MEng Programm
Nachhaltiges Bauen

Nachhaltige, aktive Gebäudekühlung im innerstädtischen Wiener Wohnbaubestand

Masterthese zur Erlangung des akademischen Grades
“Master of Engineering”

eingereicht bei
Ass.Prof.in i.R. Univ.Lektorin Dipl.-Ing.in Dr.in Karin Stieldorf

Dipl.-Ing.in Anna Aichinger

00675175

Wien, 23.08.2024

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Masterarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Masterarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Eidesstattliche Erklärung

Ich, **DIPL.-ING.IN ANNA AICHINGER**, versichere hiermit

1. dass ich die vorliegende Masterthese, "NACHHALTIGE, AKTIVE GEBÄUDEKÜHLUNG IM INNERSTÄDTISCHEN WIENER WOHNBAUBESTAND", 121 Seiten, gebunden, selbständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfen bedient habe, und
2. dass ich das Thema dieser Arbeit oder Teile davon bisher weder im In- noch Ausland zur Begutachtung in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe.

Wien, 23.08.2024

_____
Unterschrift

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Masterarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Danksagung

An erster Stelle möchte ich meiner geschätzten Betreuerin, Ass.Prof.in i.R. Univ.Lektorin Dipl.-Ing.in Dr.in Karin Stieldorf, meinen aufrichtigen Dank aussprechen. Ihre fachliche Expertise, ihre wertvollen Anregungen und ihre tatkräftige Unterstützung, auch über die Grenzen dieser Masterthese hinaus, haben maßgeblich zum erfolgreichen Abschluss der Arbeit beigetragen. Es war eine große Bereicherung, von ihrer Erfahrung und ihrem Wissen zu profitieren. Mein Interesse an der Thematik nachhaltiges Bauen wurde im Laufe des Masterprogramms maßgeblich vertieft und ich freue mich über Möglichkeiten, in der Zukunft weiter in diesem Umfeld wissenschaftlich tätig zu sein.

Mein besonderer Dank gilt auch Dr. James Howie, der mich während des gesamten Schreibprozesses mit unermüdlicher Geduld, Ratschlägen und Unterstützung begleitet hat. Ebenso danke ich meinen Freunden und meiner Familie, insbesondere meinen Eltern, für ihre stetige Ermutigung und ihr Verständnis.

Ohne die tatkräftige Unterstützung vieler lieber Menschen wäre die Fertigstellung dieser Arbeit nicht in der Art und Weise möglich gewesen. Ich danke euch vielmals!

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Masterarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Kurzfassung

Angesichts der fortschreitenden Klimakrise und ihrer Auswirkungen auf sommerlichen Komfort, Gesundheit sowie auf die prognostizierten steigenden Kühlbedarfe in Gebäuden, zielt diese Arbeit darauf ab, aktive nachhaltige Technologien zur Gebäudekühlung für ein typisches innerstädtisches Wiener Bestandswohngebäude zu analysieren und vergleichend zu bewerten.

Zunächst wird der aktuelle Stand der Technik hinsichtlich der aktiven Gebäudekühlung dargelegt. Eine Übersicht typischer thermisch-energetischer Sanierungsmaßnahmen sowie eine Diskussion relevanter Technologien zur Wärme- und Kältebereitstellung in bestehenden Mehrgeschoßwohnbauten bilden die Grundlage für die Auswahl geeigneter Energiesysteme.

Im Rahmen einer vergleichenden Analyse werden verschiedene Technologien zur aktiven, nachhaltigen Gebäudekühlung untersucht, um die ökonomisch-ökologische Optimalität ausgewählter Energiesysteme hinsichtlich der Lebenszyklusteilkosten, der äquivalenten Treibhausgasemissionen und der anfallenden Abwärme aus Kühlprozessen zu bewerten. Die Analyse basiert auf vereinfachten Modellrechnungen unter Heranziehung diverser Datengrundlagen und Annahmen, wobei eine lineare Optimierung mit kombinierter, gewichteter Zielfunktion zur Anwendung kommt. Zur Überprüfung der Robustheit der Ergebnisse wird eine lokale Sensitivitätsanalyse aus Basis von Szenarien durchgeführt.

Für den innerstädtischen Wiener Wohnbaubestand wird insbesondere die freie Kühlung mit dem Erdreich als Wärmesenke, sowie der Einsatz von Sole-Wasser-Wärmepumpen in Verbindung mit vertikalen Erdsonden als ökonomisch-ökologisch optimale Lösungen identifiziert. Im Gegensatz dazu erweist sich die Anwendbarkeit von Absorptionskältemaschinen als stark eingeschränkt. Die Untersuchung zeigt, dass vor dem Hintergrund der deutlichen Performanceunterschiede eine differenzierte Auswahl der Energiesysteme wünschenswert ist, die sich an spezifischen ökologischen und ökonomischen Zielsetzungen orientiert und relevante Zielgrößen über einen angemessenen Betrachtungszeitraum hinweg berücksichtigt.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung ... 5

1.1 Hintergrund und Motivation ... 5

1.2 Problemstellung und Forschungsfrage ... 7

1.3 Zielsetzung und Forschungsansatz ... 11

2 Stand des Wissens (SOTA) ... 14

2.1 Der Wiener Wohnbau-Gebäudebestand ... 14

2.2 Thermische Sanierungsmaßnahmen zur passiven Gebäudekühlung ... 16

2.2.1 Dämmung der Gebäudehülle ... 16

2.2.2 Sanierung oder Tausch der Fenster ... 17

2.2.3 Sonnenschutz ... 18

2.3 Energetische Sanierungsmaßnahmen zur aktiven Gebäudekühlung ... 19

2.3.1 Kühlung unter Verwendung des Kompressionsverfahrens ... 20

2.3.1.1 Kompressionskältemaschinen (KKM) ... 23

2.3.1.2 Wärmepumpen im reversiblen Betrieb ... 24

2.3.2 Kühlung mit natürlicher Wärmesenke (*free cooling*) ... 28

2.3.2.1 Free cooling – Wärmesenke Erdreich ... 28

2.3.2.2 Free cooling – Wärmesenke Wasserkörper ... 29

2.3.3 Kühlung unter Verwendung des Sorptionsverfahrens ... 30

2.3.3.1 Absorptionskältemaschinen (ABKM) ... 32

2.3.3.2 Adsorpionskältemaschinen (ADKM) ... 33

2.3.3.3 Dessicant Evaporative Cooling (DEC) ... 34

2.4 Normative und rechtliche Bestimmungen ... 35

2.4.1 Anforderungen an den sommerlichen Wärmeschutz ... 35

2.4.2 Rechtliche Bestimmungen zur Nutzung von erneuerbarer Energie für den Gebäudebetrieb in Österreich ... 37

2.4.3 Rechtliche Bestimmungen zur Nutzung von erneuerbarer Energie für den Gebäudebetrieb in der Europäischen Union ... 38

3 Methodik ... 40

3.1 Annahmen für die vergleichende Analyse verschiedener Energiesysteme zur aktiven Kühlung eines typischen innerstädtischen Wohngebäudes in Wien ... 40

3.1.1 Bestimmung eines Referenzgebäudes ... 40

3.1.2 Bestimmung maßgeblicher Energiebedarfe ... 41

3.1.2.1 Heizwärmebedarf ... 42

3.1.2.2 Warmwasserwärmebedarf ... 43

3.1.2.3 Heizenergiebedarf ... 43

3.1.2.4 Kühlbedarf ... 43

3.1.2.5 Kühlenergiebedarf ... 44

3.1.2.6 Haushaltsstrombedarf ... 45

3.1.2.7 Endenergiebedarf ... 45

3.2 Definition der zu vergleichenden Energiesysteme für nachhaltige aktive Gebäudekühlung ... 46

3.2.1 Energiesystem 1 - Status Quo ... 47

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Masterarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

3.2.2 Energiesystem 2 - Fernwärme und Kühlung mit ABKM 48
3.2.3 Energiesystem 3 - Fernwärme und freie Kühlung mit Erdsonden 49
3.2.4 Energiesystem 4 - Fernwärme und Kühlung mit Luftwärmepumpe 50
3.2.5 Energiesystem 5 - Erdwärmepumpe für Wärme und Kühlung 52
3.2.6 Energiesystem 6 – Luftwärmepumpe für Wärme und Kühlung 53
3.3 Ökonomisch-ökologische Analyse 54
3.3.1 System- und Bilanzgrenzen 54
3.3.2 Bestimmung des ökonomischen Aufwands 54
3.3.3 Bestimmung der ökologischen Auswirkungen 56
3.3.4 Bestimmung der ökonomisch-ökologischen Optimalität 57
3.3.5 Sensitivitätsanalyse 58
4 Ergebnisse 59
4.1.1 Lebenszyklusteilkosten 59
4.1.2 Treibhausgasemissionen 61
4.1.3 Abwärme aus Kühlprozessen 62
4.1.4 Vergleich der Energiesysteme 63
4.1.4.1 Vergleich der Lebenszyklusteilkosten 63
4.1.4.2 Vergleich der Emissionen 65
4.1.4.3 Ökonomisch-ökologisch optimales Energiesystem 66
4.1.5 Sensitivitätsanalyse 68
4.1.5.1 Szenario 1 - Fokus auf Kostenoptimalität 68
4.1.5.2 Szenario 2 - Fokus auf ökologische Optimalität 68
4.1.5.3 Szenario 3 - Dekarbonisierung der Fernwärme bis 2024 68
4.1.5.4 Szenario 4 - Reduktion des Fernwärmepreises 69
4.1.5.5 Szenario 5 - Dekarbonisierung des Strom-Liefermix ab 2030 69
4.1.5.6 Szenario 6 - Starker Anstieg des Strompreises 69
5 Diskussion 71
6 Schlussfolgerung und Ausblick 74
7 Literaturverzeichnis 76
8 Abkürzungsverzeichnis 82
9 Abbildungs-, Diagramm- und Tabellenverzeichnis 84
10 Anhang A 86
10.1 Grundlagen und Annahmen für die Modellrechnung 86
10.2 Berechnung der Investitionskosten 89
10.3 Berechnung der Betriebskosten 111
11 Anhang B 115

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Masterarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

1 Einleitung

1.1 Hintergrund und Motivation

Wie in vielen Städten der Welt wird auch für Wien in den kommenden Jahrzehnten eine deutliche Zunahme von Hitzetagen, Tropennächten und anderen extremen Wetterereignissen im Zusammenhang mit der Klimakrise erwartet (vgl. Kuttler 2011: 7; Kromp-Kolb et al. 2014: 85; vgl. Miranda et al. 2023).

Bei einem ungebremsten Ausstoß von Treibhausgasen entsprechend dem IPCC Emissionsszenario RCP 8.5 (IPCC 2023) könnten mit dem Jahr 2100 über 45 Hitzetage pro Jahr in Wien zur Normalität werden (ZAMG 2022). Im Falle einer Einhaltung des Pariser Klimaziels von 1,5 °C Erderwärmung über vorindustriellem Niveau entsprechend dem IPCC Emissionsszenario RCP 2.6 (IPCC 2023) könnte sich die Anzahl der Hitzetage in Wien knapp über den aktuellen Werten stabilisieren (ZAMG 2022). Folgend den aktuellen politischen Richtlinien und Bestimmungen auf globaler Ebene erscheint derzeit jedoch eine zukünftige Entwicklung nach dem Emissionsszenario RCP 6 am wahrscheinlichsten. Dies würde einer mittleren globalen Erwärmung von 3,2 °C bis ins Jahr 2100 entsprechen (IPCC 2023) und ebenfalls einen signifikanten Anstieg an Hitzetagen in Wien bedeuten.

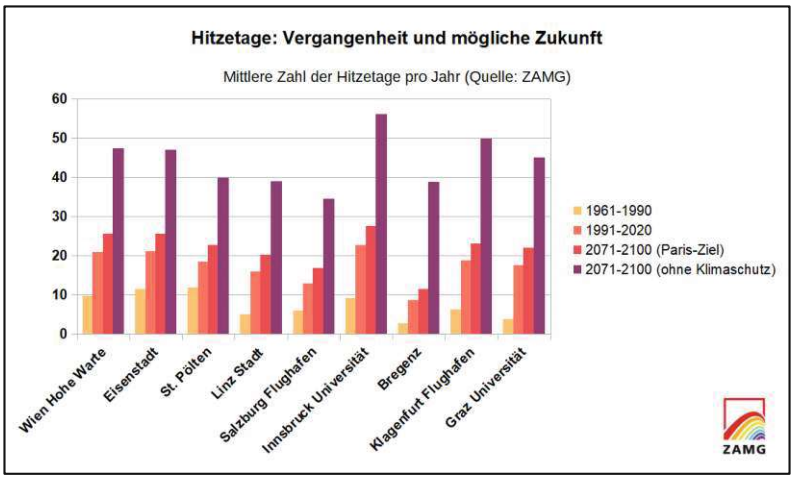

Abbildung 1. Hitzetage in Wien, Zunahme bis 2020 und Prognose je IPCC Emissionsszenario. (vgl. ZAMG 2022)

Im Vergleich zu ländlichen Regionen werden Städte zudem in höherem Maße von extremen Hitzeereignissen betroffen sein. Der sog. „Urban Heat Island“ (UHI) – Effekt beschreibt die Temperaturdifferenz der Luft zwischen der Stadt und dem kühleren Umland. In urbanen Agglomerationen wird eine intensive Absorption von Sonnenstrahlung während des Tages begünstigt, gleichzeitig ist die nächtliche Wärmeabstrahlung durch die bauliche Dichte begrenzt. Aufgrund dessen weisen

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Masterarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

Städte im Vergleich zum Umland eine signifikant höhere Erwärmung auf, welche mehrere Kelvin betragen kann. (vgl. Landsberg 1982; Oke 1982; Stewart & Oke 2012) Ein konkretes Beispiel für die Ausprägung dieses Effekts liefert die Untersuchung der Temperaturunterschiede zwischen der Wiener Innenstadt und Seibersdorf im unmittelbaren Umland Wiens, bei der bereits im Jahr 2012 eine Differenz von mehr als 4 °C festgestellt wurde (Stadt Wien Magistratsabteilung 22 2015: 8).

Insbesondere in Stadtteilen mit hoher Bebauungs- bzw. Bevölkerungsdichte und eingeschränktem Zugang zu Grünflächen wird eine erhöhte Hitzevulnerabilität der Bevölkerung aufgrund des UHI-Effekts festgestellt (vgl. Mills 2006; vgl. Li 2020). Ältere Menschen, Kinder, einkommensschwache Gruppen und Personen mit eingeschränkter Mobilität sind besonders gefährdet, da Ihnen möglicherweise weniger Ressourcen für den Schutz vor Hitze und die Anpassung an klimatische Veränderungen zur Verfügung stehen. (vgl. Bohle 2007: 805; vgl. Birkmann 2008) Ebenso könnten Menschen in schlecht gedämmten Wohnungen, insbesondere in Altbauten, einem erhöhten Risiko ausgesetzt sein. (vgl. Samuelson et al. 2020)

Angesichts der prognostizierten Zunahme von Hitzetagen in Wien und der damit einhergehenden erhöhten Vulnerabilität bestimmter Bevölkerungsgruppen, adressiert diese Masterarbeit die dringende Notwendigkeit, wirksame technische Lösungen zur aktiven Gebäudekühlung im Wohnbestand zu implementieren. Insbesondere Bewohner*innen historischer Gebäude in dicht bebauten innerstädtischen Wohnquartieren stehen vor der Herausforderung, Strategien für den Schutz vor sommerlicher Überhitzung umzusetzen, die sowohl umweltverträglich als auch sozial inklusiv sind.

Die Motivation hinter dieser Arbeit ist es daher, innovative und nachhaltige Technologien für die Gebäudekühlung zu untersuchen, die auf die konkreten Gegebenheiten des innerstädtischen Wiener Gebäudebestands zugeschnitten sind. Die Arbeit zielt darauf ab, verschiedene technische Systeme zur Gebäudekühlung im Hinblick auf ihre ökologische und ökonomische Nachhaltigkeit vergleichend zu bewerten und so deren Vorteile und Nachteile für den Einsatz in Wien nachvollziehbar darzulegen. Im besten Fall sollen so Anreize für den breiteren Einsatz technischer Systeme zur nachhaltigen aktiven Gebäudekühlung geschaffen werden und der dadurch entstehende ökomische Aufwand sowie die negativen Umweltauswirkungen reduziert werden. Letztendlich soll die Arbeit zu einer gesteigerten Lebensqualität der Stadtbewohner*innen und zur Resilienz Wiens gegenüber der Klimakrise beitragen.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Masterarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

1.2 Problemstellung und Forschungsfrage

Die Bewohner*innen Wiens werden sich gemäß den dargelegten Prognosen in naher Zukunft verstärkt vor extremer sommerlicher Hitze schützen müssen. Im Kontext der mitteleuropäischen Baukultur leisten traditionell angewandte, sog. *passive* Maßnahmen zur Gebäudekühlung (bspw. thermische Speicherung, natürliche Ventilation, Nachtlüftung, Verschattung, Sonnenschutz und Gebäudeausrichtung bzw. Ausrichtung der Fensterflächen) seit jeher einen unabdingbaren Beitrag zur Vermeidung von sommerlicher Überwärmung in Gebäuden. (vgl. Košir 2019)

Neben den *passiven* Maßnahmen zur Gebäudekühlung, wird auch in Mitteleuropa und insbesondere in Städten der sog. *aktiven* Gebäudekühlung eine immer größere Bedeutung zukommen. *Aktive* Gebäudekühlung bezeichnet die Senkung der Raumtemperatur auf ein komfortables Niveau durch den Entzug von Wärme im Innenraum unter Einsatz von Energie und deckt somit einen Kühlbedarf, analog zum Heizbedarf. (vgl. Pezzutto et al. 2022)

Im Falle von länger anhaltenden, durch die Klimakrise bedingten sommerlichen Hitzeperioden mit Tagestemperaturen über 30 °C und häufigen sog. „Tropennächten“, in denen die nächtliche Lufttemperatur nicht unter 20 °C sinkt, können auch im Kontext Mitteleuropas und besonders in Städten traditionell angewandte Konzepte versagen, die auf *passiven* Maßnahmen zur Gebäudekühlung beruhen. (vgl. Bohne 2022)

Derzeit ist der Endenergieverbrauch für Gebäudekühlung der am stärksten ansteigende Verbrauch im Gebäudebereich in Europa seit dem Jahr 1990, wobei sich der Energiebedarf für Gebäudekühlung seitdem fast verdreifacht hat. (vgl. Elnagar et al. 2023) Weiter weisen aktuelle Studien auf einen signifikanten Anstieg des Kühlenergiebedarfs und auf damit einhergehende Sommer-Spitzenlasten, insbesondere in Österreich hin. (vgl. Kapeller et al. 2024; vgl. Miranda et al. 2023; vgl. Hartner et al. 2018; vgl. IEA 2018) Kapeller et al. prognostizierten beispielsweise unter der Annahme ungünstiger Bedingungen wie dem IPCC Emissionsszenario RCP 8.5 (vgl. IPCC 2023) und dem ausschließlichen Einsatz *aktiver* Kühlmaßnahmen eine Zunahme des Kühlenergiebedarfs in Österreich um das 10-fache bis zum Jahr 2050 (vgl. Kapeller et al. 2024).

Vor diesem Hintergrund wird ersichtlich, dass insbesondere in Städten der Konzeption und Umsetzung von Gebäudekühlsystemen eine erhöhte Bedeutung zukommen wird. Der prognostizierte zukünftige Kühlbedarf kann hier entweder durch

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Masterarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

den Einsatz passiver Maßnahmen zur Gebäudekühlung reduziert werden, oder durch den Einsatz aktiver Maßnahmen zur Gebäudekühlung gedeckt werden. (vgl. Bohne 2022; Kapeller et al. 2024) In der Praxis werden je nach den Gegebenheiten vor Ort und finanziellen bzw. rechtlichen Rahmenbedingungen unterschiedliche Lösungen bzw. Kombinationen passiver und aktiver Maßnahmen zur Anwendung kommen. Für die Vermeidung eines negativen Feedback-Loops durch einen klimaschädlichen Betrieb aktiver Gebäudekühlsysteme wird die Umsetzung effizienter, nachhaltiger Lösungen im Sinne eines geringen Endenergieverbrauchs und geringer THG- bzw. Abwärme-Emissionen unabdingbar sein. (vgl. Bohne 2022)

Im Kontext Wiens hat die Realisierung von aktiven Kühlsystemen in den letzten Jahren im städtischen Wohnbau Einzug gefunden (vgl. Stadt Wien Magistratsabteilung 20 2023). Bis vor wenigen Jahren waren i.d.R. lediglich Dienstleistungs- und Bürogebäude mit aktiver Kühlung ausgestattet. Dies ist vor allem dadurch begründet, dass diese durch größere innere Wärmequellen und höhere transparente Fassadenanteile oft starke sommerliche Wärmelasten in Innenräumen aufweisen. (vgl. Treberspurg et al. 2006) In Wohngebäuden hat sich eine hochwertige Bausubstanz in Kombination mit Nachtlüftung häufig als genügend erwiesen, um die Temperatur im Innenraum während Hitzeperioden auf einem tolerierbaren Niveau zu halten. (vgl. Stadt Wien Magistratsabteilung 20 2023) Bedingt durch immer extremere Hitzeperioden wird derzeit insbesondere bei Neubauten (u.a. im Mehrgeschoßwohnbau in Stadtentwicklungsgebieten, bei Dachgeschoßausbauten und Ein- und Zweifamilienhäusern) sowie bei Sanierungen des gehobenen Segments die Bereitstellung von aktiver Gebäudekühlung verstärkt nachgefragt. (vgl. Stadt Wien Magistratsabteilung 20 2023)

Neubauten sind mittlerweile oft sowohl mit passiver (meist außenliegender Sonnenschutz, Dachbegrünung, seltener Fassadenbegrünung) als auch aktiver Kühlung ausgestattet. Im Neubau kann der sommerlichen Überwärmung schon in der Planung des jeweiligen Gebäudes bzw. Quartiers gegengesteuert werden, beispielsweise durch Gebäudeausrichtung, Verschattung und der Dimensionierung von Fensterflächen. Darüber hinaus werden u.a. eine Reihe von hocheffizienten Methoden zur aktiven Gebäudekühlung angewandt, i.d.R. unter Verwendung von Wärmepumpentechnologien, wobei Bedarfe an technischer Gebäudeausrüstung bzw. Platzbedarfe schon in der Planung berücksichtigt und somit meist optimal in das Bauvorhaben integriert werden können. Darüber hinaus ist die Bauteilaktivierung eine höchst effiziente Methode der Kälteverteilung, -abgabe sowie -speicherung im

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Masterarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

Gebäude, die bei Neubauten u.a. in Stahlbetondecken- oder Holz-Beton-Verbunddeckenbauweise realisiert werden kann. (vgl. Pfafferott et al. 2015) Das im Jahr 2023 durch den Nationalrat beschlossene Erneuerbare Wärme Gesetz (EWG) sieht zudem ein bundesweites Verbot für die Errichtung von fossilen Heizungssystemen im Neubau vor. Der Einsatz effizienter, fossilfreier Heizsysteme im Neubau macht die Realisierung nachhaltiger Kühlsysteme kostengünstiger und einfacher in der Umsetzung, da deren Integration in ein fossilfreies, auf Wärmepumpen basierendes Energiesystem zur Wärme- sowie Kältebereitstellung i.d.R. keinen hohen baulichen oder anlagentechnischen Mehraufwand verursacht. (vgl. Bohne 2022) In Wien wurden in den letzten Jahren auch vereinzelt Wohnbauten an das Fernkältenetz des öffentlichen Energiedienstleisters Wien Energie GmbH angeschlossen. (vgl. Wien Energie 2023) Die Fernkälte ist eine netzgebundene Methode der Gebäudekühlung, die kaltes Wasser (meist 5 bis 6 °C) in einem isolierten Leitungssystem zum Kälteabnehmer transportiert. In sog. „Kältezentralen“ nutzen Absorptionskältemaschinen Abwärme aus Industrie, KWK-Anlagen oder Abfallverbrennung um Kälte zu erzeugen. (vgl. Konstantin et al. 2022) Derzeit werden die Kapazitäten der Fernkälte vor allem für Dienstleistungsgebäude mit hohem Kühlbedarf wie Krankenhäuser oder Bürogebäude benötigt. Im Wohnbau wird die Fernkälte aus diesem Grund voraussichtlich nicht flächendeckend eingesetzt werden. (vgl. Stadt Wien Magistratsabteilung 20 2023)

Neubauten stellen in Wien jedoch nur einen kleinen Anteil der Gebäude dar. Der Wiener Wohngebäudebestand ist vielgestaltig und umfasst unterschiedlichste Bauperioden und Gebäudetypologien. (vgl. Stadt Wien Magistratsabteilung 20 2023) Mit Blick auf die Energieversorgung des Wiener Wohngebäudebestands wird deutlich, dass auf dem Weg zu einer fossilfreien Wärme- bzw. Kälteversorgung bis ins Jahr 2040 einige Hürden überwunden werden müssen. Die Mehrheit bilden hauptsächlich mit Erdgas beheizte Gebäude, welche innerhalb der nächsten 16 Jahre den neuen nationalen und internationalen Anforderungen an den Klimaschutz angepasst werden müssen. Die bisherigen auf fossilen Brennstoffen basierenden Heizsysteme müssen hierfür ersetzt werden, in vielen Fällen sollte außerdem eine thermische Sanierung des Bestandsgebäudes vorgenommen werden. Im Hinblick auf die Umsetzung passiver Maßnahmen besteht im Gebäudebestand ein geringerer Handlungsspielraum für nachträgliche Adaptierungen; Aspekte wie Gebäudeorientierung oder die Ausrichtung von Fensterflächen sind nicht mehr oder nur in sehr geringem Maße beeinflussbar. (vgl. Mayrhofer et al. 2023) Der Einsatz

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Masterarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

aktiver Maßnahmen zur Gebäudekühlung wird einerseits durch die geringe Beeinflussbarkeit der Dimensionierung bzw. der Zugriffsrechte von für die erneuerbare Energiebereitstellung nutzbarer Außenflächen erschwert, andererseits durch die Hindernisse in Bezug auf die Entscheidungsfindung, beispielsweise innerhalb einer Eigentümer*innengemeinschaft, sowie in Bezug auf die Genehmigung nachträglicher Bauführungen. Darüber hinaus sind die betreffenden Gebäude in der Regel bewohnt, was mitunter Duldungen der Mieter*innen über eine bauliche bzw. anlagentechnische Veränderung notwendig machen würde. (§ 8 MRG; § 16 WEG)

Nur ein geringer Anteil des Endenergieverbrauchs im europäischen Raum – somit i.d.R. auch im Wiener Raum – entsteht derzeit durch aktive Gebäudekühlung (vgl. EUROSTAT, 2023), wobei anzunehmen ist, dass die Nutzung aktiver Kühlsysteme auch im Wohnungsbestand in den nächsten Jahren aufgrund von sommerlichen Hitzewellen stark anwachsen wird (Kapeller et al. 2024; Hartner et al. 2018; IEA 2018). Derzeit werden im Wohnbestand i.d.R. mobile oder fix verbaute handelsübliche sog. „Klimaanlagen“ eingesetzt. Diese können unter vergleichsweise geringen Investitionskosten hergestellt werden. (Stadt Wien - Magistratsabteilung 37 2023) Der Betrieb ist jedoch in der Regel emissions- und energieintensiv, u.a. durch die Verwendung von umweltschädlichen Kältemitteln und mitunter geringer Effizienz (UNEP et al. 2023; IEA 2018). Insbesondere wird der städtische Wärmeinseleffekt durch den beim Betrieb von handelsüblichen Klimaanlagen angewandten Prozess der Rückkühlung verschlimmert, da warme Luft den Innenräumen entzogen und an die unmittelbare Umgebung abgegeben wird. (vgl. Stadt Wien - Magistratsabteilung 20 2023)

Vor diesem Hintergrund wird es künftig gerade im städtischen Bereich immer wichtiger werden, *nachhaltige aktive Kühlsysteme* anzuwenden, die wo immer möglich die Nutzung erneuerbarer Energieträger priorisieren und deren klimaschädliche Emissionen sowie deren Wärmeabgabe an die unmittelbare Umgebung möglichst gering ausfallen. (vgl. Bohne 2022) Ein besonderes Augenmerk ist zudem auf eine hohe Energieeffizienz des Gebäudes und seiner technischen Systeme zu legen (vgl. Bohne 2022), wodurch der Energiebedarf zur Gebäudekühlung- bzw. Temperierung in Kombination mit passiven Maßnahmen gegen sommerliche Überhitzung, beispielsweise Verschattung oder außenliegender Sonnenschutz, möglichst niedrig gehalten werden kann. (vgl. Mayrhofer et al 2023)

Darüber hinaus ist es maßgeblich, aktive Kühlsysteme in ein energetisch optimal abgestimmtes Gesamtenergiekonzept für Heizung, Warmwasseraufbereitung und

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Masterarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Gebäudekühlung zu integrieren. Einerseits kann dadurch der bauliche Aufwand bei der Herstellung, sowie der Wartungsaufwand der Anlagenkomponenten verringert werden, was wiederum die Lebenszyklusteilkosten des Energiesystems in günstiger Weise beeinflussen kann. Andererseits führt ein optimales Zusammenspiel der Nutzung von unterschiedlichen erneuerbaren Quellen sowie anfallender Abwärme am Standort zu einer Reduktion des Energiebedarfs und zu einer Steigerung der Gesamteffizienz des Energiesystems. In der Folge können darüber hinaus die Kapazitäten von Energieinfrastrukturen mit Netzcharakter geschont werden. (vgl. Bohne 2022)

Es stehen derzeit eine Vielfalt an technischen Lösungen zur nachhaltigen, aktiven Gebäudekühlung im Wohnbaubestand zur Verfügung, die sich erheblich in Bezug auf verschiedene ökologische und ökonomische Aspekte unterscheiden. (vgl. Bohne 2022; Pezzutto et al. 2022) Die Komplexität dieser Faktoren erschwert die Vergleichbarkeit und somit die Auswahl optimaler Kühlsysteme für den jeweiligen Anwendungsfall. Vor diesem Hintergrund eröffnet sich der Forschungsbedarf, verschiedene aktiver Kühltechnologien unter Berücksichtigung dieser multifaktoriellen Rahmenbedingungen hinsichtlich ihrer Anwendung im Wiener Wohnbaubestand einer ökonomisch-ökologischen Analyse zu unterziehen und somit vergleichbar zu machen.

Die Forschungsfrage lautet demnach: ***Wie unterscheiden sich verschiedene Technologien zur nachhaltigen, aktiven Gebäudekühlung hinsichtlich ihrer ökonomischen und ökologischen Auswirkungen in ihrer Anwendung auf ein typisches Bestandswohngebäude im innerstädtischen Wien?***

1.3 Zielsetzung und Forschungsansatz

Die vorliegende These hat zum Ziel, für den Wiener Wohnbaubestand geeignete technische Systeme bzw. Konfigurationen aktiver Kühlsysteme in ihren maßgeblichen ökonomischen und ökologischen Aspekten zu untersuchen und sie somit in ihrer Anwendbarkeit im Sinne einer möglichst hohen Nachhaltigkeit vergleichbar zu machen. Nachhaltigkeit soll in ihrer ökonomischen und ökologischen Dimension berücksichtigt werden (vgl. Finkbeiner et al. 2010; vgl. Graubner et al. 2003; vgl. UN 2002) und als maßgeblich in die Bestimmung der Kriterien einfließen, die für eine Untersuchung bzw. vergleichende Analyse der Energiesysteme herangezogen werden. Falls solche aus der vergleichenden Analyse hervorgehen bzw. die Robustheit der Ergebnisse dies zulässt, sollen besonders geeignete Lösungen für

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Masterarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

den Wiener Wohnbaubestand identifiziert werden und somit eine Orientierungshilfe für die Auswahl von Energie- bzw. aktiven Kühlsystemen im Zuge einer thermisch-energetischen Sanierung gegeben werden.

Im Rahmen der These wird im Wesentlichen ein quantitativ-vergleichender Forschungsansatz verfolgt. Der quantitative Aspekt bezieht sich auf die Erfassung und Analyse numerischer Daten, die durch ingenieurwissenschaftliche Modelle und standardisierte Berechnungen, sowie durch die Sichtung verschiedener bautechnischer bzw. branchenrelevanter Richtlinien, Normen und Datensammlungen gewonnen werden. Dies umfasst beispielsweise die Ermittlung des Energiebedarfs, der Emissionen oder der Invest- und Betriebskosten verschiedener Energie- bzw. aktiver Kühlsysteme. Der vergleichende Ansatz der These soll es ermöglichen, eine Reihe von Energie- bzw. aktiven Kühlsystemen anhand der Untersuchungen gegenüberzustellen und ihre Anwendbarkeit im Kontext des Wiener Wohnbaubestands im Sinne einer möglichst hohen Nachhaltigkeit zu bewerten.

Deskriptive Grundlage der These ist die Darstellung des Stands des Wissens (SOTA) hinsichtlich aktiver Gebäudekühlung im Wiener Wohnbaubestand (vgl. Kapitel 2). Dies umfasst eine Übersicht über typische Wiener Wohnbau-Bestandsgebäude, Rahmenbedingungen bzw. typische Bauführungen einer thermisch-energetischen Sanierung, sowie eine Rundschau über bestehende und potentiell implementierbare, innovative Technologien zur Wärme- und Kältebereitstellung für Wohnbauten im Wiener Kontext. Diese Abbildung des Stands des Wissens soll es unter anderem erlauben, die Methodik für den quantitativ-vergleichenden Teil der Arbeit auf die gegebenen Rahmenbedingungen Wiens zugeschnitten zu erarbeiten.

Die Methodik der These wird in Kapitel 3 beschrieben. Zunächst sollen die Rahmenbedingungen und Annahmen dargestellt werden, die in der Folge die Grundlage für den Vergleich verschiedener Energie- bzw. aktiver Kühlsysteme bilden. Im ersten Schritt soll ein typisches Bestandsgebäude für den Wiener Kontext definiert werden. In der Folge soll dargelegt werden, unter welchen Gesichtspunkten Energiesysteme für den Vergleich ausgewählt werden. Danach soll die Herangehensweise für die vergleichende ökonomisch-ökologische Analyse beschrieben werden.

Die durch die Anwendung der beschriebenen Methodik errechneten Ergebnisse sollen in geeigneter Weise im Kapitel 4 - Ergebnisse dargestellt werden. Im Rahmen des Kapitel 5 - Diskussion sollen die Ergebnisse hinsichtlich der Forschungsfrage

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Masterarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

kritisch diskutiert werden. Die jeweiligen Vorteile und Nachteile der untersuchten Energiesysteme sollen dargelegt werden und die Robustheit der modellhaften Berechnungen soll in geeigneter Weise berücksichtigt werden, wobei die getroffenen Annahmen und potenzielle Auswirkungen auf die Ergebnisse der These hinreichend diskutiert werden sollen.

Im schlussfolgernden Teil der These (vgl. Kapitel 6 – Schlussfolgerung) soll zur hinreichenden Beantwortung der Forschungsfrage dargestellt werden, in welcher Weise sich die betrachteten Energiesysteme hinsichtlich ihrer ökonomisch-ökologischen Optimalität unterscheiden. Falls die Ergebnisse es zulassen, soll im Zuge dessen herausgearbeitet werden, ob ein bestimmtes Energiesystem insbesondere für die aktive nachhaltige Gebäudekühlung im Kontext des Wiener Wohnbaubestands geeignet ist. Die Limitationen der im Rahmen dieser These erzielten Ergebnisse sollen schlussfolgernd betrachtet werden, um Fehlinterpretationen oder unbegründete Schlussfolgerungen zu vermeiden.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Masterarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

2 Stand des Wissens (SOTA)

2.1 Der Wiener Wohnbau-Gebäudebestand

Um sich an die Untersuchung technischer Systeme für eine nachhaltige, aktive Gebäudekühlung des Wiener Wohnbaubestand anzunähern, ist eine Betrachtung des aktuellen Zustandes des Wohnbaubestands essentiell.

Wien, als eine Stadt mit einer reichen historischen Vergangenheit, verfügt über einen umfangreichen Bestand an Gebäuden unterschiedlichster Epochen. Der Gebäudebestand in Wien umfasst eine Vielzahl an Gebäudetypologien, die sich über verschiedene architektonische Stile und Baujahre erstrecken. Im Jahr 2011 erfasste Erhebungen erfassten über 30.000 gründerzeitliche Bauten, die vor 1919 errichtet wurden. Weitere rund 25.000 Bauten entfielen auf die Zwischenkriegszeit (1919-1944), rund 55.000 Bauten auf die Jahre zwischen 1945 und 1980, ein weiterer vergleichsweise großer Anteil an Bauten (ca. 51.000) wurde ab 1980 errichtet. (vgl. Stadt Wien - Magistratsabteilung 23 2023)

Eine Betrachtung der Wiener Wohnsitze hinsichtlich der rechtlichen Wohnform zeigt einen deutlichen Überhang an Mietwohnungen (rund 66%), wobei Wohnsitze Im Eigentum nur ca. 14% ausmachen. Insbesondere soll hier der hohe Anteil von 24% sozialen Wohnbauten am Wiener Wohngebäudebestand als international beachtetes Beispiel langfristiger sozialer Wohnbaupolitik erwähnt werden. (vgl. Stadt Wien - Magistratsabteilung 23 2023)

Der Wiener Wohnbaubestand soll im Rahmen der Themenstellung dieser These aus thermisch-energetischer Perspektive betrachtet werden. Folgend den sog. „Dekarbonisierungstypen“ der Stadt Wien (vgl. Stadt Wien - Magistratsabteilung 20 2023) können die Wiener Bestands-Wohngebäude nach ihrer Gebäudetypologie, ihrem thermischen Sanierungszustand und ihrem Energiesystem für Wärmebereitstellung kategorisiert werden. So können 9 charakteristische „Dekarbonisierungstypen“ festgelegt werden und mit der Anzahl der betreffenden Nutzungseinheiten hinterlegt werden (siehe Abb. 2).

