

THG-neutrale Kühlung von Büro- und Forschungsquartieren (COOL- QUARTER-PLUS)

Berichte aus Energie- und Umweltforschung 38/2026

Wien, 2026

Impressum

Medieninhaber, Verleger und Herausgeber:

Bundesministerium für Innovation, Mobilität und Infrastruktur,
Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Verantwortung und Koordination: Abteilung III/3 - Energie und Umwelttechnologien

Leitung (interimistisch): DIⁱⁿ (FH) Isabella Warisch

Autorinnen und Autoren:

Richard Heimrath, Michael Mörth, Thomas Mach, Lisa-Marie Fochler, Institut für
Wärmetechnik, TU Graz

Martin Fürnschuß, Institut für Elektrische Anlagen und Netze, TU Graz

Johannes Exenberger, Gerald Schweiger, Institut für Softwaretechnologie, TU Graz

Iva Lukic, Marco Scherz, Helmuth Kreiner, Alexander Passer, Institut für Tragwerksentwurf,
TU Graz,

Matthias Wastian, Niki Popper, dwh technical solutions simulation services

Peter Nageler, EQUA Solutions AG

Martin Polster, Stefan Oswald, TB-Starchel Ingenieurbüro GmbH

Wien, Graz 2026. Stand: Juni 2024

Ein Projektbericht gefördert im Rahmen von



Rückmeldungen:

Ihre Überlegungen zu vorliegender Publikation übermitteln Sie bitte an iii3@bmimi.gv.at.

Rechtlicher Hinweis

Dieser Ergebnisbericht wurde von die/der Projektnehmer:in erstellt. Für die Richtigkeit, Vollständigkeit, Aktualität sowie die barrierefreie Gestaltung der Inhalte übernimmt das Bundesministerium für Innovation, Mobilität und Infrastruktur (BMIMI) keine Haftung.

Mit der Übermittlung der Projektbeschreibung bestätigt die/der Projektnehmer:in ausdrücklich, über sämtliche für die Nutzung erforderlichen Rechte – insbesondere Urheberrechte, Leistungsschutzrechte sowie etwaige Persönlichkeitsrechte abgebildeter Personen – am bereitgestellten Bildmaterial zu verfügen.

Die/der Projektnehmer:in räumt dem BMIMI ein unentgeltliches, nicht ausschließliches, zeitlich und örtlich unbeschränktes sowie unwiderrufliches Nutzungsrecht ein, das übermittelte Bildmaterial in allen derzeit bekannten sowie künftig bekannt werdenden Nutzungsarten für Zwecke der Berichterstattung, Dokumentation und Öffentlichkeitsarbeit im Zusammenhang mit der geförderten Maßnahme zu verwenden, insbesondere zur Veröffentlichung in Printmedien, digitalen Medien, Präsentationen und sozialen Netzwerken.

Für den Fall, dass Dritte Ansprüche wegen einer Verletzung von Rechten am übermittelten Bildmaterial gegen das BMIMI geltend machen, verpflichtet sich die/der Projektnehmer:in, das BMIMI vollständig schad- und klaglos zu halten. Dies umfasst insbesondere auch die Kosten einer angemessenen rechtlichen Vertretung sowie etwaige gerichtliche und außergerichtliche Aufwendungen.

Vorbemerkung

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus dem Forschungs- und Technologieprogramm „Stadt der Zukunft“ des Bundesministeriums für Innovation, Mobilität und Infrastruktur (BMIMI). Dieses Programm baut auf dem langjährigen Programm „Haus der Zukunft“ auf und hat die Intention, Konzepte, Technologien und Lösungen für zukünftige Städte und Stadtquartiere zu entwickeln und bei der Umsetzung zu unterstützen. Damit soll eine Entwicklung in Richtung energieeffiziente und klimaverträgliche Stadt unterstützt werden, die auch dazu beiträgt, die Lebensqualität und die wirtschaftliche Standortattraktivität zu erhöhen. Eine integrierte Planung wie auch die Berücksichtigung aller betroffener Bereiche wie Energieerzeugung und -verteilung, gebaute Infrastruktur, Mobilität und Kommunikation sind dabei Voraussetzung.

Um die Wirkung des Programms zu erhöhen, sind die Sichtbarkeit und leichte Verfügbarkeit der innovativen Ergebnisse ein wichtiges Anliegen. Daher werden nach dem Open Access Prinzip möglichst alle Projektergebnisse des Programms in der Schriftenreihe des BMIMI publiziert und elektronisch über die Plattform [nachhaltigwirtschaften.at](https://www.nachhaltigwirtschaften.at) zugänglich gemacht. In diesem Sinne wünschen wir allen Interessierten und Anwender:innen eine interessante Lektüre.

Inhaltsverzeichnis

1	Kurzfassung	6
2	Abstract	7
3	Ausgangslage	8
	3.1. Motive der Projektbearbeitung	8
	3.2. Ziel und Bearbeitungsansätze	9
	3.3. Urbane Kühltechnologien am Markt und in der Wissenschaft.....	10
	3.4. Expertenbefragung zu urbanen Kühltechnologien	13
	3.5. Gesetzliche Anforderungen und rechtliche Hürden	17
	3.6. PV-Technologien am Markt und in der Wissenschaft.....	20
4	Szenarien und Rahmenbedingungen	23
	4.1. Gebäude und Bedarfsstruktur	24
	4.2. Kühlcharakteristiken verschiedener Gebäudeanteile.....	26
	4.3. Strukturvarianten der Systemgestaltung.....	27
	4.4. Klimatische Rahmenbedingungen	30
	4.5. Prognose des Energieertrages der PV-Anlagen	32
5	Modellierung der urbanen Kühlinfrastruktur	35
	5.1. Gebäudemodell.....	35
	5.2. Photovoltaische Anlagen	40
	5.3. Erdwärmesonden.....	40
	5.4. Kompressionskältemaschinen bzw. Wärmepumpen	41
6	Vergleichende Analyse der Kühlinfrastruktur	42
	6.1. Auslegung der Strukturvarianten.....	45
	6.2. Analyse Kälte-, Heizenergiebedarf und THG-Emissionen	54
7	Nutzer:innen-Feedback und Datenanalyse	61
	7.1. Methodik: Time Series Forecasting.....	61
	7.2. Analyse geeigneter Datengrundlagen.....	62
	7.3. IKT-Plattform, Nutzer:innen-Feedback und Nutzer:innen Komfort	64
	7.4. Optimale Regelung der Kühlung	67
8	Lebenszyklusorientierte Nachhaltigkeitsbewertungen	70
	8.1. Lebenszykluskostenberechnung	70
	8.2. Ökobilanzierung (Module A1 - A5) - Graue Emissionen	79
	8.3. Ökobilanzierung über restlichen Lebenszyklus (Modul B).....	86
9	Ergebnisse, Schlussfolgerungen & Empfehlungen	87
	9.1. Interpretation der energietechnischen Szenarien des Referenz-Quartiers	87
	9.2. Zusammenfassung Nutzer:innen-Feedback.....	89
	9.3. Zusammenfassung Nachhaltigkeitsbewertung.....	89
	9.4. Nutzung der Ergebnisse und Weiterführung	91
	9.5. Einpassung in das Programm „Stadt der Zukunft“	93
10	Verzeichnisse	94
11	Data Management Plan (DMP)	97

