und Berechnung der saisonalen Arbeitszahl*, 2022.
- [7] C. Müller, „Leistungszahlen für Kälte- und Klima- und Wärmepumpensysteme“. Zugegriffen: 22. März 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.reftec.ch/downloads/Leistungszahlen.pdf>
- [8] Intergovernmental Panel on Climate Change und United Nations Environment Programme, Hrsg., *IPCC/TEAP special report on safeguarding the ozone layer and the global climate system: issues related to hydrofluorocarbons and perfluorocarbons*. Cambridge ; New York: Published for the Intergovernmental Panel on Climate Change [by] Cambridge University Press, 2005.
- [9] Umweltbundesamt, „Die Treibhausgase“, Nov. 2022. Zugegriffen: 22. März 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima->

energie/klimaschutz-energiepolitik-in-deutschland/treibhausgas-emissionen/die-treibhausgase

- [10] Umweltbundesamt, „Treibhauspotentiale (Global Warming Potential, GWP) ausgewählter Verbindungen und deren Gemische gemäß Viertem (AR4) und Fünftem (AR5) IPCC Sachstandsbericht sowie Verordnung (EU) 2024/573 (F-Gas-VO) bezogen auf einen Zeitraum von 100 Jahren“, März 2024. Zugegriffen: 22. März 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/10594/dokumente/2024-03_treibhauspotentiale_gwp_ar4_ar5_vo2024-573_homepage_deutsch.pdf
- [11] Amtsblatt der Europäischen Union, *VERORDNUNG (EU) Nr. 517/2014 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES*. 2014. Zugegriffen: 22. März 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32014R0517>
- [12] O. Dieter, *Einführung in die Kältetechnik*, 2. Auflage. VEB Verlag Technik Berlin, 1983.
- [13] T. Maurer, *Kältetechnik für Ingenieure*, Neuerscheinung. Berlin Offenbach: VDE VERLAG GMBH, 2016.
- [14] Deutsche Norm, *DIN EN 378-1:2016 Kälteanlagen und Wärmepumpen - Sicherheitstechnische und umweltrelevante Anforderungen*, Juni 2021.
- [15] C. Vering, D. Schwarz, P. Stefaniak, V. Venzik, und D. Müller, „Kältemittel in Wärmepumpen für die Gebäudeheizung: Ökologische Auswirkungen im gesamten Lebenszyklus“, *Chem. Ing. Tech.*, Bd. 94, Nr. 4, S. 542–554, Apr. 2022, doi: 10.1002/cite.202100016.
- [16] Bayerisches Landesamt für Umwelt, „Die neue EU F-Gase-Verordnung 2014 Grüne Kälte: Die F-Gase-Verordnung“, Dez. 2014. Zugegriffen: 22. März 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://www.umweltpakt.bayern.de/download/pdf/lfu_infoblatt_f_gase_verordnung_122014.pdf
- [17] Bundesamt für Umwelt BAFU, „Übersicht über die wichtigsten Kältemittel“, Feb. 2025. Zugegriffen: 25. März 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/chemikalien/fachinfo-daten/uebersicht_ueberdie_wichtigsten_kaeltemittel.pdf.download.pdf/uebersicht_ueberdie_wichtigsten_kaeltemittel.pdf
- [18] V. Weinmann, „Sind Klimaanlage wirklich Klimakiller?“, Nr. 12–2020, 2020, Zugegriffen: 22. März 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.tga-fachplaner.de/klimatechnik/niedrig-gwp-kaeltemittel-leckageraten-von-kaeltemitteln-sind-klimaanlagen-klimakiller>
- [19] D. Fritz, M. Gössl, E. Hatzl, S. Poupa, W. Pölz, und H. Schreiber, „HARMONISIERTE ÖSTERREICHISCHE DIREKTE UND INDIREKTE THG-

EMISSIONSFAKTOREN FÜR RELEVANTE ENERGIETRÄGER & TECHNOLOGIEN“, REP-0888, 2023. Zugegriffen: 22. März 2025. [Online].