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Masterarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek WIEN Your knowledge hub

	Gebäudetyp	Sanierungs-status	Energie-träger	zentral/ dezentral	Anzahl der Nutzungs-einheiten
1	Mehrfamilienhäuser und Geschoßwohnbauten (MFH/GWB)	Unsaniert	Gas	dezentral	306.000
2	Mehrfamilienhäuser und Geschoßwohnbauten (MFH/GWB)	Unsaniert	Gas	zentral	36.000
3	Mehrfamilienhäuser und Geschoßwohnbauten (MFH/GWB)	Unsaniert	Öl	zentral	31.000
4	Mehrfamilienhäuser und Geschoßwohnbauten (MFH/GWB)	Thermisch saniert/neu und unsaniert	Gas und Fernwärme	zentral und dezentral	79.000
5	Mehrfamilienhäuser und Geschoßwohnbauten (MFH/GWB)	Thermisch saniert/neu	Gas	zentral	22.000
6	Mehrfamilienhäuser und Geschoßwohnbauten (MFH/GWB)	Thermisch saniert/neu	Gas	dezentral	89.000
7	Ein- und Zweifamilienhaus (EFH/ZFH)	Unsaniert	Gas	zentral	36.000
8	Ein- und Zweifamilienhaus (EFH/ZFH)	Thermisch saniert/neu	Gas	zentral	6.000
9	Ein- und Zweifamilienhaus (EFH/ZFH)	Unsaniert	Öl	zentral	3.000
Summe					608.000

Abbildung 2. „Dekarbonisierungstypen“ des Wiener Wohnbaubestands, folgend der Einteilung von Wohnnutzungseinheiten nach thermisch-energetischen Gesichtspunkten. (vgl. Stadt Wien Magistratsabteilung 20 2023)

Eine *dezentrale* Organisation des Energiesystems bedeutet, dass die technische(n) Anlage(n) zur Wärme- bzw. Kältebereitstellung sich direkt in den Nutzungseinheiten befinden. Bei einer *zentralen* Organisation des Energiesystems erfolgt die Wärme- bzw. Kältebereitstellung für mehrere oder alle Nutzungseinheiten eines Gebäudes durch eine gemeinschaftlich genutzte technische Anlage. Mischformen sind hier möglich, beispielsweise, wenn in einem an das Fernwärmenetz angeschlossenes Gebäude einzelne Nutzungseinheiten mit dezentralen Gasheizgeräten bestehen bleiben, weil sich einzelne Bewohner*innen gegen einen Anschluss an die Fernwärme entschieden haben (siehe „Dekarbonisierungstyp 4“). (vgl. Stadt Wien Magistratsabteilung 20 2023)

Nach der so vorgenommenen Kategorisierung ist der sog. „Dekarbonisierungstyp 1“, definiert als unsaniertes Mehrfamilienhaus (MFH) bzw. unsanierter Geschoßwohnbau (GWB) mit Gas als Energieträger und dezentraler Organisation des Energiesystems mit ca. 306.000 Nutzungseinheiten mit Abstand am häufigsten

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Masterarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

vertreten. Die folgenden Ausführungen zum Stand der Technik thermisch-energetischer Sanierungen bzw. zur methodischen Vorgangsweise der vorliegenden Arbeit werden sich im Wesentlichen auf den „Dekarbonisierungstyp 1“ als typischen Vertreter des Wiener Wohngebäudebestands beziehen. (vgl. Stadt Wien - Magistratsabteilung 20, 2023)

2.2 Thermische Sanierungsmaßnahmen zur passiven Gebäudekühlung

Thermische Sanierungsmaßahmen wie die Dämmung der Gebäudehüllflächen, den Tausch der Bestandsfenster oder die Herstellung von Sonnenschutz können den Energiebedarf für Heizung und aktive Kühlung signifikant senken. Es ist also bei jeder beabsichtigten Nutzung von aktiver Gebäudekühlung im Zuge von energetischen Sanierungsmaßnahmen abzuwägen, ob zusätzlich eine thermische Sanierung des Gebäudes hinsichtlich einer Steigerung der Gesamtenergieeffizienz vorgenommen werden sollte. Synergien können sich hier durch die Realisierung eines integrierten Energiesystems für Raumwärme-, Warmwasser- und Kältebereitstellung ergeben, da eine Reduktion der Vorlauftemperatur durch thermische Sanierung insbesondere beim Einsatz von Niedertemperatur-Heizsystemen erforderlich sein kann. (vgl. Giebeler et al. 2012; vgl. Richarz/Schulz 2013; vgl. Rathmanner/Schmiderer 2016)

2.2.1 Dämmung der Gebäudehülle

Durch die Dämmung verschiedener Bauteile der Gebäudehülle kann der Heiz- und Kühlenergiebedarf erheblich gesenkt werden, was sowohl den Wohnkomfort als auch die Wirtschaftlichkeit der eingesetzten Energiesysteme verbessern kann. (vgl. Richarz/Schulz 2013; vgl. Rathmanner/Schmiderer 2016)

Die Dämmung der Außenwände kann den Energiebedarf für das Heizen und Kühlen um 20 bis 40% senken und den Wohnkomfort durch Erhöhung der inneren Oberflächentemperatur im Winter und deren Verringerung im Sommer erhöhen. Die gängigste Methode ist der Einsatz von Vollwärmeschutz, bei dem Dämmplatten auf die Außenseite der Wand geklebt oder gedübelt, dann armiert und verputzt werden. Alternativ kann eine hinterlüftete Fassade hergestellt werden, die vergleichsweise langlebig ist und sich für ökologische Dämmmaterialien eignet, aber i.d.R. höhere Investitionskosten verursacht. Wenn Maßnahmen an der Außenseite aus denkmalschützerischen Gründen nicht möglich sind, kann eine Innendämmung vorgenommen werden. Hierbei ist besonders auf die Vermeidung von Kondenswasserbildung im Wandaufbau zu achten. (vgl. Giebeler et al. 2012)

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Masterarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

Die Dämmung der untersten Geschoßdecke, insbesondere zwischen einem konditionierten Erdgeschoß und einem unbeheizten Keller, kann den Heizenergiebedarf im Winter um etwa 10 bis 20% reduzieren. Dies steigert den Wohnkomfort durch Erhöhung der Bodentemperatur und ermöglicht eine wirtschaftlichere Auslegung der Heizanlage. Die effizienteste Methode ist die Anbringung der Dämmung an der Unterseite der Geschoßdecke (die sog. Unterdeckendämmung), wobei Dämmplatten an die Decke gedübelt werden. Alternativ kann die Dämmung auf der Geschoßdecke und unter dem Fußbodenaufbau erfolgen, was jedoch aufwändige Eingriffe und ein höheres Risiko für bauliche Mängel mit sich bringt. (vgl. Giebeler et al. 2012)

Die Dämmung der obersten Geschoßdecke oder des Daches kann den Heiz- und Kühlenergiebedarf um 10 bis 20% senken und zu einer verbesserten Deckentemperatur im Winter und Sommer führen. Aus bautechnischer bzw. bauphysikalischer Perspektive ist die Wärmedämmung der obersten Geschoßdecke unter einem unkonditionierten Dachboden die vorteilhafteste Methode. Alternativ kann die Dämmung an der Innenseite des Daches angebracht werden, was besonders bei einem Umbau des Dachgeschosses in konditionierten Wohnraum geeignet ist. Beide Methoden sind vergleichsweise kostengünstig und mit geringem Arbeitsaufwand umzusetzen. Wichtig ist die Beachtung des Brandschutzes, die Vermeidung von Wärmebrücken und die Sicherstellung der Begehbarkeit der obersten Geschoßdecke. Bei einer Innendämmung des Daches muss zudem auf ausreichenden Feuchteschutz geachtet werden. (vgl. Giebeler et al. 2012; vgl. Rathmanner/Schmiderer 2016)

2.2.2 Sanierung oder Tausch der Fenster

Der Austausch von Bestandsfenstern durch mit Zwei- oder Dreischeiben-Wärmeschutzverglasung ist eine verbreitete Maßnahme zur Steigerung der Energieeffizienz von Gebäuden, die den Energiebedarf um 10 bis 20% senken kann. Der Fenstertausch bzw. die Fenstersanierung erfordert temporäre Eingriffe in die Wohnbereiche, was eine Beeinträchtigung der Wohnqualität für mehrere Tage mit sich bringt. Die Bestandsfenster werden demontiert und entsorgt und neue Fenster eingebaut. Bei baukulturell wertvollen historischen Rahmenkonstruktionen, in Wien i.d.R. bei historischen Kastenfenstern, kann alternativ nur die Verglasung ausgetauscht werden, um den Rahmen zu erhalten. Bei der Fenstersanierung ist also

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Masterarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

anstelle der Demontage des Bestandsfensters der bestehende Rahmen zu ertüchtigen und die Verglasung zu erneuern. (vgl. Giebeler et al. 2012)

Bei der Durchführung ohne gleichzeitige Vornahme einer Außenwanddämmung ist ein besonderes Augenmerk auf die Vermeidung von Wärmebrücken und auf die Sicherstellung eines ausreichenden Luftwechsels zur Vermeidung von Schimmelbildung zu legen. Dies kann nach dem Einbau u.a. durch regelmäßiges Stoßlüften im Winter erreicht werden, darüber hinaus können eine Reihe von technischen Lüftungssystemen für das Gebäude bzw. die Wohneinheit angedacht werden. (vgl. Giebeler et al. 2012)

2.2.3 Sonnenschutz

Außen angebrachte Verschattungssysteme, wie Jalousien, Raffstores, Markisen und Rollläden, bieten eine effektive Lösung zur Reduzierung solarer Wärmeeinträge, indem sie die direkte Sonneneinstrahlung bereits vor dem Eintritt ins Gebäude blockieren. Diese Systeme können die solaren Wärmeeinträge um bis zu 80% verringern und somit den Bedarf an aktiver Kühlung signifikant reduzieren. Darüber hinaus verbessern sie den thermischen Komfort im Sommer. Verstellbare Systeme erlauben zusätzlich eine Anpassung der Lichtverhältnisse und können die Sicht nach außen variabel gestalten. Die Installation außenliegender Systeme erfordert Arbeiten an der Fassade und gegebenenfalls im Innenraum für die Montage von Steuereinheiten. Besondere Aufmerksamkeit erfordert die Windsicherheit dieser Systeme, wobei Lösungen wie schienengeführte Systeme oder Windwächter zum Einsatz kommen. In historischen Stadtbereichen müssen solche Systeme sorgfältig ausgewählt werden, um das Stadtbild nicht zu beeinträchtigen und somit eine Genehmigung seitens der zuständigen Behörde möglich zu machen, wobei Markisen mit kleinem Verkleidungskasten oft eine geeignete Option darstellen. Fest installierte Elemente wie Balkone oder außenliegende Lamellen bieten ähnliche Vorteile, deren Errichtung jedoch i.d.R. wesentlich aufwendiger und kostenintensiver ausfällt. (vgl. Giebeler et al. 2012; vgl. Treberspurg et al. 2017)

Innenliegende Verschattungssysteme, wie Rollos und Vorhänge bieten Blendschutz und schirmen direkte Sonneneinstrahlung ab, sind allerdings in ihrer Effektivität zur Reduktion des solaren Wärmeeintrags auf etwa 20% beschränkt. Sie sind kostengünstiger und einfacher zu installieren als außenliegende Systeme, erfordern keine baulichen Veränderungen an der Fassade und unterliegen keiner behördlichen Genehmigungspflicht. (vgl. Giebeler et al. 2012; vgl. Treberspurg et al. 2017)

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Masterarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

2.3 Energetische Sanierungsmaßnahmen zur aktiven Gebäudekühlung

Energetische Sanierungsmaßnahmen zur aktiven Gebäudekühlung im urbanen Wiener Bestand betreffen den nachträglichen Einbau bzw. die Errichtung von Kälteversorgungsanlagen, die der Innenraumluft Wärme durch thermodynamische Prozesse entziehen. Dadurch kann eine Reduktion der Innenraumlufttemperatur bewirkt, Übertemperaturen verhindert bzw. die Sommertauglichkeit in Innenräumen erreicht werden, sowie ggf. die Innenraumluft entfeuchtet werden. (vgl. Bohne 2022: 285 f; vgl. Holzer et al. 2022; vgl. ÖNORM EN 378-1: 2021-06) Darüber hinaus sind in Abhängigkeit von der errichteten Kälteversorgungsanlage bauliche und anlagentechnische Maßnahmen für eine wirksame Kälteverteilung und -abgabe durchzuführen.

Eine vereinfachte Einteilung von für den Wiener Wohnbaubestand relevanten Kälteversorgungsanlagen kann nach ihrem zugrundeliegenden thermodynamischen Verfahren wie folgt vorgenommen werden: (1) Kühlung unter Verwendung des Kompressionsverfahrens, (2) Kühlung unter Verwendung des Sorptionsverfahrens, (3) Kühlung mit natürlicher Wärmesenke. (vgl. Holzer et al. 2022; vgl. Bohne 2022)

Auf Kälteversorgungsanlagen, die auf Verdunstungskühlung bzw. adiabatischer Kühlung beruhen, wird im Rahmen dieser Arbeit nicht im Detail eingegangen, da ihre Effizienz sowie die erzielbaren Kälteleistungen unter den durchschnittlichen klimatischen Bedingungen in Mitteleuropa begrenzt sind. Diese Systeme nutzen die Verdunstungskälte von Luft und Wasser, um einen Kühlungseffekt zu erzielen und sind daher für einen effektiven Betrieb auf vergleichsweise warme, trockene Luft mit einer hohen spezifischen Feuchtekapazität angewiesen. (vgl. Holzer et al. 2022; vgl. Bohne 2022: 624) Sie werden daher i.d.R. in trockenen, heißen Klimazonen mit geringer Luftfeuchtigkeit angewandt. (vgl. Holzer et al. 2022) Eine Sonderform stellen hier raumlufttechnische Anlagen (RLT-Anlagen) unter Verwendung der indirekten Verdunstungskühlung dar. Die Abluft der RLT-Anlage wird bis zur Sättigung der Luft mit Wasser besprüht und damit gekühlt. Über einen Wärmetauscher, der ggf. bereits zur Wärmerückgewinnung in der RLT-Anlage verbaut ist, wird die Kälte der Abluft an die Zuluft übertragen. Das verhindert eine Erhöhung der Feuchtigkeit in den belüfteten Innenräumen, was die indirekte Verdunstungskühlung im begrenzten Ausmaß für mitteleuropäische klimatische Bedingungen anwendbar macht. Wegen der begrenzten Effektivität und dem vergleichsweise hohen Wasserbedarf ist dieses Verfahren im Wiener Kontext jedoch nur im bivalenten Betrieb bzw. in Kombination

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Masterarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

mit anderen Technologien zur Gebäudekühlung zu empfehlen. (vgl. Bohne 2022: 623)

2.3.1 Kühlung unter Verwendung des Kompressionsverfahrens

Diese Kategorie umfasst Systeme, die den sog. Kompressionskältekreislauf nutzen, um der Innenraumluft Wärme zu entziehen. Ein Kältemittel (das sog. Arbeitsmedium) fließt zyklisch in einem geschlossenen Kreislauf durch einen Kompressor (Verdichter), einen Kondensator (Verflüssiger), ein Expansionsventil und einen Verdampfer und vollzieht dabei mehrere Zustandsänderungen, ausgelöst durch Änderungen von Größen wie Druck, Temperatur oder Volumen. Der Ablauf des Kompressionskreislaufs vollzieht sich wie folgt (vgl. Dehli 2021; vgl. Holzer et al. 2022; vgl. Bohne 2022):

(1) Das unter niedrigem Druck stehende Kältemittel befindet sich im leicht überhitzten Dampfzustand und wird von dem Kompressor je nach Anlagentyp auf 12 bis 22 bar komprimiert. I.d.R. wird der Kompressor durch einen mit Strom betriebenen Elektromotor mit der elektrischen Leistung P_{el} (in Vollastbetrieb) angetrieben. Durch diese Verdichtung werden die Temperatur und der Kondensationspunkt des Kältemittels erhöht, um im nächsten Schritt eine effektive Wärmeabgabe an die Wärmsenke möglich zu machen.

(2) Das nun unter hohem Druck stehende, überhitzte Kältemittel im Dampfzustand wird in den Kondensator geleitet, wo es zuerst auf den gesättigten Dampfzustand unter Abgabe von sensibler Wärme abkühlt, wobei die Temperaturdifferenz zwischen überhitztem Kältemittel und dem wesentlich kälteren, den Kondensator umgebenden Medium (i.d.R. Luft oder Wasser), der Wärmesenke, die Wärmeabgabe an das umgebende Medium bedingt. Durch die Abkühlung des Kältemittels wird der Kondensationspunkt erreicht, damit kondensiert das Kältemittel auf hohem Temperaturniveau infolge des hohen Drucks, unter Freisetzung von latenter Wärme an die Wärmesenke.

(3) Nun passiert das nun flüssige Kältemittel ein Expansionsventil und wird so auf niedrigen Druck gedrosselt, wodurch ein Gemisch aus flüssigem und dampfförmigen Kältemittel entsteht. Durch den Druckabfall werden die Temperatur und der Siedepunkt des Kältemittels ebenfalls verringert, um im nächsten Schritt eine effektive Wärmeabgabe an das Kältemittel möglich zu machen.

(4) In der Folge gelangt das Kältemittel in den großräumigen Verdampfer, wobei die Kältemitteltemperatur nun jedenfalls unter der Temperatur des den Verdampfer

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Masterarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

umgebenden Mediums (i.d.R. Luft oder Wasser) liegt. Durch diese Temperaturdifferenz kommt es nun zu einer Übertragung von sensibler Wärme von dem umgebenden Medium, der Wärmequelle, an das Kältemittel. Die Temperatur des Kältemittels steigt und erreicht den Siedepunkt auf niedrigem Temperaturniveau infolge des niedrigen Drucks. Das Kältemittel verdampft unter Entzug von latenter Wärme aus der Wärmequelle. Im Verdampfer stellt die auf das Kältemittel übertragene Wärmeleistung den Kühlungseffekt dar und wird als die Kälteleistung des Verdampfers $\dot{Q}_0$ bezeichnet. Das Kältemittel befindet sich nun wiederum im leicht überhitzten Dampfzustand, steht unter niedrigem Druck und gelangt im nächsten Zyklus wieder in den Kompressor.

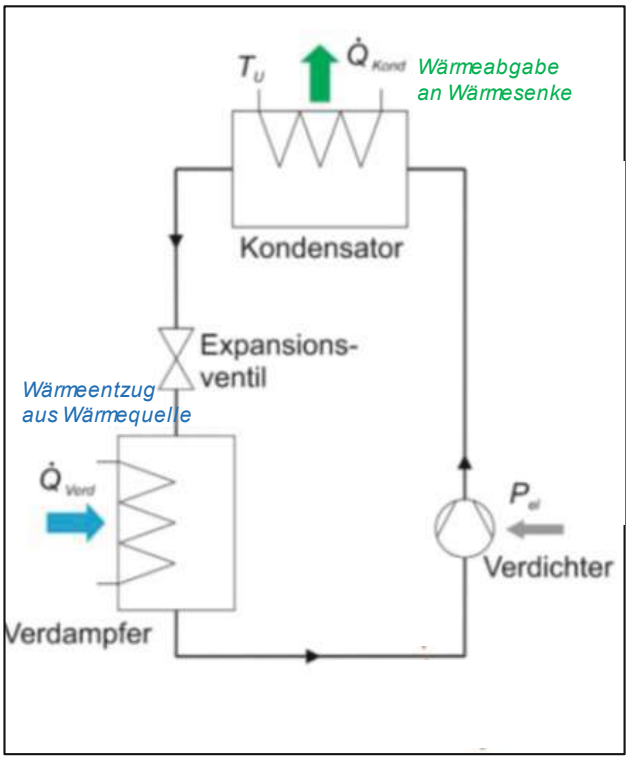

Abbildung 3. Schema des Kompressionskältemittelkreislaufs. (vgl. BauNetz 2023a)

Die Performance einer Kälteversorgungsanlage unter Verwendung des Kompressionsverfahrens stellt das Verhältnis zwischen Nutzen und Aufwand dar und kann über die Auslegungsbedingungen in Volllast durch die Kälteleistungszahl ε_K bzw. den Energy Efficiency Ratio EER beschrieben werden. Eine weitere gängige Bezeichnung ist der sog. Coefficient of Performance COP.

Die Leistungszahl der Anlage bei Volllast ist wie folgt definiert

$$COP = EER = \varepsilon_K = \frac{\dot{Q}_0}{P_{el}}$$

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Masterarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

wobei P_{el} $[kW]$ die Nennleistung des Kompressors bezeichnet und $\dot{Q}_0$ $[kW]$ die Wärmeentzugsleistung des Verdampfers. (vgl. Holzer et al. 2022; vgl. Kulterer et al. 2013) Der COP wird maßgeblich von der Temperatur der Wärmequelle am Verdampfer und der Temperatur der Wärmesenke am Kondensator beeinflusst. Im Allgemeinen liegt der COP häufig bei einem Wert von ungefähr 3. Dies bedeutet, dass das System für jede verbrauchte Einheit an zugeführter Energie etwa drei Einheiten Energie bereitstellen kann. (vgl. Holzer et al. 2022)

Die Umweltauswirkungen von Kälteversorgungsanlagen unter Verwendung des Kompressionsverfahrens sind einerseits bedingt durch die Treibhausgasemissionen der verwendeten Antriebsenergie für mechanische Komponenten (Kompressor, Ventilator, …), andererseits von dem Treibhauspotenzial (GWP) des verwendeten Kältemittels abhängig. In Europa werden häufig teilhalogenierte Fluorkohlenwasserstoffe (HFKW), wie R134a, R404a und R410a verwendet, welche einen hohen GWP-Wert aufweisen (siehe Tab. 1.) und somit im Falle von Leckagen oder unsachgemäßer Entsorgung erhebliche Umweltauswirkungen verursachen können.

Kältemittel	**Stoffklasse**	**Ozonabbaupotenzial (ODP) R11 = 1**	**Treibhauspotenzial (GWP 100a) CO_2 = 1**	**Siedepunkt [°C]**	**Ersatz für**
R12	HFCKW	1	11547	-30	
R22	HFCKW	0,055	1700	-41	
R134a	HFKW	0	1300	-26	R12
R404a	HFKW, gem.	0	3780	-47	R22
R407c	HFKW, gem.	0	1774	-44	R22
R410a	HFKW, gem.	0	1980	-51	R22
R290	KW Propan	0	3	-42	R22
R717	Ammoniak anorganisch	0	0	-33	R22
R744	CO_2	0	1	-57	div.

Tabelle 1. Kenndaten ausgewählter Kältemittel. Die Kältemittel R12 und R22 wurden wegen ihres Ozonabbaupotential über das Montreal-Protokoll ab dem Jahr 1987 verboten (vgl. Rust 2023)

In der chemischen Industrie wurden alternative synthetische Kältemittel entwickelt, die ein vergleichsweise geringes Treibhauspotential aufweisen, beispielsweise Hydrofluorolefine (HFOs), die meist ersatzmäßig in bestehende Systeme eingebracht werden können. Darüber hinaus werden derzeit verstärkt natürliche Kältemittel eingesetzt, wobei diese umweltfreundlichen Alternativen eine Reihe von Nachteilen aufweisen, beispielsweise in Bezug auf hohe Betriebsdrücke bei Kohlendioxid (CO_2),

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Masterarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

Entflammbarkeit bei Kohlenwasserstoffen (KW) und Toxizität bei anorganischem Ammoniak. (vgl. Holzer et al. 2022: 153)

2.3.1.1 Kompressionskältemaschinen (KKM)

Kompressionskältemaschinen entziehen dem Innenraum Wärme und geben diese an ein geeignetes Umgebungsmedium wieder ab. Sie werden in unterschiedlichen Bauarten ausgeführt und können in raumlufttechnische Anlagen (RLT-Anlagen) integriert werden (vgl. Bohne 2022). Es wird zwischen direkter und indirekter Kühlung unterschieden (Bohne 2022: 288; vgl. ÖNORM EN 378-1: 2021-06).

Direkte Kühlung bezeichnet die Verwendung dezentraler Anlagen, die Aufputz an der Wand, an der Brüstung oder in die Deckenkonstruktion integriert platziert werden und bei denen der Verdampfer eine Wärmeübertragung direkt mit dem abzukühlenden Medium (i.d.R. die Innenraumluft) vornimmt. Bei einem sog. „Split-Klimagerät“ zur direkten Kühlung ist der Kondensator, zusammen mit dem Kompressor und Expansionsventil im Außengerät des Gebäudes angeordnet, wobei Ventilatoren die Abgabe von Wärme an die Umgebung zusätzlich unterstützen. Im Innengerät ist der Verdampfer sowie ein Filter, ein Gebläse und die elektronische Steuerung verbaut. Wird der Betrieb der Kälteversorgungsanlage gestartet, strömt das Kältemittel durch Kupferrohre vom Außengerät zu den Innengeräten. Bei einem „Multi-Split-Klimagerät“ werden mehrere Innengeräte mit einem Außengerät verbunden (Bohne 2022: 288; vgl. ÖNORM EN 378-1: 2021-06). Eine nachteilige Umweltauswirkung von direkten Systemen ist die Abgabe von Abwärme an die unmittelbare Umgebung des Außengeräts, was in dichten urbanen Agglomerationen zu einer Verstärkung des UHI-Effekts führen kann (vgl. Stadt Wien - Magistratsabteilung 23 2023).

Bei der indirekten Kühlung wird ein geeignetes Fluid wie Wasser oder Sole (i.d.R. ein frostfreies Wasser-Glykol-Gemisch) in einer zentralen Kälteversorgungsanlage abgekühlt, einem sekundären Kreislauf an das Verteilnetz des Gebäudes übergeben und so mittels Umwälzpumpe an verschiedene Kälteabgabesysteme (Kühldecken, flächige Abgabesysteme im Fußboden, Umluftkonvektoren bzw. Fan-Coil-Geräte, …) transportiert. Übliche Vorlauftemperaturen im Verteilnetz des Gebäudes sind 6 °C, übliche Rücklauftemperaturen liegen bei 10 bis 12 °C. Häufig sind alle für den Kompressionskältekreislauf notwendigen technischen Komponenten werkseitig in einem betriebsfertig mit Kältemittel befülltem Außengerät verbaut (u.a. bezeichnet als Kältesatz bzw. engl. *chiller)*, welches oft am Dach des Gebäudes aufgestellt wird. Auch eine Konfiguration ist möglich, bei der der Kältesatz vollständig im Inneren des

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Masterarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

Gebäudes angeordnet ist, wobei dessen Kondensator einen sekundären Kühlwasserkreiskauf als Wärmesenke nutzt, der wiederum mit einem Rückkühler an der Gebäudeaußenseite verbunden ist, welcher letztendlich die Abgabe von Wärme an die Umgebung vornimmt. Im Vergleich zur direkten Kühlung ist die Effizienz der indirekten Kühlung allerdings durch die benötigte Antriebsenergie für die Umwälzpumpe gemindert. (vgl. Holzer et al. 2022: 145; Bohne 2022: 288)

Eine Besonderheit indirekter Kühlsysteme ist die Möglichkeit, die sog. freie Kühlung (engl. *free cooling*) anzuwenden (vgl. *Kapitel 2.3.3*): falls die Temperatur der durch den Kompressionskältekreislauf verwendeten Wärmesenke gering genug ist und im Bereich der gewünschten Vorlauftemperatur des Kälteverteilnetzes liegt, wird ein Umschaltventil betätigt, welches Wasser bzw. die Sole aus dem Kälteverteilnetz des Gebäudes durch den Rückkühler leitet, wodurch dem Fluid Wärme entzogen wird und es somit mit einem Minimum an Antriebsenergie (i.d.R. wird hier nur die Umwälzpumpe betrieben) gekühlt wird. Moderne Anlagen sind meist mit automatisierter Steuerung ausgestattet, die basierend auf den Temperaturschwankungen der Wärmesenke zwischen *free cooling* und dem Betrieb der Kompressionskältemaschine umschalten. (vgl. Holzer et al. 2022: 145; Bohne 2022: 288)

2.3.1.2 Wärmepumpen im reversiblen Betrieb

Wärmepumpen sind technische Anlagen, die das Kompressionsverfahren nutzen, um Wärme aus regenerativen Umweltquellen, d.h. aus der Luft, dem Erdreich oder einem Wasserkörper, auf einem niedrigen Temperaturniveau zu entziehen. Diese Wärme wird mittels des Kompressionskältekreislaufs und unter Einsatz elektrischer Energie auf ein höheres Temperaturniveau gebracht, wodurch sie für eine Gebäudekonditionierung nutzbar gemacht wird. Die Temperaturdifferenz zwischen der Temperatur der Umweltquelle und dem gewünschten Temperaturniveau zur Gebäudekonditionierung bzw. Warmwasserbereitstellung (bzw. der dafür benötigten Vorlauftemperatur im Heizwasserkreis) haben einen erheblichen Einfluss auf die Effizienz der Wärmepumpenanlage. Folgend dem Carnot'schen Gesetz, wonach die Leistungsfähigkeit thermodynamischer Anlagen bei abnehmender Temperaturdifferenz zwischen Wärmequelle und -senke steigt, ist die Effizienz der Anlage bzw. der COP höher , wenn die Temperaturen der Wärmequelle möglichst hoch sind und die und im Zuge der Heizungsauslegung festgelegten Vorlauftemperaturen möglichst gering. (vgl. Dehli 2021; Bohne 2022: 257)

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Masterarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

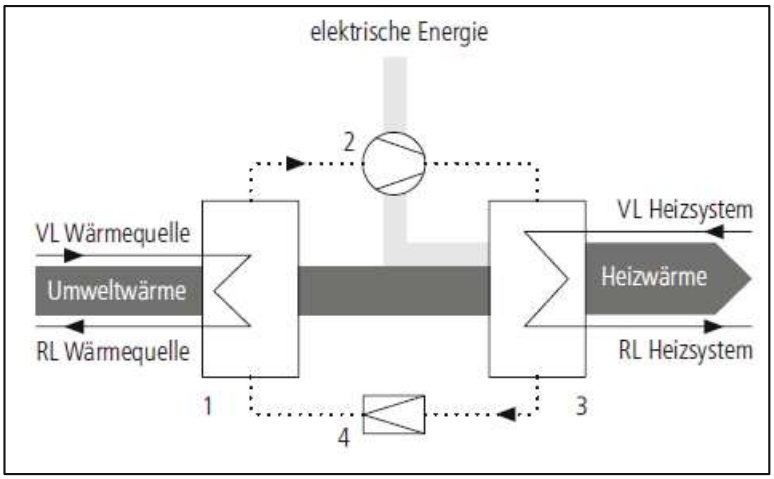

Abbildung 4. Schematische Darstellung der Funktionsweise einer Wärmepumpe für Heizzwecke unter Verwendung des Kompressionsverfahrens und mit elektrischem Antrieb. (1) Verdampfer, (2) Kompressor mit Elektromotor, (3) Kondensator, (4) Expansionsventil. Vorlauf (VL) und Rücklauf (RL) der sekundären Kreisläufe sind dargestellt. (vgl. Bohne 2022)

Im reversiblen Betrieb arbeiten Wärmepumpen nach demselben Prinzip wie Kompressionskältemaschinen: Sie entziehen Wärme aus einer Quelle im Inneren des Gebäudes, wie der Innenraumluft oder einem Verteilnetzfluid, und geben diese anschließend an die Außenumgebung ab. Die zentrale Komponente für die Reversibilität von Wärmepumpen ist ein 4-Wege-Ventil, welches den Kältemittelfluss und somit die Funktionsrichtung des Kompressionskreislaufs umkehren kann. Je nach Bedarf kann also über das Steuerungssystem der Wärmepumpe zwischen Heizbetrieb und Kühlbetrieb umgeschaltet werden. Die beiden Wärmetauscher (Kondensator und Verdampfer) wechseln dann jeweils ihre Funktionsweise von Wärmeentzug bzw. Wärmeabgabe. (vgl. Holzer et al. 2022: 152; Bohne 2022: 256)

Wärmequelle	**Wärmeträger Wärmequelle** ***(reversibler Betrieb: Wärmesenke)***	**Wärmeträger Wärmesenke** ***(reversibler Betrieb: Wärmequelle)***	**Benennung der Wärmepumpe (WP)**
Luft	Luft	Luft	Luft-Luft-WP
Luft	Luft	Wasser	Luft-Wasser-WP
Erdreich	Sole	Luft	Sole-Luft-WP
Erdreich	Sole	Wasser	Sole-Wasser-WP
Wasser	Wasser	Luft	Wasser-Luft-WP
Wasser	Wasser	Wasser	Wasser-Wasser-WP

Tab. 2. Wärmepumpen können auf Basis der herangezogenen Wärmeträger an der Wärmequelle- bzw. senke kategorisiert werden. (vgl. Bohne 2022)

Analog zu Kompressionskältemaschinen (siehe *Kapitel 2.3.1.1*) kann die Verteilung bzw. Abgabe der Kälte im Gebäude direkt oder indirekt erfolgen. Eine direkte Verteilung erfolgt i.d.R. über das Innengerät von Wärmepumpen in Split-Bauweise

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Masterarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

oder luftführende Verteilnetze an die Innenräume (dezentrale Luft-Luft-Wärmepumpen, Sole-Luft-Wärmepumpen oder Wasser-Luft-Wärmepumpen). Eine indirekte Kälteverteilung und -abgabe erfolgt meist über ein sekundäres Fluid in einem geschlossenen Kreislauf (Luft-Wasser-Wärmepumpen, Sole-Wasser-Wärmepumpen oder Wasser-Wasser-Wärmepumpen), welches die Kälte an geeignete Abgabesysteme wie Kühldecken, Fußbodenabgabesysteme oder Fan-Coil-Geräte weiterleitet.

Luftwärmepumpen im reversiblen Betrieb entziehen der Innenluft Wärme und geben diese an eine geeignete Wärmesenke (i.d.R. Luft oder Wasser) ab. Luft ist als Energiequelle an beinahe jedem Standort in ausreichender Weise vorhanden. Die Wärmekapazität der Luft ist aufgrund ihrer geringen Dichte allerdings vergleichsweise niedrig, sodass zusätzlich größere Luftmengen durch Ventilatoren bewegt werden müssen, um effektiv zu kühlen. Dies kann die benötigte elektrische Antriebsenergie der Anlage erhöhen und somit die Gesamteffizienz der Luftwärmepumpe, im Vergleich zu Wärmepumpentechnologien, die andere Umweltquellen bzw. -senken nutzen, verringern. Typische Bauweisen von Luftwärmepumpen umfassen Split-Systeme, bei denen die Komponenten auf Außen- und Inneneinheiten verteilt sind, sowie Monoblock-Systeme, bei denen alle technischen Komponenten in einer Außeneinheit verbaut sind. Luftwärmepumpen werden für Heizungszwecke oft im bivalenten Modus betrieben, d.h. dass der Heizbedarf für Raumwärme und Warmwasser nicht vollständig von der Luftwärmepumpe gedeckt wird, sondern etwaig auftretende Spitzenlasten von einem zusätzlichen Heizsystem gedeckt werden (beispielsweise Warmwasserbereitstellung unter Verwendung von solaren Power-To-Heat Technologien). Die bivalente Betriebsweise ist für Kühlzwecke insbesondere im Wohnbau weniger verbreitet, da ein saisonaler, i.d.R. auf wenige Monate im Jahr beschränkter Kühlbedarf mit der Integration eines weiteren Kühlsystems und somit einer signifikanten Erhöhung der Komplexität des Energiesystems einhergehen würde. (vgl. Holzer et al. 2022: 152; Bohne 2022: 256)

Bei Erdwärmepumpen handelt es sich meist um Sole-Wasser-Wärmepumpen, die das Erdreich als Wärmequelle bzw. -senke nutzen. Die geringeren saisonalen Temperaturschwankungen des Erdreichs wirken sich positiv auf die Effizienz der Erdwärmepumpe aus, da mit zunehmender Tiefe die Temperatur des Erdreichs stabiler ist und sich langsamer an die Außenlufttemperaturen anpasst. D.h. in Spätherbst bzw. Frühwintermonaten, wo folgend dem Carnot'schen Gesetz für einen optimal effizienten Heizbetrieb möglichst hohe Temperaturen des Erdreichs

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Masterarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

gewünscht sind, ist das Erdreich (noch) nicht übermäßig abgekühlt, der Temperaturhub zur Vorlauftemperatur der Heizungsanlage somit geringer. Erdwärmepumpen im reversiblen Betrieb sind i.d.R. auf der Seite des Wärmeentzugs an das geschlossene Kälteverteilsystem des Gebäudes gekoppelt und auf der Seite der Wärmeabgabe an einen sekundären, frostfreien Solekreislauf gekoppelt, welcher wiederum mit der geothermischen Wärmesenke, dem Erdreich, über vertikal verlegte Erdsonden in i.d.R. 100 bis zu 150 Meter Tiefe verbunden ist. Horizontal verlegte, oberflächennahe Flächenkollektoren sind ebenfalls möglich, bringen jedoch einen hohen Fächenbedarf mit sich. Eine platzsparende Sonderform stellen sog. Erdwärmekörbe dar, bei denen die spiralförmig angeordneten Soleleitungen oberflächennah in das Erdreich eingegraben werden. Die Systeme können im sog. *free cooling*-Modus betrieben werden, wenn die Temperatur des Erdreichs im Bereich der gewünschten Vorlauftemperatur des Kälteverteilnetzes im Gebäude liegt, siehe *Kapitel 2.3.2*. (vgl. Holzer et al. 2022: 152; Bohne 2022: 256 f)

Grundwasserwärmepumpen im reversiblen Betrieb sind meist als Wasser-Wasser-Wärmepumpen ausgeführt und nutzen einen Grundwasserkörper als Wärmesenke. Es wird ein Saugbrunnen für die Grundwasserentnahme und ein Schluckbrunnen für die Grundwasserrückführung angelegt. Bei hinreichender Förderleistung des Saugbrunnens ist die Effizienz der Anlage ideal, da Grundwasserkörper i.d.R. ab ca. 10 Meter Tiefe eine übers Jahr konstante Temperatur aufweisen, im Wiener Raum ca. 10 bis 12 °C. Über einen primären Kreislauf wird das Grundwasser zur Wärmepumpe befördert, wo dem sekundären, geschlossenen Kälteverteilsystem des Gebäudes Wärme entzogen wird und das gekühlte Wasser an geeignete Kälteabgabesysteme befördert wird. Der primäre Kreislauf gibt in der Folge die im Kältekompressionskreislauf entzogene Wärme an den Schluckbrunnen und somit an das Grundwasser ab. Analog zu Systemen mit Erdwärmenutzung können Systeme mit Grundwasserwärmenutzung im *free cooling*-Modus betrieben werden, wenn die Temperatur des Grundwassers im Bereich der gewünschten Vorlauftemperatur des Kälteverteilnetzes im Gebäude liegt, siehe *Kapitel 2.3.2*. (vgl. Holzer et al. 2022: 152; Bohne 2022: 256 ff)

Bei jeder für Gebäudekühlung herangezogenen geothermischen Wärmequelle- bzw. senke ist insbesondere auf eine ausreichende Regeneration des Erdreichs bzw. des Grundwassers im Sinne einer Minimierung negativer Umweltauswirkungen und einer optimalen Auslegung des Heiz- bzw. Kühlsystems zu achten. Dies wird als saisonal ausgeglichene Betriebsweise bezeichnet und setzt voraus, dass die dem Erdreich

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Masterarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

bzw. Grundwasser im Winter für Heizwecke entzogene Wärme im Sommer durch Gebäudekühlung, Solarthermie oder anderen Flächenkollektoren wieder rückgeführt wird. Bei erdgekoppelten Systemen ist eine saisonal ausgeglichene Betriebsweise kritischer als bei Systemen mit Grundwassernutzung, da Grundwasserkörper i.d.R. durch eine höhere thermische Masse und Wärmekapazität weniger anfällig für Temperaturschwankungen durch Wärmepumpennutzung sind. In Gebieten mit geringer Grundwassererneuerung bzw. bei intensiver Grundwassernutzung durch mehrere unmittelbar benachbarte Anlagen kann es dennoch zu einer signifikanten Temperaturänderung des Grundwassers kommen. (vgl. Holzer et al. 2022: 152 f; Bohne 2022: 256 f)

2.3.2 Kühlung mit natürlicher Wärmesenke (*free cooling*)

Diese Kategorie umfasst passive bzw. semi-passive Kühlsysteme, die natürliche Ressourcen zur Kühlung nutzen, indem über ein geeignetes thermisches Transfermedium die den Innenräumen entzogene Wärme an eine natürliche Wärmesenke am Standort, i.d.R. dem Erdreich, dem Grundwasser oder einem Oberflächengewässer, abgegeben wird. Die Temperatur der Wärmesenke muss während der Kühlperiode im Bereich der gewünschten Vorlauftemperatur des thermischen Transfermediums liegen und jedenfalls niedriger als die Innenlufttemperatur sein. Je niedriger die Temperatur der Wärmesenke, desto höher ist das Potential für Gebäudekühlung. Es findet kein aktiver Betrieb einer Kältemaschine statt, was den Betriebsenergiebedarf, die Effizienz und die Umweltauswirkungen derartiger Anlagen i.d.R. äußert günstig ausfallen lässt. Im Folgenden werden Systeme beschrieben, die unter Heranziehung eines flüssigen Transfermediums Wärme entziehen. Es kann auch Luft als Transfermedium verwendet werden, wobei derartige Anlagen einen hohen Flächenbedarf für die Verlegung von horizontalen, oberflächennahen Luftführungssystemen aufweisen und deswegen für die dicht bebaute Bestandsstadt nur bedingt geeignet sind. (vgl. Bohne 2022: 289 f; vgl. Holzer et al. 2022: 168 f)

2.3.2.1 Free cooling – Wärmesenke Erdreich

Die Einbringung von vertikalen Erdwärmesonden in das Erdreich und Verlegung eines durch die Erdsonden geleiteten Solekreislaufs stellt eine in hohen Maße effektive Variante der geothermischen Kühlung mit natürlicher Wärmesenke dar, da die Effizienz aufgrund der relativ konstanten Temperatur des tieferliegenden Erdreichs hoch und der Flächenbedarf der Erdsondenbohrungen im Vergleich zu

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Masterarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

oberflächennahen Flächenkollektoren gering ist. Meist wird eine reversible Sole-Wasser-Wärmepumpe mit dem Solekreislauf über einen Zwischenwärmetauscher gekoppelt. Bei geeigneter Temperatur der Wärmesenke kann durch Abschalten des Kältekompressionskreislaufs der Wärmepumpe der *free-cooling*-Betrieb eingeleitet werden. Die den Innenräumen entzogene Wärme kann nun über einen Bypass an der Wärmepumpe vorbei und zum Zwischenwärmetauscher geleitet werden, wo die thermische Energie an dem Solekreislauf und in weiterer Folge ans Erdreich abgegeben wird. Im *free-cooling*-Betrieb wird lediglich Antriebsenergie für die Umwälzpumpen dem System zugeführt. Daraus können sich äußert günstige COPs von ca. 13 bis 25 ergeben, in Abhängigkeit von der Dimensionierung der Erdwärmesonden, der Wärmeleitfähigkeit des Bodens und gebäudebezogenen Anforderungen bzw. Rahmenbedingungen. (vgl. Bohne 2022: 289 f; vgl. Holzer et al. 2022: 168 f)

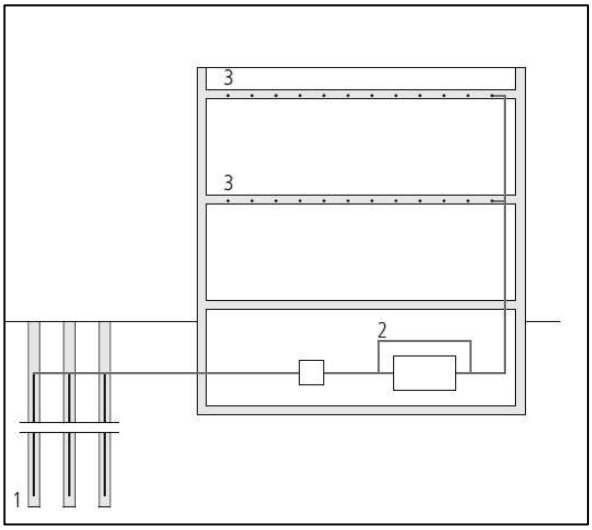

Abb. 5. Geothermische Innenraumkühlung in Verbindung mit Erdwärmesonden (1), einer reversiblen Sole-Wasser-Wärmepumpe mit Bypass (2) zur Umschaltung in den *free-cooling* Betrieb und flächigem Kälteabgabesystem (3). (vgl. Bohne 2022)

2.3.2.2 Free cooling – Wärmesenke Wasserkörper

Diese Systeme nutzen das Grundwasser im Erdreich oder einen Oberflächenwasserkörper als Wärmesenke, wobei kühles Wasser über ein Rohrsystem zum Gebäude geführt wird, wo es i.d.R. über einen Wärmetauscher thermische Energie mit dem Kälteverteilnetz des Gebäudes austauscht und sodann wieder ins Erdreich oder Gewässer zurückgeleitet wird. Sollten ausreichend (Fließ-) Wasserressourcen in der näheren Umgebung des Gebäudes vorzufinden sein, kann diese Methode der Gebäudekühlung besonders geeignet sein. Analog zum *free cooling* in Verbindung mit dem Erdreich als Wärmesenke wird meist eine reversible Wasser-Wasser-Wärmepumpe mit dem primären Wasserkreislauf über einen

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Masterarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

Zwischenwärmetauscher gekoppelt, wobei durch Deaktivierung des Kompressionskältekreislaufs die den Innenräumen entzogene Wärme direkt an den primären Wasserkreislauf über den Zwischenwärmetauscher abgegeben werden kann. Wiederum wird im *free-cooling*-Betrieb lediglich die Antriebsenergie für die Umwälzpumpen dem System zugeführt, was zu einer hohen Effizienz in Abhängigkeit der Dimensionierung der Anlagekomponenten, der Wasserdurchflussrate, der Wasserqualität und der spezifischen gebäudeseitigen Anforderungen und Rahmenbedingungen führen kann. (vgl. Bohne 2022: 289 f)

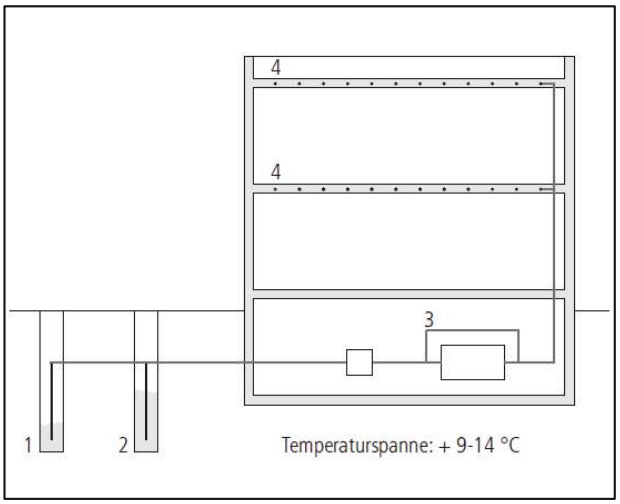

Abb. 6. Geothermische Innenraumkühlung in Verbindung mit Grundwasserbrunnen (1, 2), einer reversiblen Wasser-Wasser-Wärmepumpe mit Bypass (3) zur Umschaltung in den *free-cooling* Betrieb und flächigem Kälteabgabesystem (4). (vgl. Bohne 2022)

2.3.3 Kühlung unter Verwendung des Sorptionsverfahrens

Diese Kategorie umfasst Systeme, die das sog. Sorptionsverfahren nutzen, um der Innenraumluft Wärme zu entziehen. Das eingesetzte Kältemittel wird in dampfförmigen Zustand mit einem sog. Sorptionsmittel (Sorbens) in Kontakt gebracht, von dem es im Falle eines flüssigen Sorbens durch Absorption, im Falle eines festen Sorbens durch Adsorption aufgenommen wird. Bedingt durch das eingesetzte Sorbens wird die entsprechende technische Anlage entweder als Absorptions- oder Adsorptionskältemaschine bezeichnet. (vgl. Dehli 2021) Im Unterschied zum Kompressionsverfahren wird hier thermische Energie auf Hochtemperaturniveau zugeführt, um, unter Heranziehung der thermodynamischen Prozesse Verdampfen, Absorption, Desorption und Kondensation, Kälte zu erzeugen. Als primäre Quelle für diese thermische Energie können bspw. Fernwärme, Prozesswärme, Abwärme aus einem Heizkraftwerk oder Solarthermie dienen. Die Wahl zwischen Absorptions- und Adsorptionskältemaschinen ist von den spezifischen

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Masterarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Anforderungen der technischen Anlage und den am Standort verfügbaren primären Wärmequellen abhängig. (vgl. Dehli 2021; vgl. Holzer et al. 2022; vgl. Bohne 2022)

Die Performance einer Sorptionskältemaschine wird durch das Nennwärmeverhältnis ξ beschrieben:

$$\xi = \frac{\dot{Q}_{c,outg}}{\dot{Q}_{c,therm}}$$

wobei $\dot{Q}_{c,outg}$ $[kW]$ die Wärmeentzugsleistung am Verdampfer und $\dot{Q}_{c,therm}$ $[kW]$ die Heizleistung am Austreiber bezeichnet. Dies ist mit dem EER von Kompressionskältemaschinen nicht direkt vergleichbar, da im unterschiedliche Arten und Qualitäten von zugeführter Energie eingesetzt werden (Abwärme bzw. solare Wärme vs. elektrischer Strom). Im Allgemeinen liegt das Nennwärmeverhältnis abhängig von Faktoren wie der Temperatur der Wärmequelle, Wärmesenke und verwendeten Stoffkombinationen in einem Bereich von ca. 0,3 bis 0,8. (vgl. Holzer et al. 2022; vgl. Bohne 2022: 293 f)

Hinsichtlich ihrer Umweltauswirkungen bieten Sorptionskältemaschinen einige Vorteile, da ihre Antriebsenergie oft aus „sekundären" Energiequellen wie Prozesswärme oder Abwärme stammt und die verwendeten Stoffpaare (Kältemittel und Sorbent) keine Treibhauspotentiale aufweisen. Zudem sind durch weniger bewegliche Teile der Wartungsaufwand und Verschleiß, sowie die Lärmentwicklung während des Betriebes der Anlagen im Normalfall vergleichsweise gering. Insbesondere kann durch den Einsatz von Sorptionskältemaschinen der sommerliche Spitzenstromverbrauch für Gebäudekühlung reduziert werden, der i.d.R. durch elektrisch betriebene KKMs bzw. Wärmepumpen im reversiblen Betrieb verursacht wird. Wegen ihrer geringen Effizienz erzeugen Sorptionsmaschinen jedoch vergleichsweise viel Abwärme, die in geeigneter Weise abgeführt werden muss, um die unmittelbare Umgebung im Sommer nicht weiter zu erhitzen. (vgl. Simader/Rakos 2005: 35 f; vgl. Bohne 2022: 293 f)

Sorptionskältemaschinen werden i.d.R. in Verbindung mit geschlossenen, wassergeführten Systemen zur Kälteverteilung und -abgabe betrieben. Analog zu KKMs wird das gekühlte Fluid durch Rohrleitungen zu verschiedenen Kälteabgabesystemen (Kühldecken, Fan Coils, …) transportiert (vgl. Bohne 2022).