1 Kurzfassung

Die Motivation das Projekt COOL-QUARTER-PLUS in Angriff zu nehmen gründet auf dem stetigen und unaufhaltsam ansteigenden Kühlbedarf des weltweiten Gebäudebestandes. Das rasante Wachstum der Städte und deren Verdichtung und Versiegelung kombinieren sich mit den Auswirkungen des Klimawandels zu massiven Treibern dieser Entwicklung. Passive urbane und gebäudebezogene Kühlkonzepte sind integrale Bestandteile von Lösungsansätzen, stoßen jedoch mittlerweile auch in Mitteleuropa an ihre Grenzen und urbane Hitzeinseln breiten sich aus. Der massiv ansteigende Verkauf dezentraler Kühlgeräte ist eine Folge dieser Entwicklung. Diese weisen jedoch oftmals schlechte Wirkungsgrade und einen hohen Lärmpegel auf, verursachen unbehagliche Zugserscheinungen und werden im Erscheinungsbild der Gebäudefassaden zunehmend zum Problem. Der damit verbundene und auch rasant steigende Energieeinsatz steht der gebotenen Reduktion der Treibhausgasemissionen und der Implementierung von Plus-Energie-Quartieren, diametral gegenüber.

Das Ziel von COOL-QUARTER-PLUS ist, der aktuell laufenden Fehlentwicklung in Richtung ineffizienter Einzelgeräte, abgestimmte Kühlkonzepte auf Quartiersebene entgegensetzen. Der Fokus liegt dabei auf Büro- und Forschungsquartieren, weil in diesen, quartierszentrale Maßnahmen, aufgrund von Eigentümerstruktur und zentralem Betriebsmanagement, eine höhere Umsetzungswahrscheinlichkeit aufweisen, als in heterogenen Wohn- bzw. Mischquartieren.

Die Methode nutzt Daten eines realen Forschungsquartiers um das Simulationsmodell eines Referenz-Quartiers aufzustellen und energietechnisch zu validieren. Darauf aufbauend werden dezentrale und quartierszentrale Kühlkonzepte entwickelt und in dynamischen Simulationsmodellen abgebildet. Einzelne Kühlkonzepte werden zudem mit den Methoden der Ökobilanz und der Lebenszykluskostenberechnung bewertet.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Vernetzung der PV-Anlagen im Referenz-Quartier deutliche Vorteile gegenüber gebäudebezogenen Einzelanlagen generiert. Unterschiedliche zur Verfügung stehende Installationsflächen und unterschiedliche Kühlbedarfe können sich zwischen den einzelnen Gebäuden ausgleichen, wodurch ein höherer Anteil der generierten elektrischen Energie im Quartier genutzt werden kann. Die thermische Koppelung der Kühlgeräte zu einem Quartiers-Kühlnetz ist in diesen Zusammenhang differenzierter zu betrachten. Gebäude verbindende Kühlnetze verursachen sowohl einen finanziellen und ökologischen Aufwand und zudem im Betrieb thermische Verluste. Ob sich dieser Aufwand energietechnisch, ökonomisch und ökobilanziell lohnt, hängt von der jeweiligen Konfiguration und Betriebsweise ab. Die energietechnisch effizientesten Energiesysteme sind jene, die die beiden Funktionen, Kühlen und Heizen umfassen, und diese im Rahmen eines Gesamtkonzeptes im Wechselspiel betreiben.

Ein weiterer Aspekt des Projekts ist den Kühlbetrieb möglichst bedarfsorientiert zu gestalten. Dazu werden Machine Learning-Modelle zur Vorhersage des Energiebedarfs und des thermischen Verhaltens von Räumen entwickelt. Darauf aufbauend wird eine nutzerzentrierte Optimierung implementiert, die den Energieverbrauch minimiert und gleichzeitig die Nutzer:innen aktiv einbindet um deren Komfortbedürfnisse zielgerichtet zu berücksichtigen.

2 Abstract

The motivation to tackle the COOL-QUARTER-PLUS project is based on the constant and unstoppable increase in the cooling requirements of the global building stock. The rapid growth of cities and their densification and sealing are combining with the effects of climate change to become massive drivers of this development. Passive urban and building-related cooling concepts are integral components of solution approaches, but are now also reaching their limits in Central Europe and urban heat islands are spreading. The massive increase in the sale of decentralised cooling units is a consequence of this development. However, these often have poor efficiency and high noise levels, cause uncomfortable draughts and are increasingly becoming a problem for the appearance of building façades. The associated rapid rise in energy consumption is diametrically opposed to the necessary reduction in greenhouse gas emissions and the implementation of energy-plus neighbourhoods.

The aim of COOL-QUARTER-PLUS is to counter the current trend towards inefficient individual appliances with coordinated cooling concepts at neighbourhood level. The focus here is on office and research districts, as district-centred measures are more likely to be implemented in these districts than in heterogeneous residential or mixed districts due to the ownership structure and central operational management.

The method uses data from a real research neighbourhood to set up the simulation model of a reference neighbourhood and validate it in terms of energy technology. Based on this, decentralised and district-centred cooling concepts are developed and mapped in dynamic simulation models. Individual cooling concepts are also assessed using life cycle assessment (LCA) and cycle costing (LCC).