Verfügbar unter:

<https://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/rep0888.pdf>

- [20] P. Konstantin und M. Konstantin, *Praxisbuch der Fernwärme- und Fernkälteversorgung: Systeme, Netzaufbauvarianten, Kraft-Wärme- und Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung, Kostenstrukturen und Preisbildung*, 3. Auflage 2024. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2024. doi: 10.1007/978-3-662-69526-5.
- [21] E. Klapp, *Apparate- und Anlagentechnik: Planung, Berechnung, Bau und Betrieb stoff- und energiewandelnder Systeme auf konstruktiver Grundlage*. Berlin Heidelberg: Springer, 1980.
- [22] Gabler Wirtschaftslexikon, „Internes Rechnungswesen Capex“. Februar 2018. Zugegriffen: 23. März 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/capex-52700/version-275817>
- [23] Gabler Wirtschaftslexikon, „Internes Rechnungswesen Opex“. Februar 2018. Zugegriffen: 17. März 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/opex-52701/version-383552>
- [24] F. W. Peren, *Formelsammlung Finanzmathematik: Wissen kompakt für Studierende und Praktiker*, 2. Aufl. 2023. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2023. doi: 10.1007/978-3-662-67361-4.
- [25] H. D. Baehr und S. Kabelac, *Thermodynamik: Grundlagen und technische Anwendungen*, 16. Aufl. 2016. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2016. doi: 10.1007/978-3-662-49568-1.
- [26] J. Dohmann, *Thermodynamik der Kälteanlagen und Wärmepumpen: Grundlagen und Anwendungen der Kältetechnik*, 1. Aufl. 2016. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2016. doi: 10.1007/978-3-662-49110-2.
- [27] R. Zahoransky, H.-J. Allelein, E. Bollin, und U. Schelling, Hrsg., *Energietechnik: Systeme zur konventionellen und erneuerbaren Energieumwandlung. Kompaktwissen für Studium und Beruf*, 9., Überarbeitete und Ergänzte Auflage. in Springer eBook Collection. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2022. doi: 10.1007/978-3-658-34831-1.
- [28] M. Richter, M. Dr. Safarik, und C. Heinrich, „Klimafreundliche Gebäudeklimatisierung“, Juli 2014, Zugegriffen: 20. März 2025. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/klimafreundliche-gebaeudeklimatisierung>
- [29] R. Krottil, „Klimakälte aus Wärme“, *HLK Österr. Spezialisierte Fachz. Für Heiz. Lüft. Klima- Kältetech.* 384, 2007, Zugegriffen: 20. März 2025. [Online]. Verfügbar unter: <https://permalink.obvsg.at/AC01826253>

- [30] E. Bollin, Hrsg., *Regenerative Energien im Gebäude nutzen: Wärme- und Kälteversorgung, Automation, Ausgeführte Beispiele*, 2. Aufl. 2016. in SpringerLink Bücher. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2016. doi: 10.1007/978-3-658-12405-2.
- [31] R. Stieglitz und V. Heinzel, *Thermische Solarenergie: Grundlagen, Technologie, Anwendungen*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013. doi: 10.1007/978-3-642-29475-4.
- [32] D. Bohne, *Gebäudetechnik und technischer Ausbau von Gebäuden*, 12.Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2022. doi: 10.1007/978-3-658-37488-4.
- [33] „Schulungsunterlagen Kesselwärter; interne Quelle nicht öffentlich zugänglich“. 2020.
- [34] TH, „Besprechung zur Investitionskostenabschätzung; interne Quelle nicht öffentlich zugänglich“, 5. Januar 2024.
- [35] MP, „Klimaanlagen Übersicht URB“. 4. Januar 2024.
- [36] JA, „Aufnahme der zu prüfenden Teile neu; ; interne Quelle nicht öffentlich zugänglich“. 19. Februar 2024.
- [37] Bundesministerium Klimaschutz, Umwelt, Energie, Innovation und Technologie, „Informationsblatt Klimatisierung und Kühlung“. März 2025. Zugegriffen: 22. März 2025. [Online]. Verfügbar unter: https://www.umweltfoerderung.at/fileadmin/user_upload/umweltfoerderung/betriebe/Klimatisierung_und_Kuehlung/UFI_Standardfall_Infoblatt_KUEHL.pdf
- [38] KTK Klimatechnik, „Luftgekühlte Flüssigkeitskühler Free Cooling“. Februar 2024. Zugegriffen: 29. Februar 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://ktk.it/de/produkte/top-line-2/aircooled-liquid-chillers-free-cooling/twafc-2121102-skp/>
- [39] MP, „Bewertungsmatrix Varianten, interne Quelle nicht öffentlich zugänglich“. März 2024.
- [40] Baelz, „Technische Beschreibung Absorptionskälteanlagen Typ ‚Hornisse‘; interne Quelle nicht öffentlich zugänglich“. 4. März 2024.
- [41] HW, „30KAVP 1100A Air-cooled chiller with variable-speed screw compressor; interne Quelle nicht öffentlich zugänglich“. 13. März 2023.