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Masterarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

2.3.3.1 Absorptionskältemaschinen (ABKM)

Absorptionskältemaschinen liegen die thermodynamischen Prozesse von Zweistoffsystemen zugrunde. (vgl. Dehli 2021) Im Unterschied zum Kompressionskältekreislauf geschieht die Verdichtung nicht durch Zuführen von elektrischer Energie an einen mechanischen Kompressor, sondern durch Zuführen von thermischer Energie unter Anwendung eines Absorptionsprozesses. Das Kältemittel wird von einem zweiten flüssigen Medium, dem sogenannten Sorbens, absorbiert und physikalisch gebunden. Durch diese Absorption entsteht eine Zweistofflösung, die eine höhere Dichte aufweist als das Kältemittel. Aufgrund dieser erhöhten Dichte kann die Zweistofflösung, verglichen mit der Verdichtung von Kältemitteln im Dampfzustand in einer herkömmlichen Kompressionskältemaschine, mit weniger Energieaufwand auf ein höheres Druckniveau gepumpt werden. Der Ablauf des Absorptionsverfahrens wie folgt (vgl. Holzer et al. 2022; vgl. Bohne 2022):

(1) Das überhitzte Kältemittel im Dampfzustand wird in den Absorber geleitet, wo es vom Sorbens durch Absorption aufgenommen wird. Die dabei freiwerdende Lösungswärme wird an die Wärmesenke abgegeben.

(2) Danach wird die durch den Absorptionsprozess entstandenen Zweistofflösung durch eine Pumpe von Nieder- auf Hochdruck gebracht. Dieser Vorgang benötigt nur einen Bruchteil an elektrischer Energie im Vergleich zu einer Kompressionskältemaschine. Dies wird dadurch bedingt, dass die Zweistofflösungen im Vergleich zum Kältemitteldampf eine viel höhere Dichte ausweist und als inkompressibel angesehen werden kann. Damit kann die Pumpe einen höheren Druckzustand erzeugen, ohne das Kompressionsarbeit notwendig ist.

(3) Nun gelangt die unter hohem Druck stehende Zweistofflösung in den sog. Desorber (Austreiber), wo das Kältemittel, als Fluid mit dem niedrigeren Siedepunkt, unter Wärmezufuhr auf hohem Temperaturniveau (ca. 80 bis 120 °C) ausgedampft wird. Die zugeführte Wärme am Desorber wird als Heizleistung $\dot{Q}_{c,therm}$ beschrieben.

(4) Im Abscheider bzw. Dephlegmator wird sodann das gasförmige Kältemittel von dem flüssigen Sorbens getrennt. Das Sorbens ist somit durch Ausdampfung regeneriert worden und fließt über ein Expansionsventil im entspannten Zustand zum Absorber zurück.

(5) Das Kältemittel im dichten Dampfzustand wird sodann an den Kondensator geleitet, wo es unter Wärmeabgabe kondensiert und so Wärme an die Wärmesenke abgibt.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Masterarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

(6) In der Folge wird das unterkühlte Kältemittel durch ein Expansionsventil auf Niederdruck gedrosselt.

(7) Nun wird das Kältemittel an den Verdampfer geleitet, wo es verdampft und dabei dem umgebenden Medium, der zu kühlenden Wärmequelle, Wärme entzieht. Im Verdampfer stellt die auf das Kältemittel übertragene Wärmeleistung den Kühlungseffekt dar und wird als die Wärmeentzugsleistung des Verdampfers $\dot{Q}_{c,outg}$ bezeichnet. Das überhitzte Kältemittel im Dampfzustand fließt zurück an den Absorber, der Kreislauf beginnt von neuem.

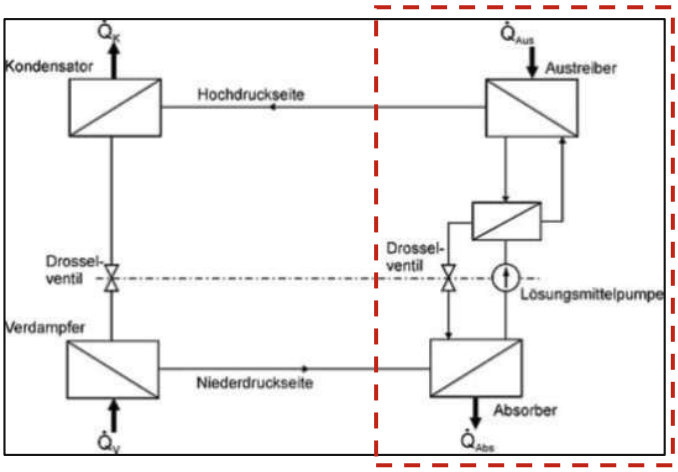

Abb. 7. Schematische Darstellung der Funktionsweise einer Absorptionskältemaschine. Die rote strichlierte Linie markiert den Bereich der thermischen Verdichtung. (vgl. BauNetz 2023b)

Meist wird eine Kombination aus dem Kältemittel Wasser und dem Sorbens Lithiumbromid oder eine Kombination aus dem Kältemittel Ammoniak und dem Sorbens Wasser genutzt. Ammoniak-Wasser-Systeme eignen sich insbesondere für industrielle Anwendungen, bei denen Kälteerzeugung auf sehr niedrigem Temperaturniveau (bis max. minus 60 °C) realisiert werden soll. Wasser-Lithiumbromid-Systeme können Vorlauftemperaturen von bis zu ca. 4 °C erreichen und werden typischerweise in der Gebäudekonditionierung und Prozesskühlung eingesetzt. (vgl. Bohne 2022: 293 f)

2.3.3.2 Adsorpionskältemaschinen (ADKM)

Adsorptionskältemaschinen verwenden als Kältemittel meist Wasser, als Sorbens einen hochporösen hygroskopischen Feststoff wie Aktivkohle, Zeolith oder Silikagel. Es findet eine chemische Reaktion an der Feststoffoberfläche statt, bei der das Kältemittel an das Sorbens gebunden wird. Im Unterschied zum Absorptionsverfahren kann das feste Sorbens nicht von einer technischen Systemkomponente in die nächste geleitet werden. Die beiden zentralen Phasen der thermischen Verdichtung (Adsorption und Desorption) müssen dennoch so

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Masterarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

ausgeführt werden, dass ein quasi-kontinuierlicher Prozess gewährleistet ist. Es werden zwei mit Sorbens gefüllte Kammern jeweils wechselweise zur Adsorption des Kältemittels und Desorption durch Ausdampfung genutzt, wobei jede Kammer über Dreiwegeventile wechselweise mit dem Kondensator und Verdampfer verbunden wird. Das Kältemittel wird also im Zuge zweier Arbeitstakte zwischen den technischen Komponenten geleitet, wobei Zustandsänderungen analog zum Absorptionsverfahren auftreten. (vgl. Bohne 2022: 294 f)

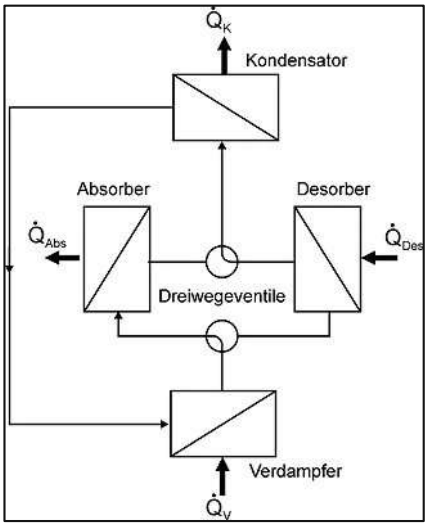

Abb. 8. Schematische Darstellung der Funktionsweise einer Adsorptionskältemaschine. Die beiden Komponenten Adsorber und Desorber stellen die mit Sorbens gefüllten Kammern dar. (vgl. BauNetz 2023c)

ADKMs sind insbesondere für solarthermische Wärmequellen geeignet, da im Vergleich zur ABKM niedrigere Temperaturen der Wärmezufuhr (ab ca. 70 °C) möglich sind. (vgl. Bohne 2022: 294 f)

2.3.3.3 Dessicant Evaporative Cooling (DEC)

DEC-Systeme sind i.d.R. in RLT-Anlagen integriert und arbeiten mit einer Kombination aus Luftfeuchtigkeitsentzug durch Einsatz hygroskopischer Sorptionsmittel und dem Prozess der Verdunstungskühlung: im langsam rotierenden Entfeuchter (auch bezeichnet als Sorptionsrad bzw. Dessicant-Rotor) entzieht das Sorbens, meist Silikagel oder Lithiumchlorid, unter Absorption bzw. Adsorption Feuchtigkeit aus der Außenluft. In der Folge wird die nun entfeuchtete Luft durch direkte oder indirekte Verdunstungskühlung gekühlt und über das Luftführungssystem des Gebäudes verteilt. Das feuchte Sorbens im Entfeuchter wird durch die Zufuhr von Wärme regeneriert, d.h. die aufgenommene Feuchtigkeit wird ausgetrieben und als feuchter Abluftstrom an die Umgebung abgeführt. Die für die Regeneration des Sorbens erforderliche Wärme wird häufig durch den Einsatz von Solarthermieanlagen

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Masterarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

bereitgestellt (Bohne 2022: 296). Im Unterschied zu ABKMs und ADKMs sind DEC-Anlagen also als offene Systeme konzipiert, die für eine Kühlung der Innenräume gekühlte Zuluft einblasen. Unter Berücksichtigung einer behaglichen relativen Luftfeuchtigkeit unter 70% in Innenräumen während der Kühlperiode können unter Anwendung von DEC Zuluft-Temperaturen von ca. 20 bis 21 °C erzielt werden. (vgl. ÖNORM EN 16798-1:2019: 59; vgl. Bohne 2022: 294) Die im mitteleuropäischen Kontext erzielbare Kälteleistung von DEC-Anlagen ist im Vergleich zu Kompressionskältemaschinen vergleichsweise gering und steht dem in der Regel hohen anlagentechnischen Aufwand für die Errichtung, Betrieb und Wartung dieser Anlagen gegenüber (vgl. Bohne 2022: 625).

2.4 Normative und rechtliche Bestimmungen

2.4.1 Anforderungen an den sommerlichen Wärmeschutz

Die individuelle thermische Behaglichkeit in Innenräumen während den Sommermonaten ist im hohem Maße abhängig von der vorherrschenden Lufttemperatur, der mittleren Strahlungstemperatur der umgebenden Oberflächen, der Luftgeschwindigkeit und der Luftfeuchte. (vgl. Frank 1975) Diese Parameter resultieren wiederum aus unterschiedlichen Einflussfaktoren wie Standortklima, der Bauweise, den inneren Lasten, dem Bewohner*innenverhalten und Verschattung bzw. Orientierung des Gebäudes. Für die Beurteilung der thermischen Behaglichkeit wird hauptsächlich die operative Temperatur herangezogen, die die gefühlte Temperatur eines im Innenraum befindlichen Menschen abbildet und den Mittelwert der Innenlufttemperatur und der Strahlungstemperatur der umgebenden Oberflächen darstellt. (vgl. Frank 1975) Eine Vielzahl von Studien bzw. technischen Normen empfehlen operative Temperaturen von ca. 25 bis 27 °C in Aufenthaltsräumen während den Sommermonaten, um die thermische Behaglichkeit sicherzustellen. (vgl. DIN EN 16798-1:2022; vgl. ÖNORM EN ISO 7730:2023) Darüber hinaus kann für nicht aktiv gekühlte Gebäude das sog. adaptive Komfortmodell angewandt werden, wonach die komfortable operative Innenraumtemperatur durch physiologische Anpassungen des menschlichen Körpers in Abhängigkeit von der Außentemperatur variiert (vgl. DIN EN 16798-1:2022; vgl. ÖNORM EN ISO 7730:2023; ASHRAE Standard 55-2010).

Die Anforderungen an den sommerlichen Wärmeschutz von Aufenthaltsräumen gelten in Österreich als eingehalten, wenn ein Nachweis über die Sommertauglichkeit

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Masterarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

gemäß OIB Richtlinie 6 erfolgen kann. (vgl. OIB-330.6-036/23; vgl. ÖNORM B 8110-3:2020-06; vgl. ÖNORM B 8110-5:2024-03; vgl. ÖNORM B 8110-6-1:2024-03) Für Wohngebäude gilt die Sommertauglichkeit als gegeben, wenn die operative Temperatur den Wert der maximal zulässigen operativen Temperatur

$$T_{OP,max} = \frac{T_{NAT,13}}{3} + 21{,}8\ °C$$

nicht übersteigt, wobei $T_{NAT,13}$ den standortabhängigen Tagesmittelwert eines sich täglich periodisch wiederholenden Außenklimas, mit einer durchschnittlichen Überschreitungshäufigkeit von 13 Tagen, darstellt. Die Ermittlung von $T_{NAT,13}$ ist gemäß den in der ÖNORM B 8110-5 angeführten, monatlichen, standortabhängigen Klimadaten durchzuführen. Die Berechnung von $T_{OP,max}$ ist gemäß ÖNORM B 8110-3 vorzunehmen, wobei die klimatischen Bedingungen eines durchschnittlichen Sommers zugrunde gelegt werden und als Datum für die Berechnung der 15. Juli angesetzt wird. Es darf zudem angenommen werden, dass im Zeitraum von 06:00 Uhr morgens bis 22:00 Uhr abends die Fenster geöffnet werden, wenn die Außentemperatur unter der operativen Temperatur im Innenraum liegt. Kühlungseffekte durch Nachtlüftung zwischen 22:00 Uhr abends und 06:00 Uhr morgens dürfen nicht berücksichtigt werden. Für den Wiener Raum ergeben sich folgend der angeführten normierten Rechenverfahren je nach Standort maximal zulässige operative Temperaturen in Aufenthaltsräumen von ca. 30 °C. (vgl. OIB-Richtlinie 6, NAT-T13 Excel; vgl. Dörn 2020) Alternativ gilt der sommerliche Wärmeschutz als eingehalten, wenn alle Lichteintrittsflächen außenliegende Abschattungselemente mit einem Gesamtenergiedurchlassgrad von $g_{tot} \leq 0{,}15$ aufweisen.

Für Nicht-Wohngebäude wird gemäß OIB Richtlinie 6 die Nachweisführung der Sommertauglichkeit über die Berechnung des außeninduzierten Kühlbedarfs KB* für aktiv gekühlte Aufenthaltsräume vorgeschrieben. Es wird die erforderliche Nutzenergie errechnet, die benötigt wird, um eine maximale Innenraumtemperatur von 26 °C aufrechtzuerhalten, wobei im Zuge der Berechnung interne Lasten und die Luftwechselrate vernachlässigt werden können. Als Höchstwerte für KB* gelten gemäß OIB Richtlinie 6 bei Neubauten 1,0 kWh/m³a bzw. bei größeren Renovierungen von Nicht-Wohngebäuden 2,0 kWh/m³a. (vgl. OIB-330.6-036/23)

Geltende Normen für Wohngebäude in Wien definieren also operative Temperaturen in Aufenthaltsräumen von bis zu 30 °C als sommertauglich, wobei diese

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Masterarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

Maximalwerte folgend dem adaptiven Komfortmodell von dem jeweiligen Tagesmittelwert $T_{NAT,13}$ am Standort abgeleitet werden. Hier ist zu beachten, dass die für die Berechnung von $T_{NAT,13}$ standardmäßig heranzuziehenden Datengrundlagen sich auf die Jahre 1981 bis 2000 beziehen (vgl. ÖNORM B 8110-5:2024-03: 8). Vor dem Hintergrund der voranschreitenden Erderhitzung erscheint es erforderlich, die Notwendigkeit einer Aktualisierung von Datengrundlagen für die Errechnung der Maximalwerte sommerlicher operativer Temperaturen in regelmäßigen Abständen zu überprüfen.

2.4.2 Rechtliche Bestimmungen zur Nutzung von erneuerbarer Energie für den Gebäudebetrieb in Österreich

Mit der Verabschiedung des Erneuerbaren-Ausbau-Gesetzes (EAG) durch die österreichische Bundesregierung im Jahr 2021 wurden rechtliche und organisatorische Rahmenbedingungen geschaffen, um die Nutzung von erneuerbaren Energieträgern in allen Sektoren hinweg weiter auszubauen. Bis ins Jahr 2030 soll der gesamte Strombedarf Österreichs bilanziell zu 100% durch erneuerbare Energieträger gedeckt werden. Um dieses Ziel zu erreichen, soll die jährliche Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien (Photovoltaik, Windkraft, Wasserkraft und Biomasse) bis ins Jahr 2030 um 27 Terrawattstunden (TWh) angehoben werden (§ 4 Abs. 4 EAG). Diese Maßnahmen haben Implikationen für den nachhaltigen Betrieb von strombetriebenen Kälteversorgungsanlagen, die im optimalen Fall durch eine gesteigerte Verfügbarkeit von Strom aus Erneuerbaren klimaneutral betrieben werden können.

Darüber hinaus wurde im Jahr 2023 mit dem Erneuerbare Wärme Gesetz (EWG) ein bundesweites Verbot für die Errichtung fossiler Heizsysteme (wie Kohle-, Öl- und Gasheizungen) in Neubauten beschlossen. In Wien wurde zudem mit der Novelle der Wiener Bauordnung (BO) im Jahr 2023 der Ausstieg aus fossilen Heizsystemen im Gebäudebestand vorangetrieben. Gemäß §118 Abs. 3f BO ist es bis auf wenige Ausnahmen nicht gestattet, Kohle- oder Ölheizungen bei größeren Renovierungen oder Änderungen am gebäudetechnischen System für die Wärmeversorgung zu installieren. Die Umstellung von einer Öl- auf eine Gasheizung bleibt weiterhin möglich, erfordert jedoch eine Alternativenprüfung der Gasheizung im Vergleich zu der technischen, ökologischen und wirtschaftlichen Realisierbarkeit hocheffizienter alternativer Energiesysteme gemäß § 118 Abs. 3 BO.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Masterarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

Es werden also im Neubau und in Wien zu einem geringeren Ausmaß auch im Bestand, die Nutzung nachhaltiger Technologien für Raumwärme und Warmwasserbereitstellung gesetzlich geregelt. Nachhaltige Gebäudekühlung durch den reversiblen Betrieb von Wärmepumpen bzw. *free cooling* wird durch das Verbot der Errichtung fossiler Heizanlagen im Neubau und durch die Alternativenprüfung hocheffizienter alternativer Systeme bei Heizungsumstellungen im Wiener Gebäudebestand hinsichtlich der Realisierung eines integrierten Energiesystems für Heizung und Kühlung durch Wärmepumpentechnologie begünstigt.

2.4.3 Rechtliche Bestimmungen zur Nutzung von erneuerbarer Energie für den Gebäudebetrieb in der Europäischen Union

Die Erneuerbare-Energien-Richtlinie (RED III) der Europäischen Union wurde im Rahmen des „Fit for 55“ Pakets im Jahr 2023 verabschiedet und muss bis 21. Mai 2025 von den Mitgliedsstaaten der Europäischen Union in nationales Recht umgesetzt werden. Gemäß Art 3 RED III muss der Anteil erneuerbarer Energien bis ins Jahr 2030 auf mindestens 42,5% des Endenergieverbrauchs angehoben werden. Zudem wurden spezifische Ziele für einzelne Sektoren festgelegt. Der Anteil erneuerbarer Energien für Gebäudeheizung und -kühlung muss gemäß Art 15a RED III europaweit bis ins Jahr 2030 auf mindestens 49% angehoben werden, wobei nach Art 23 RED III dieser Anteil um 1,1 Prozentpunkte pro Jahr zwischen 2026 und 2030 gesteigert werden muss. Mitgliedsstaaten werden weiter dazu verpflichtet, im Neubau, bei größeren Renovierungen und bei der Erneuerung von Heizungsanlagen einen Mindestanteil an Erneuerbaren im Heizsystem festzulegen. Dies streicht die Wichtigkeit einer zukünftigen Bereitstellung von Kälte auf der Basis von Erneuerbaren heraus, insbesondere hinsichtlich des prognostizierten gesteigerten Kühlbedarfs im Gebäudesektor. In Österreich sollen Vorgaben der RED III durch das angekündigte Erneuerbaren-Ausbau-Beschleunigungs-Gesetz (EABG) umgesetzt werden. U.a. sollen Verfahren für Erneuerbaren-Projekte, die unter die Schwelle der Umweltverträglichkeitsprüfung fallen, erheblich beschleunigt und deren überragendes öffentliche Interesse gesetzlich festgemacht werden.

Die Energieeffizienz-Richtlinie (EED) der Europäischen Union wurde im Jahr 2023 verabschiedet, alt Teil des „Fit for 55“ Pakets ausgearbeitet und muss durch die Mitgliedsstaaten bis 11. Oktober 2025 in nationales Recht umgesetzt werden. Gemäß Art 4 EED wird eine Reduktion des Endenergieverbrauchs um 11,7% bis ins Jahr 2030 festgelegt, im Vergleich zu einem im Jahr 2020 festgelegten Referenzwert.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Masterarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

Darüber hinaus fordert die EED die Mitgliedstaaten auf, jährliche Energieeinsparungen bis ins Jahr 2030 zu erzielen, was u.a. durch die Sanierung bestehender Gebäude erreicht soll. Gemäß Art 33 EED ist der öffentliche Sektor außerdem dazu verpflichtet, jährlich mindestens 3% der Gesamtfläche aller Gebäude im Eigentum der öffentlichen Hand auf Niedrigstenergie- bzw. Nullemissionsgebäudestandard zu sanieren.

Die im Jahr 2024 novellierte Richtlinie über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden (EPBD) muss innerhalb von 2 Jahren durch die Mitgliedsstaaten in nationales Recht umgesetzt werden und setzt gemäß Art 1 EPBD das Ziel, den Gebäudesektor in der EU bis zum Jahr 2050 klimaneutral zu machen. Dazu sollen sämtliche Gebäude in der EU als Nullemissionsgebäude (engl. *zero emission building*, ZEB) klassifizierbar sein, wobei gemäß Art 3 EPBD der erstmals definierte Standard ZEB die vorherige Definition des Niedrigstenergiegebäudes ersetzt. Die Mitgliedstaaten sind ferner gemäß Art 6 EPBD aufgefordert, Strategien zur Dekarbonisierung der zur Wärme- und Kältebereitstellung genutzten technischen Anlagen zu entwickeln und sukzessive von fossilen Brennstoffen bei der Bereitstellung von Wärme und Kälte abzurücken. Folgend Art 7 EPBD sollen haustechnische Anlagen (bspw. Heizkessel), die mit fossilen Brennstoffen betrieben werden, bis 2040 vollständig dekarbonisiert betrieben werden. Dieses Ziel für 2040 wird allerdings als sog. indikative Vorgabe beschrieben, was den Mitgliedstaaten Flexibilität bei der Umsetzung des übergeordneten Ziels der Klimaneutralität des Gebäudesektors bis 2050 gewährt. Ab 2025 ist die Subventionierung von eigenständigen fossilen Heizkesseln untersagt, während finanzielle Anreize für die Nutzung von hybriden Heizsystemen, die beispielsweise Solarenergie oder Wärmepumpen integrieren, bestehen bleiben.

Darüber hinaus löst die die Verordnung 2024/573 über Fluorierte Treibhausgase (F-Gase) der Europäischen Union ein Verbot von F-Gasen in Monoblock Wärmepumpen ab dem Jahr 2032 und ein Verbot von F-Gasen in Split-Wärmepumpen bzw. Split-Klimageräten ab 2035 aus. Dies bringt weitreichende Auswirkungen hinsichtlich der Produktion, Errichtung und Wartung von Kälteversorgungsanlagen mit sich und wird die Umweltauswirkungen von Kältekompressionsmaschinen langfristig erheblich reduzieren.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Masterarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

3 Methodik

Um die im Rahmen dieser These gestellte Forschungsfrage zu beantworten, sollen eine Reihe von Energiesystemen zur Gebäudekühlung einer ökomisch-ökologischen Analyse unterzogen werden. Eine Reihe von Annahmen betreffend Gebäudezustand und -geometrie, bisheriger Energiebereitstellung und maßgeblicher Energiebedarfe soll im Vorfeld getroffen werden, um eine im Kontext des innerstädtischen Wiener Wohngebäudebestands typische Ausgangssituation für die Umstellung auf ein aktives, nachhaltiges System für Gebäudekühlung festzumachen und die Vergleichbarkeit verschiedener Energiesysteme herzustellen. Die Energiesysteme sollen nach ihrer bau- bzw. anlagentechnischen Anwendbarkeit im innerstädtischen Wien bzw. nach den energieplanerischen Strategien der Stadt Wien ausgewählt werden. Die jeweilige energietechnische Konfiguration und i.d.R. notwendige bauliche Leistungen im Kontext einer Umstellung auf das jeweilige Energiesystem im innerstädtischen Wiener Wohnbaubestand sollen dargelegt werden. Darauf aufbauend soll eine Reihe von Kriterien erarbeitet werden, die den ökonomischen Aufwand und die ökologischen Auswirkungen des jeweiligen Energiesystems in hinreichender Weise darstellen und anhand derer die vergleichende Analyse erfolgen kann.

3.1 Annahmen für die vergleichende Analyse verschiedener Energiesysteme zur aktiven Kühlung eines typischen innerstädtischen Wohngebäudes in Wien

3.1.1 Bestimmung eines Referenzgebäudes

Die Bestimmung eines typischen Gebäudes des innerstädtischen Wiener Wohnbaubestands orientiert sich, wie bereits unter *Kapitel 2.1.* ausgeführt, an dem im Wiener Gebäudebestand am häufigsten vertretenen „Dekarbonisierungstyp 1“, also an unsanierten Mehrfamilienhäusern bzw. Geschoßwohnbauten, deren Raumwärme- und Warmwasserbereitstellung über dezentrale, mit Gas betriebene Heizungsanlagen erfolgt (vgl. Stadt Wien Magistratsabteilung 20 2023), sowie an der Kostenoptimalitätsstudie der OIB Richtlinie 6 (vgl. OIB-330.6-012/24), welche die Vorgaben gemäß Art. 5 2010/31/EU (EPBD) betreffend der Ermittlung von optimalen Verhältnissen zwischen Lebenszyklusteilkosten und der Erreichung der Mindestanforderungen an die Gesamtenergieeffizienz umsetzt. Im Zuge der Kostenoptimalitätsstudie werden Referenzgebäude mit typischen

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Masterarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Gebäudeabmessungen durch statistische Auswertungen der Anzahl verschiedener Gebäudekategorien (Einfamilienhäuser, Mehrfamilienhäuser und Geschoßwohnbauten) bzw. durchschnittlicher Wohnungsgrößen in Österreich definiert, unter der Heranziehung von Daten der Statistik Austria (vgl. OIB-330.6-012/24).

Kategorie	Breite [m]	Länge [m]	Geschoßhöhe [m]	Geschoße [-]	BGF [m²]	Wohnungen	Bauweise	ℓ_c [m]	Fensterflächenanteil [%]
EFH	12	15,46	3	1	186	1,15	offen	1,04	16
	8	11,59	3	2			gekuppelt	1,49	11
MFH	12	23,54	3	2	565	5,51	offen	1,71	17
	10	18,83	3	3			gekuppelt	2,10	14
GWB	12	38,06	3	4	1.827	19,58	gekuppelt	2,78	21
	12	25,38	3	6			geschlossen	3,60	18

Tab. 3. Definition der Referenzgebäude lt. Kostenoptimalitätsstudie der OIB Richtlinie 6 (vgl. OIB 2023)

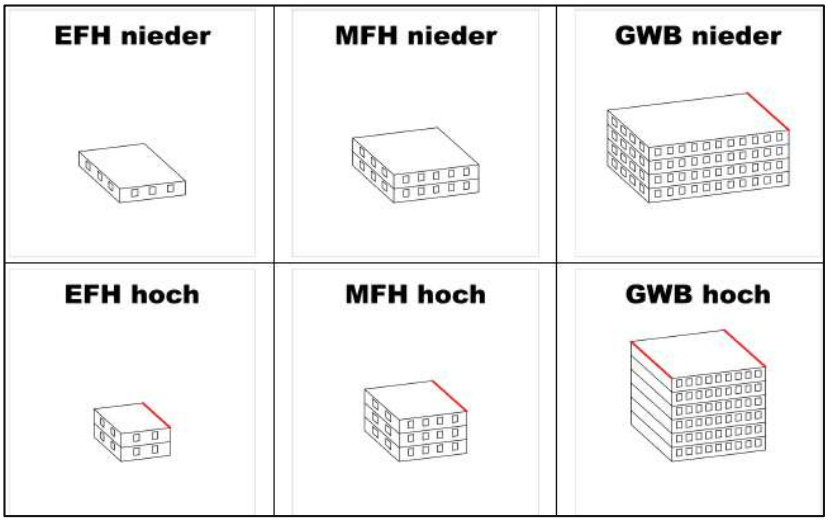

Abb. 9. Geometrie und Bauweise der Referenzgebäude lt. Kostenoptimalitätsstudie der OIB Richtlinie 6: Die adiabatischen Wände an Gebäudeseiten sind mit einer roten Linie gekennzeichnet. (vgl. OIB 2023)

Aus den vorliegenden Referenzgebäuden wird der den innerstädtischen Wiener Gebäudebestand widerspiegelnde „Geschoßwohnbau hoch“ mit 6 Geschoßen ausgewählt, wobei die geschlossene Bauweise mit adiabatischen Wänden entlang der kurzen Gebäudeseiten eine typische Wiener Blockrandsituation abbildet.

3.1.2 Bestimmung maßgeblicher Energiebedarfe

Es wird angenommen, dass das Referenzgebäude vor der Umstellung auf ein nachhaltiges Energiesystem zur aktiven Gebäudekühlung einer thermischen Sanierung unterzogen wird, wobei die unter *Kapitel 2.2* dargestellten thermischen Sanierungsmaßnahmen angewandt und die Anforderungen an die

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Masterarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Gesamtenergieeffizienz im Zuge einer größeren Renovierung gemäß OIB Richtlinie 6 eingehalten werden (vgl. OIB-330.6-036/23). Dies spiegelt die im Sinne der Nachhaltigkeit bzw. Energieeffizienz sinnvolle und insbesondere die vor der Umstellung auf nachhaltige Energiesysteme empfohlene Vorgehensweise wider.

Da von einem typisierten Referenzgebäude und nicht von einem realen Gebäude ausgegangen wird, wird von einer komplexen Berechnung der Bedarfe zum Zwecke der öffentlich-rechtlichen Nachweisführung gemäß ÖNORM B 8110-6-1:2024-3 für den Heizwärmebedarf (HWB) und Kühlbedarf (KB), gemäß ÖNORM H 5050-1:2024-03 für den Haushaltsstrombedarf (HHSB), gemäß ÖNORM H 5056-1:2024-03 für den Heizenergiebedarf (HEB), sowie gemäß ÖNORM H 5058-1:2019-01 für den Kühlenergiebedarf (KEB) abgesehen. Die Bestimmung maßgeblicher Energiebedarfe wird anhand von Mindestanforderungen und Default-Werten gängiger österreichischer Normen, sowie statistisch relevanter Richtwerte und vereinfachten Berechnungsverfahren aus der wissenschaftlichen Literatur durchgeführt. Es soll darauf hingewiesen werden, dass sämtliche erhobene Werte eine typische Situation im Kontext des innerstädtischen Wiener Gebäudebestands für ein Referenzgebäude annähern und unter realen Bedingungen erheblich variieren können.

3.1.2.1 Heizwärmebedarf

Der Heizwärmebedarf (HWB) bezeichnet die Wärmemenge, die den konditionierten Räumen eines Gebäudes zugeführt werden muss, um eine Sollinnentemperatur von mindestens 22 °C zu erreichen und wird zum Zwecke der öffentlich-rechtlichen Nachweisführung gemäß ÖNORM B 8110-6-1:2024-03 berechnet, unter Annahme des österreichischen Referenzklimas gemäß ÖNORM B 8110-5:2024-03 bzw. des konkreten Standortklimas des Gebäudes. Die Mindestanforderung an den flächenspezifischen Referenz-Heizwärmebedarf nach größeren Renovierungen von Wohngebäuden ist gemäß OIB Richtlinie 6, Punkt 4.3. wie folgt definiert:

$$HWB_{Ref,RK,zul} = 17 \times \left(1 + \frac{2{,}5}{\ell c}\right) [kWh/m^2{}_{BGF}a]$$

Für das unter Kapitel 3.1.1. definierte Referenzgebäude mit einer charakteristischen Länge von 3,6 Metern wird der flächenspezifische Jahres-Heizwärmebedarf $HWB_{BGA,a}$ nach thermischer Sanierung gemäß dieser Mindestanforderung mit 28,80 $kWh/m^2{}_{BGF}.a$ angesetzt.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Masterarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

3.1.2.2 Warmwasserwärmebedarf

Der Warmwasserwärmebedarf (WWWB) des Referenzgebäudes kann gemäß ÖNORM B 8110-5:2024-03 für das Nutzungsprofil „Wohngebäude mit 10 oder mehr Nutzungseinheiten“ und ausgehend von dem in der Norm angegebenen Default-Wert von 28 $Wh/m^2_{BGF}.d$ auf einen flächenspezifischen Jahres-Warmwasserwärmebedarf $WWWB_{BGF,a}$ von 10,2 $kWh/m^2_{BGF}.a$ hochgerechnet werden.

3.1.2.3 Heizenergiebedarf

Der Heizenergiebedarf berücksichtigt die Effizienz der haustechnischen Anlage zur Raumwärme und Warmwasserbereitstellung und bildet somit die Auswirkungen der Verluste der Energieübergabe, -verteilung und -speicherung durch die Heizanlagentechnik ab. Zum Zwecke der öffentlich-rechtlichen Nachweisführungen wird die Berechnung gemäß ÖNORM H 5056-1:2024-03 vorgenommen.

Es wird im Rahmen dieser These eine vereinfachte Berechnungsmethode des flächenspezifischen Jahres-Heizenergiebedarfs über folgenden Formelzusammenhang herangezogen (vgl. BGBl II 28/2024, Anhang 1 zu §5; vgl. Willems/Schild 2022; vgl. Pöhn/Pech 2011):

$$HEB_{BGF,a} = e_{AWZ,H} \times (HWB_{BGF,a} + WWWB_{BGF,a}) \left[\frac{kWh}{m^2{}_{BGF}a}\right]$$

wobei $e_{AWZ,H}$ die Energieaufwandszahl der Heizungsanlage darstellt, welcher als dimensionsloser Wert das Verhältnis zwischen Endenergieaufwand und Nutzenergiebedarf beschreibt und dem Kehrwert des gemittelten Wirkungsgrades der haustechnischen Anlage bezogen auf ein ganzes Jahr entspricht. Abhängig von dem zu betrachtenden Energiesystem kann die Energieaufwandszahl mit Richtwerten aus der wissenschaftlicher Literatur bzw. gemäß den in BGBl II 28/2024, Anhang 1 zu §5 festgelegten Standartwerten für die Herleitung der von Endenergieeinsparungen durch Energieeffizienzmaßnahmen abgebildet werden (vgl. Pöhn/Pech 2011: 150 f; vgl. BGBl II 28/2024, Anhang 1 zu §5).

3.1.2.4 Kühlbedarf

Der Kühlbedarf bezeichnet die Wärmemenge, die konditionierten Räumen im Gebäude entzogen werden muss, um eine vorgegebene Solltemperatur von maximal 26 °C einzuhalten und wird zum Zwecke der öffentlich-rechtlichen Nachweisführung für Nichtwohngebäude gemäß ÖNORM B 8110-6-1:2024-03 berechnet. Für Wohngebäude werden gemäß OIB Richtlinie 6 keine Mindestanforderungen an den

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Masterarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

außeninduzierten Kühlbedarf (KB*), bedingt durch solare Einträge und Wärmetransmission durch die Gebäudehülle, festgelegt. Für Nicht-Wohngebäude ist der KB* im Falle einer größeren Renovierung auf einen Höchstwert von 2 kWh/m³.a begrenzt (vgl. OIB-330.6-036/23).