The results show that the networking of PV systems in the reference neighbourhood generates clear advantages over individual building-related systems. Different available installation areas and different cooling requirements can be balanced out between the individual buildings, which means that a higher proportion of the generated electrical energy can be used in the neighbourhood. The thermal coupling of cooling units to a neighbourhood cooling network must be considered in a more differentiated way in this context. Cooling networks connecting buildings cause both financial and ecological costs as well as thermal losses during operation. Whether this expenditure is worthwhile from an energy, economic and ecological point of view depends on the respective configuration and mode of operation. The most energy-efficient energy systems are those that combine the two functions of cooling and heating and operate them interchangeably as part of an overall concept.

Another aspect of the project is to design the cooling operation to be as demand-orientated as possible. To this end, machine learning models are being developed to predict the energy requirements and thermal behaviour of rooms. Based on this, a user-centred optimisation is implemented that minimises energy consumption and at the same time actively involves the users in order to take their comfort needs into account in a targeted manner.

3 Ausgangslage

Bearbeitung: Institut für Wärmetechnik, Institut für Elektrische Anlagen und Netze

Die Sinnhaftigkeit das vorliegende Projekt durchzuführen beruht auf einer Reihe von Motiven, die in Kapitel 3.1 angeführt werden. Kapitel 3.2 beschreibt die daraus abgeleiteten Ziele, die wiederum zu den gewählten Bearbeitungsansätzen führen, die auf die in den Kapiteln 3.3. und 3.4 dargestellte Ausgangslage in der Technik, am Markt und in der Planung aufbauen.

3.1. Motive der Projektbearbeitung

Die Bearbeitung von COOL-QUARTER-PLUS stützt sich auf folgende Zusammenhänge:

► Steigende sommerliche Belastung aufgrund des Klimawandels

Die Auswirkungen des Klimawandels sind sowohl für den Menschen spürbar als auch klimatologisch nachweisbar. Die stetig steigenden sommerlichen Temperaturen sind bereits, insbesondere für die ältere Bevölkerung und die Kinder, eine hohe gesundheitliche Belastung. Zu hohe Temperaturen führen zu Kopfschmerzen, Müdigkeit bis hin zu Übelkeit und Irritationen an Augen, Nase und Hals und aus dem ökonomischen Standpunkt betrachtet, zu enormen Einbußen in der Produktivität der Arbeitsleistung. Gemäß den meisten Prognosen ein Megatrend, der im vergangenen Jahrzehnt erst seinen Anfang genommen hat und sich noch massiv verstärken wird.

► Verstärkung durch rasante Steigerung der urbanen Verbauungsdichte

Zusätzlich wird dieser Trend noch durch das rasante Wachstum unserer Städte befeuert. Der ökonomische Druck lässt weltweit die Stadtstrukturen immer dichter werden. Sommerliche Aufheizung und Wärmespeicherung in der Baumasse lassen, zusätzlich zu den Auswirkungen des Klimawandels, die Temperaturen in den Städten weiter steigen und urbane Hitzeinseln entstehen.

► Passive Kühlkonzepte stoßen an ihre Grenzen

Die in Mittel- und Nordeuropa bisher oftmals favorisierten passiven Kühlkonzepte arbeiten einerseits mit Reduktion der solaren Aufheizung und andererseits mit der in der Nacht geringeren Außenlufttemperatur. Durch die stetig steigenden nächtlichen Außenlufttemperaturen (Stichwort Tropennächte) verlieren diese passiven Konzepte zunehmend an Wirksamkeit.

► Reduktion des urbanen Energieverbrauchs wird gefordert

Neben den beschriebenen Herausforderungen zur Klimawandelanpassung (Adaption) sind aber auch die Anstrengungen zur Klimawandelvermeidung (Mitigation) zu intensivieren, der urbane Energieverbrauch ist maßgeblich zu senken und auf regenerative Energieträger umzustellen, was einem stark zunehmenden Energieverbrauch für Kühlung diametral gegenübersteht.

► Fehlentwicklung in Richtung ineffizienter Einzellösungen

Die Reaktion auf die beschriebenen Überhitzungsprobleme äußert sich in massiven Steigerungsraten im Verkauf von dezentralen Kühlgeräten, die oftmals schlechte Wirkungsgrade und einen hohen Lärmpegel aufweisen, Zugerscheinungen verursachen und direkt über das öffentliche Stromverteilnetz versorgt werden. Zudem werden die dazugehörigen Außeneinheiten zunehmend ein gestalterisches und lärmtechnisches Problem für den urbanen Außenraum.

► Mangel an übergeordneten Konzepten

Im Gegensatz zu Heizen und Warmwasserbereitung fehlen zur Bewältigung des Kühlbedarfs zurzeit vielerorts noch übergeordnete Strategien und Konzepte. Oft wird noch davon ausgegangen, dass der zukünftige Kühlbedarf durch passive Maßnahmen wie Stadtbegrünung und Nachtauskühlung bewerkstelligt werden kann. Neben diesen zweifelsfrei wichtigen Maßnahmen werden insbesondere in der Büronutzung relevante Kühlbedarfe überbleiben. Im Moment ist es jedem einzelnen Nutzer-, Betreiber bzw. Eigentümer überlassen eine singuläre Lösung für einzelne Büros- bzw. Gebäude zu finden. Das Angebot der Energieversorger in Bezug auf Kühlung übergeordnete Lösungen anzubieten wurde von den Autoren dieser Studie bisher als marginal wahrgenommen.

3.2. Ziel und Bearbeitungsansätze

Das übergeordnete Ziel des Projektes COOL-QUARTER-PLUS ist, der laufenden Fehlentwicklung zu ineffizienten Einzelkühlmaßnahmen, Analysen und Entscheidungsgrundlagen zu Kühlkonzepten auf Quartiersebene entgegenzusetzen. Der Aufbau des Projektes bzw. die Struktur der Bearbeitung stützt sich auf folgende Zusammenhänge:

Büro- und Forschungsquartiere als Zielgruppe hoher Umsetzungswahrscheinlichkeit

Forschung- bzw. Universitätsquartiere weisen meist, aufgrund von Versuchseinrichtungen und hohen Belegungsdichten in Vortragsräumen, einen hohen Kühlbedarf auf. Gegenüber reinen Wohnquartieren oder auch heterogen zusammengesetzten Stadtquartieren zeichnen sie sich zudem oftmals durch einfachere Eigentümerstrukturen aus, wodurch Entscheidungsprozesse zu energietechnischen Transformationsmaßnahmen übergeordnet getroffen und für ein gesamtes Quartier geplant werden können. In der Betriebsphase erleichtert ein zentrales Betriebsmanagement die Umsetzung eines effizienten Betriebs.