Da keine Kühlbedarfsrichtwerte in der österreichischen Normenlandschaft existieren, wird im Folgenden ein Richtwert unter Heranziehung wissenschaftlicher Literatur formuliert. Kapeller et al. (2024) führten über 1700 dynamische Gebäudesimulationen zur Bestimmung des Kühlbedarfs bzw. der maximal erforderlichen Kühllast von Wohngebäuden in Österreich durch, unter Variation verschiedener maßgeblicher Input-Parameter des Simulations-Modells wie Gebäudekategorie, thermischer Standard, Klimazone, interne Lasten, außenliegende Verschattung, Sollinnentemperatur und IPCC Referenz-Klimaszenario bzw. Jahr. Zusätzlich wurden für jeden Input-Parameter der dynamischen Gebäudesimulation Mittelwerte des Kühlbedarfs und der maximalen Kühllast errechnet. Für das im Rahmen dieser These betrachtete Referenzgebäude können die Kühlbedarfs- bzw. Kühllast-Mittelwerte folgender Parameter als relevant angesehen werden:

Input-Parameter	**Mittelwert simulierte Kühlbedarfe [kWh/m².a]**	**Mittelwert simulierte maximale Kühllasten [W/m²]**
Gebäudekategorie: Mehrgeschoßwohnbau	14	17,1
thermischer Standard: durchschnittliche thermische Masse, gedämmt	8,6	14,2
Klimazone: gemäßigt	15,1	22,2
Interne Lasten: niedrig	12,3	20,2
Verschattung: außenliegend	9,7	16,0
Sollinnentemperatur: 26 °C	12,7	20,4
Klimaszenario und Jahr: RCP4.5, 2020	13,9	21,6

Tab. 4. Mittelwerte von Kühlbedarf und max. flächenspezifischer Kühllast für ausgewählte, in Kapeller et at. (2024) definierte Input-Parameter dynamischer Gebäudesimulationen

Folgend dieser Zusammenstellung der durch Kapeller et al. (2024) erstellten Simulationsergebnisse kann für das Referenzgebäude ein durchschnittlicher Kühlbedarfs-Richtwert $KB_{BGF,a}$ von 12,3 kWh/m²·a angenommen werden.

3.1.2.5 Kühlenergiebedarf

Der Kühlenergiebedarf (KEB) bezeichnet den Energiebedarf zur Deckung des KB zzgl. der Anlagenverluste des gebäudetechnischen Systems, wobei eine detaillierte

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Masterarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Berechnung zum Zwecke der öffentlich-rechtlichen Nachweisführung nach ÖNORM H 5058-1:2019-01 erfolgt. Im Rahmen dieser These wird die in der ÖNORM H 5050-1:24-03, Punkt 7c festgelegte, vereinfachte Berechnungsmethode für den flächenspezifischen Kühlbedarf von Nicht-Wohngebäuden herangezogen:

$$KEB_{BGF,a} = f_{KT} \times 1{,}33 \times KB_{BGF,a} \left[\frac{kWh}{m^2{}_{BGF}a}\right]$$

wobei f_{KT} als fixer, dimensionsloser Berechnungsfaktor die Effizienz verschiedener Energiesysteme für die aktive Gebäudekühlung berücksichtigt und lt. ÖNORM H 5050-1:24-03, Punkt 7c Kompressionskältemaschinen mit $f_{KT} = 0{,}3$, Absorptionskältemaschinen mit $f_{KT} = 1{,}5$ definiert wird.

3.1.2.6 Haushaltsstrombedarf

Der Haushaltsstrombedarf (HHSB) ist als flächenspezifischer, normierter Default-Wert für Mehrfamilienhäuser und Geschoßwohnbauten mit 22,8 kWh/m^2.a festgelegt und entspricht circa dem durchschnittlichen flächenspezifischen Stromverbrauch eines Haushalts in Österreich (vgl. Pöhn/Pech 2011: 144). Eine Berechnung zum Zwecke der öffentlich-rechtlichen Nachweisführung kann gemäß ÖNORM H 5050-1:2024-03, Punkt 4.2 erfolgen.

3.1.2.7 Endenergiebedarf

Der Endenergiebedarf (EEB) ist der an der Systemgrenze des betrachteten Gebäudes ermittelte Energiebedarf und ist gemäß ÖNORM H 5050-1:2024-03, Punkt 6.6 für Wohngebäude wie folgt definiert:

$$EEB_{BGF,a} = HEB_{BGF,a} + HHSB_{BGF,a} \; [kWh/m^2{}_{BGF}a]$$

umfasst also zusätzlich zum Heizenergiebedarf den Haushaltsstrombedarf, abzüglich allfälliger Endenergieerträge (PV, Solarthermie, Wärmerückgewinnung aus Lüftungsanlagen) und zuzüglich eines hierfür notwendigen Hilfsenergiebedarfs. Der Endenergiebedarf nach ÖNORM H 5050-1:2024-03 entspricht jener Energiemenge, die eingekauft werden muss und ist somit ausschlaggebend für Modellrechnungen im Rahmen der ökonomisch-ökologischen Analyse (vgl. OIB-330.6-012/24).

Im Rahmen dieser These wird der KEB zum Endenergiebedarf hinzugerechnet, da jedes zu betrachtende Energiesystem abweichend von den derzeit gültigen normativen Anforderungen an Wohngebäude eine aktive Gebäudekühlung ermöglicht:

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Masterarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

$$EEB_{BGF,a,mod} = HEB_{BGF,a} + HHSB_{BGF,a} + KEB_{BGF,a}\ [kWh/m^2{}_{BGF}a]$$

3.2 Definition der zu vergleichenden Energiesysteme für nachhaltige aktive Gebäudekühlung

Im Zuge der Definition der zu vergleichenden Energiesysteme für nachhaltige aktive Gebäudekühlung wird vorausgesetzt, dass das betrachtete typisierte Wohngebäude durch das jeweilige Energiesystem sowohl aktiv mit Kälte versorgt wird, als auch mit Raumwärme und Warmwasser. Dies bildet die Realität bzw. gängige Praxis ab, da technische Anlagen zur Gebäudekühlung i.d.R. als Zusatz zu jedenfalls benötigten Systemen für Wärmebereitstellung konzipiert bzw. errichtet werden. Die Auswahl der Energiesysteme zur nachhaltigen aktiven Gebäudekühlung orientieren sich an dem im Wiener Wärmeplan 2024 vorgeschlagenen Zonierungen für Energiesysteme zur Wärmeversorgung (vgl. Stadt Wien Magistratsabteilung 20 2024), an den spezifischen Potentialen und Rahmenbedingungen hinsichtlich der Nutzung erneuerbarer Energieträger in Wien (vgl. Stadt Wien Magistratsabteilung 20 2023; GeoSphere Austria 2024; vgl. Englisch et al. 2022), sowie an dem Leitfaden zur OIB Richtlinie 6 2023 dargestellten typischen Haustechnikkonfigurationen (vgl. OIB-330.6-037/23) und geeigneten wissenschaftlichen Quellen (vgl. Bohne 2022).

Der Wiener Wärmeplan 2024 enthält Vorschläge zur Eignung verschiedener Technologien zur fossilfreien Wärmeversorgung für das gesamte Wiener Stadtgebiet, zur Bereitstellung von Raumwärme und Warmwasser ausschließlich aus erneuerbaren Energieträgern ab dem Jahr 2040 (vgl. Stadt Wien Magistratsabteilung 20 2024). Im Rahmen dieser These werden innerstädtische Mehrgeschoßwohnbauten betrachtet, weswegen insbesondere die für die Innenbezirke vorgeschlagenen Technologien zur Wärmeversorgung in die analysierten Energiesysteme miteinbezogen werden. Technische Systeme zur nachhaltigen aktiven Gebäudekühlung werden auf Basis der vorgeschlagenen Technologien zur Wärmeversorgung ausgewählt. Diese Herangehensweise einer integrativen Planung von Energiesystemen kann zu einer optimierten Gesamtenergiebilanz führen, den Energieverbrauch sowie Investitions- und Betriebskosten senken und eine nachhaltige Stadtentwicklung durch die Vermeidung der Abgabe von durch Kühlprozesse entstandene Abwärme an die Umgebung unterstützen (vgl. Bohne 2022: 623). Die innerstädtischen Gebiete Wiens werden im Wiener Wärmeplan 2040 als Gebiete für eine zukünftige Wärmeversorgung mit Fernwärme ausgewiesen. Daher werden im Folgenden mögliche Kombinationen von

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Masterarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

Fernwärme mit nachhaltigen, aktiven Technologien zur Gebäudekühlung untersucht, vgl. *Kapitel 3.2.2, 3.2.3* und *3.2.4*. Für ein vollständiges Bild bietet sich der Vergleich mit integrierten Systemen zur Raumwärme-, Warmwasser sowie Kältebereitstellung über Wärmepumpentechnologien an, vgl. *Kapitel 3.2.5* und *3.2.6*.

3.2.1 Energiesystem 1 - Status Quo

Um einen umfassenden Vergleich der Energiesysteme zu ermöglichen, wird der „Status Quo" analysiert, sprich der Zustand des Energiesystems des Referenzgebäudes vor der Umstellung auf ein nachhaltiges Energiesystem. Dabei wird von dezentralen Gasbrennwertthermen zur Raumwärme und Warmwasserbereitstellung ausgegangen. Es wird kein System zur aktiven Gebäudekühlung angenommen, analog zu der derzeit gängigen Praxis, im Bestand weitestgehend keine aktive Kühlung einzusetzen. Es wird weiter angenommen, dass nach einer Zeitspanne von 15 Jahren die Gaskombithermen ausgetauscht, sowie die Gasleitungsführung und das Wärmeabgabesystem in jeder Wohnung erneuert werden müssen. Allgemeine Charakteristika des Energiesystems werden wie folgt festgelegt (vgl. OIB-330.6-037/23 2023: 12):

ENERGIESYSTEM 1: STATUS QUO		
ALLGEMEIN	***Zentralisierung***	Dezentrale Wärmebereitstellung
	Integration	Kombinierte Wärmebereitstellung für Raumwärme und Warmwasser mittels Gaskombitherme 10 kW
	Systemtemperaturen	70 °C VL / 55 °C RL
		Verteil-, Stich- und Anbindegasleitungen, Dimensionierung gemäß ÖVGW G Richtlinien
RAUMWARME	***Bereitstellung***	Gaskombitherme mit Brennwerttechnologie 10 kW
	Verteilung	Rohrleitungen gedämmt
	Wärmeabgabe	Radiatoren
	Speicherung	-
WARMWASSER	***Bereitstellung***	Gaskombitherme mit Brennwerttechnologie 10 kW
	Verteilung	Rohrleitungen gedämmt
	Wärmeabgabe	Zweigriffarmaturen
	Speicherung	-
AKTIVE KÜHLUNG	***Bereitstellung***	-
	Verteilung	-
	Wärmeentzug	-
	Speicherung	-

Tab. 5: Allgemeine Charakteristika des Energiesystems 1: Status Quo

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Masterarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

3.2.2 Energiesystem 2 - Fernwärme und Kühlung mit ABKM

Es soll ein Energiesystem bestehend aus Fernwärme für Raumwärme- und Warmwasserbereitstellung, sowie einer ABKM zur Gebäudekühlung untersucht werden. Die für den Betrieb der ABKM benötigte thermische Energie wird durch die Fernwärme bereitgestellt. Es wird von einer ABKM mit Wasser als Kältemittel und Lithiumbromid als Sorptionsmittel ausgegangen, da diese Maschinen in einem geringen Leistungsbereich verfügbar sind und mit Temperaturen der thermischen Energiequelle von 80 °C bis 100 °C betrieben werden können, wobei das Nennwärmeverhältnis für Wasser-Lithiumbromid-Systeme i.d.R. zwischen 0,55 und 0,8 liegt. (vgl. Bohne 2022, Schmidt et al. 2020) Im Rahmen dieser These wird von einem Nennwärmeverhältnis von ca. 0,5 ausgegangen, da die von der Fernwärme bereitgestellte Vorlauftemperatur von 70 °C zu einer geringeren Effizienz der Anlage führen kann.

Die bei der Kältebereitstellung anfallende Abwärme kann in das Fernwärmeleitungsnetz eingespeist werden und damit die Gesamteffizienz der Fernwärme verbessern und den Bedarf an Primärenergie reduzieren. Die Investitionskosten für die gebäudetechnische Anlage zzgl. Einspeisung von Abwärme in das Leitungsnetz der Fernwärme kann jedoch aufgrund der erforderlichen zusätzlichen Anlagenkomponenten und der komplexeren Systemintegration erheblich erhöht werden (vgl. Seidnitzer-Gallien et al. 2024) und wird somit im Rahmen der gegenständlichen Untersuchung nicht betrachtet.

Allgemeine Charakteristika des Energiesystems werden wie folgt festgelegt (vgl. OIB-330.6-037/23 2023: 12; vgl. Bohne 2022):

ENERGIESYSTEM 2: FERNWÄRME UND KÜHLUNG MIT ABKM		
ALLGEMEIN	***Zentralisierung***	Zentrale Wärme- und Kältebereitstellung
	Integration	Kombinierte Wärmebereitstellung für Raumwärme und Warmwasser mittels Fernwärme
	Systemtemperaturen	Fernwärme 70 °C VL / 55 °C RL
		Fußbodenheizung 40 °C VL / 30 °C RL
		Fußbodenkühlung 18 °C VL / 22 °C RL
	Leitungsführung	Zentrale Leitungsführung (Verteil- und Steigleitungen Heizwasser, Kühlwasser, Trinkwasser)
		Verteil- und Steigleitungen im unkonditionierten Gebäudebereich
		Stich- und Anbindeleitungen im konditionierten Gebäudebereich
RAUMWÄRME	***Bereitstellung***	Fernwärmeübergabestation, über Wohnungsstationen mit Plattenwärmetauscher
	Verteilung	Rohrleitungen gedämmt

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Masterarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

	Wärmeabgabe	Flächig verlegtes Rohrsystem im Fußboden („Fußbodenheizung“)
	Speicherung	-
WARMWASSER WÄRME	***Bereitstellung***	Fernwärmeübergabestation, über Wohnungsstationen mit Plattenwärmetauscher
	Verteilung	Rohrleitungen gedämmt
	Wärmeabgabe	Zweigriffarmaturen
	Speicherung	-
AKTIVE KÜHLUNG	***Bereitstellung***	ABKM Wasser/Li-Br, Leistung 20 kW, über Wohnungsstationen mit Plattenwärmetauscher
	Verteilung	Rohrleitungen gedämmt
	Wärmeentzug	Flächig verlegtes Rohrsystem im Fußboden („Fußbodenheizung“)
	Speicherung	Kältespeicher, bis 1000 Liter

Tab. 6.: Allgemeine Charakteristika des Energiesystems 2: Fernwärme und Kühlung mit ABKM

3.2.3 Energiesystem 3 - Fernwärme und freie Kühlung mit Erdsonden

Es soll ein Energiesystem mit der Nutzung von Fernwärme für Raumwärme- und Warmwasserbereitstellung und einer Erdsondenanlage zur freien Kühlung in den Sommermonaten untersucht werden.

Innerhalb Wiens wird insbesondere die Nutzung von Erdwärme zur Gebäudekonditionierung in Verbindung mit vertikalen Erdsondenbohrungen als sinnvoll betrachtet. Von der Nutzung des Grundwassers als Wärmesenke bzw. vom Einsatz von Wasser-Wasser-Wärmepumpen ist für die meisten Standorte innerhalb Wiens abzuraten, da das Grundwasser in Wien derzeit zunehmend überwärmt ist und somit durch Abwärme aus Kühlprozessen nicht weiter erwärmt werden sollte (vgl. Englisch et al. 2022). Die Nutzung von Erdwärme zur freien Kühlung kann insbesondere in der dicht bebauten Bestandsstadt erhebliche Vorteile bieten, da vertikale Bohrungen einen minimalen Flächenbedarf aufweisen und sie zudem die Speicherung von Abwärme aus Kühlprozessen im Erdreich ermöglichen. Es kann somit die Abgabe von Abwärme an die unmittelbare Umgebung vermieden werden. Bei freier Kühlung wird lediglich die Umwälzpumpe für die Verteilung des Kälteübertragungsmediums betrieben (vgl. *Kapitel 2.3.2.2*), was in der Regel zu einem sehr geringen Kühlenergiebedarf und einer hohen Anlageneffizienz führt.

Bei der Kombination der freien Kühlung über Erdsonden mit Fernwärme zur Raumwärme- und Warmwasserbereitstellung ist es im Sinne eines saisonal ausgeglichenen Betriebs, d.h. der Wahrung einer über den Betrachtungszeitraum konstanten Temperatur des Erdreichs, sowie zur Sicherung der langfristigen Effizienz der Anlage empfehlenswert, einen außenaufgestellten Luft-Glykol Wärmetauscher für

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Masterarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

die Abführung von Wärme aus dem Erdreich zu betreiben. Die Abgabe von Wärme aus dem Erdreich an die unmittelbare Umgebung kann in den Wintermonaten erfolgen, um den sommerlichen UHI-Effekt nicht weiter zu verstärken. Allgemeine Charakteristika des Energiesystems werden wie folgt festgelegt (vgl. OIB-330.6-037/23 2023: 12; vgl. Bohne 2022):

ENERGIESYSTEM 3: FERNWÄRME UND FREIE KÜHLUNG MIT ERDSONDEN		
ALLGEMEIN	***Zentralisierung***	Zentrale Wärme- und Kältebereitstellung
	Integration	Kombinierte Wärmebereitstellung für Raumwärme und Warmwasser mittels Fernwärme
	Systemtemperaturen	Fernwärme 70 °C VL / 55 °C RL
		Fußbodenheizung 40 °C VL / 30 °C RL
		Fußbodenkühlung 18 °C VL / 22 °C RL
	Leitungsführung	Zentrale Leitungsführung (Verteil- und Steigleitungen Heizwasser, Kühlwasser, Trinkwasser)
		Verteil- und Steigleitungen im unkonditionierten Gebäudebereich
		Stich- und Anbindeleitungen im konditionierten Gebäudebereich
RAUMWÄRME	***Bereitstellung***	Fernwärmeübergabestation, über Wohnungsstationen mit Plattenwärmetauscher
	Verteilung	Rohrleitungen gedämmt
	Wärmeabgabe	Flächig verlegtes Rohrsystem im Fußboden („Fußbodenheizung“)
	Speicherung	-
WARMWASSER	***Bereitstellung***	Fernwärmeübergabestation, über Wohnungsstationen mit Plattenwärmetauscher
	Verteilung	Rohrleitungen gedämmt
	Wärmeabgabe	Zweigriffarmaturen
	Speicherung	-
KÜHLUNG	***Bereitstellung***	Freie Kühlung mit Erdsonden bzw. Nutzung des Erdreichs als Wärmesenke, zzgl. Betrieb eines Luft-Glykol-Wärmetauschers zur Regeneration des Erdreichs, über Wohnungsstationen mit Plattenwärmetauscher
	Verteilung	Rohrleitungen gedämmt
	Wärmeentzug	Flächig verlegtes Rohrsystem im Fußboden („Fußbodenheizung“)
	Speicherung	-

Tab. 7.: Allgemeine Charakteristika des Energiesystems 3: Fernwärme und freie Kühlung mit Erdsonden

3.2.4 Energiesystem 4 - Fernwärme und Kühlung mit Luftwärmepumpe

Es soll ein Energiesystem bestehend aus Fernwärme für Raumwärme- und Warmwasserbereitstellung und der Nutzung einer Luftwärmepumpe zur aktiven Gebäudekühlung in den Sommermonaten untersucht werden.

Luftwärmepumpen weisen vergleichsweise geringe Investitionskosten auf, geben jedoch im Sommer durch den aktiven Kühlprozess Abwärme an die unmittelbare

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Masterarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Umgebung ab und verstärken somit den UHI-Effekt in Städten mit ohnehin hoher sommerlicher Hitzebelastung (vgl. Stadt Wien Magistratsabteilung 20 2023).

Der Betrieb von Fernwärme und einer Luft-Wärmepumpe bietet die Möglichkeit, im Falle von vereinzelt auftretenden Spitzenlasten insbesondere in den Wintermonaten die Grundlasten mit der Fernwärme abzudecken, während die Spitzenlasten über die zeitweise Aktivierung der Luftwärmepumpe gedeckt werden können. Durch diesen bivalenten Betrieb kann die Belastung der Fernwärmeinfrastruktur während Spitzenlastzeiten reduziert werden, wodurch die Gesamtstabilität des Energiesystems verbessert und die Kapazität der Fernwärme zu Spitzenlastzeiten erhöht wird. (vgl. Kensby et al. 2017) Von der Untersuchung eines solchen bivalenten Betriebs wird im Rahmen dieser These abgesehen. Allgemeine Charakteristika des Energiesystems werden wie folgt festgelegt (vgl. OIB-330.6-037/23 2023: 12; vgl. Bohne 2022):

ENERGIESYSTEM 4: FERNWÄRME UND KÜHLUNG MIT LUFTWÄRMEPUMPE		
ALLGEMEIN	***Zentralisierung***	Zentrale Wärme- und Kältebereitstellung
	Integration	Kombinierte Wärmebereitstellung für Raumwärme und Warmwasser mittels Fernwärme
	Systemtemperaturen	Fernwärme 70 °C VL / 55 °C RL
		Fußbodenheizung 40 °C VL / 30 °C RL
		Fußbodenkühlung 18 °C VL / 22 °C RL
	Leitungsführung	Zentrale Leitungsführung (Verteil- und Steigleitungen Heizwasser, Kühlwasser, Trinkwasser)
		Verteil- und Steigleitungen im unkonditionierten Gebäudebereich
		Stich- und Anbindeleitungen im konditionierten Gebäudebereich
RAUMWÄRME	***Bereitstellung***	Fernwärmeübergabestation, über Wohnungsstationen mit Plattenwärmetauscher
	Verteilung	Rohrleitungen gedämmt
	Wärmeabgabe	Flächig verlegtes Rohrsystem im Fußboden („Fußbodenheizung“)
	Speicherung	-
WARMWASSER	***Bereitstellung***	Fernwärmeübergabestation, über Wohnungsstationen mit Plattenwärmetauscher
	Verteilung	Rohrleitungen gedämmt
	Wärmeabgabe	Zweigriffarmaturen
	Speicherung	-
AKTIVE KÜHLUNG	***Bereitstellung***	Luft-Wasser-Wärmepumpe im reversiblen Betrieb, Leistung 20 kW, über Wohnungsstation mit Plattenwärmetauscher
	Verteilung	Rohrleitungen gedämmt
	Wärmeentzug	Flächig verlegtes Rohrsystem im Fußboden („Fußbodenheizung“)
	Speicherung	Kältespeicher, bis 1000 Liter

Tab. 8.: Allgemeine Charakteristika des Energiesystems 4: Fernwärme und Kühlung mit Luftwärmepumpe

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Masterarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

3.2.5 Energiesystem 5 - Erdwärmepumpe für Wärme und Kühlung

Auch im innerstädtischen Wiener Stadtgebiet, wo Fernwärme voraussichtlich bis 2040 weitgehend verfügbar sein wird, können Lösungen zur lokalen Wärmeversorgung ohne Anbindung an eine Netzinfrastruktur angewandt werden, insbesondere dann, wenn ein Fernwärmeanschluss nicht unmittelbar möglich ist und ausreichend Flächen für die Nutzung erneuerbarer Energieträger am Grundstück vorhanden sind. Im Folgenden wird die Nutzung von Erdwärme durch den Einsatz einer Sole-Wasser-Wärmepumpe in Verbindung mit vertikalen Erdsondenbohrungen für die Raumwärme-, Warmwasserwärme- und Kältebereitstellung untersucht. Analog zur freien Kühlung mit Erdsonden kann dies insbesondere in der dicht bebauten Bestandsstadt in Bezug auf Flächenbedarfe und Speicherung der während dem Kühlprozess entstehenden Abwärme im Erdreich erhebliche Vorteile bieten. Durch die Nutzung der Wärmepumpe für Wärme- und Kältebereitstellung kann zudem bei korrekter Auslegung ein saisonal ausgeglichener Betrieb gewährleistet werden, bei dem die im Sommer im Erdreich gespeicherte Wärme in den Wintermonaten wieder zu Heizwecken aus dem Erdreich entnommen werden. I.d.R. wird dadurch die Anlageneffizienz gesteigert, insbesondere wird in den Sommermonaten keine Abwärme an die unmittelbare Umgebung abgegeben. (vgl. Bohne 2022) Allgemeine Charakteristika des Energiesystems werden wie folgt festgelegt (vgl. OIB-330.6-037/23 2023: 13; vgl. Bohne 2022):

ENERGIESYSTEM 5: ERDWÄRMEPUMPE FÜR WÄRME UND KÜHLUNG		
ALLGEMEIN	***Zentralisierung***	Zentrale Wärme- und Kältebereitstellung
	Integration	Kombinierte Bereitstellung für Raumwärme, Warmwasser und Kälte mittels Sole-Wasser-Wärmepumpe
	Systemtemperaturen	Warmwasser 60 °C VL / 45 °C RL
		Fußbodenheizung 40 °C VL / 30 °C RL
		Fußbodenkühlung 18 °C VL / 22 °C RL
	Leitungsführung	Zentrale Leitungsführung (Verteil- und Steigleitungen Heizwasser, Kühlwasser, Trinkwasser)
		Verteil- und Steigleitungen im unkonditionierten Gebäudebereich
		Stich- und Anbindeleitungen im konditionierten Gebäudebereich
RAUMWÄRME	***Bereitstellung***	Sole-Wasser-Wärmepumpe, Leistung 30 kW, über Wohnungsstationen mit Plattenwärmetauscher
	Verteilung	Rohrleitungen gedämmt
	Wärmeabgabe	Flächig verlegtes Rohrsystem im Fußboden („Fußbodenheizung“)
	Speicherung	Heizungspufferspeicher, bis 1000 Liter
WARMWASSER WÄRME	***Bereitstellung***	Sole-Wasser-Wärmepumpe, Leistung 30 kW, über Wohnungsstationen mit Plattenwärmetauscher
	Verteilung	Rohrleitungen gedämmt

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Masterarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

	Wärmeabgabe	Zweigriffarmaturen
	Speicherung	-
AKTIVE KÜHLUNG	***Bereitstellung***	Sole-Wasser-Wärmepumpe, Leistung 30 kW, über Wohnungsstation mit Plattenwärmetauscher
	Verteilung	Rohrleitungen gedämmt
	Wärmeentzug	Flächig verlegtes Rohrsystem im Fußboden („Fußbodenheizung“)
	Speicherung	Kältespeicher, bis 1000 Liter

Tab. 9.: Allgemeine Charakteristika des Energiesystems 5: Erdwärmepumpe für Wärme und Kühlung

3.2.6 Energiesystem 6 – Luftwärmepumpe für Wärme und Kühlung

Im Folgenden wird zusätzlich zum Einsatz von Sole-Wasser-Wärmepumpen die Nutzung von Luftwärmepumpen für die Raumwärme-, Warmwasserwärme- und Kältebereitstellung untersucht. Allgemeine Charakteristika des Energiesystems werden wie folgt festgelegt (vgl. OIB-330.6-037/23 2023: 13; vgl. Bohne 2022):

ENERGIESYSTEM 6: LUFTWÄRMEPUMPE FÜR WÄRME UND KÜHLUNG		
ALLGEMEIN	***Zentralisierung***	Zentrale Wärme- und Kältebereitstellung
	Integration	Kombinierte Wärmebereitstellung für Raumwärme, Warmwasser und Kälte mittels Luft-Wasser-Wärmepumpe
	Systemtemperaturen	Warmwasser 60 °C VL / 45 °C RL
		Fußbodenheizung 40 °C VL / 30 °C RL
		Fußbodenkühlung 18 °C VL / 22 °C RL
	Leitungsführung	Zentrale Leitungsführung (Verteil- und Steigleitungen Heizwasser, Kühlwasser, Trinkwasser)
		Verteil- und Steigleitungen im unkonditionierten Gebäudebereich
		Stich- und Anbindeleitungen im konditionierten Gebäudebereich
RAUMWÄRME	***Bereitstellung***	Luft-Wasser-Wärmepumpe, Leistung 30 kW, über Wohnungsstationen mit Plattenwärmetauscher
	Verteilung	Rohrleitungen gedämmt
	Wärmeabgabe	Flächig verlegtes Rohrsystem im Fußboden („Fußbodenheizung“)
	Speicherung	Heizungspufferspeicher, bis 1000 Liter
WARMWASSER WÄRME	***Bereitstellung***	Luft-Wasser-Wärmepumpe, Leistung 30 kW, über Wohnungsstationen mit Plattenwärmetauscher
	Verteilung	Rohrleitungen gedämmt
	Wärmeabgabe	Zweigriffarmaturen
	Speicherung	-
AKTIVE KÜHLUNG	***Bereitstellung***	Luft-Wasser-Wärmepumpe, Leistung 30 kW, über Wohnungsstationen mit Plattenwärmetauscher
	Verteilung	Rohrleitungen gedämmt
	Wärmeentzug	Flächig verlegtes Rohrsystem im Fußboden („Fußbodenheizung“)
	Speicherung	Kältespeicher, bis 1000 Liter

Tab. 10.: Allgemeine Charakteristika des Energiesystems 6: Luftwärmepumpe für Wärme und Kühlung

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Masterarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

3.3 Ökonomisch-ökologische Analyse

Im Rahmen dieser Masterthese wird eine ökonomisch-ökologische Analyse der in *Kapitel 3.2* festgelegten Energiesysteme zur nachhaltigen aktiven Gebäudekühlung durchgeführt, unter Heranziehung der in *Kapitel 3.1* getroffenen Annahmen über das untersuchte, typische Gebäude und dessen typische bzw. normierte Energiebedarfe und unter Durchführung einer Modellrechnung gemäß der dargelegten Methodik. Im ersten Schritt wird eine vergleichende Analyse durchgeführt, um die Kosten für die Errichtung und den Betrieb des jeweiligen Energiesystems seinen negativen Umweltauswirkungen gegenüberzustellen, wobei Energiesysteme mit einem möglichst geringen ökonomischen Aufwand und möglichst geringen negativen Umweltauswirkungen als optimal angesehen werden. (vgl. Scholz 2018; vgl. Rupp et al. 2020; vgl. Sommer et al. 2011) Im zweiten Schritt erfolgt eine Sensitivitätsanalyse, um die Robustheit der Ergebnisse gegenüber Änderungen verschiedener Analyseparameter zu überprüfen. (vgl. Kausche 2017)

3.3.1 System- und Bilanzgrenzen

Als Bilanzgrenze für sämtliche Modellrechnungen wird die Gebäudehülle bzw. die Kubatur des Referenzgebäudes festgesetzt, sowie der im Referenzgebäude anfallende jährliche Endenergiebedarf (vgl. Kapitel 3.1). Der Betrachtungszeitraum wird auf 30 Jahre angesetzt, was dem normierten Betrachtungszeitraum für Lebenszyklusteilkostenrechnungen gemäß ÖNORM B 1801-4:2014 entspricht und die Lebensdauer der zu untersuchenden Energiesysteme, sowie den zeitlichen Horizont für eine beabsichtigte vollständige Dekarbonisierung der Fernwärme bis ins Jahr 2040 miteinschließt.

3.3.2 Bestimmung des ökonomischen Aufwands

Der ökomische Aufwand wird im Folgenden als Aggregation der Investitions-, Betriebs- und Wartungskosten eines Energiesystems zur nachhaltigen aktiven Gebäudekühlung dargestellt. Die Kosten werden im Zuge einer Lebenszyklusteilkosten-Analyse ermittelt und schließen lediglich Kostengruppen lt. ÖNORM B 1801-1:2022-03 und ÖNORM B 1801-2:2011 mit ein, die in direkter Weise für die Errichtung und den Betrieb einer gebäudetechnischen Anlage relevant sind: die Kostengruppe „Errichtung Bauwerk-Technik“, die Kostengruppe „Wartung“, sowie die Kostengruppe „Energieversorgung mit Wärme und Kälte“. Die aus der Errichtung

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Masterarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

und dem Betrieb von Kälteanlagen entstehenden Kosten werden darüber hinaus in der Ergebnisdarstellung gesondert ausgewiesen.

Die Investitionskosten K_{Invest} werden als einmalige Kosten für die Anschaffung und Errichtung der Energiesysteme in einem innerstädtischen Wiener Bestandswohngebäude ermittelt und basieren auf der durch das Baukosteninformationszentrum der Deutschen Architektenkammern (BKI) veröffentlichten Kostendatenbank, wobei alle Kosten als Brutto-Preise mit Stand August 2023 entnommen werden. Die Gebäudekostendaten werden sodann unter Heranziehung des aktuellen Baukostenindex auf den Stand Mai 2024 modifiziert und mit den Regionalfaktoren des BKI auf den Wirtschaftsraum Wien bezogen. (vgl. BKI 2023; vgl. BKI 2024)

Zukünftige Investitionskosten, die ggf. bei einer notwendigen Erneuerung von Anlagenkomponenten nach Ende ihrer Lebensdauer anfallen, werden gemäß der in der ÖNORM B 1801-4:2014 dargelegten Barwertmethode auf den Zeitpunkt der Errichtung des Energiesystems abgezinst. Bei einmaligen Kosten k_0 ergibt sich der Barwert $k_{Invest,n}$ im n-ten Jahr wie folgt:

$$k_{Invest,n} = \frac{k_0 \times q^n}{d^n} \; [€]$$

wobei d den Abzinsungsfaktor (Basiszinssatz) bezeichnet und q die Preissteigerungsrate je Kostengruppe.

Betriebskosten werden aus den Energiekosten für die jeweilig eingesetzten Energieträger zur Deckung des HEB und KEB ermittelt, unter Heranziehung von öffentlich verfügbaren Kostendaten relevanter Regulierungsbehörden bzw. Energieagenturen im Wiener Raum, sowie folgend der Kostenoptimalitätsstudie der OIB Richtlinie 6 (vgl. AEA 2024; vgl. Statistik Austria 2024a; vgl. Statistik Austria 2024b; vgl. AK Wien 2024; vgl. OIB-330.6-012/24). Schätzwerte für die Wartungskosten je Energiesystem werden aus der Kostenoptimalitätsstudie der OIB Richtlinie 6 entnommen bzw. durch eine allgemeine Produktrecherche verschiedener Wärmepumpenhersteller festgelegt (vgl. OIB-330.6-012/24). Im Zuge der Berechnung der Betriebskosten über den gesamten Betrachtungszeitraum wird die Barwertmethode gemäß ÖNORM B 1801-4:2014 angewandt, wobei alle nach der Errichtung anfallenden Kosten, also die Betriebs- und Wartungskosten, unter Heranziehung des durch die Österreichische Nationalbank veröffentlichten Basiszinssatz von 3,88% per anno (Stand 20. September 2023) und spezifischen

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Masterarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

Preissteigerungsraten je Kostengruppe (vgl. OIB-330.6-012/24, Statistik Austria 2024a; vgl. Statistik Austria 2024b; vgl. AEA 2024; vgl. OeNB 2024) auf den Zeitpunkt der Errichtung des Energiesystems abgezinst werden. Die Betriebs- und Wartungskosten je Energiesystem werden als Summe aller Barwerte dargestellt. Bei jährlichen Kosten k_0 ergibt sich der Barwert k_n über die n Jahre wie folgt:

$$k_n = k_0 \left(\frac{q}{d}\right) \frac{\left(\left(\frac{q}{d}\right)^n - 1\right)}{\left(\frac{q}{d} - 1\right)} \text{ [€]}$$

wobei d den Abzinsungsfaktor (Basiszinssatz) bezeichnet und q die Preissteigerungsrate je Kostengruppe.

Die Berechnung der Lebenszyklusteilkosten K_{ES} je Energiesystem erfolgt demnach für den Betrachtungszeitraum von 30 Jahren wie folgt:

$$K_{ES} = K_{Invest} + k_{Invest,n} + k_{30,Betrieb} + k_{30,Wartung} \text{ [€]}$$

3.3.3 Bestimmung der ökologischen Auswirkungen

Die negativen ökologischen werden die durch (1) die beim Betrieb der technischen Anlagen verursachten Treibhausgasemissionen und durch (2) Wärmeemissionen, d.h. die Abgabe von durch Kühlprozesse entstehende Abwärme an die unmittelbare Umgebung i.d.R. in den Sommermonaten, dargestellt. Folgend der unter *Kapitel 3.3.1* festgelegten System- und Bilanzgrenzen werden die bei der Produktion bzw. Herstellung der anlagentechnischen Komponenten verursachten Treibhausgasemissionen nicht berücksichtigt.

Für die Berechnung der Treibhausgasemissionen werden je Energiesystem der $HEB_{BGF,a}$ sowie der $KEB_{BGF,a}$ herangezogen, um analog zu ÖNORM H 5050-1:2024-03, Punkt 9.2 die jährlichen äquivalenten Kohlendioxidemissionen $CO_{2,eq,a}$ für Wärme- und Kältebereitstellung zu ermitteln. Die aus Kühlprozessen entstehenden Treibhausgasemissionen werden darüber hinaus in der Ergebnisdarstellung gesondert ausgewiesen. Dazu werden Konversionsfaktoren $f_{CO2,eq,HEB}$ $[\frac{g}{kWh}]$ bzw. $f_{CO2,eq,KEB}$ $[\frac{g}{kWh}]$ gemäß OIB RL 6 2023, Punkt 7 bzw. gemäß Einzelnachweis der Wien Energie GmbH für den jeweils eingesetzten Energieträger zur Deckung des Heizenergiebedarfs und Kühlbedarfs herangezogen. Die Berechnung der jährlichen, äquivalenten Kohlendioxidemissionen wie folgt:

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Masterarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

$$CO_{2,eq,a} = BGF \times \left(\left(HEB_{BGF,a} \times f_{CO2,eq,HEB}\right) + \left(KEB_{BGF,a} \times f_{CO2,eq,KEB}\right)\right) \left[\frac{g}{kWh}\right]$$

Anschließend wird die jährlichen, äquivalenten Kohlendioxidemissionen über den Betrachtungszeitraum von 30 Jahren aggregiert.

Die aus Kühlprozessen entstehenden jährlichen Wärmeemissionen $Q_{Abw.,a}$ werden gemäß einem einfachen Energiebilanzverfahren, bei dem die jährlich durch die Kälteanlage abgegebene thermische Energie der Summe aus der zugeführten (thermischen oder elektrischen) Energie $KEB_{BGF,a} \times BGF$ und der dem Umgebungsmedium entzogenen thermischen Energie $KB_{BGF,a} \times BGF$ entspricht, über folgenden Formelzusammenhang umschlagsmäßig angenähert (vgl. Dehli 2021; Herold et al. 2016):

$$Q_{Abw.,a} = BGF \times \left(KB_{BGF,a} \times (1 + e_{AWZ})\right) [kWh]$$

wobei e_{AWZ} die Energieaufwandszahl darstellt und für sämtliche technische Anlagen analog zu den dargelegten Formelzusammenhängen angenommen wird. Anschließend wird die jährlich durch Kühlprozesse anfallende Abwärme über den Betrachtungszeitraum von 30 Jahren aggregiert.

3.3.4 Bestimmung der ökonomisch-ökologischen Optimalität

Das aus ökonomischer und ökologischer Qualität optimale Energiesystem erfüllt über den gesetzten Betrachtungszeitraum von 30 Jahren das Ziel der Minimierung der Gesamtkosten, einschließlich Investitions-, Betriebs- und Wartungskosten, sowie das Ziel der Minimierung der Emissionen, dargestellt als äquivalente Kohlendioxidemissionen sowie Wärmeemissionen. Es wird folgende kombinierte lineare Zielfunktion zur Findung der optimalen Variante aufgestellt:

$$\min_{i \in I}\left(\alpha \times K_{ES.\,i} + \beta \times CO_{2,eq.\,i} + \gamma \times Q_{Abw.\,i}\right)$$

wobei i die verschiedenen Energiesysteme bezeichnet, I die Menge der betrachteten Energiesysteme darstellt und die Gewichtungsfaktoren mit $\alpha = \overline{0.3}$, $\beta = \overline{0.3}$ und $\gamma = \overline{0.3}$ angenommen werden, um die Bedeutung der Zielgrößen gleichzusetzen. Für einen adäquaten Vergleich der Zielgrößen $K_{ES.i}$, $CO_{2,eq.,i}$, $Q_{Abw.,i}$ mit verschiedenen Einheiten werden diese zudem vor der Anwendung der Zielfunktion normalisiert (vgl. Scholz 2018):

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Masterarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

$$x'_i = \frac{x_i - \min(x)}{\max(x) - \min(x)}$$

Auf der Basis des durch die Zielfunktion ermittelten Zielwerts je Energiesystem wird im Rahmen der vergleichenden Analyse eine absteigende Rangfolge 1 bis 6 für die Reihung der Energiesysteme festgelegt, wobei das Energiesystem mit dem minimalen Zielwert als ökonomisch-ökologisches optimales Energiesystem den ersten Rang erhält.