Analyse des dynamischen Systemverhaltens

Eine Herausforderung für zukünftige Kühlsysteme von Stadtquartieren ist es, die verfügbare Energie aus erneuerbaren Quellen mit dem vorhandenen Energiebedarf in Ort, Zeit und Menge in Einklang zu bringen. Hierbei kann nicht auf langjährige Erfahrungswerte zurückgegriffen werden. Vielmehr muss die jeweilige Abstimmung anlass- bzw. situationsbezogen durchgeführt werden. Die Autoren gehen nicht davon aus, dass entsprechender Wissensaufbau in der Planungspraxis erfolgt, da dynamische Planungstools in konventionellen Planungsprozessen eher geringe Anwendung finden. Der Wissensgewinn zu dynamischen Wechselwirkungen in derartigen Systemen kann hingegen mittels instationären Systemsimulationen aufgebaut werden.

Vergleichende Analyse unterschiedlicher Strukturansätze

Gefragt sind vergleichende Analysen zu unterschiedlichen Konfigurationen quartiersbezogener Kühlsysteme. Um aussagekräftige Systemvergleiche anstellen zu können, müssen vollständig gleichartige Rahmenbedingungen und Betriebsführungen gewährleistet werden. Diese Vorgabe ist in gebauten Systemen nicht herstellbar. Simulationssysteme bieten hingegen die Möglichkeit klimatische Rahmenbedingungen, Nutzungsverhalten und Regelungsparameter gleichartig und beliebig oft, zu reproduzieren und somit Systemvergleiche auf eine gleichartige Basis zu stellen.

Bearbeitung anhand eines realen Büro- bzw. Forschungsquartiers

Der fundierte Vergleich unterschiedlicher Versorgungsstrukturen zur Deckung des Kühlbedarfes von urbanen Quartieren benötigt realitätsnahe Annahmen von Rahmenbedingungen, wie Gebäudedefinitionen, Nutzungsstrukturen und energie- bzw. gebäudetechnische Ausstattung. Auch die Verfügbarkeit von zeitlich und räumlich hoch aufgelösten Messwerten ist als unverzichtbare Grundlage zur Validierung von Modellen ein wesentliches Kriterium. Im Projekt COOL-QUARTER-PLUS wird dazu der Universitätscampus Inffeldgasse herangezogen [siehe Kapitel 4.1].

3.3. Urbane Kühltechnologien am Markt und in der Wissenschaft

Mehr als die Hälfte des Endenergiebedarfes der Europäischen Union wird für die Kälte- und Wärmeversorgung verwendet [1]. Eine weitere signifikante Zunahme des Energiebedarfes in den nächsten Jahren und Jahrzehnten, besonders für die Gebäudekühlung in urbanen Regionen, verursacht durch, interne Wärmelasten, Wärmeineffekte, Komfortgründen und der Klimaveränderung, wird erwartet [2]. Nachdem die Klimaziele von Paris eine beinahe vollständige Dekarbonisierung der Energiebereitstellung bis zum Jahr 2050 erfordern [3], muss spezielles Augenmerk auf die langfristige und nachhaltige Planung unserer Kälte-, Raumwärme- und Warmwasserversorgung gelegt werden. Kälte- und Wärmenetze ermöglichen eine intelligente Vernetzung Erneuerbarer Energien, Abwärme, Speicher, Wärmeabnehmer und die Kopplung mit anderen Ver- und Entsorgungsnetzen (Strom, Gas, Abwasser) zur Steigerung der Gesamteffizienz und Wirtschaftlichkeit sowie zur Reduktion von Treibhausgas-Emissionen zukünftiger Energiesysteme. Die primäre Anforderung ist, eine leistbare, sichere und für aktuelle und zukünftige Rahmenbedingungen resiliente Energieversorgung, die auch ökologisch vertretbar und klimaschonend ist, bereitzustellen. Die Europäische Kommission sieht die Fernkälte- und Fernwärmeversorgung als eine der Schlüsseltechnologien der Energiewende und definiert entsprechende Szenarien dafür [4]. Fernkälte und Fernwärme zählen zu den Säulen der österreichischen Klima- und Energiestrategie [5]: Steigerung der Energieeffizienz, Ausbau Erneuerbarer Energien, langfristige Sicherstellung der Energieversorgung.

Fernkälte – International und in Österreich

Innerhalb der EU-27 wird der Kältemarkt aktuell auf etwa 192 bis 285 TWh geschätzt. Der zukünftige europäische Kältemarkt beträgt rund 1220 TWh/a, wovon 710 TWh auf Wohngebäude und 510 TWh auf Dienstleistungsgebäude fallen werden. Fast 70 % des potenziellen Kältemarkts liegen in den fünf größten Ländern Deutschland, Frankreich, Großbritannien, Italien und Spanien [6].

¹ Fleiter, T.; Steinbach, J.; Ragwitz, M. et al. (2016): Mapping and analyses for the current and future (2020 - 2030) heating/cooling fuel development (fossil/renewables) – Executive Summary. Brussels: European Commission, DG Energy <https://tinyurl.com/ukfyq8a>

² Tverne et al. "EU DISTRICT COOLING MARKET AND TRENDS" WP2-Bericht Projekt RESCUE – RENEWABLE SMART COOLING FOR URBAN EUROPE, <https://tinyurl.com/vfccett>, Zugriff am 21.1.2020

³ COM/2011/0112 FIN, Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions, A Roadmap for moving to a competitive low carbon economy in 2050.

⁴ Connelly et al. "Heat Roadmap Europe: Combining DH with heat savings to decarbonise the EU energy system", Energy Policy, Vol 65, February 2014, Pages 475–489.

⁵ BMNT, BMVIT, 2018, Die österreichische Klima- und Energiestrategie.

⁶ Polic S. (2018): Fernkälte in Österreich – Eine Analyse der Stakeholder und Entscheidungskriterien, Uni Graz

Für Österreich wird der gesamte zukünftige Kältemarkt auf rund 22 TWh pro Jahr [7] geschätzt. Momentan beträgt der Markt für Fernkälte etwa 150 GWh (Wien, Linz, St. Pölten, Baden) wobei ein deutliches Wachstum zu verzeichnen ist und sich innerhalb der letzten fünf Jahren verdoppelt hat [8].

Unklar stellt sich der Markt seitens der dezentralen Klimageräte (Split-, Multisplit und mobile Geräte) mit kleiner und mittlerer Leistung (bis 30 kW) dar. Hier sind nur wenige gesicherte Zahlen verfügbar, wobei derzeit von Nachfragesteigerungen von etwa 15 % (im Jahr 2019) ausgegangen wird.

Im Jahr 2019 wurden ca. 32 000 Anlagen in Österreich, vorwiegend im Geschloßwohnbau und in Form von Multisplit-Geräten verbaut [9]. Der Gesamtbestand mobiler Geräte dürfte derzeit bei etwa 320 000 Stück und der Bestand der Splitgeräte bei etwa 90 000 Stück liegen [10]. Eine Hochrechnung der hierdurch abgegebenen jährlichen Kälte beläuft sich auf etwa 800 GWh. Somit beträgt aktuelle heimische Kältemarkt etwa 0.95 TWh je Jahr. Abgesehen vom verbleibenden Potential an Kälteversorgung ist vor allem der hohe Anteil an dezentraler Kälteversorgung mit Kompressionskälteanlagen geringer Leistung ein großes Problem, da einerseits durch die Abgabe der Abwärme an die Umgebungsluft die Überhitzung des urbanen Klimas gefördert wird und andererseits schalltechnische Probleme (besonders in den Nachtstunden) entstehen. Als Konsequenz bietet es sich in Innenstädten an, vermehrt Fernkältenetze (oder kalte Fernwärme) zu installieren. Diese leisten einen wesentlichen Beitrag zur Verminderung von überhitzten und lauten Innenstädten.

Fernkälte – Stand der Technik

Fernkältesysteme haben das Ziel, zentral, mit hoher Effizienz, unter der Nutzung erneuerbarer Ressourcen, Kälte herzustellen und an entsprechende Abnehmer zu liefern. Im Wesentlichen besteht ein Gesamtsystem aus drei Komponenten. Einer Anlage zur Erzeugung von Kälte, einem Verteilernetz als Verbindung zwischen Anlage und Verbraucher und einer Übergabestation als Schnittstelle zwischen dem Verteilernetz und dem System des Verbrauchers. Grundsätzlich gibt es mehrere Verfahren zur Kälteherstellung. Am weitesten verbreitet ist der Einsatz von Maschinen (elektrisch oder thermisch getrieben), zunehmend werden aber auch natürliche Quellen genutzt, auch bekannt als Freie Kühlung („free cooling“). Ebenso ist eine Kombination von beiden Varianten möglich.

Kompressionskältemaschinen (KKM) entsprechen in ihrem Aufbau dem System der Kompression--Wärmepumpe. Umgekehrt zum Wärmepumpenprinzip wird bei der Kältemaschine die Wärmeaufnahme am Verdampfer zur Kühlung des Kühlwasservorlaufes genutzt. Die am Kondensator anfallende Wärme muss über einen weiteren Kühlkreislauf abgeführt werden, damit der Kälteprozess funktioniert. Diese Rückkühlung kann über Erdreich (Tiefensonden), Wasser (Grundwasser, Seen, etc.) oder Luft erfolgen. Je nach Baugröße der Kompressionskältemaschine kann mit der Verwendung einer kWh Strom fünf bis neun kWh Kälte erzeugt werden.

7 Persson, U. & Werner, S. (2015). Quantifying the Heating and Cooling Demand in Europe. Stratego Work Package 2. Zugriff am 21.1.2020 unter <https://tinyurl.com/rjjmojc>

8 FGW, WKO, 2018, Erdgas und Fernwärme in Österreich, Zahlenspiegel 2018.

9 Marktanalyse GmbH (2019): Klimaspplitgeräte in Österreich 2019 | Branchenradar

10 Riviere P., et al. (2008). Ecodesign Lot 10. Draft Chapter 2. Preparatory study on the environmental performance of residential room conditioning appliances. Economic and Market analysis.

Bei Absorptionskältemaschinen (AKM) wird, wie bei den Kompressionskältemaschinen, die Verdampfung und Kondensation eines Kältemittels unter Druck ausgenutzt. Der Unterschied liegt in der Art der Verdichtung. Anstelle des elektrischen Kompressors wird ein thermischer Verdichter unter Verwendung eines Absorptionsmittels eingesetzt. Je Baugröße kann mit der Verwendung einer kWh (Ab-)Wärme (>80 °C) ca. 0.5 bis 1.2 kWh Kälte erzeugt werden. Die Wärme kann Fernwärme, industrielle Abwärme oder Wärme aus erneuerbaren Ressourcen (z.B. Solarthermie) sein. Im Gegensatz zu Absorptionskältemaschinen wird bei Adsorptionskältemaschinen ein festes Sorptionsmittel eingesetzt. Als Arbeitsstoffpaar wird häufig Silicagel und Wasser als Kältemittel verwendet. Je nach Baugröße der Adsorptionskältemaschine kann mit der Verwendung einer kWh (Ab-Wärme (>60 °C) ca. 0.4 bis 0.7 kWh Kälte erzeugt werden.

Für die Freie Kühlung werden natürliche Kältequellen, wie Wasser, Luft oder Erdreich erschlossen. Erdsonden bzw. Erdkollektoren werden eingesetzt, um Wärme an die Umgebung abzuführen. In geeigneten Fällen kann Wasser aus Flüssen, Seen, Ozeanen oder auch Grundwasser verwendet werden. Werden ausreichend niedrige Temperaturen mit der Außenluft erzielt, so kann mittels Trockenkühlern eine Abgabe der Wärme an die Luft erfolgen. Eine zusätzliche Möglichkeit ist die Nutzung von Verdunstung des Wassers zur Kühlung, auch bekannt als adiabate Kühlung. Je nach Art der Freien Kühlung kann mit der Verwendung einer kWh Strom bis zu 200 kWh an Kälte erzeugt werden. Die Fernkälte kann in unterschiedlichsten Systemvarianten realisiert werden [11], so sind als Energieträger neben Biomasse [12], Solarthermie [13], Oberflächenwasser [14], Abwärme [15] und Photovoltaik [16] möglich.