3.3.5 Sensitivitätsanalyse

Mit der Durchführung einer Sensitivitätsanalyse (SA) wird die Robustheit der Ergebnisse gegenüber Unsicherheiten und Änderungen durch die Variation zentraler Analyseparameter untersucht. Dies soll in erster Linie eine fundierte Analyse der Optimalität verschiedener Energiesysteme hinsichtlich verschiedener Ausgangs- bzw. Rahmenbedingungen ermöglichen. Es werden dazu eine Reihe von Szenarien entwickelt, um die Bandbreite möglicher Ergebnisse hinreichend zu erfassen. (vgl. Kausche 2017) Sämtliche Szenarien werden analog zur dargestellten Methodik berechnet und bewertet. Folgende Szenarien und Variationen von Analyseparametern sollen betrachtet werden:

ID	SZENARIO	ANALYSEPARAMETER	VARIATION
1	Fokus auf Kostenoptimalität	Gewichtungsfaktoren der Zielfunktion α, β, γ	$\alpha = 0{,}9$, $\beta = 0{,}05$, $\gamma = 0{,}05$
2	Fokus auf ökologische Optimalität	Gewichtungsfaktoren der Zielfunktion α, β, γ	$\alpha = 0{,}1$, $\beta = 0{,}45$, $\gamma = 0{,}45$
3	Dekarbonisierte Wiener Fernwärme ab 2040	$f_{CO2,eq,FW}$	Linearer Abfall bis $f_{CO2,eq,FW} = 0{,}00$ im Jahr 2040
4	Starke Reduktion des Fernwärmepreises	Preissteigerungsrate q_{FW}	$q_{FW} = 0{,}94$
5	Betrieb mit Ökostrom ab 2030, gemäß EAG	$f_{CO2,eq,El}$	Linearer Abfall bis $f_{CO2,eq,El} = 0{,}00$ im Jahr 2030
6	Starker Anstieg des Strompreises	Preissteigerungsrate q_{El}	$q_{El} = 1{,}06$

Tab. 11.: Betrachtete Szenarien im Rahmen der Sensitivitätsanalyse

Wo möglich sollen aus den dargelegten Analyseergebnissen Empfehlungen für die Auswahl der ökonomisch-ökologisch optimalen Energiesysteme zur aktiven Gebäudekühlung abgeleitet werden.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Masterarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

4 Ergebnisse

4.1.1 Lebenszyklusteilkosten

Für das Energiesystem 1 - Status Quo fallen im Ausgangsjahr keine Investitionskosten K_{Invest} für die Errichtung an, da nicht auf ein nachhaltiges Energiesystem umgestellt wird. Für die Energiesysteme 2 bis 6 fallen jeweils spezifische Investitionskosten K_{Invest} für bauliche Leistungen zur Errichtung des Energiesystems bzw. zur Erneuerung von Wärme- bzw. Kälteversorgungsanlagen an.

Hinsichtlich der Lebensdauer einer Absorptionskältemaschine, Luftwärmepumpe und Erdwärmepumpe von 20 Jahren wird angenommen, dass die Anlagenkomponente nach 20 Jahren ausgetauscht wird, woraus die Kosten $k_{Invest,20}$ entstehen. Im Hinblick auf die Lebensdauer einer dezentralen Gasbrennwerttherme von ca. 20 Jahren (vgl. Meyer et al. 2024) wird angenommen, dass nach 15 Jahren alle dezentralen Gaskombithermen ausgetauscht, sowie die Gasleitungsführung und die Radiatoren in jeder Wohnung erneuert werden müssen. Die Kosten hierfür werden mit $k_{Invest,15}$ verzeichnet. Im Falle des Energiesystems 3 – Fernwärme und freie Kühlung mit Erdsonden wird angenommen, dass lediglich der für die Regeneration des Erdreichs um die Erdsonden eingesetzte Luft-Glykol-Wärmetauscher nach 20 Jahren ausgetauscht wird, woraus die Kosten $k_{Invest,20}$ entstehen. Die Fernwärmeübergabestation muss im Hinblick auf ihre längere Lebensdauer im Betrachtungszeitraum für die jeweiligen Energiesysteme nicht ausgetauscht werden. (vgl. BGB II 28/2024, Anhang 1 zu §5)

Die Betriebskosten $k_{30,Betrieb}$ über den Betrachtungszeitraum von 30 Jahren werden unter Heranziehung des aktuellen Erdgaspreises, Strompreises und Fernwärmepreises für Privatkunden ermittelt, die Wartungskosten $k_{30,Wartung}$ über den Betrachtungszeitraum unter Heranziehung typischer Wartungskosten für die jeweiligen technischen Anlagen im Mehrgeschoßwohnbau.

Für eine detaillierte Aufstellung der baulichen Leistungen je Energiesystem, Berechnungsgrundlagen und Annahmen siehe *Anhang A, Tabellen A1 bis A14*. In folgender Aufstellung sind die Lebenszyklusteilkosten je Energiesystem dargestellt, zzgl. der Lebenszyklusteilkosten die direkt aus der Errichtung bzw. Erneuerung und den Betrieb der Kälteanlage entstehen:

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Masterarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

ES 1 - Status Quo		Kosten [€]	Flächenspezifische Kosten [€/m²BGF]	Anteil an K_{ES1} [%]
	K_{Invest}	0,00	0,00	0
	$k_{Invest, 15}$	220737,73	120,82	32,87
	$k_{30, Betrieb}$	402377,59	220,24	59,93
	$k_{30, Wartung}$	48336,37	26,46	7,20
	K_{ES1}	**671451,69**	**367,52**	
ES 2 – Fernwärme und Kühlung mit ABKM		**Kosten [€]**	**Flächenspezifische Kosten [€/m²BGF]**	**Anteil an K_{ES2} [%]**
	K_{Invest}	410285,40	224,57	32,98
	$k_{Invest, 20}$	42143,66	23,07	3,39
	$k_{30, Betrieb}$	766740,06	419,67	61,64
	$k_{30, Wartung}$	24686,60	13,51	1,98
	K_{ES2}	**1243855,72**	**680,82**	
	$K_{invest, Kälte}$	44251,49	24,22	3,56
	$k_{Invest, 20, Kälte}$	42143,66	23,07	3,39
	$k_{30, Betrieb, Kälte}$	297389,66	162,77	23,91
	$K_{ES2,Kälte}$	**383784,81**	**210,06**	**30,85**
ES 3 – Fernwärme und freie Kühlung mit Erdsonden		**Kosten [€]**	**Flächenspezifische Kosten [€/m²BGF]**	**Anteil an K_{ES3} [%]**
	K_{Invest}	446403,03	244,37	47,91
	$k_{Invest, 20}$	4737,249879	2,59	0,51
	$k_{30, Betrieb}$	480688,4852	263,10	51,59
	$k_{30, Wartung}$	0	0	0
	K_{ES3}	**931828,77**	**510,03**	
	$K_{invest, Kälte}$	80369,13	43,99	8,62
	$k_{Invest, 20, Kälte}$	4737,25	2,59	0,51
	$k_{30, Betrieb, Kälte}$	11338,09	6,21	1,22
	$K_{ES3,Kälte}$	**96444,46**	**52,79**	**10,35**
ES 4 – Fernwärme und Luftwärmepumpe		**Kosten [€]**	**Flächenspezifische Kosten [€/m²BGF]**	**Anteil an K_{ES4} [%]**
	K_{Invest}	410365,10	224,61	41,82
	$k_{Invest, 20}$	34636,28	18,96	3,53
	$k_{30, Betrieb}$	531256,35	290,78	54,14
	$k_{30, Wartung}$	4937,32	2,70	0,50
	K_{ES4}	**981195,04**	**537,05**	
	$K_{invest, Kälte}$	44331,19	24,26	4,52
	$k_{Invest, 20, Kälte}$	34636,28	18,96	3,53
	$k_{30, Betrieb, Kälte}$	61905,95	33,88	6,31
	$K_{ES4,Kälte}$	**140873,41**	**77,11**	**14,36**

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Masterarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

ES 5 – Erdwärmepumpe für Wärme und Kälte		Kosten [€]	Flächenspezifische Kosten [€/m²BGF]	Anteil an K_{ES5} [%]
	K_{Invest}	422010,74	230,99	60,41
	$k_{Invest,\ 20}$	44165,99	24,17	6,32
	$k_{30,\ Betrieb}$	227455,82	124,50	32,56
	$k_{30,\ Wartung}$	4937,32	2,70	0,71
	K_{ES5}	**698569,86**	**382,36**	
	$K_{invest,\ Kälte}$	132348,43	72,44	18,95
	$k_{Invest,\ 20,\ Kälte}$	44165,99	24,17	6,32
	$k_{30,\ Betrieb,\ Kälte}$	54536,19	29,85	7,81
	$K_{ES5,Kälte}$	**231050,61**	**126,46**	33,07
ES 6 – Luftwärmepumpe für Wärme und Kälte		**Kosten [€]**	**Flächenspezifische Kosten [€/m²BGF]**	**Anteil an K_{ES6} [%]**
	K_{Invest}	345744,12	189,24	52,81
	$k_{Invest,\ 20}$	45769,40	25,05	6,99
	$k_{30,\ Betrieb}$	258193,09	141,32	39,44
	$k_{30,\ Wartung}$	4937,32	2,70	0,75
	K_{ES6}	**654643,92**	**358,32**	
	$K_{invest,\ Kälte}$	56081,81	30,70	8,57
	$k_{Invest,\ 20,\ Kälte}$	45769,40	25,05	6,99
	$k_{30,\ Betrieb,\ Kälte}$	61905,95	33,88	9,46
	$K_{ES6,Kälte}$	**163757,15**	**89,63**	25,01

Tab. 12.: Lebenszyklusteilkosten der Energiesysteme ES 1 bis ES 6

4.1.2 Treibhausgasemissionen

Die Treibhausgasemissionen für die Energiesysteme 1 bis 6 werden als die jährlichen CO2-Äquivalentemissionen $CO_{2,eq,a}$ über den Betrachtungszeitraum von 30 Jahren aggregiert. Zudem werden die äquivalenten Kohlendioxidemissionen ermittelt, die direkt aus dem Betrieb der jeweiligen Kälteanlage entstehen. Für eine detaillierte Aufstellung der Konversionsfaktoren gemäß OIB Richtlinie 6, Berechnungsgrundlagen und Annahmen siehe *Anhang A, Tabelle A1 bis A4*.

ES 1 - Status Quo			Flächenspezifische $CO_{2,eq}$ [t/m²BGF]	
	$CO_{2,eq,ES1}$ [t]	**558,55**	**0,3**	
ES 2 – Fernwärme und ABKM			Flächenspezifische $CO_{2,eq}$ [t/m²BGF]	Anteil an $CO_{2,eq,ES2}$ [%]
	$CO_{2,eq,ES2,Kälte}$ [t]	29,59	0,02	31,79
	$CO_{2,eq,ES2}$ [t]	**93,08**	**0,05**	

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Masterarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

ES 3 – Fernwärme und freie Kühlung mit Erdsonden			Flächenspezifische $CO_{2,eq}$ [t/m²BGF]	Anteil an $CO_{2,eq,ES3}$ [%]
	$CO_{2,eq,ES3,Kälte}$ [t]	8,09	0,004	11,3
	$CO_{2,eq,ES3}$ [t]	**71,58**	**0,04**	
ES 4 – Fernwärme und Luftwärmepumpe			Flächenspezifische $CO_{2,eq}$ [t/m²BGF]	Anteil an $CO_{2,eq,ES4}$ [%]
	$CO_{2,eq,ES4,Kälte}$ [t]	44,17	0,02	41,03
	$CO_{2,eq,ES4}$ [t]	**107,66**	**0,06**	
ES 5 – Erdwärmepumpe für Wärme und Kälte			Flächenspezifische $CO_{2,eq}$ [t/m²BGF]	Anteil an $CO_{2,eq,ES5}$ [%]
	$CO_{2,eq,ES5,Kälte}$ [t]	38,91	0,02	23,98
	$CO_{2,eq,ES5}$ [t]	**162,29**	**0,09**	
ES 6 – Luftwärmepumpe für Wärme und Kälte			Flächenspezifische $CO_{2,eq}$ [t/m²BGF]	Anteil an $CO_{2,eq,ES6}$ [%]
	$CO_{2,eq,ES6,Kälte}$ [t]	44,17	0,02	23,98
	$CO_{2,eq,ES6}$ [t]	**184,23**	**0,10**	

Tab. 13.: Äquivalente Kohlendioxidemissionen, für die Energiesysteme ES 1 bis ES 6

4.1.3 Abwärme aus Kühlprozessen

Die Abwärme aus Kühlprozessen $Q_{Abw.}$ wird über den Betrachtungszeitraum von 30 Jahren ermittelt. Für das Energiesystem 1 - Status Quo fällt keine Abwärme an, da keine aktive Kältemaschine im Betrieb ist, für das Energiesystem 5 - Erdwärmepumpe fällt ebenfalls keine Abwärme aus Kühlprozessen an, da von einem saisonal ausgeglichenen Betrieb der Anlage mit dem Erdreich als Wärmesenke ausgegangen wird. Für eine detaillierte Aufstellung der Berechnungsgrundlagen und Annahmen siehe *Anhang A, Tabelle A1 bis A3*.

			Flächenspezifische $Q_{Abw.}$ [MWh/m²BGF]
ES 2 – Fernwärme und ABKM	$Q_{Abw,ES2}$ [MWh]	**2019,12**	1,11
ES 3 – Fernwärme und freie Kühlung mit Erdsonden	$Q_{Abw,ES3}$ [MWh]	**674,163**	0,369
ES 4 – Fernwärme und Luftwärmepumpe	$Q_{Abw,ES4}$ [MWh]	**957,31**	0,52
ES 6 – Luftwärmepumpe für Wärme und Kälte	$Q_{Abw,ES6}$ [MWh]	**957,31**	0,52

Tab. 14.: Abwärme aus Kühlprozessen, für die Energiesysteme ES 2, ES 3, ES 4, ES 6

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Masterarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

4.1.4 Vergleich der Energiesysteme

4.1.4.1 Vergleich der Lebenszyklusteilkosten

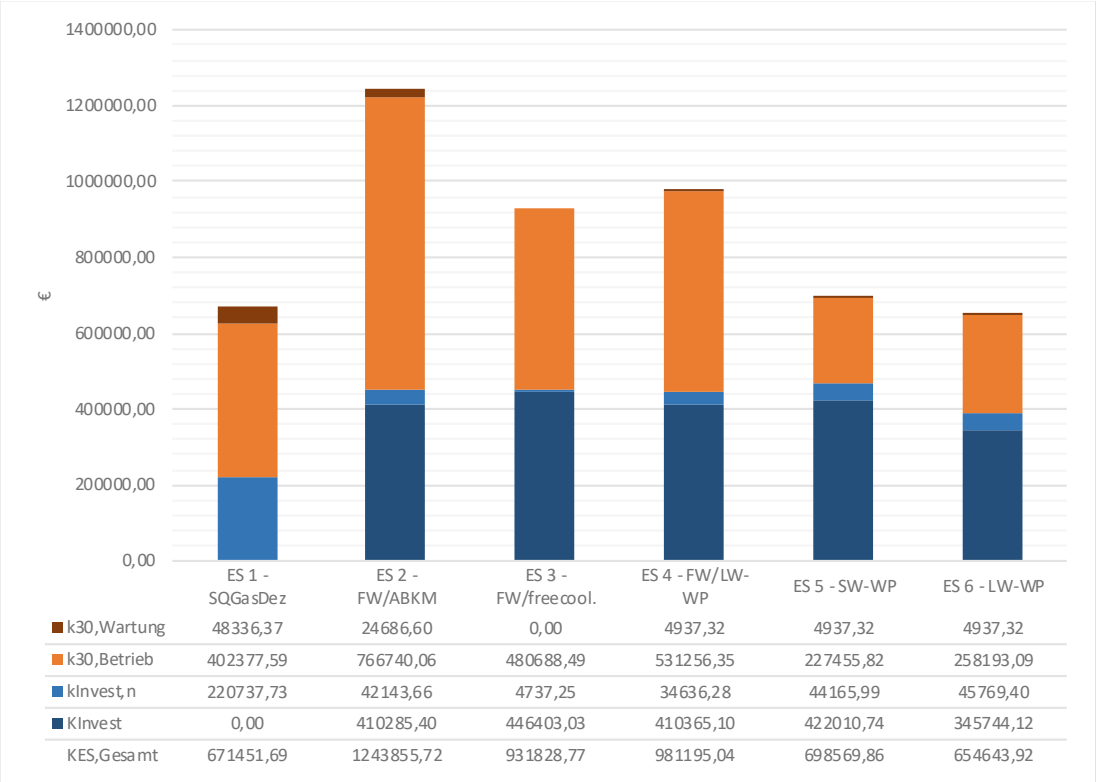

Diagramm 1. Vergleich der Lebenszyklusteilkosten für die Energiesysteme ES 1 bis ES 6

Insgesamt verursacht die Umstellung auf das „Energiesystem 6 - Luftwärmepumpe für Wärme und Kälte“ und auf das „Energiesystem 5 - Erdwärmepumpe für Wärme und Kälte“ vergleichsweise geringe Lebenszyklusteilkosten (vgl. Diagramm 1). Dies ist auf marginal geringere initiale Investitionskosten im Vergleich zu netzgebundenen Lösungen zurückzuführen, sowie insbesondere auf die geringen Betriebskosten durch eine hohe Anlageneffizienz. Das Energiesystem 1 - Status Quo verursacht ebenfalls geringe Lebenszyklusteilkosten, wobei trotz initialer Unterlassung einer Umstellung des Energiesystems hohe Investitionskosten notwendig sind, um die dezentralen Gasbrennwertthermen und relevante sonstige Anlagenkomponenten zu erneuern. Es soll darauf hingewiesen werden, dass diese zukünftigen Investitionskosten voraussichtlich keine Subvention durch die öffentliche Hand unterliegen werden, während die Umstellung auf erneuerbare Energiesysteme derzeit durch eine Reihe von staatlichen bzw. kommunalen Förderprogrammen mit einer Auszahlung von max. 30% der förderbaren Investitionskosten gefördert werden, wobei durch eine Kombination von Bundes- und Landesförderungen eine anteilsmäßige Auszahlung der förderbaren Kosten von jenseits der 50% resultieren

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Masterarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

kann (vgl. BKA 2024). Aus ökonomischer Perspektive ist der Umstieg auf ein nachhaltiges Energiesystem somit zu empfehlen.

Die Investitionskosten bei einer Umstellung auf Fernwärme stellen sich ähnlich dar, gesamthaft tragen jedoch die vergleichsweise hohen Betriebskosten, begründet durch die im Vergleich zu Wärmepumpentechnologien geringe Anlageneffizienz der Fernwärmeübergabestation bzw. der ABKM, zu vergleichsweise hohen Lebenszyklusteilkosten bei.

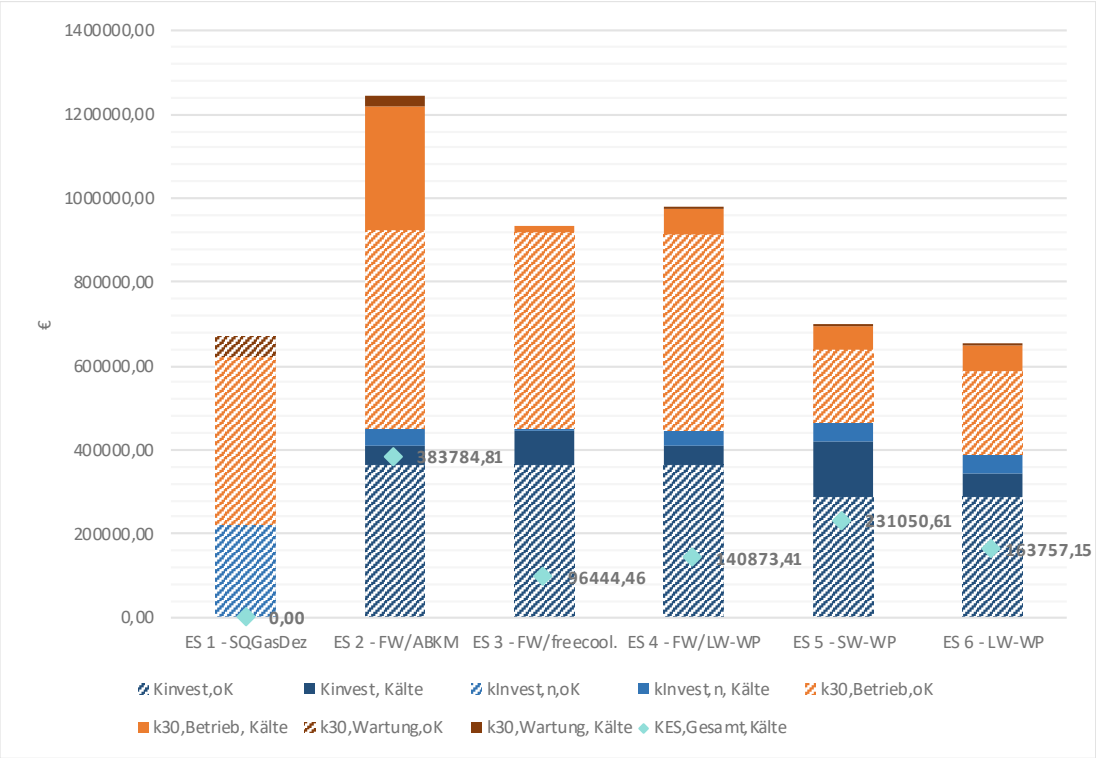

Diagramm 2. Vergleich der Lebenszyklusteilkosten direkt bedingt durch Gebäudekühlung, für die Energiesysteme ES 1 bis ES 6

Eine Betrachtung der Lebenszyklusteilkosten, die direkt durch die Errichtung und den Betrieb von Kälteversorgungsanlagen bedingt sind, ist die freie Kühlung (als Teil des Energiesystems 3) die aus ökonomischer Perspektive vorzuziehende nachhaltige Technologie für Gebäudekühlung (vgl. Diagramm 2). Während die Investitionskosten für die Herstellung der Erdsonden durchaus vergleichbar mit der Errichtung bzw. Erneuerung der Luftwärmepumpe oder ABKM für Kühlzwecke sind, sind die Betriebskosten in diesem Fall sehr gering, da keine aktive Kältemaschine im Einsatz ist. Auch der Einsatz von Luft- bzw. Erdwärmepumpen zur aktiven Kühlung weisen vergleichsweise geringe Lebenszyklusteilkosten auf. Für die ABKM wurden hohe Kosten ermittelt, vor allem bedingt durch ihre geringe Anlageneffizienz.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Masterarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

4.1.4.2 Vergleich der Emissionen

Das Energiesystem ES 1 - Status quo mit dem Energieträger Erdgas weist circa das drei- bis siebenfache an äquivalenten Kohlendioxidemissionen als andere Energiesysteme über den Betrachtungszeitraum von 30 Jahren auf. Weiter verursachen Energiesysteme basierend auf Wärmepumpentechnologien mehr äquivalente Kohlendioxidemissionen als Fernwärme-basierte Systeme. Dies ist durch den besonders günstigen Konversionsfaktor der Fernwärme $f_{CO2,eq,FW}$ = 22 [g/kWh] im Vergleich zum österreichischen Strom-Liefermix bedingt, welcher gemäß OIB Richtlinie 6 mit $f_{CO2,eq,FW}$ = 156 [g/kWh] beziffert ist. Das Energiesystem 3 - Fernwärme und freie Kühlung mit Erdsonden werden am wenigsten äquivalente Kohlendioxidemissionen verursacht. Mit 71,58 Tonnen über den Betrachtungszeitraum von 30 Jahren werden lediglich circa 13% der äquivalenten Treibhausgasemissionen des Energiesystem 1 - Status Quo ausgestoßen.

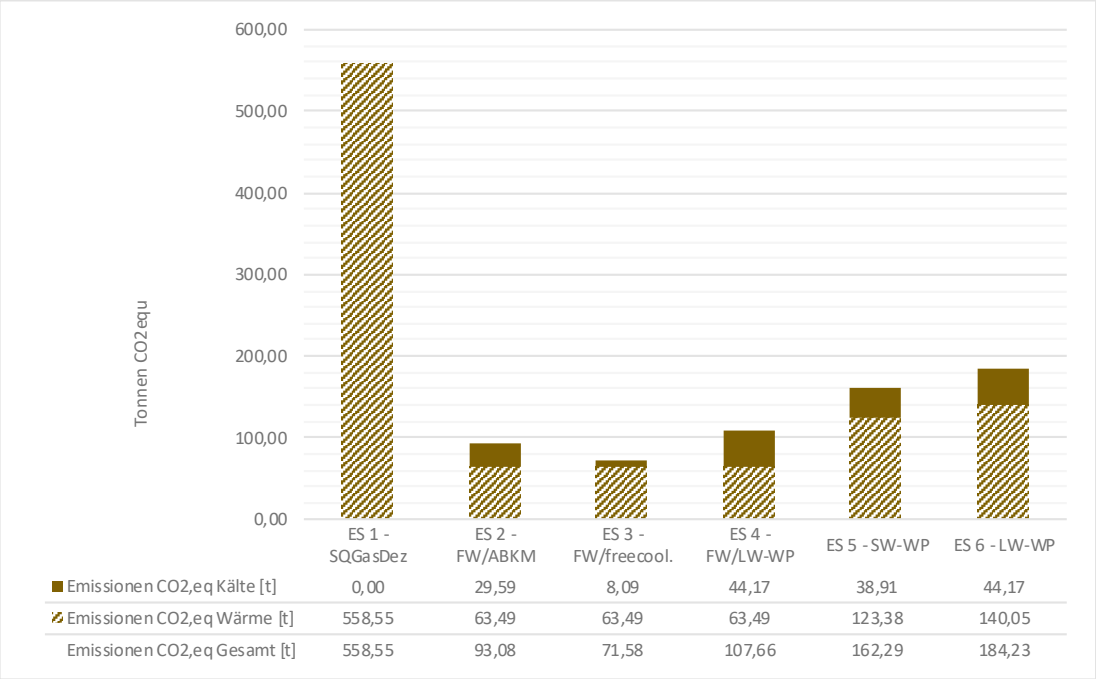

Diagramm 3. Vergleich der äquivalenten Kohlendioxidemissionen $CO_{2,eq}$ verursacht durch den Betrieb der Energiesysteme ES 1 bis ES 6, zzgl. der äquivalenten Kohlendioxidemissionen direkt bedingt durch Gebäudekühlung

Hinsichtlich äquivalenter Kohlendioxidemissionen, die direkt durch den Betrieb von Kälteversorgungsanlagen ausgestoßen werden, ist die freie Kühlung ohne den aktiven Betrieb einer Kältemaschine am nachhaltigsten, gefolgt von der ABKM und der Sole-Wasser-Wärmepumpe. Die Nutzung der Luftwärmepumpe für Gebäudekühlung verursacht am meisten Emissionen, was durch die geringere Anlageneffizienz im Vergleich zur Sole-Wasser-Wärmepumpe bedingt ist.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Masterarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

Die Betrachtung der ermittelten durch Kühlprozesse verursachten Abwärme ergibt der Betrieb einer ABKM mehr als doppelt so hohe Mengen an thermischer Energie, die in den Sommermonaten an die unmittelbare Umgebung abgegeben werden, als bei der Nutzung von Luftwärmepumpen zur Gebäudekühlung. Bei der Nutzung einer Erdwärmepumpe im saisonal ausgeglichenen Betrieb fällt keine Abwärme an, da das Erdreich als Wärmesenke in der Kühlperiode fungiert. Bei der freien Kühlung kann im Falle gegenständlichen Kombination mit Fernwärme Abwärme anfallen, um das Erdreich um die Erdsonden zu regenerieren, jedoch mit potentiell weniger negativen Auswirkungen als bei aktiven Betrieb einer Kältemaschine im Sommer, da die Abwärme zur Regeneration des Erdreichs nicht zwingend in den heißen Sommermonaten anfallen muss.

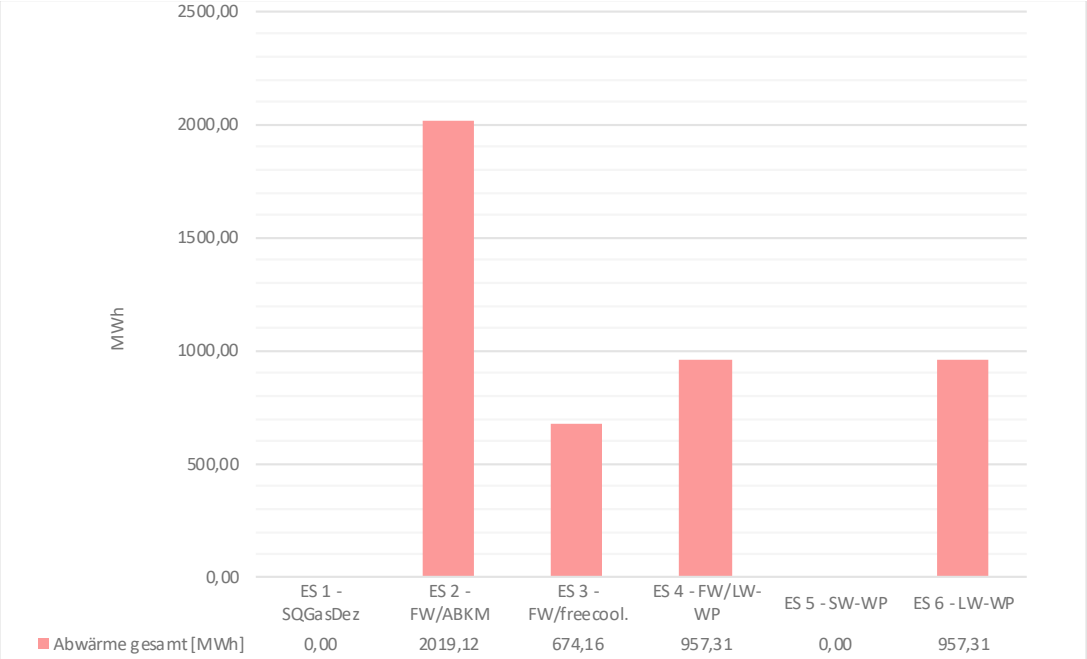

Diagramm 4. Vergleich der Abwärme Q_{Abw} aus Rückkühlung über den Betrachtungszeitraum, für die Energiesysteme ES 1 - ES 6

4.1.4.3 Ökonomisch-ökologisch optimales Energiesystem

Folgend der in *Kapitel 3.3.4* dargelegten Methodik für die Findung des ökonomisch-ökologische Variante wird durch die Anwendung der Zielfunktion mit der Gewichtungsfaktoren $\alpha = \overline{0.3}$, $\beta = \overline{0.3}$ und $\gamma = \overline{0.3}$ ermittelt. Als ökologisch-ökonomisch optimales Energiesystem wird das ES 5 - Erdwärmepumpe für Wärme und Kälte bestimmt, vgl. Tabelle 15. Auch die Luftwärmepumpe für Wärme- und Kälteversorgung sowie die Fernwärme in Kombination mit Erdsonden zur freien Kühlung hat gute ökomisch-ökologische Zielwerte.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Masterarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

	K_{ES} [€]	K_{ES}' [€]	$CO_{2,eq}$ [t]	$CO_{2,eq}$' [t]	Q_{Abw} [MWh]	Q_{Abw} ' [MWh]	Zielwert	Rang
ES 1 - SQGas Dez	671451,69	0,03	558,55	1,00	0,00	0,00	0,34	4
ES 2 - FW/ABKM	1243855,72	1,00	93,08	0,04	2019,12	1,00	0,68	6
ES 3 - FW/freecool	931828,77	0,47	71,58	0,00	674,16	0,33	0,27	3
ES 4 - FW/LW-WP	981195,04	0,55	107,66	0,07	957,31	0,47	0,37	5
ES 5 - SW-WP	698569,86	0,07	162,29	0,19	0,00	0,00	0,09	1
ES 6 - LW-WP	654643,92	0,00	224,61	0,31	957,31	0,47	0,26	2

Tab. 15.: Bestimmung des ökonomisch-ökologisch optimales Energiesystems gemäß der gewichteten Zielfunktion. Die ersten 3 Ränge sind in grün hinterlegt.

Folgend der Betrachtung derer Lebenszyklusteilkosten und Emissionen, die direkt aus der Errichtung bzw. Erneuerung und dem Betrieb der Kälteanlagen entstehen, wird die ökologisch-ökonomisch optimale Kälteanlage als freie Kühlung *(free cooling)* bestimmt, vgl. Tabelle 16. Auch für die Erdwärmepumpe und Luftwärmepumpe zur Kälteversorgung sind gute ökomisch-ökologische Zielwerte zu verzeichnen. Abgeschlagen liegt die ABKM am letzten Rang mit einem hohen ökonomisch-ökologischen Zielwert.

	K_{ES} [€]	K_{ES}' [€]	$CO_{2,eq}$ [t]	$CO_{2,eq}$' [t]	Q_{Abw} [MWh]	Q_{Abw} ' [MWh]	Zielwert	Rang
ES 2 – ABKM für Kälte	383784,81	1,00	29,59	0,60	2019,12	1,00	0,87	5
ES 3 – free cooling	96444,46	0,00	8,09	0,00	674,16	0,33	0,11	1
ES 4 - LW-WP für Kälte	140873,41	0,15	44,17	1,00	957,31	0,47	0,54	3
ES 5 - SW-WP Wärme&Kälte	231050,61	0,47	38,91	0,85	0,00	0,00	0,44	2
ES 6 - LW-WP Wärme&Kälte	163757,15	0,23	44,17	1,00	957,31	0,47	0,57	4

Tab. 16.: Bestimmung der ökonomisch-ökologisch optimalen Kälteanlage gemäß der gewichteten Zielfunktion. Die ersten 3 Ränge sind in blau unterlegt.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Masterarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

4.1.5 Sensitivitätsanalyse

Die ermittelten Ergebnisse werden im Rahmen einer lokalen, Szenarien-basierten Sensitivitätsanalyse auf ihre (lokale) Robustheit bzw. Sensitivität gegenüber Änderungen maßgeblicher Parameter der Modellrechnung überprüft.

Von einer Änderung von Anlageneffizienz-Parametern wird in der Folge abgesehen, da einerseits sämtliche Technologien einen hohen Technology Readiness Level (TRL) besitzen (vgl. Holzer et al. 2022) und so in absehbarer Zeit voraussichtlich nicht mit starken Erhöhungen der Effizienz einzelner Technologien zu rechnen ist, die das Endergebnis maßgeblich beeinflussen würden.

4.1.5.1 Szenario 1 - Fokus auf Kostenoptimalität

Die Gewichtungsfaktoren der Zielfunktion werden abgeändert, wobei der Kostenoptimalität im Sinne geringer Lebenszyklusteilkosten mit $\alpha = 0{,}9$, $\beta = 0{,}05$, $\gamma = 0{,}05$ am meisten Gewicht gegeben wird. Es wird das Energiesystem 6 - Luftwärmepumpe für Wärme und Kälte als optimales System bestimmt, vgl. Anhang B, Tabelle B1. Folgend der Betrachtung derer Lebenszyklusteilkosten und Emissionen, die direkt aus der Errichtung bzw. Erneuerung und dem Betrieb der Kälteanlagen entstehen, gleich den initialen Ergebnissen der Modellrechnung die freie Kühlung als ökonomisch-ökologisch optimale Kälteversorgungssanlage bestimmt, vgl. Anhang B, Tabelle B2.

4.1.5.2 Szenario 2 - Fokus auf ökologische Optimalität

Die Gewichtungsfaktoren der Zielfunktion werden abgeändert, wobei der ökologischen Optimalität im Sinne geringer äquivalenter Kohlendioxidemissionen und geringem Anfall von Abwärme aus Kühlprozessen mit $\alpha = 0{,}1$, $\beta = 0{,}45$, $\gamma = 0{,}45$ am meisten Gewicht gegeben wird. Es wird das Energiesystem 5 - Erdwärmepumpe für Wärme und Kälte als optimales System bestimmt, vgl. Anhang B, Tabelle B3. Folgend der Betrachtung derer Lebenszyklusteilkosten und Emissionen, die direkt aus der Errichtung bzw. Erneuerung und dem Betrieb der Kälteanlagen entstehen, wiederum die freie Kühlung als ökonomisch-ökologisch optimale Kälteversorgungsanlage bestimmt, vgl. Anhang B, Tabelle B4.

4.1.5.3 Szenario 3 - Dekarbonisierung der Fernwärme bis 2024

Es wird davon ausgegangen, dass die Fernwärme bis 2040 vollständig dekarbonisiert wird, gemäß den aktuellen Absichten maßgeblicher Energiedienstleister im Wiener

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Masterarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Raum. Dazu wird eine lineare Reduktion des aktuelle Konversionsfaktors $f_{CO2,eq,FW} = 22$ [g/kWh] angenommen, bis $f_{CO2,eq,FW} = 0$ [g/kWh] ab dem Jahr 2040. Dies entspricht einer jährlichen Reduktion des Konversionsfaktors der Fernwärme um 1,38 %. Es wird gleich den initialen Ergebnissen das Energiesystem 5 - Erdwärmepumpe für Wärme und Kälte als optimales System bestimmt, vgl. Anhang B, Tabelle B5. Folgend der Betrachtung derer Lebenszyklusteilkosten und Emissionen, die direkt aus der Errichtung bzw. Erneuerung und dem Betrieb der Kälteanlagen entstehen, wird wiederum die freie Kühlung als ökonomisch-ökologisch optimal bestimmt, vgl. Anhang B, Tabelle B6.

4.1.5.4 Szenario 4 - Reduktion des Fernwärmepreises

Die Auswirkungen eines starken Abfalls des Fernwärmepreises auf die ökomisch-ökologische Optimalität wird mit einer Verminderung der Preissteigerungsrate q_{FW} = 1,3 % p.a. auf eine negative Preissteigerungsrate („Deflationsrate“) von 6 % p.a. untersucht. Es wird das Energiesystem 3 – Fernwärme und freie Kühlung mit Erdsonden als optimales System bestimmt, vgl. Anhang B, Tabelle B7. Folgend der Betrachtung derer Lebenszyklusteilkosten und Emissionen, die direkt aus der Errichtung bzw. Erneuerung und dem Betrieb der Kälteanlagen entstehen, wird wiederum die freie Kühlung als optimal bestimmt, vgl. Anhang B, Tabelle B8.

4.1.5.5 Szenario 5 - Dekarbonisierung des Strom-Liefermix ab 2030

Es wird davon ausgegangen, dass der Strom-Liefermix bis 2030 vollständig dekarbonisiert wird, gemäß § 4 Art 2 EAG. Dazu wird eine lineare Reduktion des aktuellen Konversionsfaktors $f_{CO2,eq,El} = 156$ [g/kWh] angenommen, bis $f_{CO2,eq,El} = 0$ [g/kWh] ab dem Jahr 2030. Das entspricht einer jährlichen Reduktion der äquivalenten Kohlendioxidemissionen um 16,67% pro Jahr. Es wird das Energiesystem 5 - Erdwärmepumpe für Wärme und Kälte als optimales System bestimmt, vgl. Anhang B, Tabelle B9. Folgend der Betrachtung derer Lebenszyklusteilkosten und Emissionen, die direkt aus der Errichtung bzw. Erneuerung und dem Betrieb der Kälteanlagen entstehen, wird wiederum die freie Kühlung als ökomisch-ökologisch optimal bestimmt, vgl. Anhang B, Tabelle B10.

4.1.5.6 Szenario 6 - Starker Anstieg des Strompreises

Es wird untersucht, um angesichts der bisher guten Zielwerte für mit Strom betriebene Wärmepumpentechnologien, ein starker Anstieg des Strompreises die ökonomisch-ökologische Optimalität beeinflusst. Dazu wird angenommen, dass die

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Masterarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

Preissteigerungsrate des Strom-Liefermix für Privatkunden q_{El} von derzeit 2,4 % p.a. auf 6 % p.a. erhöht wird. Es wird wiederum das Energiesystem 5 - Erdwärmepumpe für Wärme und Kälte als optimales System bestimmt, vgl. Tabelle Anhang B, Tabelle B11. Wiederum wird die freie Kühlung als ökomisch-ökologisch optimale Kälteversorgungsanlage bestimmt, vgl. Anhang B, Tabelle B12.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Masterarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

5 Diskussion

Der Vergleich der untersuchten Energiesysteme in Bezug auf ihre Lebenszyklusteilkosten, äquivalenten Kohlendioxidemissionen und Abwärme aus Kühlprozessen führt zu konsistenten Ergebnissen. Das Energiesystem 5 - **Erdwärmepumpe für Wärme und Kälte** erweist sich in nahezu allen untersuchten Szenarien als das ökonomisch-ökologisch optimale Energiesystem, was durch eine Kombination aus vergleichsweise niedrigen Lebenszyklusteilkosten und moderaten äquivalenten Kohlendioxidemissionen und keiner an die unmittelbare Umgebung abgegebener Abwärme in den Sommermonaten zu erklären ist. Sole-Wasser-Wärmepumpen in Kombination mit Erdsonden verfügen über eine hohe Anlageneffizienz, wodurch äußert geringe Betriebskosten und, insbesondere bei Betrieb der Anlage mit Ökostrom, äußert geringe Emissionen entstehen können. Es ist jedoch zu betonen, dass dieses Ergebnis im Rahmen dieser These durch die Annahme einer saisonal ausgeglichenen Betriebsweise der Anlage begründet ist, wodurch die Abgabe von Abwärme zur Regenerierung des Erdreichs um die Erdsonden obsolet wird. In einem Großteil der Szenarien bleibt die ökonomisch-ökologische Optimalität des Energiesystems gegenüber Änderungen in den zugrundeliegenden Annahmen, wie der Dekarbonisierung der Fernwärme bis 2040 oder einem deutlichen Anstieg des Strompreises, stabil.

		Sz. 1	**Sz. 2**	**Sz. 3**	**Sz. 4**	**Sz. 5**	**Sz. 6**
	Ergebnisse	*Fokus auf Kostenoptimalität*	*Fokus auf ökologische Optimalität*	*Dekarbonisierung der Fernwärme bis 2040*	*Reduktion des Fernwärmepreises*	*Dekarbonisierung des Strom-Liefermix ab 2030*	*Starker Anstieg des Strompreises*
ES 1 - SQGas Dez	**4**	2	5	5	5	4	3
ES 2 – FW/ABKM	**6**	6	6	6	6	6	6
ES 3 – FW/free cooling	**3**	4	2	2	1	3	2
ES 4 – FW/LW-WP	**5**	5	3	5	4	5	5
ES 5 – SW-WP	**1**	3	1	1	2	1	1
ES 6 – LW-WP	**2**	1	4	3	3	2	4

Tab. 17.: Vergleich der ökonomisch-ökologischen Optimalität für die Energiesysteme 1 bis 6; initiale Ergebnisse und Ergebnisse unter Annahme der Szenarien (Sz.) 1 bis 6

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Masterarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Die Analyse des Energiesystem 6 (Luftwärmepumpe für Wärme und Kälte) als zweites untersuchtes Energiesystem, das alleinig auf einer Wärmepumpentechnologie zur Wärme- und Kältebereitstellung basiert, ermittelt ebenfalls meist gute Zielwerte, insbesondere wenn der Fokus auf Kostenoptimalität gelegt wird (Szenario 1). Hier zeigt sich die Luftwärmepumpe als das optimale System. Hinsichtlich der Szenarien, die auf ökologische Aspekte (z.B. Szenario 2) fokussieren, erweist sich das Energiesystem als weniger attraktiv, was insbesondere durch die im Vergleich zur Sole-Wasser-Wärmepumpe geringere Anlageneffizienz und die Abgabe von Abwärme an die unmittelbare Umgebung begründet ist. Unter Annahme eines dekarbonisierten Strom-Liefermix ab 2030 kommt es zu einer starken Verbesserung der ökologischen Performance des Energiesystems.