Im vorliegenden Projekt wird mit Kompressionskältemaschinen unterschiedlicher Leistungsklassen (dezentral oder zentral), mit den Wärmesenken Luft, Grundwasser und Tiefensonden gearbeitet werden. Der hierfür notwendige Strom soll zu relevanten Anteilen photovoltaisch zur Verfügung gestellt werden, wobei hierbei unterschiedliche Anordnungen und Technologien seitens der Photovoltaik zum Einsatz kommen.

Entwicklungstendenzen thermischer Netze

Ein zentrales Charakteristikum thermischer Netze ist das Temperaturniveau, auf dem sie betrieben werden. Während die erste Generation von Wärmenetzen als Dampfnetze betrieben wurde, erfolgte die Ausführung der zweiten und dritten Generation von Wärmenetzen als Heißwassernetze mit Vorlauftemperaturen (VLT) von mehr als 100 °C. Aktuell werden die Netze auf Temperaturen unter 100 °C ausgelegt und mit VLT zwischen 70 und 95 °C betrieben. Es gibt zunehmende Bestrebungen die Vorlauftemperaturen weiter zu senken, was in Schweden oder Dänemark eindrucksvoll gezeigt wird.

¹¹ Gang et al. (2016): District cooling systems: Technology integration, system optimization, challenges and opportunities for applications, doi: 10.1016/j.rser.2015.08.051

¹² Difs Kristina et al. (2010): Biomass gasification opportunities in a district heating system. Biomass Bioenergy; 34(5):637–51.

¹³ Franchini et al. (2018): Performance prediction of a solar district cooling system—A case study. Energy Convers Manager

¹⁴ Looney et al. (2007): Seawater district cooling and lake source district cooling. Energy Eng 2007; 104(5):34–45.

¹⁵ Ebrahimi et al. (2014): A review of data center cooling technology, operating conditions and the corresponding low-grade waste heat recovery opportunities. Renew Sustain Energy Rev 2014; 31:622–38.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.12.007>.

¹⁶ Neyer et al. (2018): Technical and economic assessment of solar heating and cooling – Methodology and examples of IEA SHC Task 53. Sol. Energy 2018; 172:90–1.

Dieser nächste Schritt in Richtung Niedertemperatur-Fernwärme (NT-FW) ist dadurch begrenzt, dass die maximale VLT beim Abnehmer noch die entsprechenden Hygienebestimmungen zur Trinkwarmwassertemperatur gewährleisten kann. Damit ergeben sich Vorlauftemperaturen zwischen 50 und 70 °C und Zieltemperaturen von 20 bis 40 °C im Rücklauf. In neuesten Konzepten wird die Netztemperatur noch weiter gesenkt, wodurch ein gemeinsames Netz für Heizung, Warmwasser und Kühlung entsteht, ein sogenanntes Anergienetz.

Die von einem Schweizer Ingenieurbüro konzipierten Anergienetze (=Kalte Fernwärmesysteme mit Betriebstemperaturen im Bereich von 5 bis 25 °C) überwinden durch ring- oder maschenförmige Netze, den Verzicht auf zentrale Netzpumpen (ungerichtetes Netz) und rein bedarfsorientierte Entnahme und Einspeisung die Limitierungen hinsichtlich Pumpstrombedarf und weisen hohe Flexibilitäten bezüglich Erweiterung, dezentrale Einbindung neuer Quellen, Senken und Speicher auf. Anstatt von dezentraler Erdwärme oder Außenluft stellt das Anergienetz die Wärmequelle für dezentrale Wärmepumpen dar oder kann, direkt oder als Wärmesenke, für die Kältebereitstellung verwendet werden. Erste Demonstrationsanlagen wurden in der Schweiz realisiert (FGZ-Zürich, ETH Zürich-Hönggerberg, Richti Areal, Freilager Zürich). Kalte Nahwärmanlagen (GeoHybridsystem mit BHKW+Geothermie) wurden auch in Berlin-Zehlendorf und Berlin-Pankow realisiert.

3.4. Expertenbefragung zu urbanen Kühltechnologien

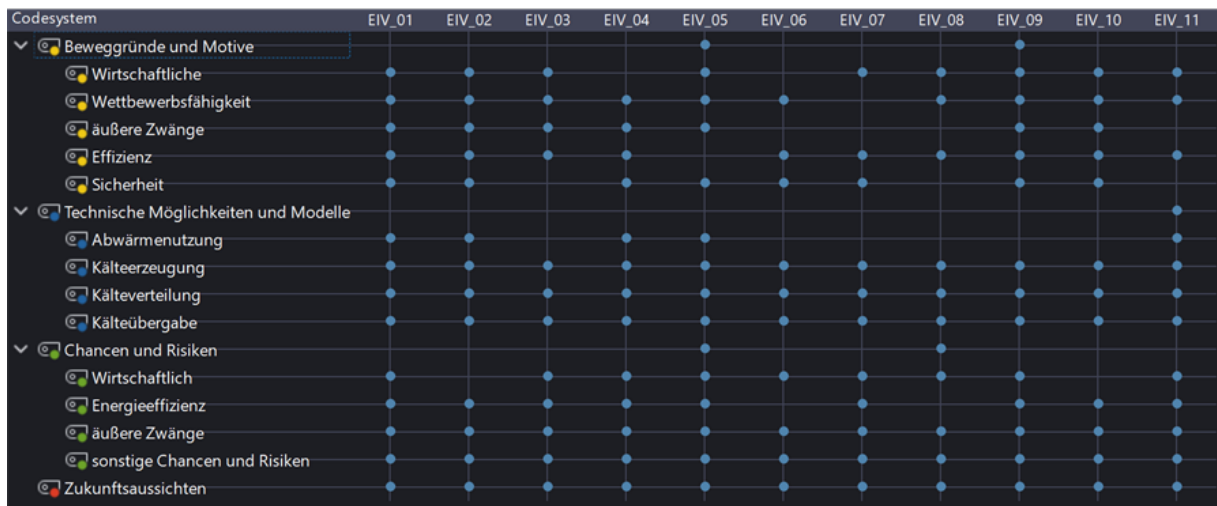
Im Rahmen des Projektverlaufes ergab sich die Möglichkeit eine Masterarbeit zum Thema der urbanen Kälteversorgung zu betreuen¹⁷. Die Arbeit beschäftigt sich unter anderem mit den Beweggründen und Motiven für den Aufbau und Betrieb einer Fernkälteversorgung im innerstädtischen Bereich und den von Expert:innen wahrgenommenen Herausforderungen bei Planung, Ausführung und Errichtung. Auch wurde die rechtliche Situation auf unterschiedlichen hoheitlichen Handlungsebenen betrachtet (siehe Kapitel 3.5). Die zur Aufgabenstellung von COOL-QUARTER-PLUS passenden Methoden, Ergebnisse und Richtlinien werden in der Folge, teilweise wortwörtlich, teilweise zusammenfassend verkürzt dargestellt.

Es wurden elf Experteninterviews mit einer Gesamtdauer von jeweils etwa einer Stunde durchgeführt. Die Auswahl der Experten erfolgte aus den Bereichen Planung, Errichtung und Betrieb von Kälteanlagen, basierend auf mehrjähriger Erfahrung. Als Grundlage wurde ein Interviewleitfaden mit offenen, nicht wertenden Fragestellungen entwickelt. Die offenen Interviews zielen darauf ab, die Expertise, das Fachwissen und die Erfahrungen der ausgewählten Personen umfassend zu erfassen, wiederzugeben und zu dokumentieren. Nachvollziehbarkeit und Dokumentation erfolgten durch digitale Aufzeichnungen und anschließende Transkription. Zur Auswertung wurde die qualitative Methode nach Kuckartz [¹⁸] angewendet. Die Interviews wurden systematisch zusammengefasst, strukturiert und kategorisiert (Abbildung 1).

¹⁷ Ponsold, P. (2023): Chancen und Risiken einer Fernkälteversorgung eines Campus (Liegenschaftsverbundes) im innerstädtischen Bereich. Masterarbeit an der FHW der Wiener Wirtschaft GmbH, Wien, Betreuung durch Richard Heimrath, TU Graz

¹⁸ Kuckartz, U. (2022): Qualitative Inhaltsanalyse. Methoden, Praxis, Computerunterstützung (Grundlagentexte Methoden), Beltz Juventa, Weinheim

Abbildung 1: Kategoriensystem der Auswertung



Im vorliegenden Abschnitt dargestellten Ergebnisse spiegeln das Wissen und die Standpunkte der interviewten Expert:innen wider:

Beweggründe und Motive

Die Expert:innen identifizieren Aspekte, wie die Verfügbarkeit von Kälteenergie, Versorgungssicherheit und Redundanz, als zentrale Beweggründe für die Planung, Errichtung und den Betrieb von Nah- bzw. Fernkälteanlagen. Zudem werden Vorteile, gegenüber Einzelanlagen, bei Instandhaltung, Wartungen, Anlagenoptimierungen und Überwachungen betont. Die Zentralisierung von Kälteerzeugungsanlagen wird als vorteilhaft angesehen, da sie zu besseren Betriebspunkten, optimalen Laufzeiten und einer Reduktion der benötigten Anlagen führt. Anlagenbetreiber:innen sehen in der Wirtschaftlichkeit des Kältenetzes einen zentralen Aspekt, insbesondere wenn es um die Erweiterung des Produktportfolios für Energieversorger:innen geht. Die Anschlussdichte beeinflusst die Wirtschaftlichkeit des Systems, während Betriebskosten und Platzeinsparungen wesentliche Motive für Abnehmer:innen sind. Auch äußere Zwänge, wie örtliche Gegebenheiten und rechtliche Aspekte, werden als relevante Motive genannt. Entscheidend ist, dass die Realisierung eines Kältenetzes im jeweiligen Kontext genau geprüft werden muss. Für Anlagenbetreiber:innen sind Betriebssicherheit, Zentralisierung, Gesamteffizienz und Kosten wichtige Argumente. Anlagenerrichter:innen und Planer:innen stellen ebenso technische, effizienzbezogene, örtliche und wirtschaftliche Gründe in den Vordergrund.

Technische Möglichkeiten und Modelle

Die technischen Möglichkeiten der Kälteerzeugung in Nah- und Fernkältenetzen sind vielfältig und abhängig von verschiedenen Faktoren und örtlichen Gegebenheiten. Die Integration erneuerbarer Energien, insbesondere bei Neuanlagen, gilt als wichtige Herausforderung. Die Expert:innen betonen die Vielfalt der erneuerbaren Energiequellen, darunter Free-Cooling, Erdkollektoren, Erdsonden, Grundwasser- oder Flusswassernutzung. Die Auswahl hängt vom Standort ab und erfordert eine sorgfältige Planung und Abstimmung mit behördlichen Vorgaben, insbesondere im Hinblick auf Wasserrecht und andere Umweltaspekte. Free-Cooling ermöglicht die Kälteerzeugung ohne Kältemaschinenbetrieb, ist jedoch saisonal bedingt. Bei der Integration natürlicher Quellen ist ein ausgewogener Energiehaushalt zwischen Heiz- und Kühlbetrieb entscheidend.

Die genannten natürlichen und passiven Systeme haben aufgrund ihrer Abhängigkeiten begrenzte Kapazitäten. Insgesamt eröffnen diese Technologien aber flexible Möglichkeiten für eine individuelle und nachhaltige Kälteerzeugung.

Eine zusätzliche Möglichkeit zur Integration erneuerbarer Energie besteht in der Nutzung von Strom aus Photovoltaikanlagen oder eigener Wärmeerzeugung durch Solarthermieanlagen. Die erzeugte Wärme kann als Quelle für Sorptionskältemaschinen dienen, die je nach Temperatur der Wärmequelle Absorptions- oder Adsorptionskälte erzeugen können. Der effiziente Betrieb solcher Anlagen erfordert eine ausreichende Menge hochtemperierter Wärme. Zur Speicherung dieser Wärme können Kurzzeit- oder Langzeitspeicher, abhängig von der Wärmequelle, eingesetzt werden. In Industriegebieten kann auch die Nutzung von Abwärme aus Produktionsprozessen als Wärmequelle für Sorptionsmaschinen in Betracht gezogen werden. Die Wiederverwendung von Abwärme als Energiequelle ermöglicht einen wirtschaftlichen Betrieb der Sorptionsmaschinen.