Die Energiesysteme basierend auf Fernwärme, insbesondere das Energiesystem 3 (Fernwärme und freie Kühlung), zeigen sich unter Betrachtung spezifischer Szenarien als ökomisch-ökologisch optimal bzw. wettbewerbsfähig. Insbesondere die Fernwärme zur Wärmebereitstellung in Kombination mit freier Kühlung erreicht durchwegs gute Zielwerte. Dennoch bleibt die Herausforderung der ermittelten vergleichsweise hohen Lebenszyklusteilkosten, die insbesondere durch die im Vergleich zu Wärmepumpentechnologien geringere Anlageneffizienz begründet sind. Das Szenario 4 - Reduktion des Fernwärmepreises kann diese geringere Anlageneffizienz allerdings durch die Reduktion der Energiekosten ausgleichen, was zur ökonomisch-ökologischen Optimalität des Energiesystem 3 – Fernwärme und freie Kühlung führt. Auch die Dekarbonisierung der Fernwärme bis 2040 (Szenario 3) zeigt Potenzial zur Verbesserung der ökonomisch-ökologischen Optimalität der Fernwärmesysteme, wobei die Kombination der Fernwärme mit freier Kühlung bzw. Luftwärmepumpe zur Kühlung in diesem Fall gute Zielwerte erreicht.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Masterarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

		Sz. 1	Sz. 2	Sz. 3	Sz. 4	Sz. 5	Sz. 6
	Ergebnisse	*Fokus auf Kostenoptimalität*	*Fokus auf ökologische Optimalität*	*Dekarbonisierung der Fernwärme bis 2040*	*Reduktion des Fernwärmepreises*	*Dekarbonisierung des Strom-Liefermix ab 2030*	*Starker Anstieg des Strompreises*
ES 2 – ABKM für Kälte	**5**	5	5	5	5	5	5
ES 3 – free cooling	**1**	1	1	1	1	1	1
ES 4 - LW-WP für Kälte	**3**	2	3	3	2	3	3
ES 5 - SW-WP Wärme&Kälte	**2**	4	2	2	4	2	2
ES 6 - LW-WP Wärme&Kälte	**4**	3	4	4	3	4	4

Tab. 18.: Vergleich der ökonomisch-ökologischen Optimalität für die Kälteversorgungsanlagen der Energiesysteme 1 bis 6; initiale Ergebnisse und Ergebnisse unter Annahme der Szenarien Sz. 1 bis 6

Die Analyse derer Lebenszyklusteilkosten und Emissionen, die direkt aus der Errichtung, Erneuerung bzw. dem Betrieb der Kältemaschinen bzw. Anlagen zur Gebäudekühlung entstehen, ermittelt konsistent die **freie Kühlung** (als Teil des Energiesystem 3) als ökonomisch-ökologisch optimale Lösung. Dies ist durch die äußert hohe Analgeneffizienz der freien Kühlung bedingt, die wiederum durch den alleinigen Betrieb von zur Zirkulation des Wärmetransfermediums eingesetzten Umwälzpumpen für die Deckung des Kühlenergiebedarfs begründet ist. Eine Betrachtung der Lebenszyklusteilkosten zeigt weiter, dass die initialen Investitionskosten für freie Kühlung durch die Herstellung eines Erdsondenfelds zwar vergleichsweise hoch sind, jedoch nur äußert geringe zukünftige Investitionskosten zur Erneuerung vergleichsweise niedrig gepreister Anlagenkomponenten anfallen. Die Betriebskosten fallen ebenfalls äußert gering aus. Unter der Annahme geänderter Rahmenbedingungen bleibt die freie Kühlung durchwegs die ökomisch-ökologisch optimale Technologie zur Gebäudekühlung, gefolgt von der Sole-Wasser-Wärmepumpe, die meist gute Zielwerte erreichen kann.

Auffällig ist die Position der ABKM (als Teil des Energiesystems 2), die durchgehend die ungünstigsten ökologisch-ökonomische Zielwerte in allen Szenarien aufweist. Diese sind vor allem auf die vergleichsweise geringe Anlageneffizienz der ABKM und die dadurch hohen Betriebskosten sowie den hohen Anfall von Abwärme zurückzuführen.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Masterarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

6 Schlussfolgerung und Ausblick

Zur Beantwortung der Forschungsfrage dieser These wurden ausgewählte Energiesysteme in ihrer Gesamtheit (Wärme, Warmwasser, Kälte) einer vergleichenden ökonomisch-ökologischen Analyse unterzogen, um die Situation *in realitas* bestmöglich abzubilden, wobei Systeme zur Gebäudekühlung i.d.R. als Erweiterung eines Energiesystems zur Raumwärme- und Warmwasserversorgung umgesetzt werden. Darüber hinaus wurden alleinig die Kosten und Umweltauswirkungen analysiert, die direkt durch die Errichtung, Erneuerung und den Betrieb technischer Anlagen zur Gebäudekühlung entstehen, um die verschiedenen Kältetechnologien unabhängig von dem jeweilig eingesetzten Heizsystem vergleichbar zu machen.

Im Kontext des innerstädtischen Wiener Wohnbaubestands wird insbesondere die **freie Kühlung unter Nutzung des Erdreichs als Wärmesenke**, sowie der Einsatz von **Sole-Wasser-Wärmepumpen in Verbindung mit vertikalen Erdsondenbohrungen** als ökonomisch-ökologisch optimal ermittelt, unter Berücksichtigung entstehender Lebenszyklusteilkosten zzgl. der initialen und zukünftigen Investitionskosten, der äquivalenten Kohlendioxidemissionen und der durch Kühlprozesse entstehenden Abwärme über einen Betrachtungszeitraum von 30 Jahren. Die Anwendbarkeit der ABKM zur Gebäudekühlung kann dagegen als stark eingeschränkt bezeichnet werden. Die Analyse verdeutlicht darüber hinaus die ökonomisch-ökologisch gute Performance der Fernwärme, die weiter durch Dekarbonisierungsmaßnahmen bis 2040 und etwaige zukünftige Preisreduktionen gesteigert werden kann.

Insgesamt unterstreicht die vorgenommene Untersuchung die Notwendigkeit einer differenzierten Betrachtung und Auswahl von Energiesystemen bzw. Technologien zur Gebäudekühlung, abhängig von den spezifischen ökologischen und ökonomischen Zielsetzungen, sowie den zu erwarteten Entwicklungen in den Bereichen Energieeffizienz, Bau- bzw. Energiekosten und etwaigen Bestrebungen und gesetzlichen Vorgaben zur Emissionsreduktion.

Die in dieser Masterthese durchgeführte Modellrechnung und die darauf basierende Optimierung unterliegen mehreren Limitationen. Die durchgeführte lineare Optimierung mit kombinierter, gewichteter Zielfunktion basiert auf einer vereinfachten Modellrechnung unter Annahme eines typischen Referenzgebäudes für den innerstädtischen Wiener Wohnbaubestand, die reale baulichen Gegebenheiten und

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Masterarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

relevanten Überlegungen zur Bestimmung geeigneter Energiesysteme nicht vollständig und projektspezifisch abbilden kann. Der Fokus dieser These liegt auf einer vergleichenden Bewertung der Energiesysteme unter gleichen Ausgangsbedingungen, wobei keine Aussagen über projektspezifische Trade-Offs und bauliche bzw. anlagentechnische Gegebenheiten getroffen werden kann. Zudem wurden einige Grundlagen für die Modellrechnung, wie etwa konstante Energiepreise und linear fallende äquivalente Kohlendioxidemissionen im Zuge einer Dekarbonisierung, als gegeben angenommen, wobei diese in der Praxis erheblichen Schwankungen unterliegen können. Schließlich wurden potenzielle zukünftige technologische Entwicklungen und Marktdynamiken nicht umfassend berücksichtigt, was die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf zukünftige Szenarien ggf. einschränken könnte.

Anknüpfende Forschungsarbeiten können darauf abzielen, die in dieser Arbeit identifizierten Limitierungen durch die Anwendung geeigneter multikriterieller Optimierungsalgorithmen, detaillierterer Modellrechnungen sowie einer hinreichend robusten Prognostizierung wichtiger Grundlagen und Annahmen zu überwinden. Insbesondere können stochastische Modelle eingesetzt werden, um Wahrscheinlichkeitsverteilungen und Variabilität in den Kosten- und Emissionsdaten besser zu erfassen. Zudem könnten die Zielgrößen der Optimierung um soziale Aspekte erweitert werden, welche bspw. den Aufwand der Umsetzung für Bewohner*innen, oder die Verfügbarkeit von ausführenden Fachkräften und Anlagenkomponenten im Wiener Raum abbilden.

Vor dem Hintergrund der ermittelten deutlichen Unterschiede einzelner Technologien zur Gebäudekühlung hinsichtlich ihres Potentials, die zukünftig steigenden Kühlenergiebedarfe im Wiener Raum mit minimalen ökonomischen Aufwand und minimalen Umweltauswirkungen zu decken, ist die evidenzbasierten Analyse und Auswahl von Energiesystemen zur nachhaltigen, aktiven Gebäudekühlung unerlässlich, um die Energiewende erfolgreich zu meistern.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Masterarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

7 Literaturverzeichnis

AK Wien (2024): Heizkostenabrechnung bei der Fernwärme Wien, [online] https://wien.arbeiterkammer.at/beratung/Wohnen/Heizkostenabrechnung/Heizkostenabrechnung_bei_der_Fernwaerme_Wien.html#:~:text=Der%20Grundpreis%20(verbrauchsunabh%C3%A4ngiger%20Teil)%20betr%C3%A4gt,also%20ohne%20Umsatzsteuer%20(USt). [abgerufen am 03.08.2024].

Austrian Energy Agency [AEA] (2024): Energiepreisindex - Verbraucherpreisindex, VPI Und EPI der Letzten 3 Jahre, [online] https://www.statistik.at/statistiken/industrie-bau-handel-und-dienstleistungen/konjunktur/baukostenindex [abgerufen am 15.08.2024].

Baukosteninformationszentrum [BKI] (2023): BKI Baupreise Kompakt 2024 - Neubau + Altbau: Statistische Baupreise für Positionen mit Kurztexten.

Baukosteninformationszentrum Deutscher Architektenkammern GmbH [BKI] (2024): Aktueller Baupreisindex & Daten aus vorherigen Jahren, [online] https://bki.de/baupreisindex [abgerufen am 18.07.2024].

BauNetz (2023a): Kälteerzeugung mit Kompression, [online] https://www.baunetzwissen.de/gebaeudetechnik/fachwissen/kuehlen-klimatisieren/kaelteerzeugung-mit-kompression-2492693 [abgerufen am 04.03.2024].

BauNetz (2023b): Absorptionskältemaschine, [online] https://www.baunetzwissen.de/solar/fachwissen/solarkaelte/absorptionskaeltemaschine-165906 [abgerufen am 23.03.2024].

BauNetz (2023c): Adsorptionskältemaschine, [online] https://www.baunetzwissen.de/solar/fachwissen/solarkaelte/adsorptionskaeltemaschine-165908 [abgerufen am 24.03.2024].

Birkmann, Jörn (2008): Globaler Umweltwandel, Naturgefahren, Vulnerabilität und Katastrophenresilienz, in: Raumforschung und Raumordnung, Bd. 66, Nr. 1, [online] doi:10.1007/bf03184043.

Bohle, Hans-Georg (2019): Geographische Entwicklungsforschung, in: Hans Gebhardt/Rüdiger Glaser/Ulrich Radtke/Paul Reuber/Andreas Vött (Hrsg.), Geographie. Physische Geographie und Humangeographie., Springer Spektrum.

Bohne, Dirk (2022): Gebäudetechnik und technischer Ausbau von Gebäuden, Springer eBooks, [online] doi:10.1007/978-3-658-37488-4.

Bundeskanzleramt Österreich [BKA] (2024): „Raus aus Öl und Gas“ 2023/2024, [online] https://www.oesterreich.gv.at/themen/umwelt_und_klima/energie_und_ressourcen_sparen/1/raus_aus_oel.html [abgerufen am 16.08.2024].

Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie [BMK] (2024): Wärmepumpen mit Erdsondenspeichern: Eine Fachinformation für Gemeinden zur Unterstützung gemeinschaftlich umgesetzter Wärmepumpenanlagen.

Dehli, Martin (2021): Kompendium Technische Thermodynamik, Springer eBooks, [online] doi:10.1007/978-3-658-34540-2.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Masterarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Dörn, Markus (2020): OIB RL 6 :2019 Nachweis des sommerlichen Wärmeschutzes, ArchiPHYSIK, [online] https://archiphysik.at/oib-rl-6-2019-nachweis-des-sommerlichen-waermeschutzes/ [abgerufen am 03.07.2024].

E-Control (2024): Überblick über aktuelle Strom- und Gaspreise, E-Control Preismonitor, [online] https://www.e-control.at/preismonitor [abgerufen am 23.07.2024].

Elnagar, Essam/Simon Pezzutto/Bruno Duplessis/Théodore Fontenaille/Vincent Lemort (2023): A comprehensive scouting of space cooling technologies in Europe: Key characteristics and development trends, in: Renewable & Sustainable Energy Reviews, Bd. 186, S. 113636, [online] doi:10.1016/j.rser.2023.113636.

Englisch, Constanze/Eva Kaminsky/Cornelia Steiner/Christine Stumpp/Gregor Götzl/Christian Griebler (2022): Heat below the City – Is temperature a key driver in urban groundwater ecosystems?, in: ARPHA Conference Abstracts, Bd. 5, [online] doi:10.3897/aca.5.e89677.

European Commission (2024): Disaggregated final energy consumption in households - quantities, [Eurostat Data Browser] doi:10.2908/NRG_D_HHQ.

Fanger, P.O. (1988): FUNDAMENTALS OF THERMAL COMFORT, in: Elsevier eBooks, S. 3056–3061, [online] doi:10.1016/b978-0-08-034315-0.50562-0.

Finkbeiner, Matthias/Erwin M. Schau/Annekatrin Lehmann/Marzia Traverso (2010): Towards life cycle sustainability assessment, in: Sustainability, Bd. 2, Nr. 10, S. 3309–3322, [online] doi:10.3390/su2103309.

Frank, Walther (1975): Raumklima und thermische Behaglichkeit: Literaturauswertung durchgeführt im Auftrage des Bundesministers für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau; mit 12 Tabellen.

GeoSphere Austria (2024): Geothermie Atlas, [online] https://geothermieatlas.geosphere.at/ [abgerufen am 23.07.2024].

Giebeler, Georg/Rainer Fisch/Harald Krause/Florian Musso/Karl-Heinz Petzinka/Alexander Rudolphi (2012): Atlas Sanierung: Instandhaltung, Umbau, Ergänzung, Walter de Gruyter.

Graubner, Carl-Alexander/Katja Hüske (2003): Nachhaltigkeit im Bauwesen, John Wiley & Sons.

Hartner, Michael/Sebastian Forthuber/Lukas Kranzl/Sara Fritz/Andreas Müller/Christiane Bernath/Frank Sensfuß/Hector Maranon-Ledesma (2017): D. 5.3: Summary report on case study: Energy demand and supply in buildings and the role for RES market integration, [online] doi:10.24406/publica-fhg-299333.

Herold, Keith E./Reinhard Radermacher/Sanford A. Klein (2016): Absorption Chillers and Heat Pumps, CRC Press eBooks, [online] doi:10.1201/b19625.

Holzer, Peter/Philipp Stern/Ai Zhengtao/Jan Akander/Edward Arens/Taha Arghand/Shady Attia/Dragos-Ioan Bogatu/Emmanuel Bozonnet/Hilde Breesch/Mathias Cehlin/Giacomo Chiesa/Feryal Chtioui/Essam Elnagar/Abolfazl Hayati/Per Heiselberg/Peter Holzer/Saqib Javed/Ongun Kazanci/Maria Kolokotroni/Vincent Lemort/Ronnen Levinson/Ardeshir Mahdavi/Bjarne Olesen/Ramin Rahif/Patrick Salagnac/Agnese Salvati/Sana Sayadi/Stephen Selkowitz/Abantika Sengupta/Behzad Sodagar/Philipp

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Masterarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

Stern/Helene Teufl/Nari Yoon/Chen Zhang/Guoqiang Zhang/Hui Zhang/Michele Zinzi (2022): International Energy Agency EBC Annex 80 - Resilient Cooling of Buildings - State of the Art Review, [online] doi:10.52776/coxk4763.

IEA (2018): The Future of Cooling: Opportunities for energy-efficient air conditioning, OECD eBooks, [online] doi:10.1787/9789264301993-en.

Institute for Building Research and Innovation [IBR&I] (2020): Gebäudebestand gasfrei machen, Untersuchung der Technischen Möglichkeiten, Bestandsgebäude Gasfrei zu Machen, Stadt Wien.

IPCC (2023): Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland., [online] doi:10.59327/ipcc/ar6-9789291691647.

Kapeller, Rudolf/Marianne Bügelmayer-Blaschek/Barbara Herndler/Lukas Kranzl/Andreas Müller/Simon Moser/Thomas Natiesta/Johannes Reichl/Roman Schwalbe (2024): The effects of climate change-induced cooling demand on power grids, in: Energy Reports, Bd. 11, S. 674–691, [online] doi:10.1016/j.egyr.2023.07.028.

Kausche, Michael (2017): Sensitivitätsanalyse, in: Wirtschaftlichkeit schwimmender Offshore Windenergieanlagen, Wiesbaden, Deutschland: Springer Gabler, [online] doi:10.1007/978-3-658-19581-6_5.

Kensby, J./A. Trüschel/J.O. Dalenbäck (2017): Heat source shifting in buildings supplied by district heating and exhaust air heat pump, in: Energy Procedia, Bd. 116, S. 470–480, [online] doi:10.1016/j.egypro.2017.05.094.

Kohansal, Mohammad Ebrahim/Hamid Reza Akaf/Javad Gholami/Shahab Moshari (2021): Investigating the simultaneous effects of building orientation and thermal insulation on heating and cooling loads in different climate zones, in: Architectural Engineering And Design Management, Bd. 18, Nr. 4, S. 410–433, [online] doi:10.1080/17452007.2021.1901220.

Konstantin, Panos/Margarete Konstantin (2022): Aufbau- und Betrieb von Kältesystemen, in: Praxisbuch der Fernwärme-und Fernkälteversorgung: Systeme, Netzaufbauvarianten, Kraft-Wärme- und Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung, Kostenstrukturen und Preisbildung, Springer eBooks, S. 103–126, [online] doi:10.1007/978-3-662-64343-3_8.

Košir, Mitja (2019): Climate Adaptability of Buildings, Springer eBooks, [online] doi:10.1007/978-3-030-18456-8.

Kromp-Kolb, Helga/Karl Steiniger/Nebojsa Nakicenovic (2014): Österreichischer Sachstandsbericht Klimawandel 2014, [online] doi:10.26530/oapen_574829.

Kuttler, Wilhelm (2011): Climate change in urban areas, Part 1, Effects, in: Environmental Sciences Europe, Bd. 23, Nr. 1, [online] doi:10.1186/2190-4715-23-11.

Landsberg, Helmut E. (1981): The urban climate, Academic Press.

Li, Yunfei/Sebastian Schubert/Jürgen P. Kropp/Diego Rybski (2020): On the influence of density and morphology on the Urban Heat Island intensity, in: Nature Communications, Bd. 11, Nr. 1, [online] doi:10.1038/s41467-020-16461-9.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Masterarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

Mayrhofer, Lukas/Andreas Müller/Marianne Bügelmayer-Blaschek/Aadit Malla/Lukas Kranzl (2023): Modelling the effect of passive cooling measures on future energy needs for the Austrian building stock, in: Energy And Buildings, Bd. 296, S. 113333, [online] doi:10.1016/j.enbuild.2023.113333.

Meyer, Robert/Nicolas Fuchs/Jessica Thomsen/Sebastian Herkel/Christoph Kost (2024): Heizkosten und Treibhausgasemissionen in Bestandsgebäuden: Aktualisierung auf Basis der GEG-Novelle 2024, Potsdam, Deutschland: Kopernikus-Projekt Ariadne.

Mills, Gerald (2005): Progress toward sustainable settlements: a role for urban climatology, in: Theoretical And Applied Climatology, Bd. 84, Nr. 1–3, S. 69–76, [online] doi:10.1007/s00704-005-0145-0.

Miranda, Nicole D./Jesus Lizana/Sarah N. Sparrow/Miriam Zachau-Walker/Peter A. G. Watson/David C. H. Wallom/Radhika Khosla/Malcolm McCulloch (2023): Change in cooling degree days with global mean temperature rise increasing from 1.5 °C to 2.0 °C, in: Nature Sustainability, Bd. 6, Nr. 11, S. 1326–1330, [online] doi:10.1038/s41893-023-01155-z.

Österreichische Nationalbank [OeNB] (2024): Basis- und Referenzzinssätze der Oesterreichischen Nationalbank, [online] https://www.oenb.at/isawebstat/stabfrage/createReport?report=2.1 [abgerufen am 09.08.2024].

Österreichisches Institut für Bautechnik [OIB] (2023): OIB-Richtlinie 6: Kostenoptimalität, [online] https://www.oib.or.at/sites/default/files/kostenoptimalitaet_jaenner_2024.pdf [abgerufen am 06.07.2024].

Pezzutto/Novelli/Zambito/Quaglini/Miraglio/Belleri (2022): Cooling Technologies Overview and Market Shares: Part 1 of the study “Renewable cooling under the Revised Renewable Energy Directive ENER/C1/2018-493&qout;, Publications Office of the European Union, [online] doi:10.2833/799633.

Pfafferott, Jens/Doreen Kalz/Roland Koenigsdorff (2015): Bauteilaktivierung., [online] doi:10.51202/9783816793588.

Pöhn, Christian/Anton Pech (2017): Bauphysik: Erweiterung 1: Energieeinsparung und Wärmeschutz. Energieausweis - Gesamtenergieeffizienz, Birkhauser.

Pöhn, Christian/Anton Pech/Thomas Bednar/Wolfgang Streicher (2011): Bauphysik: Erweiterung 1: Energieeinsparung und Wärmeschutz. Energieausweis – Gesamtenergieeffizienz, Springer Science & Business Media.

Python Software Foundation (2024): Welcome to Python, Python.org, [online] https://www.python.org/ [abgerufen am 23.07.2024].

Rathmanner, Johann/Alexander Schmiderer (2016): Altbau-Sanierung: Gebäude richtig und nachhaltig revitalisieren.

Richarz, Clemens/Christina Schulz (2013): Energy efficiency refurbishments: Principles, Details, Case studies, Walter de Gruyter.

Rupp, Matthias/Christian Rieke/Nils Handschuh/Isabel Kuperjans (2020): Economic and ecological optimization of electric bus charging considering variable electricity prices and CO2eq intensities, in: Transportation Research. Part D, Transport And Environment, Bd. 81, S. 102293, [online] doi:10.1016/j.trd.2020.102293.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Masterarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Rust (2022): Verification of halogenated greenhouse gas emissions by regional atmospheric observations in Europe, Doktorarbeit, ETH Zürich, [online] doi:10.3929/ethz-b-000646134.

Samuelson, Holly/Amir Baniassadi/Anne Lin/Pablo Izaga González/Thomas Brawley/Tushar Narula (2020): Housing as a critical determinant of heat vulnerability and health, in: Science Of The Total Environment, Bd. 720, S. 137296, [online] doi:10.1016/j.scitotenv.2020.137296.

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

Scholz, Daniel (2018): Multikriterielle Optimierung, in: Springer eBooks, S. 169–187, [online] doi:10.1007/978-3-662-57953-4_7.

Schubert, Sebastian/Susanne Grossman-Clarke (2013): The Influence of green areas and roof albedos on air temperatures during Extreme Heat Events in Berlin, Germany, in: Meteorologische Zeitschrift, Bd. 22, Nr. 2, S. 131–143, [online] doi:10.1127/0941-2948/2013/0393.

Seidnitzer-Gallien, Carina/Carles Ribas-Tugores/Gerald Zotter (2024): AbSolut - Integration of Absorption Technologies in District Heating and Cooling Systems for Enhanced Economic and Ecological Impact, in: International Sustainable Energy Conference - Proceedings, Bd. 1, [online] doi:10.52825/isec.v1i.1097.

Simader, Günter/Christian Rakos (2005): Klimatisierung, Kühlung und Klimaschutz: Technologien, Wirtschaftlichkeit und CO2-Reduktionspotenziale, Österreichische Energieagentur, [online] https://www.wien.gv.at/meu/fdb/pdf/kkk-materialienband-1018-ma27.pdf [abgerufen am 03.07.2024].

Sommer, Rolf/Nodir Djanibekov/Marc Müller/Omonbek Salaev (2011): Economic-Ecological Optimization Model of Land and Resource Use at Farm-Aggregated Level, in: Springer eBooks, S. 267–283, [online] doi:10.1007/978-94-007-1963-7_17.

Stadt Wien Magistratsabteilung 20 (2023): Raus aus Gas: Wiener Wärme und Kälte 2040, [online] https://www.wien.gv.at/stadtentwicklung/energie/pdf/waerme-und-kaelte-2040.pdf [abgerufen am 12.03.2024].

Stadt Wien Magistratsabteilung 20 (2024): Wiener Wärmeplan 2040 veranschaulicht klimaneutrale Zukunft, [online] https://www.wien.gv.at/umwelt-klimaschutz/waermeplan-2040-klimaneutrale-zukunft.html.

Stadt Wien Magistratsabteilung 22 (2015): Urban Heat Islands: Strategieplan Wien, [online] https://www.wien.gv.at/umweltschutz/raum/pdf/uhi-strategieplan.pdf [abgerufen am 12.03.2024].

Stadt Wien Magistratsabteilung 23 (2023): Wien in Zahlen 2023, [online] https://www.wien.gv.at/statistik/pdf/wieninzahlen-2023.pdf [abgerufen am 02.07.2024].

Stadt Wien Magistratsabteilung 37 (2023): Merkblatt Technische Anlagen, Klima-, Lüftungsanlagen, Wärmepumpen, etc., [online] https://www.wien.gv.at/wohnen/baupolizei/pdf/merkblatt-klima-lueftungsanlagen-waermepumpen.pdf [abgerufen am 12.06.2024].

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Masterarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

Statistik Austria (2024a): Baukostenindex, STATISTIK AUSTRIA, [online] https://www.statistik.at/statistiken/industrie-bau-handel-und-dienstleistungen/konjunktur/baukostenindex [abgerufen am 15.08.2024].

Statistik Austria (2024b): Energiepreise, -steuern, STATISTIK AUSTRIA, [online] https://www.statistik.at/statistiken/energie-und-umwelt/energie/energiepreise-steuern.

Stewart, I. D./T. R. Oke (2012): Local Climate Zones for Urban Temperature Studies, in: Bulletin Of The American Meteorological Society, Bd. 93, Nr. 12, S. 1879–1900, [online] doi:10.1175/bams-d-11-00019.1.

Treberspurg, Martin/Doris Österreicher/Carmen Vicente Iñigo (2017): Hitze! vermeiden: Vermeidung sommerlicher Überwärmung im Wohnbau, Stadt Wien Magistratsabteilung 20 (Hrsg.), [online] https://www.wien.gv.at/stadtentwicklung/energie/wissen/leitfaden-hitze-vermeiden.html [abgerufen am 22.06.2024].

Treberspurg, Martin/Wolfgang Streicher/Thomas Reim/Wilhelm Hofbauer (2006): Sommertauglichkeit im Wohnbau: Sommerlichkeit und Behaglichkeit mit umweltverträglichen und CO2 neutralen Kühlstrategien. Projekt im Auftrag vom Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit, Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft.

United Nations Environment Programme and International Energy Agency (2020), Cooling Emissions and Policy Synthesis Report. UNEP, Nairobi and IEA, Paris.

Vereinte Nationen (2002): Bericht des Weltgipfels für nachhaltige Entwicklung, Johannesburg, Südafrika. 26. Jg.

Wien Energie (2023): Fernkälte in der Wohnung nachrüsten – geht das so einfach?, Wien Energie, [online] https://www.wienenergie.at/blog/erstmals-fernkaelte-fuer-wohnungen/.

Wiener Netze (2024): Strom - Wiener Netze, [online] https://www.wienernetze.at/stromnetzbedingungen#:~:text=Ust-,Netzbereitstellungsentgelt%3A,Ausma%C3%9F%20der%20Netznutzung%20verrechnet%20wird.

Willems, Wolfgang M./Kai Schild (2022): Wärmeschutz: Grundlagen - Berechnung - Bewertung.

ZAMG (2022): Massive Zunahme an Hitzetagen, [online] https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/news/massive-zunahme-an-hitzetagen [abgerufen am 02.01.2024].

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Masterarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

8 Abkürzungsverzeichnis

%	Prozent
°C	Grad Celsius
a	Jahr
ABKM	Absorptionskältemaschine
ADKM	Adsorptionskältemaschine
CO_2	Kohlendioxid
COP	Coefficient of Performance
DEC	Dessicant Evaporative Cooling
EEB	Endenergiebedarf
EER	Energy Efficiency Ratio
ES	Energiesystem
F-Gase	Fluorierte Treibhausgase
FW	Fernwärme
GWP	Treibhauspotential
HEB	Heizenergiebedarf
HFKW	Fluorkohlenwasserstoffe
HFO	Hydrofluorolefine
HHSB	Haushaltsstrombedarf
HWB	Heizwärmebedarf
i.d.R.	in der Regel
LW-WP	Luft-Wasser-Wärmepumpe
KB	Kühlbedarf
KB*	außeninduzierter Kühlbedarf
KEB	Kühlenergiebedarf

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Masterarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

KKM	Kompressionskältemaschine
KW	Kohlenwasserstoff
kWh	Kilowattstunden
mon	Monat
MWh	Megawattstunden
RLT	Raumlufttechnik
SA	Sensitivitätsanalyse
sog.	sogenannte
SOTA	State of the Art
SQ	Status Quo
SW-WP	Sole-Wasser-Wärmepumpe
Sz	Szenario
t	Tonnen
TWh	Terrawattstunden
TLR	Technological Readiness Level
u.a.	unter anderem
UHI	Urban Heat Island
W	Watt
WP	Wärmepumpe
WWWB	Warmwasserwärmebedarf

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Masterarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

9 Abbildungs-, Diagramm- und Tabellenverzeichnis

Abbildung 1. Hitzetage in Wien, Zunahme bis 2020 und Prognose je IPCC Emissionsszenario (vgl. ZAMG 2022) …… S.5

Abbildung 2. „Dekarbonisierungstypen“ des Wiener Wohnbaubestands, folgend der Einteilung von Wohnnutzungseinheiten nach thermisch-energetischen Gesichtspunkten (vgl. Stadt Wien - Magistratsabteilung 20 2023)……S.15

Abbildung 3. Schema des Kompressionskältemittelkreislaufs ……S.21

Abbildung 4. Schematische Darstellung der Funktionsweise einer Wärmepumpe für Heizzwecke unter Verwendung des Kompressionsverfahrens und mit elektrischem Antrieb. (Bohne 2022) ……S.25

Abbildung 5. Geothermische Innenraumkühlung in Verbindung mit Erdwärmesonden ……S.29

Abbildung 6. Geothermische Innenraumkühlung in Verbindung mit Grundwasserbrunnen ……S.30

Abbildung 7. Schematische Darstellung der Funktionsweise einer Absorptionskältemaschine ……S.33

Abbildung 8. Schematische Darstellung der Funktionsweise einer Adsorptionskältemaschine ……S.34

Abbildung 9. Geometrie und Bauweise der Referenzgebäude lt. Kostenoptimalitätsstudie der OIB Richtlinie 6 ……S.41

Diagramm 1. Vergleich der Lebenszyklusteilkosten für die Energiesysteme ES 1 - ES 6…… S.63

Diagramm 2. Vergleich der Lebenszyklusteilkosten direkt bedingt durch Gebäudekühlung, für die Energiesysteme ES 1 - ES 6 ……S.64

Diagramm 3. Vergleich der äquivalenten Kohlendioxidemissionen CO2,eq verursacht durch den Betrieb der Energiesysteme ES 1 – ES 6, zzgl. der äquivalenten Kohlendioxidemissionen direkt bedingt durch Gebäudekühlung ……S.65

Diagramm 4. Vergleich der Abwärme QAbw aus Rückkühlung über den Betrachtungszeitraum, für die Energiesysteme ES 1 - ES 6 ……S.66

Tabelle 1. Kenndaten ausgewählter Kältemittel ……S.22

Tabelle 2. Wärmepumpen können auf Basis der herangezogenen Wärmeträger an der Wärmequelle- bzw. senke kategorisiert werden ……S.25

Tabelle 3. Definition der Referenzgebäude lt. Kostenoptimalitätsstudie der OIB Richtlinie 6 ……S.41

Tabelle 4. Mittelwerte von Kühlbedarf und max. flächenspezifischer Kühllast für ausgewählte, durch Kapeller et.at. (2024) definierte Input-Parameter dynamischer Gebäudesimulationen ……S.44

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Masterarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

Tabelle 5: Allgemeine Charakteristika des Energiesystems 1: Status Quo ……S.47

Tabelle 6.: Allgemeine Charakteristika des Energiesystems 2: Fernwärme und Kühlung mit ABKM ……S.49

Tabelle 7.: Allgemeine Charakteristika des Energiesystems 3: Fernwärme und freie Kühlung mit Erdsonden ……S.50

Tabelle 8.: Allgemeine Charakteristika des Energiesystems 4: Fernwärme und Kühlung mit Luftwärmepumpe ……S.51

Tabelle 9.: Allgemeine Charakteristika des Energiesystems 5: Erdwärmepumpe für Wärme und Kühlung ……S.53

Tabelle 10.: Allgemeine Charakteristika des Energiesystems 6: Luftwärmepumpe für Wärme und Kühlung ……S.53

Tabelle 11.: Betrachtete Szenarien im Rahmen der Sensitivitätsanalyse ……S.58

Tabelle 12.: Lebenszyklusteilkosten der Energiesysteme ES 1 - ES 6 ……S.61

Tabelle 13.: Äquivalente Kohlendioxidemissionen, für die Energiesysteme ES 1 - ES 6 ……S.62

Tabelle 14.: Abwärme aus Kühlprozessen, für die Energiesysteme ES 2, ES 3, ES 4, ES 6 ……S.62

Tabelle 15.: Bestimmung des ökonomisch-ökologisch optimales Energiesystems gemäß der gewichteten Zielfunktion. Die ersten 3 Ränge sind in grün hinterlegt. ……S.67

Tabelle 16.: Bestimmung der ökonomisch-ökologisch optimalen Kälteerzeugungsanlage gemäß der gewichteten Zielfunktion. Die ersten 3 Ränge sind in blau unterlegt. ……S.67

Tabelle 17.: Vergleich der ökonomisch-ökologischen Optimalität für die Energiesysteme 1 - 6; initiale Ergebnisse und Ergebnisse unter Annahme der Szenarien (Sz.) 1 – 6 ……S.71

Tabelle 18.: Vergleich der ökonomisch-ökologischen Optimalität für die Kälteerzeugungsanlagen der Energiesysteme 1 - 6; initiale Ergebnisse und Ergebnisse unter Annahme der Szenarien Sz. 1 – 6 ……S.73

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Masterarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

10 Anhang A

10.1 Grundlagen und Annahmen für die Modellrechnung

	Parameter		Einheit	Quelle bzw. Hinweis
Referenzgebäude Allgemein	Breite (Tiefe)	12	m	*vgl. Kapitel 4.1.1*
	Länge	25,38	m	
	Geschoßhöhe	3	m	
	Anzahl Geschosse	6		
	BGF	1827	m^2	
	Wohnnutzfläche WNF	1278,9	m^2	
	Anzahl Wohnungen	19,58		
	Bauweise	geschlossen		
	Charakteristische Länge l_c	3,6		
	Fensterflächenanteil	18	%	
	Wohnungsgröße ⌀	65,3	m^2	
	Gebäudehöhe	18	m	
	Anteil WNF an BGF	0,7		*ONORM B 1800*
	Nutzfläche (NF)/BGF	0,8		*ÖNORM B 1800*

Tab. A1. Grundlagen und Annahmen – Referenzgebäude allgemein

	Parameter		Einheit	Quelle bzw. Hinweis
Referenzgebäude Anlagentechnik	Technikzentrale (TZ) Fläche brutto	16	m^2	*Ermittlung gem. VDI 2500 Blatt 1*
	Technikzentrale Nutzfläche NF_{TZ}	12,8	m^2	
	TZ Anzahl Wanddurchbrüche Mauerwerk	2		*Überschlagsmäßige Annahme*
	TZ Anzahl Deckendurchbrüche Mauerwerk	2		*Überschlagsmäßige Annahme*
	TZ Nichttragende Innenwand Trockenbau	12	m^2	*Überschlagsmäßige Annahme*
	TZ Bestehendes Ziegelmauerwerk	36	m^2	*Überschlagsmäßige Annahme*
	TZ Nenninhalt zentraler Heizungswärmespeicher (Wärmepumpe)	800	l	*Überschlagsmäßige Annahme*
	TZ Länge Gasleitungen	7	m	*Überschlagsmäßige Annahme*
	TZ Länge Elektrik-Trasse	8	m	*Überschlagsmäßige Annahme*
	TZ Anzahl Leuchten	2	St	*Überschlagsmäßige Annahme*
	Länge d. Steigleitungspaars	146,16	m	
	Faktor Leitungslänge Steigleitungen	0,1	m/m^2_{NGF}	*gem. ÖNÖRM H 5056-1:2024-03*
	Länge Gasleitungen Wohnungen, zu dezentraler Gastherme [m]	5	m/Wng.	*Überschlagsmäßige Annahme*
	Verteilungsleitungen - Wohnungsabzweiger	12,5	m/Wng.	*Überschlagsmäßige Annahme*

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Masterarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

	Länge der Anschlussleitungen ans zentrale Verteilnetz, innerhalb Wohnung	5	m/Wng.	*Überschlagsmäßige Annahme*
	Länge der Wohnungsabzweiger des zentralen Verteilnetzes	12,5	m/Wng.	*Überschlagsmäßige Annahme*
	Länge Gasleitungen Allgemeinbereich, zu Wohnungen mit Gasthermen	18	m/Geb.	*Überschlagsmäßige Annahme*
	Flächennutzungsgrad Systemfläche f. Fußbodenheizung	0,7	m^2/ m^2_{WNF}	*Überschlagsmäßige Annahme*
	Systemfläche d. Fußbodenheizung	895,23	m^2	
	Abgedeckte Wohnnutzfläche je Radiator	20	m^2	*Überschlagsmäßige Annahme*
	Anzahl Radiatoren Gebäude	63,945	St/Geb.	
	Faktor Leitungslänge Anbindeleitungen Radiatoren (kleinflächige Wärmeabgabe)	0,7	m/ m^2_{NGF}	*gem. ONORM H 5056-1:2024-03*
	Länge Anbindeleitungen Radiatoren	1023,12	m/Geb.	
	Abstand Erdsonden	7	m	*gem. VDI 4640 Blatt 2*
	Entzugsleistung Erdsonden	40	W/lfm	*vgl. BMK 2024*
	Länge der Erdsonden	150	m	*vgl. BMK 2024*
	Anzahl Erdsonden freie Kühlung	4		*Ermittlung über Entzugsleistung pro lfm Erdsonde, Kühlleistung*
	Anzahl Erdsonden Heizen, Warmwasser	4		*Ermittlung über Entzugsleistung pro lfm Erdsonde, Energieaufwandszahl Erdwärmepumpe, Heizleistung*
	Außenfläche Erdsondenfeld freie Kühlung	153,93804	m^2	*Ermittlung über Kreisfläche um Erdsondenbohrung*
	Außenfläche Erdsondenfeld Heizen, Warmwasser	153,93804	m^2	*Ermittlung über Anzahl Erdsonden, Abstand*
	Lebensdauer Luftwärmepumpe	18	Jahre	*BGBl II 28/2024, Anhang 1 zu §5*
	Lebensdauer Erdwärmepumpe	20	Jahre	*BGBl II 28/2024, Anhang 1 zu §5*
	Lebensdauer Fernwärmeanschluss	30	Jahre	*BGBl II 28/2024, Anhang 1 zu §5*
	Lebensdauer Gaskombitherme	20	Jahre	*Meyer et al. 2024*
	Lebensdauer Absorptionskältemaschine	20	Jahre	*Schmidt et al. 2020*

Tab. A2. Grundlagen und Annahmen – Referenzgebäude Anlagentechnik

	Parameter		**Einheit**	**Quelle bzw. Hinweis**
Energiebedarfe, Anlageneffizienz & -leistung	Heizwärmebedarf	28,8	kWh/m^2a	*vgl. Kapitel 4.1.2*
	Warmwasserwärmebedarf	10,2	kWh/m^2a	*vgl. Kapitel 4.1.2*
	Kühlbedarf	12,3	kWh/m^2a	*vgl. Kapitel 4.1.2*
	Heizleistung	30	kW	*Überschlagsmäßige Annahme*
	Kühlleistung	20,097	kW	*Überschlagsmäßige Annahme*
	Elektrische Antriebsenergie Erdwärmepumpe	10,878	kW	*gem. Energieaufwandszahl*
	Elektrische Antriebsenergie Luftwärmepumpe	8,44074	kW	*gem. Energieaufwandszahl*

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Masterarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

	Energieaufwandszahl (e_{AWZ}) Luftwärmepumpe	0,42		*BGBl II 28/2024, Anhang 1 zu §5*
	e_{AWZ} Erdwärmepumpe	0,37		*BGBl II 28/2024, Anhang 1 zu §5*
	e_{AWZ} Fernwärmeanschluss	1,35		*BGBl II 28/2024, Anhang 1 zu §5*
	e_{AWZ} Gasbrennwerttherme	1,3		*vgl. Pöhn/Pech 2011: 150*
	e_{AWZ} Absorptionskältemaschine	1,5		*ONORM H 5050-1:24-03*
	e_{AWZ} Freie Kühlung	0,077		*vgl. Holzer et al. 2022; Kapitel 3.3.2.1*

Tab. A3. Grundlagen und Annahmen – Energiebedarfe, Anlageneffizienz und -leistung

	Parameter		**Einheit**	**Quelle bzw. Hinweis**
THG-Konversionsfaktoren	Elektrische Energie (Liefermix)	156	g/kWh	*OIB-330.6-036/23*
	Fernwärme aus hocheffizienter KWK (Defaultwert)	22	g/kWh	*Einzelnachweis gem. OIB RL 6 der Wien Energie GmbH, TÜV Zertifikat, 28.2.2023*
	Fossile Brennstoffe gasförmig	201	g/kWh	*OIB-330.6-036/23*

Tab. A4. Grundlagen und Annahmen – Treibhausgas-Konversionsfaktoren

	Parameter		**Einheit**	**Quelle bzw. Hinweis**
	Basiszinssatz	3,88	p.a.	*vgl. OeNB 2024*
Energiekosten	Erdgaspreis - privater Einsatz, brutto	0,165	Euro/kWh	*vgl. Statistik Austria 2024b*
	Strompreis - privater Einsatz, brutto	0,271	Euro/kWh	*vgl. Statistik Austria 2024b*
	Fernwärmepreis - Grundpreis, netto	0,3845	Euro/m^2_{WNF}*mon	*vgl. AK Wien 2024*
	Fernwärmepreis - Arbeitspreis, netto	134,141	Euro/MWh	*vgl. AK Wien 2024*
Wartungskosten	Geschoßwohnbau - Gas dezentral	1958	Euro/a Gbd.	*Überschlagsmäßige Annahme gem. Produktrecherche, Anzahl Wohnungen*
	Geschoßwohnbau - Fernwärme	0	Euro/a Gbd.	*OIB-330.6-012/24*
	Geschoßwohnbau - Wärmepumpe L/W, S/W	200	Euro/a Gbd.	*Produktrecherche Wärmepumpenhersteller; OIB-330.6-012/24*
	Geschoßwohnbau - Gas	260	Euro/a Gbd.	*OIB-330.6-012/24*
	Geschoßwohnbau ABKM	1000	Euro/a Gbd.	*Produktrecherche Wärmepumpenhersteller*
Baukostenrechnung	Baupreisindex Stand November 2020	115,6		*BKI 2024*
	Baupreisindex Stand August 2023	160,6		*BKI 2024*
	Baupreisindex Stand Mai 2024	164,5		*BKI 2024*
	Korrekturfaktor Wien	1,199		*BKI 2024*

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Masterarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

	Preissteigerungsrate Baukosten	3,6	% p.a.	*vgl. Statistik Austria 2024b*
	Preissteigerungsfaktor Baukosten q_{BK}	1,036		
Energiekostenrechnung	Preissteigerungsrate Strom	2,4	p.a.	*OIB-330.6-012/24*
	Preissteigerungsfaktor Strom q_{BK}	1,024		
	Preissteigerungsrate Fernwärme	1,3	p.a.	*OIB-330.6-012/24*
	Preissteigerungsfaktor Fernwärme q_{FW}	1,013		
	Preissteigerungsrate Gas	2,99	p.a.	*vgl. AEA 2024*
	Preissteigerungsfaktor Gas q_G	1,0299		
Wartungskostenrechnung	Preissteigerungsrate Wartung	2,54	p.a.	*OIB-330.6-012/24*
	Preissteigerungsfaktor Wartung	1,0254		

Tab. A5. Grundlagen und Annahmen – Kostenrechnung

10.2 Berechnung der Investitionskosten

Leistungen	Position BKI	Einheit	Einheitspreis BKI 08/2023	Einheitspreis BKI 05/2024	Einheitspreis BKI 05/2024, Wien	Gebäude-spez. Preis	Bezug auf Grundlagengröße	Quelle
Erneuerung Gasbrennwertherme	Demontage Heiztherme	St	167	171,06	205,10	4015,77	Anzahl Wohnungen	BKI LB 340 Nr 2
	Anschluss Heiztherme, einschließlich Dichtheitsprüfung	St	300	307,29	368,43	7213,96	Anzahl Wohnungen	BKI LB 340 Nr 1
	Gas-Brennwerttherme, bis 15kW, Wandmontage, Kombi-Therme	St	4942	5062,01	6069,35	118837,90	Anzahl Wohnungen	BKI LB 340 Nr 4
Erneuerung Gasleitungen (Abzweiger zu Wohnungen)	Rohrleitung, C-Stahlrohr, DN32, in Stangen, inkl. Fittings	m	52	53,26	63,86	1149,52	Länge Gasleitungen Allgemeinbereich, zu Wohnungen mit Gasthermen	BKI LB 041 Nr 23
Erneuerung Gasleitungen (Wohnbereich, Gasthermen)	Rohrleitung, C-Stahlrohr, DN12, in Stangen, inkl. Fittings	m	29	29,70	35,62	3486,75	Länge Gasleitungen Wohnungen, zu dezentraler Gastherme	BKI LB 041 Nr 19
Demontage Bestandsradiatoren	Röhrenradiator demontieren, bis 50kg, inkl. Verschließen der Anschlussleitung, Entsorgung	St	30	30,73	36,84	2355,96	Anzahl Radiatoren Gebäude	BKI LB 341 Nr 1

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Masterarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

Demontage Anbindeleitungen der Bestandsradiatoren	Kupferrohrleitung, demontieren, bis DN25	m	5,3	5,43	6,51	6659,51	Länge Anbindeleitungen Radiatoren	BKI LB 341 Nr 6
Installation Anbindeleitungen	Leitung, Metallverbundrohr, DN15, Mehrschichtverbundwerkstoff, inkl. Dichtung, Befestigung, Fittings (50 Meter je Wohnung)	m	22	22,53	27,02	27643,23	Länge Anbindeleitungen Radiatoren	BKI LB 342 Nr 5
Erneuerung Radiatoren	Kompaktheizkörper, Stahl, H=600mm, L=bis 1400mm, inkl. Montageset, Anschlussarbeiten	St	574	587,94	704,94	45077,31	Anzahl Radiatoren Gebäude	BKI LB 341 Nr 27
Hydraulischer Abgleich und Einregulierung	Hydraulischer Abgleich, Einstellen aller Ventile und Pumpen, Erstellung eines Protokolls	St	558	571,55	685,29	13417,96	Anzahl Wohnungen	BKI LB 341 Nr 10
					∑	**229857,85**		
					$k_{Invest,\ 15}$	**220737,73**	Barwertmethode gem. ÖNORM B 1801-4:2014, Preissteigerungsfaktor Baukosten q_{BK}	

Tab. A6. ES 1 – Status Quo: Investitionskosten im 15. Jahr zur Erneuerung der dezentralen Gasthermen, zzgl. Erneuerung der Verteilung und Wärmeabgabesystem

Leistungen	**Position BKI**	**Einheit**	**Einheitspreis BKI 08/2023**	**Einheitspreis BKI 05/2024**	**Einheitspreis BKI 05/2024, Wien**	**Gebäude-spez. Preis**	**Bezug auf Grundlagengröße**	**Quelle**
Demontage Gastherme	Demontage Heiztherme	St	167	171,06	205,10	4015,77	Anzahl Wohnungen	BKI LB 340 Nr 2
Rückbau Gasleitungen (Allgemeinbereich, Abzweiger zu Wohnungen)	Stahlrohrleitungen demontieren, bis DN50, inkl. Verschließen der Anschlussleitung	m	12,5	12,80	15,35	276,33	Länge Gasleitungen Allgemeinbereich, zu Wohnungen mit Gasthermen	BKI LB 342 Nr 2
Rückbau Gasleitungen (Wohnungen, zu Gasthermen)	Stahlrohrleitungen demontieren, bis DN25, inkl. Verschließen der Anschlussleitung	m	9,5	9,73	11,67	1142,21	Länge Gasleitungen Wohnungen, zu dezentraler Gastherme	BKI LB 342 Nr 1
Demontage Bestandsradiatoren	Röhenradiator demontieren, bis 50kg, inkl. Verschließen der Anschlussleitung, Entsorgung	St	30	30,73	36,84	2355,96	Anzahl Radiatoren Gebäude	BKI LB 341 Nr 1

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Masterarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Demontage Anbindeleitungen der Bestandsradiatoren	Kupferrohrleitung, demontieren, bis DN25	m	5,3	5,43	6,51	6659,51	Länge Anbindeleitungen Radiatoren	BKI LB 341 Nr 6
Herstellung Technikraum im Keller	Untergrund reinigen	$m^2_{NF, HTZ}$	2,1	2,15	2,58	33,01	Technikzentrale Nuztfläche NF_{HTZ}	BKI LB 336 Nr 7
	Untergrund schleifen, absaugen, Abfall entsorgen	$m^2_{NF, HTZ}$	2,2	2,25	2,70	34,58	Technikzentrale Nuztfläche NF_{HTZ}	BKI LB 336 Nr 9
	Untergrund grundieren	$m^2_{NF, HTZ}$	2,7	2,77	3,32	42,44	Technikzentrale Nuztfläche NF_{HTZ}	BKI LB 336 Nr 10
	Ausgleichsspachtelung, bis 10mm	$m^2_{NF, HTZ}$	4,5	4,61	5,53	70,74	Technikzentrale Nuztfläche NF_{HTZ}	BKI LB 336 Nr 13
	Bodenbelag, PVC	$m^2_{NF, HTZ}$	43	44,04	52,81	675,96	Technikzentrale Nuztfläche NF_{HTZ}	BKI LB 336 Nr 23
	Innenwand, Gipsbauplatte, nichttragend, Dicke 80-100mm (12 m2)	$m^2_{Wandfl.}$	83	85,02	101,93	1223,20	TZ Nichttragende Innenwand Trockenbau	BKI LB 339 Nr 21
	Deckendurchbruch, bis 500m2, bis 30cm Dicke(2 Stück)	St	50	51,21	61,41	122,81	TZ Anzahl Deckendurchbrüche Mauerwerk	BKI LB 312 Nr 74
	Wanddurchbruch, bis 500cm2, bis 40cm Dicke, nachträglich hergestellt, Bauschutt entsorgen (2 Stück)	St	43	44,04	52,81	105,62	TZ Anzahl Wanddurchbrüche Mauerwerk	BKI LB 312 Nr 60
Wärme bzw. Kältehauptverteilung in Technikraum und Anlagenhydraulik	Herstellung Hauptverteilung Technikzentrale und Anlagenhydraulik (Heizungsverteiler, Schaltungen, Umwälzpumpen, Druckhaltung, Rohrleitungen, Dämmung, Armaturen)	$m^2_{NF, HTZ}$			2750,00	35200,00	Technikzentrale Nuztfläche NF_{HTZ}	Überschlagsmäßige Annahme gem. Produktrecherche, BKI LB 340, 341
Elektrik und Beleuchtung Technikraum	Kabelrinne, Stahl, WA, verzinkt, 300 x 60mm, inkl. Verbinder-Set	m	59	60,43	72,46	579,67	Länge Elektrik-Trasse Technikzentrale	BKI LB 353 Nr 5

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Masterarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

	Installationsleitungen NYM-J 5 x 2,5mm², inkl. Befestigung,	m	6,6	6,76	8,11	64,84	Länge Elektrik-Trasse Technikzentrale	BKI LB 353 Nr 9
	Wannenleuchte, LED, Polyester, Plexiglas, 28W, inkl. Leuchtmittel/LED	St	23	23,56	28,25	56,49	Anzahl Wannenleuchten Technikzentrale	BKI LB 358 Nr 2
Errichtung und Einleitung Fernwärme	Errichtung Fernwärmeübergabestation mit Trenntauscher, inkl. Anschlussleitung bis 5m	m² WNF	35	49,81	59,72	76371,60	Wohnnutzfläche	vgl. IBR&I 2020
Errichtung ABKM	Absorptionswärmepumpe, bis 50kW, Wasser/Lithium-Bromid-Lösungsmittel, wetterfeste Ausführung, zzgl. Inbetriebnahme	St	32762	33557,59	40235,55	40235,55	Pauschal	BKI LB 340 Nr 31
Errichtung Kältespeicher	Kältepufferspeicher bis 1000 Liter, Stahl außen beschichtet, Druck 6bar	St	3270	3349,41	4015,94	4015,94	Pauschal, Keine Position für Kältespeicher vorhanden,	LB 040 Nr 35
Errichtung Wohnungsabzweiger (4-Leiter-System)	Leitung, Metallverbundrohr, DN20, Mehrschichtverbundwerkstoff, inkl. Dichtung, Befestigung, Fittings (12,5 Meter je Wohnung)	m	28	28,68	34,39	16832,56	Länge Steigleitung, Anzahl Wohnungen	BKI LB 342 Nr 6
Errichtung Steigleitung, Stiegenhaus (4-Leiter-System)	Leitung, Metallverbundrohr, DN40, Mehrschichtverbundwerkstoff, inkl. Dichtung, Befestigung, Fittings	m	70	71,70	85,97	25130,21	Länge Steigleitung	BKI LB 342 Nr 9
Verkleidung Steigleitung, Stiegenhaus	Verkofferung/Bekleidung, Rohrleitungen, GK/GF Platten, Mineralfaser, inkl. verspachteln, schleifen	m	64	65,55	78,60	11488,10	Länge Steigleitung	BKI LB 339 Nr 30
Dämmung Steigleitung (4-Leiter-System)	Rohrdämmung, MW-Alukaschiert, DN40	m	43	44,04	52,81	15437,13	Länge Steigleitung	BKI LB 347 Nr 13
Anschluss an Steigleitungen an Wohnungsstation	Leitung, Metallverbundrohr, DN20, Mehrschichtverbundwerkstoff, inkl. Dichtung, Befestigung, Fittings	m	28	28,68	34,39	3366,51	Länge der Anschlussleitungen ans zentrale Verteilnetz, innerhalb Wohnung, Anzahl Wohnungen	BKI LB 342 Nr 6

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Masterarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Herstellung Wohnungsstation	Herstellung Wohnungsstation	Stk			4000,00	78320,00	Anzahl Wohnungen	Annahme gem. BKI LB 340, 341
Errichtung Heizungsverteiler	Heizungsverteiler, Fußbodenheizung, 5 Heizkreise	St	236	241,73	289,84	5674,98	Anzahl Wohnungen	BKI LB 041 Nr 78
	Verteilerschrank, Fußbodenheizung, Unterputz	St	634	649,40	778,63	15245,49	Anzahl Wohnungen	BKI LB 041 Nr 78
Herstellung Fußbodenheizung	Fußbodenheizung, Typ A, Träger/PE-X Rohr, Verlegeabstand 100mm, inkl. Trägersystem	$m^2_{SysFl.}$	47	48,14	57,72	51673,99	Systemfläche Fußbodenheizung	BKI LB 041 Nr 87
	Funktionsheizen, Fußbodenheizung, gem. Aufheizprotokoll Estrichhersteller	$m^2_{SysFl.}$	2,6	2,66	3,19	2858,56	Systemfläche Fußbodenheizung	BKI LB 041 Nr 91
	Belegreifheizen, Fußbodenheizung, nach abgeschlossenem Funktionsheizen	$m^2_{SysFl.}$	0,6	0,61	0,74	659,67	Systemfläche Fußbodenheizung	BKI LB 041 Nr 92
	Einregulierung/Inbetriebnahme, Fußbodenheizung, inkl. Erstellen eines Einstellprotokolls	St	429	439,42	526,86	10315,96	Anzahl Wohnungen	BKI LB 041 Nr 93
					K_{Invest}	**410285,40**		
					$K_{invest,Kälte}$	**44251,49**		

Tab. A7. ES 2 – FW/ABKM: Investitionskosten im Ausgangsjahr zur Umstellung auf das Energiesystem, zzgl. Erneuerung der Verteilung und Wärmeabgabesystem, Kosten der Kälteanlagen blau hinterlegt

Leistungen	**Position BKI**	**Einheit**	**Einheitspreis BKI 08/2023**	**Einheitspreis BKI 05/2024**	**Einheitspreis BKI 05/2024, Wien**	**Gebäude-spez. Preis**	**Bezug auf Grundlagengröße**	**Quelle**
Demontage ABKM	Demontage Heiztherme	St	187	191,54	229,66	229,66	Pauschal, keine Position für Demontage Wärmepumpe vorhanden,	analog zu BKI LB 340 Nr 2
Errichtung ABKM	Absorptionswärmepumpe, bis 50kW, Wasser/Lithium-Bromid-Lösungsmittel, wetterfeste Ausführung, zzgl. Inbetriebnahme	St	32762	33557,59	40235,55	40235,55	Pauschal	BKI LB 340 Nr 31

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Masterarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Errichtung Kältespeicher	Kältepufferspeicher bis 1000 Liter, Stahl außen beschichtet, Druck 6bar	St	3270	3349,41	4015,94	4015,94	Pauschal, keine Position für Kältespeicher vorhanden	analog zu BKI LB 040 Nr 35
					∑	**44481,15**		
					$k_{Invest, 20, Kälte}$	**42143,66381**	Barwertmethode gem. ÖNORM B 1801-4:2014, Preissteigerungsfaktor Baukosten q_{BK}	

Tab. A8. ES 2 – FW/ABKM: Investitionskosten im 20. Jahr zur Erneuerung der Kälteversorgungsanlage

Leistungen	Position BKI	Einheit	Einheitspreis BKI 08/2023	Einheitspreis BKI 05/2024	Einheitspreis BKI 05/2024, Wien	Gebäude-spez. Preis	Bezug auf Grundlagengröße	Quelle
Demontage Gastherme	Demontage Heiztherme	St	167	171,06	205,10	4015,77	Anzahl Wohnungen	BKI LB 340 Nr 2
Rückbau Gasleitungen (Allgemeinbereich, Abzweiger zu Wohnungen)	Stahlrohrleitungen demontieren, bis DN50, inkl. Verschließen der Anschlussleitung	m	12,5	12,80	15,35	276,33	Länge Gasleitungen Allgemeinbereich, zu Wohnungen mit Gasthermen	BKI LB 342 Nr 2
Rückbau Gasleitungen (Wohnungen, zu Gasthermen)	Stahlrohrleitungen demontieren, bis DN25, inkl. Verschließen der Anschlussleitung	m	9,5	9,73	11,67	1142,21	Länge Gasleitungen Wohnungen, zu dezentraler Gastherme	BKI LB 342 Nr 1
Demontage Bestandsradiatoren	Röhenradiator demontieren, bis 50kg, inkl. Verschließen der Anschlussleitung, Entsorgung	St	30	30,73	36,84	2355,96	Anzahl Radiatoren Gebäude	BKI LB 341 Nr 1
Demontage Anbindeleitungen der Bestandsradiatoren	Kupferrohrleitung, demontieren, bis DN25	m	5,3	5,43	6,51	6659,51	Länge Anbindeleitungen Radiatoren	BKI LB 341 Nr 6
Herstellung Technikraum im Keller	Untergrund reinigen	$m^2_{NF, HTZ}$	2,1	2,15	2,58	33,01	Technikzentrale Nuztfläche NF_{HTZ}	BKI LB 336 Nr 7
	Untergrund schleifen, absaugen, Abfall entsorgen	$m^2_{NF, HTZ}$	2,2	2,25	2,70	34,58	Technikzentrale Nuztfläche NF_{HTZ}	BKI LB 336 Nr 9

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Masterarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

	Untergrund grundieren	$m^2_{NF, HTZ}$	2,7	2,77	3,32	42,44	Technikzentrale Nuztfläche NF_{HTZ}	BKI LB 336 Nr 10
	Ausgleichsspachtelung, bis 10mm	$m^2_{NF, HTZ}$	4,5	4,61	5,53	70,74	Technikzentrale Nuztfläche NF_{HTZ}	BKI LB 336 Nr 13
	Bodenbelag, PVC	$m^2_{NF, HTZ}$	43	44,04	52,81	675,96	Technikzentrale Nuztfläche NF_{HTZ}	BKI LB 336 Nr 23
	Innenwand, Gipsbauplatte, nichttragend, Dicke 80-100mm (12 m2)	$m^2_{Wandfl.}$	83	85,02	101,93	1223,20	TZ Nichttragende Innenwand Trockenbau	BKI LB 339 Nr 21
	Deckendurchbruch, bis 500m2, bis 30cm Dicke(2 Stück)	St	50	51,21	61,41	122,81	TZ Anzahl Deckendurchbrüche Mauerwerk	BKI LB 312 Nr 74
	Wanddurchbruch, bis 500cm2, bis 40cm Dicke, nachträglich hergestellt, Bauschutt entsorgen (2 Stück)	St	43	44,04	52,81	105,62	TZ Anzahl Wanddurchbrüche Mauerwerk	BKI LB 312 Nr 60
Wärme bzw. Kältehauptverteilung in Technikraum und Anlagenhydraulik	Herstellung Hauptverteilung Technikzentrale und Anlagenhydraulik (Heizungsverteiler, Schaltungen, Umwälzpumpen, Druckhaltung, Rohrleitungen, Dämmung, Armaturen)	$m^2_{NF, HTZ}$			2750,00	35200,00	Technikzentrale Nuztfläche NF_{HTZ}	Überschlagsmäßige Annahme gem. Produktrecherche, BKI LB 340, 341
Elektrik und Beleuchtung Technikraum	Kabelrinne, Stahl, WA, verzinkt, 300 x 60mm, inkl. Verbinder-Set	m	59	60,43	72,46	579,67	Länge Elektrik-Trasse Technikzentrale	BKI LB 353 Nr 5
	Installationsleitungen NYM-J 5 x 2,5mm², inkl. Befestigung,	m	6,6	6,76	8,11	64,84	Länge Elektrik-Trasse Technikzentrale	BKI LB 353 Nr 9
	Wannenleuchte, LED, Polyester, Plexiglas, 28W, inkl. Leuchtmittel/LED	St	23	23,56	28,25	56,49	Anzahl Wannenleuchten Technikzentrale	BKI LB 358 Nr 2
	Errichtung Fernwärmeübergabestation mit Trenntauscher, inkl. Anschlussleitung bis 5m	m^2_{WNF}		49,81	59,72	76371,60	Wohnnutzfläche	vgl. IBR&I 2020

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Masterarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

Herstellung Luftwärmetauscher zur thermischen Regeneration (inkl. Anschluss, Glykol-Füllung)	Luft-Glykol-Wärmetauscher zur thermischen Regeneration des Erdreichs (Wärmezufuhr) 15kW, inkl. Installation, Anschluss	St			5000,00	5000,00	Pauschal	Überschlagsmäßige Annahme gem. Produktrecherche Wärmepumpenhersteller
Herstellung Boden (Erdsondenfeld)	Untergrund verdichten, Wegeflächen	m^2_{AF}	1,5	1,54	1,84	283,58	Außenfläche Erdsondenfeld	BKI LB 380 Nr 22
	Oberboden auftragen, lagernd, Förderweg bis 500m, Dicke 20cm	m^2_{AF}	2,2	2,25	2,70	415,92	Außenfläche Erdsondenfeld	BKI LB 303 Nr 34
	Rasenansaat	m^2_{AF}	1,3	1,33	1,60	245,77	Außenfläche Erdsondenfeld	BKI LB 303 Nr 39
Herstellung Erdsondenfeld (inkl. Zusammenführung, Glykol-Füllung)	Erdsondenanlage, Doppel-U-Sonden, Befüllung Wasser/Wasser-Glykol, Bohrloch 160mm, Sonden 32mm, inkl. Fußstück	m	101	103,45	124,04	74423,86	Anzahl und Länge der Erdsonden	BKI LB 340 Nr 39
Errichtung Wohnungsabzweiger (4-Leiter-System)	Leitung, Metallverbundrohr, DN20, Mehrschichtverbundwerkstoff, inkl. Dichtung, Befestigung, Fittings (12,5 Meter je Wohnung)	m	28	28,68	34,39	16832,56	Länge Steigleitung, Anzahl Wohnungen	BKI LB 342 Nr 6
Errichtung Steigleitung, Stiegenhaus (4-Leiter-System)	Leitung, Metallverbundrohr, DN40, Mehrschichtverbundwerkstoff, inkl. Dichtung, Befestigung, Fittings	m	70	71,70	85,97	25130,21	Länge Steigleitung	BKI LB 342 Nr 9
Verkleidung Steigleitung Stiegenhaus	Verkofferung/Bekleidung, Rohrleitungen, GK/GF Platten, Mineralfaser, inkl. verspachteln, schleifen		64	65,55	78,60	11488,10	Länge Steigleitung	BKI LB 339 Nr 30
Dämmung Steigleitung (4-Leiter-System)	Rohrdämmung, MW-Alukaschiert, DN40	m	43	44,04	52,81	15437,13	Länge Steigleitung	BKI LB 347 Nr 13

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Masterarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Anschluss an Steigleitungen an Wohnungsstation	Leitung, Metallverbundrohr, DN20, Mehrschichtverbundwerkstoff, inkl. Dichtung, Befestigung, Fittings	m	28	28,68	34,39	3366,51	Länge der Anschlussleitungen ans zentrale Verteilnetz, innerhalb Wohnung, Anzahl Wohnungen	BKI 342 Nr 6
Installation Wohnungsstation	Herstellung Wohnungsstation	Stk	4000		4000,00	78320,00	Anzahl Wohnungen	Annahme gem. BKI LB 340, 341
Errichtung Heizungsverteiler	Heizungsverteiler, Fußbodenheizung, 5 Heizkreise	St	236	241,73	289,84	5674,98	Anzahl Wohnungen	BKI LB 041 Nr 78
	Verteilerschrank, Fußbodenheizung, Unterputz	St	634	649,40	778,63	15245,49	Anzahl Wohnungen	BKI LB 041 Nr 78
Herstellung Fußbodenheizung	Fußbodenheizung, Typ A, Träger/PE-X Rohr, Verlegeabstand 100mm, inkl. Trägersystem	$m^2_{SysFl.}$	47	48,14	57,72	51673,99	Systemfläche Fußbodenheizung	BKI LB 041 Nr 87
	Funktionsheizen, Fußbodenheizung, gem. Aufheizprotokoll Estrichhersteller	$m^2_{SysFl.}$	2,6	2,66	3,19	2858,56	Systemfläche Fußbodenheizung	BKI LB 041 Nr 91
	Belegreifheizen, Fußbodenheizung, nach abgeschlossenem Funktionsheizen	$m^2_{SysFl.}$	0,6	0,61	0,74	659,67	Systemfläche Fußbodenheizung	BKI LB 041 Nr 92
	Einregulierung/Inbetriebnahme, Fußbodenheizung, inkl. Erstellen eines Einstellprotokolls	St	429	439,42	526,86	10315,96	Anzahl Wohnungen	BKI LB 041 Nr 93
					K_{invest}	**446403,03**		
					$K_{invest,Kälte}$	**80369,13**		

Tab. A9. ES 3 – FW/free cooling: Investitionskosten im Ausgangsjahr zur Umstellung auf das Energiesystem, zzgl. Erneuerung der Verteilung und Wärmeabgabesystem, Kosten der Kälteanlagen blau hinterlegt

Leistungen	**Position BKI**	**Einheit**	**Einheitspreis BKI 08/2023**	**Einheitspreis BKI 05/2024**	**Einheitspreis BKI 05/2024, Wien**	**Gebäude-spez. Preis**	**Bezug auf Grundlagengröße**	**Quelle**

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Masterarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Herstellung Luftwärmetauscher zur thermischen Regeneration (inkl. Anschluss, Glykol-Füllung)	Luft-Glykol-Wärmetauscher zur thermischen Regeneration des Erdreichs (Wärmezufuhr) 20kW, inkl. Installation, Anschluss	St			5000,00	5000,00	Pauschal	Annahme gem. Produktrecherche Wärmepumpenhersteller
						5000,00		
					$k_{Invest, 20, Kälte}$	**4737,25**	Barwertmethode gem. ÖNORM B 1801-4:2014, Preissteigerungsfaktor Baukosten q_{BK}	

Tab. A10. ES 3 – FW/free cooling: Investitionskosten im 20. Jahr zur Erneuerung der Kälteversorgungsanlage

Leistungen	Position BKI	Einheit	Einheitspreis BKI 08/2023	Einheitspreis BKI 05/2024	Einheitspreis BKI 05/2024, Wien	Gebäude-spez. Preis	Bezug auf Grundlagengröße	Quelle
Demontage Gastherme	Demontage Heiztherme	St	167	171,06	205,10	4015,77	Anzahl Wohnungen	BKI LB 340 Nr 2
Rückbau Gasleitungen (Allgemeinbereich, Abzweiger zu Wohnungen)	Stahlrohrleitungen demontieren, bis DN50, inkl. Verschließen der Anschlussleitung	m	12,5	12,80	15,35	276,33	Länge Gasleitungen Allgemeinbereich, zu Wohnungen mit Gasthermen	BKI LB 342 Nr 2
Rückbau Gasleitungen (Wohnungen, zu Gasthermen)	Stahlrohrleitungen demontieren, bis DN25, inkl. Verschließen der Anschlussleitung	m	9,5	9,73	11,67	1142,21	Länge Gasleitungen Wohnungen, zu dezentraler Gastherme	BKI LB 342 Nr 1
Demontage Bestandsradiatoren	Röhenradiator demontieren, bis 50kg, inkl. Verschließen der Anschlussleitung, Entsorgung	St	30	30,73	36,84	2355,96	Anzahl Radiatoren Gebäude	BKI LB 341 Nr 1
Demontage Anbindeleitungen der Bestandsradiatoren	Kupferrohrleitung, demontieren, bis DN25	m	5,3	5,43	6,51	6659,51	Länge Anbindeleitungen Radiatoren	BKI LB 341 Nr 6
Herstellung Technikraum im Keller	Untergrund reinigen	$m^2_{NF, HTZ}$	2,1	2,15	2,58	33,01	Technikzentrale Nuztfläche NF_{HTZ}	BKI LB 336 Nr 7
	Untergrund schleifen, absaugen, Abfall entsorgen	$m^2_{NF, HTZ}$	2,2	2,25	2,70	34,58	Technikzentrale Nuztfläche NF_{HTZ}	BKI LB 336 Nr 9

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Masterarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

	Untergrund grundieren	$m^2_{NF, HTZ}$	2,7	2,77	3,32	42,44	Technikzentrale Nuztfläche NF_{HTZ}	BKI LB 336 Nr 10
	Ausgleichsspachtelung, bis 10mm	$m^2_{NF, HTZ}$	4,5	4,61	5,53	70,74	Technikzentrale Nuztfläche NF_{HTZ}	BKI LB 336 Nr 13
	Bodenbelag, PVC	$m^2_{NF, HTZ}$	43	44,04	52,81	675,96	Technikzentrale Nuztfläche NF_{HTZ}	BKI LB 336 Nr 23
	Innenwand, Gipsbauplatte, nichttragend, Dicke 80-100mm (12 m2)	$m^2_{Wandfl.}$	83	85,02	101,93	1223,20	TZ Nichttragende Innenwand Trockenbau	BKI LB 339 Nr 21
	Deckendurchbruch, bis 500m2, bis 30cm Dicke(2 Stück)	St	50	51,21	61,41	122,81	TZ Anzahl Deckendurchbrüche Mauerwerk	BKI LB 312 Nr 74
	Wanddurchbruch, bis 500cm2, bis 40cm Dicke, nachträglich hergestellt, Bauschutt entsorgen (2 Stück)	St	43	44,04	52,81	105,62	TZ Anzahl Wanddurchbrüche Mauerwerk	BKI LB 312 Nr 60
Wärme bzw. Kältehauptverteilung in Technikraum und Anlagenhydraulik	Herstellung Hauptverteilung Technikzentrale und Anlagenhydraulik (Heizungsverteiler, Schaltungen, Umwälzpumpen, Druckhaltung, Rohrleitungen, Dämmung, Armaturen)	$m^2_{NF, HTZ}$			2750,00	35200,00	Technikzentrale Nuztfläche NF_{HTZ}	Überschlagsmäßige Annahme gem. Produktrecherche, BKI LB 340, 341
Elektrik und Beleuchtung Technikraum	Kabelrinne, Stahl, WA, verzinkt, 300 x 60mm, inkl. Verbinder-Set	m	59	60,43	72,46	579,67	Länge Elektrik-Trasse Technikzentrale	BKI LB 353 Nr 5
	Installationsleitungen NYM-J 5 x 2,5mm², inkl. Befestigung,	m	6,6	6,76	8,11	64,84	Länge Elektrik-Trasse Technikzentrale	BKI LB 353 Nr 9
	Wannenleuchte, LED, Polyester, Plexiglas, 28W, inkl. Leuchtmittel/LED	St	23	23,56	28,25	56,49	Anzahl Wannenleuchten Technikzentrale	BKI LB 358 Nr 2
	Errichtung Fernwärmeübergabestation mit Trenntauscher, inkl. Anschlussleitung bis 5m	m^2_{WNF}	35	49,81	59,72	76371,60	Wohnnutzfläche	vgl. IBR&I 2020

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Masterarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

Errichtung Luft-Wasser-Wärmepumpe (Monoblock)	Wärmepumpe, 15-25kW, Luft, Luft/Wasser, Innen-/Außenaufstellung	St	25544	26164,31	31371,01	31371,01	Pauschal	BKI LB 340 Nr 37
	Einhausung der WP bzw. der Außengeräte		2000		2000,00	2000,00	Pauschal	Annahme gem. Produktrecherche Wärmepumpenhersteller
	Inbetriebnahme Wärmepumpe, gemäß Vorgaben Wärmepumpenhersteller und gesetzlichen Bestimmungen		779	797,92	956,70	956,70	Pauschal	BKI LB 340 Nr 40
	Netzbereitstellungsentgelt Wärmepumpe, Netzebene 7	kW			235,47	1987,54	Elektrische Antriebsenergie Luftwärmepumpe	Vgl. Wiener Netze 2024
Errichtung Kältespeicher	Kältepufferspeicher bis 1000 Liter, Stahl außen beschichtet, Druck 6bar	St	3270	3349,41	4015,94	4015,94	Pauschal	analog Position BKI LB 040 Nr 35
Herstellung Belüftungsanlage für WP (Kältemittelabsaugung)	Be- und Entlüftungsgerät, ohne Wärmerückgewinnung, bis 5000 m³/h, inkl. Kältemittelabsaugung	St			4000,00	4000,00	Pauschal	Annahme gem. BKI LB 375, Produktrecherche
Errichtung Wohnungsabzweiger (4-Leiter-System)	Leitung, Metallverbundrohr, DN20, Mehrschichtverbundwerkstoff, inkl. Dichtung, Befestigung, Fittings (12,5 Meter je Wohnung)	m	28	28,68	34,39	16832,56	Länge Steigleitung, Anzahl Wohnungen	BKI LB 342 Nr 6
Errichtung Steigleitung, Stiegenhaus (4-Leiter-System)	Leitung, Metallverbundrohr, DN40, Mehrschichtverbundwerkstoff, inkl. Dichtung, Befestigung, Fittings	m	70	71,70	85,97	25130,21	Länge Steigleitung	BKI LB 342 Nr 9
Verkleidung Steigleitung, Stiegenhaus	Verkofferung/Bekleidung, Rohrleitungen, GK/GF Platten, Mineralfaser, inkl. verspachteln, schleifen		64	65,55	78,60	11488,10	Länge Steigleitung	BKI LB 339 Nr 30
Dämmung Steigleitung (4-Leiter-System)	Rohrdämmung, MW-Alukaschiert, DN40	m	43	44,04	52,81	15437,13	Länge Steigleitung	BKI LB 347 Nr 13

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Masterarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

Anschluss an Steigleitungen an Wohnungsstation	Leitung, Metallverbundrohr, DN20, Mehrschichtverbundwerkstoff, inkl. Dichtung, Befestigung, Fittings	m	28	28,68	34,39	3366,51	Länge der Anschlussleitungen ans zentrale Verteilnetz, innerhalb Wohnung, Anzahl Wohnungen	BKI LB 342 Nr 6
Herstellung Wohnungsstation	Herstellung Wohnungsstation	Stk	4000		4000,00	78320,00	Anzahl Wohnungen	Annahme gem. Positionen BKI LB 340, 341
Errichtung Heizungsverteiler	Heizungsverteiler, Fußbodenheizung, 5 Heizkreise	St	236	241,73	289,84	5674,98	Anzahl Wohnungen	BKI LB 041 Nr 78
	Verteilerschrank, Fußbodenheizung, Unterputz	St	634	649,40	778,63	15245,49	Anzahl Wohnungen	BKI LB 041 Nr 78
Herstellung Fußbodenheizung	Fußbodenheizung, Typ A, Träger/PE-X Rohr, Verlegeabstand 100mm, inkl. Trägersystem	$m^2_{SysFl.}$	47	48,14	57,72	51673,99	Systemfläche Fußbodenheizung	BKI LB 041 Nr 87
	Funktionsheizen, Fußbodenheizung, gem. Aufheizprotokoll Estrichhersteller	$m^2_{SysFl.}$	2,6	2,66	3,19	2858,56	Systemfläche Fußbodenheizung	BKI LB 041 Nr 91
	Belegreifheizen, Fußbodenheizung, nach abgeschlossenem Funktionsheizen	$m^2_{SysFl.}$	0,6	0,61	0,74	659,67	Systemfläche Fußbodenheizung	BKI LB 041 Nr 92
	Einregulierung/Inbetriebnahme, Fußbodenheizung, inkl. Erstellen eines Einstellprotokolls	St	429	439,42	526,86	10315,96	Anzahl Wohnungen	BKI LB 041 Nr 93
					K_{Invest}	**410365,10**		
					$K_{invest,\ Kälte}$	**44331,19**		

Tab. A10. ES 4 – FW/LW-WP: Investitionskosten im Ausgangsjahr zur Umstellung auf das Energiesystem, zzgl. Erneuerung der Verteilung und Wärmeabgabesystem, Kosten der Kälteversorgungsanlagen blau hinterlegt

Leistungen	**Position BKI**	**Einheit**	**Einheitspreis BKI 08/2023**	**Einheitspreis BKI 05/2024**	**Einheitspreis BKI 05/2024, Wien**	**Gebäude-spez. Preis**	**Bezug auf Grundlagengröße**	**Quelle**

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Masterarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Errichtung Luft-Wasser-Wärmepumpe (Monoblock)	Wärmepumpe, 15-25kW, Luft, Luft/Wasser, Innen-/Außenaufstellung	St	25544	26164,31	31371,01	31371,01	Pauschal	BKI LB 340 Nr 37
	Inbetriebnahme Wärmepumpe, gemäß Vorgaben Wärmepumpenhersteller und gesetzlichen Bestimmungen		779	797,92	956,70	956,70	Pauschal	BKI LB 340 Nr 40
Demontage Luft-Wasser-Wärmepumpe	Demontage Heiztherme	St	187	191,54	229,66	229,66	Pauschal	analog BKI LB 340 Nr 2
Herstellung Belüftungsanlage für WP (Kältemittelabsaugung)	Be- und Entlüftungsgerät, ohne Wärmerückgewinnung, bis 5000 m³/h, inkl. Kältemittelabsaugung	St			4000,00	4000,00	Pauschal	Annahme gem. BKI LB 375, Produktrecherche
					∑	**36557,37**		
					$k_{Invest, 20, Kälte}$	**34636,27627**	Barwertmethode gem. ÖNORM B 1801-4:2014, Preissteigerungsfaktor Baukosten q_{BK}	

Tab. A11. ES 4 – FW/LW-WP: Investitionskosten im 20. Jahr zur Erneuerung der Kälteversorgungsanlage

Leistungen	**Position BKI**	**Einheit**	**Einheitspreis BKI 08/2023**	**Einheitspreis BKI 05/2024**	**Einheitspreis BKI 05/2024, Wien**	**Gebäude-spez. Preis**	**Bezug auf Grundlagengröße**	**Quelle**
Demontage Gastherme	Demontage Heiztherme	St	167	171,06	205,10	4015,77	Anzahl Wohnungen	BKI LB 340 Nr 2
Rückbau Gasleitungen (Allgemeinbereich, Abzweiger zu Wohnungen)	Stahlrohrleitungen demontieren, bis DN50, inkl. Verschließen der Anschlussleitung	m	12,5	12,80	15,35	276,33	Länge Gasleitungen Allgemeinbereich, zu Wohnungen mit Gasthermen	BKI LB 342 Nr 2
Rückbau Gasleitungen (Wohnungen, zu Gasthermen)	Stahlrohrleitungen demontieren, bis DN25, inkl. Verschließen der Anschlussleitung	m	9,5	9,73	11,67	1142,21	Länge Gasleitungen Wohnungen, zu dezentraler Gastherme	BKI LB 342 Nr 1
Demontage Bestandsradiatoren	Röhenradiator demontieren, bis 50kg, inkl. Verschließen der Anschlussleitung, Entsorgung	St	30	30,73	36,84	2355,96	Anzahl Radiatoren Gebäude	BKI LB 341 Nr 1
Demontage Anbindeleitungen der	Kupferrohrleitung, demontieren, bis DN25	m	5,3	5,43	6,51	6659,51	Länge Anbindeleitungen Radiatoren	BKI LB 341 Nr 6

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Masterarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

Bestandsradiatoren								
Herstellung Technikraum im Keller	Untergrund reinigen	$m^2_{NF, HTZ}$	2,1	2,15	2,58	33,01	Technikzentrale Nuztfläche NF_{HTZ}	BKI LB 336 Nr 7
	Untergrund schleifen, absaugen, Abfall entsorgen	$m^2_{NF, HTZ}$	2,2	2,25	2,70	34,58	Technikzentrale Nuztfläche NF_{HTZ}	BKI LB 336 Nr 9
	Untergrund grundieren	$m^2_{NF, HTZ}$	2,7	2,77	3,32	42,44	Technikzentrale Nuztfläche NF_{HTZ}	BKI LB 336 Nr 10
	Ausgleichsspachtelung, bis 10mm	$m^2_{NF, HTZ}$	4,5	4,61	5,53	70,74	Technikzentrale Nuztfläche NF_{HTZ}	BKI LB 336 Nr 13
	Bodenbelag, PVC	$m^2_{NF, HTZ}$	43	44,04	52,81	675,96	Technikzentrale Nuztfläche NF_{HTZ}	BKI LB 336 Nr 23
	Innenwand, Gipsbauplatte, nichttragend, Dicke 80-100mm (12 m2)	$m^2_{Wandfl.}$	83	85,02	101,93	1223,20	TZ Nichttragende Innenwand Trockenbau	BKI LB 339 Nr 21
	Deckendurchbruch, bis 500m2, bis 30cm Dicke(2 Stück)	St	50	51,21	61,41	122,81	TZ Anzahl Deckendurchbrüche Mauerwerk	BKI LB 312 Nr 74
	Wanddurchbruch, bis 500cm2, bis 40cm Dicke, nachträglich hergestellt, Bauschutt entsorgen (2 Stück)	St	43	44,04	52,81	105,62	TZ Anzahl Wanddurchbrüche Mauerwerk	BKI LB 312 Nr 60
Wärme bzw. Kältehauptverteilung in Technikraum und Anlagenhydraulik	Herstellung Hauptverteilung Technikzentrale und Anlagenhydraulik (Heizungsverteiler, Schaltungen, Umwälzpumpen, Druckhaltung, Rohrleitungen, Dämmung, Armaturen)	$m^2_{NF, HTZ}$			2750,00	35200,00	Technikzentrale Nuztfläche NF_{HTZ}	Annahme gem. Produktrecherche, BKI LB 340, 341
Elektrik und Beleuchtung Technikraum	Kabelrinne, Stahl, WA, verzinkt, 300 x 60mm, inkl. Verbinder-Set	m	59	60,43	72,46	579,67	Länge Elektrik-Trasse Technikzentrale	BKI LB 353 Nr 5
	Installationsleitungen NYM-J 5 x	m	6,6	6,76	8,11	64,84	Länge Elektrik-Trasse Technikzentrale	BKI LB 353 Nr 9

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Masterarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

	2,5mm², inkl. Befestigung,							
	Wannenleuchte, LED, Polyester, Plexiglas, 28W, inkl. Leuchtmittel/LED	St	23	23,56	28,25	56,49	Anzahl Wannenleuchten Technikzentrale	BKI LB 358 Nr 2
Wiederherstellung Boden (Erdsondenfeld)	Untergrund verdichten, Wegeflächen	m^2_{AF}	1,5	1,54	1,84	283,58	Außenfläche Erdsondenfeld	BKI LB 380 Nr 22
	Oberboden auftragen, lagernd, Förderweg bis 500m, Dicke 20cm	m^2_{AF}	2,2	2,25	2,70	415,92	Außenfläche Erdsondenfeld	BKI LB 303 Nr 34
	Rasenansaat	m^2_{AF}	1,3	1,33	1,60	245,77	Außenfläche Erdsondenfeld	BKI LB 303 Nr 39
Herstellung Erdsondenfeld (inkl. Zusammenführung, Glykol-Füllung)	Erdsondenanlage, Doppel-U-Sonden, Befüllung Wasser/Wasser-Glykol, Bohrloch 160mm, Sonden 32mm, inkl. Fußstück	m	101	103,45	124,04	74423,86	Anzahl und Länge der Erdsonden	BKI LB 340 Nr 39
Errichtung Sole-Wasser-Wärmepumpe (inkl. Kältemittelfüllung)	Wärmepumpe, 25-35kW, Sole-Wasser, für Raumheizung- bzw. Kühlung, Trinkwassererwärmung, Innenaufstellung, über Erdsonden/Erdkollektoren	St	33734	34553,19	41429,28	41429,28	Pauschal	BKI LB 340 Nr 34
	Inbetriebnahme Wärmepumpe, gemäß Vorgaben Wärmepumpenhersteller und gesetzlichen Bestimmungen		779	797,92	956,70	956,70	Pauschal	BKI LB 340 Nr 40
Errichtung Heizungs-Pufferspeicher	Heizungspufferspeicher bis 1000 Liter, Stahl außen beschichtet, Druck 6bar	St	3270	3349,41	4015,94	4015,94	Pauschal	BKI LB 040 Nr 35
Errichtung Kältespeicher	Kältepufferspeicher bis 1000 Liter, Stahl außen beschichtet, Druck 6bar	St	3270	3349,41	4015,94	4015,94	Pauschal	analog BKI LB 040 Nr 35

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Masterarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

Herstellung Belüftungsanlage für WP (Kältemittelabsaugung)	Be- und Entlüftungsgerät, ohne Wärmerückgewinnung, bis 5000 m³/h, inkl. Kältemittelabsaugung	St			4000,00	4000,00	Pauschal	Annahme gem. BKI LB 375, Produktrecherche
Netzbereitstellungsentgelt (Strom für Wärmebereitstellung)	Netzbereitstellungsentgelt Wärmepumpe, Netzebene 7	kW			235,47	2561,44	Elektrische Antriebsenergie Erdwärmepumpe	Vgl. Wiener Netze 2024
Errichtung Wohnungsabzweiger (4-Leiter-System)	Leitung, Metallverbundrohr, DN20, Mehrschichtverbundwerkstoff, inkl. Dichtung, Befestigung, Fittings (12,5 Meter je Wohnung)	m	28	28,68	34,39	16832,56	Länge Steigleitung, Anzahl Wohnungen	BKI LB 342 Nr 6
Errichtung Steigleitung, Stiegenhaus (4-Leiter-System)	Leitung, Metallverbundrohr, DN40, Mehrschichtverbundwerkstoff, inkl. Dichtung, Befestigung, Fittings	m	70	71,70	85,97	25130,21	Länge Steigleitung	BKI LB 342 Nr 9
Verkleidung Steigleitung, Stiegenhaus	Verkofferung/Bekleidung, Rohrleitungen, GK/GF Platten, Mineralfaser, inkl. verspachteln, schleifen		64	65,55	78,60	11488,10	Länge Steigleitung	BKI LB 339 Nr 30
Dämmung Steigleitung (4-Leiter-System)	Rohrdämmung, MW-Alukaschiert, DN40	m	43	44,04	52,81	15437,13	Länge Steigleitung	BKI LB 347 Nr 13
Anschluss an Steigleitungen an Wohnungsstation	Leitung, Metallverbundrohr, DN20, Mehrschichtverbundwerkstoff, inkl. Dichtung, Befestigung, Fittings	m	28	28,68	34,39	3366,51	Länge der Anschlussleitungen ans zentrale Verteilnetz, innerhalb Wohnung, Anzahl Wohnungen	BKI LB 342 Nr 6
Herstellung Wohnungsstation	Herstellung Wohnungsstation	Stk	4000		4000,00	78320,00	Anzahl Wohnungen	Annahme gem. BKI LB 340, 341
Errichtung Heizungsverteiler	Heizungsverteiler,	St	236	241,73	289,84	5674,98	Anzahl Wohnungen	BKI LB 041 Nr 78

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Masterarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

	Fußbodenheizung, 5 Heizkreise							
	Verteilerschrank, Fußbodenheizung, Unterputz	St	634	649,40	778,63	15245,49	Anzahl Wohnungen	BKI LB 041 Nr 78
Herstellung Fußbodenheizung	Fußbodenheizung, Typ A, Träger/PE-X Rohr, Verlegeabstand 100mm, inkl. Trägersystem	$m^2_{SysFl.}$	47	48,14	57,72	51673,99	Systemfläche Fußbodenheizung	BKI LB 041 Nr 87
	Funktionsheizen, Fußbodenheizung, gem. Aufheizprotokoll Estrichhersteller	$m^2_{SysFl.}$	2,6	2,66	3,19	2858,56	Systemfläche Fußbodenheizung	BKI LB 041 Nr 91
	Belegreifheizen, Fußbodenheizung, nach abgeschlossenem Funktionsheizen	$m^2_{SysFl.}$	0,6	0,61	0,74	659,67	Systemfläche Fußbodenheizung	BKI LB 041 Nr 92
	Einregulierung/Inbetriebnahme, Fußbodenheizung, inkl. Erstellen eines Einstellprotokolls	St	429	439,42	526,86	10315,96	Anzahl Wohnungen	BKI LB 041 Nr 93
					K_{Invest}	**422010,74**		
					$K_{invest,\ Kälte}$	**132348,43**		

Tab. A11. ES 5 – ERD-WP: Investitionskosten im Ausgangsjahr zur Umstellung auf das Energiesystem, zzgl. Erneuerung der Verteilung und Wärmeabgabesystem, Kosten der Kälteversorgungsanlagen blau hinterlegt

Leistungen	**Position BKI**	**Einheit**	**Einheitspreis BKI 08/2023**	**Einheitspreis BKI 05/2024**	**Einheitspreis BKI 05/2024, Wien**	**Gebäude-spez. Preis**	**Bezug auf Grundlagengröße**	**Quelle**
Demontage Sole-Wasser-Wärmepumpe	Demontage Heiztherme	St	187	191,54	229,66	229,66	Pauschal	analog BKI LB 340 Nr 2
Errichtung Sole-Wasser-Wärmepumpe (inkl. Kältemittelfüllung)	Wärmepumpe, 25-35kW, Sole-Wasser, für Raumheizung- bzw. Kühlung, Trinkwassererwärmung, Innenaufstellung, über Erdsonden/Erdkollektoren	St	33734	34553,19	41429,28	41429,28	Pauschal	BKI LB 340 Nr 34

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Masterarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

	Inbetriebnahme Wärmepumpe, gemäß Vorgaben Wärmepumpenhersteller und gesetzlichen Bestimmungen		779	797,92	956,70	956,70	Pauschal	BKI LB 340 Nr 40
Herstellung Belüftungsanlage für WP (Kältemittelabsaugung)	Be- und Entlüftungsgerät, ohne Wärmerückgewinnung, bis 5000 m³/h, inkl. Kältemittelabsaugung	St			4000,00	4000,00	Pauschal	Annahme gem. BKI LB 375, Produktrecherche
					∑	**46615,64**		
					$k_{Invest,\ 20,\ Kälte}$	**44165,98738**	Barwertmethode gem. ÖNORM B 1801-4:2014, Preissteigerungsfaktor Baukosten q_{BK}	

Tab. A12. ES 5 – ERD-WP: Investitionskosten im 20. Jahr zur Erneuerung der Kälteversorgungsanlage

Leistungen	**Position BKI**	**Einheit**	**Einheitspreis BKI 08/2023**	**Einheitspreis BKI 05/2024**	**Einheitspreis BKI 05/2024, Wien**	**Gebäude-spez. Preis**	**Bezug auf Grundlagengröße**	**Quelle**
Demontage Gastherme	Demontage Heiztherme	St	167	171,06	205,10	4015,77	Anzahl Wohnungen	BKI LB 340 Nr 2
Rückbau Gasleitungen (Allgemeinbereich, Abzweiger zu Wohnungen)	Stahlrohrleitungen demontieren, bis DN50, inkl. Verschließen der Anschlussleitung	m	12,5	12,80	15,35	276,33	Länge Gasleitungen Allgemeinbereich, zu Wohnungen mit Gasthermen	BKI LB 342 Nr 2
Rückbau Gasleitungen (Wohnungen, zu Gasthermen)	Stahlrohrleitungen demontieren, bis DN25, inkl. Verschließen der Anschlussleitung	m	9,5	9,73	11,67	1142,21	Länge Gasleitungen Wohnungen, zu dezentraler Gastherme	BKI LB 342 Nr 1
Demontage Bestandsradiatoren	Röhenradiator demontieren, bis 50kg, inkl. Verschließen der Anschlussleitung, Entsorgung	St	30	30,73	36,84	2355,96	Anzahl Radiatoren Gebäude	BKI LB 341 Nr 1
Demontage Anbindeleitungen der Bestandsradiatoren	Kupferrohrleitung, demontieren, bis DN25	m	5,3	5,43	6,51	6659,51	Länge Anbindeleitungen Radiatoren	BKI LB 341 Nr 6
Herstellung Technikraum im Keller	Untergrund reinigen	$m^2_{NF,\ HTZ}$	2,1	2,15	2,58	33,01	Technikzentrale Nuztfläche NF_{HTZ}	BKI LB 336 Nr 7

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Masterarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

	Untergrund schleifen, absaugen, Abfall entsorgen	m^2 NF, HTZ	2,2	2,25	2,70	34,58	Technikzentrale Nuztfläche NF_{HTZ}	BKI LB 336 Nr 9
	Untergrund grundieren	m^2 NF, HTZ	2,7	2,77	3,32	42,44	Technikzentrale Nuztfläche NF_{HTZ}	BKI LB 336 Nr 10
	Ausgleichsspachtelung, bis 10mm	m^2 NF, HTZ	4,5	4,61	5,53	70,74	Technikzentrale Nuztfläche NF_{HTZ}	BKI LB 336 Nr 13
	Bodenbelag, PVC	m^2 NF, HTZ	43	44,04	52,81	675,96	Technikzentrale Nuztfläche NF_{HTZ}	BKI LB 336 Nr 23
	Innenwand, Gipsbauplatte, nichttragend, Dicke 80-100mm (12 m2)	m^2 Wandfl.	83	85,02	101,93	1223,20	TZ Nichttragende Innenwand Trockenbau	BKI LB 339 Nr 21
	Deckendurchbruch, bis 500m2, bis 30cm Dicke(2 Stück)	St	50	51,21	61,41	122,81	TZ Anzahl Deckendurchbrüche Mauerwerk	BKI LB 312 Nr 74
	Wanddurchbruch, bis 500cm2, bis 40cm Dicke, nachträglich hergestellt, Bauschutt entsorgen (2 Stück)	St	43	44,04	52,81	105,62	TZ Anzahl Wanddurchbrüche Mauerwerk	BKI LB 312 Nr 60
Wärme bzw. Kältehauptverteilung in Technikraum und Anlagenhydraulik	Herstellung Hauptverteilung Technikzentrale und Anlagenhydraulik (Heizungsverteiler, Schaltungen, Umwälzpumpen, Druckhaltung, Rohrleitungen, Dämmung, Armaturen)	m^2 NF, HTZ			2750,00	35200,00	Technikzentrale Nuztfläche NF_{HTZ}	Annahme gem. Produktrecherche, BKI LB 340, 341
Elektrik und Beleuchtung Technikraum	Kabelrinne, Stahl, WA, verzinkt, 300 x 60mm, inkl. Verbinder-Set	m	59	60,43	72,46	579,67	Länge Elektrik-Trasse Technikzentrale	BKI LB 353 Nr 5
	Installationsleitungen NYM-J 5 x 2,5mm², inkl. Befestigung,	m	6,6	6,76	8,11	64,84	Länge Elektrik-Trasse Technikzentrale	BKI LB 353 Nr 9
	Wannenleuchte, LED, Polyester, Plexiglas, 28W, inkl. Leuchtmittel/LED	St	23	23,56	28,25	56,49	Anzahl Wannenleuchten Technikzentrale	BKI LB 358 Nr 2
Errichtung Luft-Wasser-	Wärmepumpe, 25-35kW, Luft, Luft/Wasser,		35112	35964,66	43121,62	43121,62	Pauschal	BKI LB 340 Nr 37

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Masterarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Wärmepumpe (Monoblock)	Innen-/Außenaufstellung							
	Einhausung der WP bzw. der Außengeräte	St	2000		2000,00	2000,00	Pauschal	Annahme gem. Produktrecherche Wärmepumpenhersteller
	Inbetriebnahme Wärmepumpe, gemäß Vorgaben Wärmepumpenhersteller und gesetzlichen Bestimmungen		779	797,92	956,70	956,70	Pauschal	BKI LB 340 Nr 40
	Netzbereitstellungsentgelt Wärmepumpe, Netzebene 7	kW			235,47	1987,54	Elektrische Antriebsenergie Luftwärmepumpe	Vgl. Wiener Netze 2024
Errichtung Kältespeicher	Kältepufferspeicher bis 1000 Liter, Stahl außen beschichtet, Druck 6bar	St	3270	3349,41	4015,94	4015,94	Pauschal	analog LB 040 Nr 35
Herstellung Belüftungsanlage für WP (Kältemittelabsaugung)	Be- und Entlüftungsgerät, ohne Wärmerückgewinnung, bis 5000 m³/h, inkl. Kältemittelabsaugung	St			4000,00	4000,00	Pauschal	Annahme gem. Positionen BKI LB 375, Produktrecherche
Errichtung Wohnungsabzweiger (4-Leiter-System)	Leitung, Metallverbundrohr, DN20, Mehrschichtverbundwerkstoff, inkl. Dichtung, Befestigung, Fittings (12,5 Meter je Wohnung)	m	28	28,68	34,39	16832,56	Länge Steigleitung, Anzahl Wohnungen	BKI LB 342 Nr 6
Errichtung Steigleitung, Stiegenhaus (4-Leiter-System)	Leitung, Metallverbundrohr, DN40, Mehrschichtverbundwerkstoff, inkl. Dichtung, Befestigung, Fittings	m	70	71,70	85,97	25130,21	Länge Steigleitung	BKI LB 342 Nr 9
Verkleidung Steigleitung, Stiegenhaus	Verkofferung/Bekleidung, Rohrleitungen, GK/GF Platten, Mineralfaser, inkl. verspachteln, schleifen		64	65,55	78,60	11488,10	Länge Steigleitung	BKI LB 339 Nr 30
Dämmung Steigleitung (4-Leiter-System)	Rohrdämmung, MW-Alukaschiert, DN40	m	43	44,04	52,81	15437,13	Länge Steigleitung	BKI LB 347 Nr 13

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Masterarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Anschluss an Steigleitungen an Wohnungsstation	Leitung, Metallverbundrohr, DN20, Mehrschichtverbundwerkstoff, inkl. Dichtung, Befestigung, Fittings	m	28	28,68	34,39	3366,51	Länge der Anschlussleitungen ans zentrale Verteilnetz, innerhalb Wohnung, Anzahl Wohnungen	BKI LB 342 Nr 6
Herstellung Wohnungsstation	Herstellung Wohnungsstation	Stk	4000		4000,00	78320,00	Anzahl Wohnungen	Annahme gem. Positionen BKI LB 340, 341
Errichtung Heizungsverteiler	Heizungsverteiler, Fußbodenheizung, 5 Heizkreise	St	236	241,73	289,84	5674,98	Anzahl Wohnungen	BKI LB 041 Nr 78
	Verteilerschrank, Fußbodenheizung, Unterputz	St	634	649,40	778,63	15245,49	Anzahl Wohnungen	BKI LB 041 Nr 78
Herstellung Fußbodenheizung	Fußbodenheizung, Typ A, Träger/PE-X Rohr, Verlegeabstand 100mm, inkl. Trägersystem	m^2 Sys Fl.	47	48,14	57,72	51673,99	Systemfläche Fußbodenheizung	BKI LB 041 Nr 87
	Funktionsheizen, Fußbodenheizung, gem. Aufheizprotokoll Estrichhersteller	m^2 Sys Fl.	2,6	2,66	3,19	2858,56	Systemfläche Fußbodenheizung	BKI LB 041 Nr 91
	Belegreifheizen, Fußbodenheizung, nach abgeschlossenem Funktionsheizen	m^2 Sys Fl.	0,6	0,61	0,74	659,67	Systemfläche Fußbodenheizung	BKI LB 041 Nr 92
	Einregulierung/Inbetriebnahme, Fußbodenheizung, inkl. Erstellen eines Einstellprotokolls	St	429	439,42	526,86	10315,96	Anzahl Wohnungen	BKI LB 041 Nr 93
					K_{Invest}	**345744,12**		
					$K_{Invest, Kälte}$	**56081,81**		

Tab. A13. ES 6 – LUFT-WP: Investitionskosten im Ausgangsjahr zur Umstellung auf das Energiesystem, zzgl. Erneuerung der Verteilung und Wärmeabgabesystem, Kosten der Kälteversorgungsanlagen blau hinterlegt

Leistungen	**Position BKI**	**Einheit**	**Einheitspreis BKI 08/2023**	**Einheitspreis BKI 05/2024**	**Einheitspreis BKI 05/2024, Wien**	**Gebäude-spez. Preis**	**Bezug auf Grundlagengröße**	**Quelle**
Errichtung Luft-Wasser-Wärmepumpe (Monoblock)	Wärmepumpe, 25-35kW, Luft, Luft/Wasser, Innen-		35112	35964,66	43121,62	43121,62	Pauschal	BKI LB 340 Nr 37

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Masterarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

	/Außenaufstellung							
	Inbetriebnahme Wärmepumpe, gemäß Vorgaben Wärmepumpenhersteller und gesetzlichen Bestimmungen	Psch	779	797,92	956,70	956,70	Pauschal	BKI LB 340 Nr 40
Demontage Luft-Wasser-Wärmepumpe	Demontage Heiztherme	St	187	191,54	229,66	229,66	Pauschal	analog BKI LB 340 Nr 2
Herstellung Belüftungsanlage für WP (Kältemittelabsaugung)	Be- und Entlüftungsgerät, ohne Wärmerückgewinnung, bis 5000 m³/h, inkl. Kältemittelabsaugung	St			4000,00	4000,00	Pauschal	Annahme gem. Positionen BKI LB 375, Produktrecherche
					∑	**48307,98**		
					$k_{Invest,\ 20,\ Kälte}$	**45769,39**	Barwertmethode gem. ÖNORM B 1801-4:2014, Preissteigerungsfaktor Baukosten q_{BK}	

Tab. A14. ES 6 – LUFT-WP: Investitionskosten im 20. Jahr zur Erneuerung der Kälteversorgungsanlage

10.3 Berechnung der Betriebskosten

BETRIEBSKOSTEN ES 1			**Bezugsgröße – Methodik, Grundlagen & Annahmen**
Jährliche Energiebedarfe [kWh/a]	WWWB	18635,4	Heizwärmebedarf, Bruttogeschoßfläche
	HWB	52617,6	Warmwasserwärmebedarf, Bruttogeschoßfläche
	KB	n.a.	Kühlbedarf, Bruttogeschoßfläche
Jährliche Endenergiebedarfe [kWh/a]	HEB	92628,9	Energieaufwandszahl Gasbrennwerttherme
	KEB	n.a.	
Jährliche Betriebskosten[€/a]		15283,77	Erdgaspreis - privater Einsatz
	$k_{30.\ Betrieb}$	**402377,59**	Barwertmethode gem. ÖNORM B 1801-4:2014, Abzinsungsfaktor, Preissteigerungsfaktor Gas

Tab. A15. Berechnung der Betriebskosten Energiesystem 1 - Status Quo

BETRIEBSKOSTEN ES 2			**Bezugsgröße – Methodik, Grundlagen & Annahmen**
Jährliche Energiebedarfe [kWh/a]	WWWB	18635,4	Heizwärmebedarf, Bruttogeschoßfläche
	HWB	52617,6	Warmwasserwärmebedarf, Bruttogeschoßfläche

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Masterarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

	KB	22472,1	Kühlbedarf, Bruttogeschoßfläche
Jährliche Endenergiebedarfe [kWh/a]	HEB	96191,55	Energieaufwandszahl Fernwärmeübergabestation
	KEB	44831,84	Energieaufwandszahl ABKM
Jährliche Betriebskosten[€/a]	Wärme	22564,89	Fernwärmepreis
	Kälte	14297,56	Fernwärmepreis
	$k_{30,\ Betrieb,\ Wärme}$	469350,40	Barwertmethode gem. ÖNORM B 1801-4:2014, Preissteigerungsfaktor Fernwärme, Abzinsungsfaktor
	$k_{30,\ Betrieb,\ Kälte}$	297389,66	Barwertmethode gem. ÖNORM B 1801-4:2014, Preissteigerungsfaktor Fernwärme, Abzinsungsfaktor
	$k_{30,\ Betrieb}$	766740,06	

Tab. A16. Berechnung der Betriebskosten Energiesystem 2 – FW/ABKM

BETRIEBSKOSTEN ES 3			**Bezugsgröße – Methodik, Grundlagen & Annahmen**
Jährliche Energiebedarfe [kWh/a]	WWWB	18635,4	Heizwärmebedarf, Bruttogeschoßfläche
	HWB	52617,6	Warmwasserwärmebedarf, Bruttogeschoßfläche
	KB	22472,1	Kühlbedarf, Bruttogeschoßfläche
Jährliche Endenergiebedarfe [kWh/a]	HEB	96191,55	Energieaufwandszahl Fernwärmeübergabestation
	KEB	1728,62	Energieaufwandszahl freie Kühlung
Jährliche Betriebskosten[€/a]	Wärme	22564,89	Fernwärmepreis
	Kälte	468,46	Strompreis
	$k_{30,\ Betrieb,\ Wärme}$	469350,4	Barwertmethode gem. ÖNORM B 1801-4:2014, Preissteigerungsfaktor Fernwärme, Abzinsungsfaktor
	$k_{30,\ Betrieb,\ Kälte}$	11338,09	Barwertmethode gem. ÖNORM B 1801-4:2014, Preissteigerungsfaktor Strom, Abzinsungsfaktor
	$k_{30,\ Betrieb}$	480688,49	

Tab. A17. Berechnung der Betriebskosten Energiesystem 3 – FW/free cooling

BETRIEBSKOSTEN ES 4			**Bezugsgröße – Methodik, Grundlagen & Annahmen**
Jährliche Energiebedarfe [kWh/a]	WWWB	18635,4	Heizwärmebedarf, Bruttogeschoßfläche
	HWB	52617,6	Warmwasserwärmebedarf, Bruttogeschoßfläche
	KB	22472,1	Kühlbedarf, Bruttogeschoßfläche
Jährliche Endenergiebedarfe [kWh/a]	HEB	96191,55	Energieaufwandszahl Fernwärmeübergabestation
	KEB	9438,28	Energieaufwandszahl LW-WP
Jährliche Betriebskosten[€/a]	Wärme	22564,89	Fernwärmepreis

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Masterarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

	Kälte	2557,77	Strompreis
	$k_{30,\ Betrieb,\ Wärme}$	469350,4	Barwertmethode gem. ÖNORM B 1801-4:2014, Preissteigerungsfaktor Fernwärme, Abzinsungsfaktor
	$k_{30,\ Betrieb,\ Kälte}$	61905,95	Barwertmethode gem. ÖNORM B 1801-4:2014, Preissteigerungsfaktor Strom, Abzinsungsfaktor
	$k_{30,\ Betrieb}$	531256,35	

Tab. A18. Berechnung der Betriebskosten Energiesystem 4 – FW/LW-WP

BETRIEBSKOSTEN ES 5			**Bezugsgröße – Methodik, Grundlagen & Annahmen**
Jährliche Energiebedarfe [kWh/a]	WWWB	18635,4	Heizwärmebedarf, Bruttogeschoßfläche
	HWB	52617,6	Warmwasserwärmebedarf, Bruttogeschoßfläche
	KB	22472,1	Kühlbedarf, Bruttogeschoßfläche
Jährliche Endenergiebedarfe [kWh/a]	HEB	26363,61	Energieaufwandszahl SW-WP
	KEB	8314,68	Energieaufwandszahl SW-WP
Jährliche Betriebskosten[€/a]	Wärme	7144,54	Strompreis
	Kälte	2253,28	Strompreis
	$k_{30,\ Betrieb,\ Wärme}$	172919,63	Barwertmethode gem. ÖNORM B 1801-4:2014, Preissteigerungsfaktor Strom, Abzinsungsfaktor
	$k_{30,\ Betrieb,\ Kälte}$	54536,19	Barwertmethode gem. ÖNORM B 1801-4:2014, Preissteigerungsfaktor Strom, Abzinsungsfaktor
	$k_{30,\ Betrieb}$	227455,82	

Tab. A18. Berechnung der Betriebskosten Energiesystem 5 – SW-WP

BETRIEBSKOSTEN ES 6			**Bezugsgröße – Methodik, Grundlagen & Annahmen**
Jährliche Energiebedarfe [kWh/a]	WWWB	18635,4	Heizwärmebedarf, Bruttogeschoßfläche
	HWB	52617,6	Warmwasserwärmebedarf, Bruttogeschoßfläche
	KB	22472,1	Kühlbedarf, Bruttogeschoßfläche
Jährliche Endenergiebedarfe [kWh/a]	HEB	29926,26	Barwertmethode gem. ÖNORM B 1801-4:2014, Energieaufwandszahl LW-WP
	KEB	9438,28	Barwertmethode gem. ÖNORM B 1801-4:2014, Energieaufwandszahl LW-WP
Jährliche Betriebskosten[€/a]	Wärme	8110,02	Strompreis
	Kälte	2557,77	Strompreis
	$k_{30,\ Betrieb,\ Wärme}$	196287,14	Barwertmethode gem. ÖNORM B 1801-4:2014, Preissteigerungsfaktor Strom, Abzinsungsfaktor
	$k_{30,\ Betrieb,\ Kälte}$	61905,95	Barwertmethode gem. ÖNORM B 1801-4:2014, Preissteigerungsfaktor Strom, Abzinsungsfaktor

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Masterarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub

	$k_{30.\ Betrieb}$	258193,09	

Tab. A19. Berechnung der Betriebskosten Energiesystem 6 – LW-WP

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Masterarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

11 Anhang B

Im Anhang B sind die Ergebnisse der Modellrechnungen im Zuge der Sensitivitätsanalyse dargestellt.

	K_{ES} [€]	K_{ES}' [€]	$CO_{2,eq}$ [t]	$CO_{2,eq}$' [t]	Q_{Abw} [MWh]	Q_{Abw}' [MWh]	Zielwert	Rang
ES 1 - SQGas Dez	671451,69	0,03	558,55	1,00	0,00	0,00	0,07	2
ES 2 - FW/ABKM	1243855,72	1,00	93,08	0,04	2019,12	1,00	0,95	6
ES 3 - FW/freecool	950671,05	0,50	71,58	0,00	674,16	0,33	0,47	4
ES 4 - FW/LW-WP	981768,94	0,55	107,66	0,07	957,31	0,47	0,53	5
ES 5 - SW-WP	717412,15	0,11	162,29	0,19	0,00	0,00	0,10	3
ES 6 - LW-WP	655217,83	0,00	224,93	0,31	957,31	0,47	0,04	1

Tab. B1.: Szenario 1 - Fokus auf Kostenoptimalität; Bestimmung des optimalen Energiesystems gemäß der gewichteten Zielfunktion

	K_{ES} [€]	K_{ES}' [€]	$CO_{2,eq}$ [t]	$CO_{2,eq}$' [t]	Q_{Abw} [MWh]	Q_{Abw}' [MWh]	Zielwert	Rang
ES 2 – ABKM für Kälte	383784,81	1,00	29,59	0,60	2019,12	1,00	0,98	5
ES 3 – free cooling	115286,74	0,00	8,09	0,00	674,16	0,33	0,02	1
ES 4 - LW-WP für Kälte	141447,31	0,10	44,17	1,00	957,31	0,47	0,16	2
ES 5 - SW-WP Wärme und Kälte	249892,89	0,50	38,91	0,85	0,00	0,00	0,49	4
ES 6 - LW-WP Wärme und Kälte	164331,05	0,18	44,17	1,00	957,31	0,47	0,24	3

Tab. B2.: Szenario 1 - Fokus auf Kostenoptimalität; Bestimmung der optimalen Kälteversorgungsanlage gemäß der gewichteten Zielfunktion

	K_{ES} [€]	K_{ES}' [€]	$CO_{2,eq}$ [t]	$CO_{2,eq}$' [t]	Q_{Abw} [MWh]	Q_{Abw}' [MWh]	Zielwert	Rang
ES 1 - SQGas Dez	671451,69	0,03	558,55	1,00	0,00	0,00	0,45	5

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Masterarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

ES 2 - FW/ABKM	1243855,72	1,00	93,08	0,04	2019,12	1,00	0,57	6
ES 3 - FW/freecool	950671,05	0,50	71,58	0,00	674,16	0,33	0,20	2
ES 4 - FW/LW-WP	981768,94	0,55	107,66	0,07	957,31	0,47	0,30	3
ES 5 - SW-WP	717412,15	0,11	162,29	0,19	0,00	0,00	0,09	1
ES 6 - LW-WP	655217,83	0,00	224,93	0,31	957,31	0,47	0,36	4

Tab. B3.: Szenario 2 - Fokus auf ökologische Optimalität; Bestimmung des optimalen Energiesystems gemäß der gewichteten Zielfunktion

	K_{ES} [€]	K_{ES}' [€]	$CO_{2,eq}$ [t]	$CO_{2,eq}$' [t]	Q_{Abw} [MWh]	Q_{Abw}' [MWh]	Zielwert	Rang
ES 2 – ABKM für Kälte	383784,81	1,00	29,59	0,60	2019,12	1,00	0,82	5
ES 3 – free cooling	115286,74	0,00	8,09	0,00	674,16	0,33	0,15	1
ES 4 - LW-WP für Kälte	141447,31	0,10	44,17	1,00	957,31	0,47	0,67	3
ES 5 - SW-WP Wärme& Kälte	249892,89	0,50	38,91	0,85	0,00	0,00	0,43	2
ES 6 - LW-WP Wärme& Kälte	164331,05	0,18	44,17	1,00	957,31	0,47	0,68	4

Tab. B4.: Szenario 2 - Fokus auf ökologische Optimalität; Bestimmung der optimalen Kälteversorgungsanlage gemäß der gewichteten Zielfunktion

	K_{ES} [€]	K_{ES}' [€]	$CO_{2,eq}$ [t]	$CO_{2,eq}$' [t]	Q_{Abw} [MWh]	Q_{Abw}' [MWh]	Zielwert	Rang
ES 1 - SQGasDez	671451,69	0,03	558,55	1,00	0,00	0,00	0,34	5
ES 2 - FW/ABKM	1243855,72	1,00	26,37	0,00	2019,12	1,00	0,67	6
ES 3 - FW/freecool	950671,05	0,50	26,08	0,00	674,16	0,33	0,28	2
ES 4 - FW/LW-WP	981768,94	0,55	62,16	0,07	957,31	0,47	0,37	5
ES 5 - SW-WP	717412,15	0,11	162,29	0,26	0,00	0,00	0,12	1
ES 6 - LW-WP	655217,83	0,00	224,93	0,37	957,31	0,47	0,28	3

Tab. B5.: Szenario 3 - Dekarbonisierung der Fernwärme bis 2040; Bestimmung des optimalen Energiesystems gemäß der gewichteten Zielfunktion

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Masterarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

	K_{ES} [€]	K_{ES}' [€]	$CO_{2,eq}$ [t]	$CO_{2,eq}$' [t]	Q_{Abw} [MWh]	Q_{Abw}' [MWh]	Zielwert	Rang
ES 2 – ABKM für Kälte	383784,81	1,00	8,38	0,01	2019,12	1,00	0,67	5
ES 3 – free cooling	115286,74	0,00	8,09	0,00	674,16	0,33	0,11	1
ES 4 - LW-WP für Kälte	141447,31	0,10	44,17	1,00	957,31	0,47	0,52	3
ES 5 - SW-WP Wärme und Kälte	249892,89	0,50	38,91	0,85	0,00	0,00	0,45	2
ES 6 - LW-WP Wärme und Kälte	164331,05	0,18	44,17	1,00	957,31	0,47	0,55	4

Tab. B6.: Szenario 3 - Dekarbonisierung der Fernwärme bis 2040; Bestimmung der optimalen Kälteversorgungsanlage gemäß der gewichteten Zielfunktion

	K_{ES} [€]	K_{ES}' [€]	$CO_{2,eq}$ [t]	$CO_{2,eq}$' [t]	Q_{Abw} [MWh]	Q_{Abw}' [MWh]	Zielwert	Rang
ES 1 - SQGas Dez	671451,69	0,10	558,55	1,00	0,00	0,00	0,37	5
ES 2 - FW/ABKM	810339,56	1,00	93,08	0,04	2019,12	1,00	0,68	6
ES 3 - FW/freecool	685299,51	0,19	71,58	0,00	674,16	0,33	0,18	1
ES 4 - FW/LW-WP	716397,41	0,39	107,66	0,07	957,31	0,47	0,31	4
ES 5 - SW-WP	717412,15	0,40	162,29	0,19	0,00	0,00	0,20	2
ES 6 - LW-WP	655217,83	0,00	224,93	0,31	957,31	0,47	0,26	3

Tab. B7.: Szenario 4 - Reduktion des Fernwärmepreises; Bestimmung des optimalen Energiesystems gemäß der gewichteten Zielfunktion

	K_{ES} [€]	K_{ES}' [€]	$CO_{2,eq}$ [t]	$CO_{2,eq}$' [t]	Q_{Abw} [MWh]	Q_{Abw}' [MWh]	Zielwert	Rang
ES 2 – ABKM für Kälte	215640,18	0,75	29,59	0,60	2019,12	1,00	0,78	5
ES 3 – free cooling	115286,74	0,00	8,09	0,00	674,16	0,33	0,11	1
ES 4 - LW-WP für Kälte	141447,31	0,19	44,17	1,00	957,31	0,47	0,56	2
ES 5 - SW-WP Wärme und Kälte	249892,89	1,00	38,91	0,85	0,00	0,00	0,62	4

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Masterarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

ES 6 - LW-WP Wärme und Kälte	164331,05	0,36	44,17	1,00	957,31	0,47	0,61	3

Tab. B8.: Szenario 4 - Reduktion des Fernwärmepreises; Bestimmung der optimalen Kälteversorgungsanlage gemäß der gewichteten Zielfunktion

	K_{ES} [€]	K_{ES}' [€]	$CO_{2,eq}$ [t]	$CO_{2,eq}$' [t]	Q_{Abw} [MWh]	Q_{Abw}' [MWh]	Zielwert	Rang
ES 1 - SQGas Dez	671451,69	0,03	558,55	1,00	0,00	0,00	0,34	4
ES 2 - FW/ABKM	1243855,72	1,00	93,08	0,14	2019,12	1,00	0,71	6
ES 3 - FW/free cool	950671,05	0,50	64,43	0,08	674,16	0,33	0,31	3
ES 4 - FW/LW-WP	981768,94	0,55	68,64	0,09	957,31	0,47	0,37	5
ES 5 - SW-WP	717412,15	0,11	18,93	0,00	0,00	0,00	0,04	1
ES 6 - LW-WP	655217,83	0,00	224,93	0,38	957,31	0,47	0,29	2

Tab. B9.: Szenario 5 – Dekarbonisierung des Strom-Liefermix ab 2030; Bestimmung des optimalen Energiesystems gemäß der gewichteten Zielfunktion

	K_{ES} [€]	K_{ES}' [€]	$CO_{2,eq}$ [t]	$CO_{2,eq}$' [t]	Q_{Abw} [MWh]	Q_{Abw}' [MWh]	Zielwert	Rang
ES 2 – ABKM für Kälte	383784,81	1,00	29,59	1,00	2019,12	1,00	1,00	5
ES 3 – free cooling	115286,74	0,00	0,94	0,00	674,16	0,33	0,11	1
ES 4 - LW-WP für Kälte	141447,31	0,10	5,15	0,15	957,31	0,47	0,24	3
ES 5 - SW-WP Wärme und Kälte	249892,89	0,50	4,54	0,13	0,00	0,00	0,21	2
ES 6 - LW-WP Wärme und Kälte	164331,05	0,18	5,15	0,15	957,31	0,47	0,27	4

Tab. B10.: Szenario 5 - Dekarbonisierung des Strom-Liefermix ab 2030; Bestimmung der optimalen Kälteversorgungsanlage gemäß der gewichteten Zielfunktion

	K_{ES} [€]	K_{ES}' [€]	$CO_{2,eq}$ [t]	$CO_{2,eq}$' [t]	Q_{Abw} [MWh]	Q_{Abw}' [MWh]	Zielwert	Rang
ES 1 - SQGas Dez	671451,69	0,00	558,55	1,00	0,00	0,00	0,33	3

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Masterarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

ES 2 - FW/ABKM	1243855,72	1,00	93,08	0,04	2019,12	1,00	0,68	6
ES 3 - FW/freecool	958849,66	0,50	71,58	0,00	674,16	0,33	0,28	2
ES 4 - FW/LW-WP	1026424,13	0,62	107,66	0,07	957,31	0,47	0,39	5
ES 5 - SW-WP	881484,97	0,37	162,29	0,19	0,00	0,00	0,18	1
ES 6 - LW-WP	841462,65	0,30	224,93	0,31	957,31	0,47	0,36	4

Tab. B11.: Szenario 6 - Starker Anstieg des Strompreises; Bestimmung des optimalen Energiesystems gemäß der gewichteten Zielfunktion

	K_{ES} [€]	K_{ES}' [€]	$CO_{2,eq}$ [t]	$CO_{2,eq}$' [t]	Q_{Abw} [MWh]	Q_{Abw} ' [MWh]	Zielwert	Rang
ES 2 – ABKM für Kälte	383784,81	1,00	29,59	0,60	2019,12	1,00	0,87	5
ES 3 – free cooling	123465,35	0,00	8,09	0,00	674,16	0,33	0,11	1
ES 4 - LW-WP für Kälte	186102,51	0,24	44,17	1,00	957,31	0,47	0,57	3
ES 5 - SW-WP Wärme und Kälte	289231,99	0,64	38,91	0,85	0,00	0,00	0,50	2
ES 6 - LW-WP Wärme und Kälte	208986,25	0,33	44,17	1,00	957,31	0,47	0,60	4

Tab. B12.: Szenario 6 - Starker Anstieg des Strompreises; Bestimmung der optimalen Kälteversorgungsanlage gemäß der gewichteten Zielfunktion

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Masterarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU WIEN Bibliothek Your knowledge hub