Für eine wirtschaftliche Kälteerzeugung ist eine Kombination verschiedener Kälteerzeugungsarten erforderlich. Im Bereich der Kompressionskältemaschine bieten die vielfältigen Konfigurationsmöglichkeiten der Verdichter und Kältemittel zahlreiche Optionen. Die Experten betonen die Bedeutung der Kältemittelwahl im Sinne der Nachhaltigkeit, mit einem Fokus auf natürliche Kältemittel oder solche mit geringem GWP (Global Warming Potential). Ammoniak und Propan wurden als Beispiel für umweltfreundliche Kältemittel genannt, wobei auch die Einhaltung gesetzlicher Überwachungs- und Sicherheitsanforderungen von Bedeutung ist. Die Vielfalt der Kälteerzeugungsmöglichkeiten ermöglicht eine an die Ausgangssituation angepasste Auswahl. Die Herausforderung liegt in der sinnvollen Integration und Erweiterung vorhandener Anlagen oder der nachhaltigen Gestaltung von Neuanlagen. Sowohl bei bestehenden als auch neuen Anlagen ist die effiziente Speicherung von Energie entscheidend, insbesondere bei der Nutzung von Sorptionsmaschinen. Latente Speicher, wie Eisspeicher, wurden als eine Möglichkeit für den Lastausgleich genannt, um die Produktionssysteme flexibel umzuschalten und so stets die wirtschaftlichste Option für die Kälteerzeugung zu nutzen.

In der hydraulischen Kälteverteilung für Nah- bzw. Fernkältenetze favorisieren die Expert:innen wasserbasierte Fluide, wobei Glykol-Wasser-Gemische aufgrund ihrer geringeren Wärmekapazität als nachteilig gesehen werden. Die Verteilung erfolgt in Erdleitungen, wobei Grabungsarbeiten als Herausforderung gelten. Netzstrukturen werden in Strahlennetze und Ringnetze unterteilt. Das Strahlennetz bietet Flexibilität bei der Dimensionierung, aber Herausforderungen in der Versorgungssicherheit. Das Ringnetz bietet höhere Planungssicherheit, Flexibilität und höhere Resilienz bei technischen Gebrechen, jedoch auch höhere Errichtungskosten. Praktisch wird oft eine Kombination aus Ring- und Strahlennetz angewendet, wodurch ein technisch-wirtschaftlicher Kompromiss entsteht.

Für die Übergabe der Kälteenergie an Abnehmer:innen gibt es zwei Varianten: die direkte Anbindung ohne hydraulische Trennung und die indirekte Anbindung mit Trennwärmetauschern. Die direkte Anbindung bietet höhere Effizienz, jedoch überwiegen die Nachteile wie Anlagengröße und Wasserqualität. Die indirekte Anbindung gewährleistet Betriebssicherheit durch klare Schnittstellen und definierte Verantwortlichkeiten. Trotz des Wirkungsgradverlustes über den Trennwärmetauscher wird die hydraulische Trennung als unumgänglich angesehen, besonders bei größeren Netzen, wobei Ausnahmen für spezifische Anwendungen in kleinen lokalen Netzen existieren können.

Chancen und Risiken

Die Expert:innen betonen zahlreiche Chancen und Risiken im Kontext von Nah- bzw. Fernkältenetzen. Hervorgehoben werden insbesondere wirtschaftliche Risiken, angefangen bei der Standortwahl bis hin zu den laufenden Betriebskosten. Die Wirtschaftlichkeit eines solchen Netzes steht und fällt mit der Anschlussdichte und der Effizienz in der Planung. Eine umfassende Finanzierung und klare Regelungen für Schnittstellen, Anschlussbedingungen und Betriebskosten sind entscheidend. Die Lebenszykluskosten werden über einen Zeitraum von 30 bis 50 Jahren betrachtet, wobei ein klar definiertes Reglement die Grundlage für den wirtschaftlichen Betrieb bildet. Die Anschlussmöglichkeit an ein Nah- bzw. Fernkältenetz bietet Abnehmer:innen diverse Chancen und Risiken, darunter die Stilllegung ineffizienter Altanlagen, den Rückbau bestehender Anlagen und die Vereinfachung des Betriebs. Dies ermöglicht möglicherweise sogar den Verzicht auf qualifiziertes Personal. Trotz höherer Energiekosten können Abnehmer:innen von den Vorteilen, wie einfacherer Anlagenwartung und erhöhter Versorgungssicherheit, profitieren. Für Netzbetreiber:innen ergeben sich Chancen in der Auslastung und damit verbundenen wirtschaftlichen Sicherheit. Eine hohe Auslastung im Netzverbund ermöglicht effizienten Volllastbetrieb, Qualitätsverbesserungen, Aktualisierungen der Technologie und flexibleres Reagieren auf gesetzliche Anforderungen.

Die Abwärmenutzung aus dem Kälteerzeugungsprozess bietet eine Chance für Netzbetreiber:innen und Abnehmer:innen, indem sie zu einem wirtschaftlichen Vorteil und einer ganzheitlichen Energieverwertung führt. Dies fördert Nachhaltigkeit, CO₂-Reduktion und Dekarbonisierung. Jedoch können äußere Zwänge, wie Standortbedingungen und gesetzliche Auflagen, die Wirtschaftlichkeit beeinflussen. Insbesondere bei der Kälteerzeugung können behördliche Auflagen aufgrund von Grundstückslage, Bauordnungen und Bebauungsdichte, Einschränkungen darstellen. Die Kälteverteilung erfordert Abstimmungen mit Grundstückseigentümern, Leitungsträgern und Behörden. Bei der Kälteübergabe in den Objekten eröffnen sich Chancen, etwa bei denkmalgeschützten Gebäuden, in denen nicht mehr benötigte technische Komponenten, Raum für andere Nutzungszwecke schaffen können. Risiken bleiben bei der gebäudeinternen Kälteverteilung, die jedoch meist die Verbraucher:innen betreffen, nicht den Kältenetzbetreiber.

Die sonstigen Chancen und Risiken umfassen die gründliche Konzeptions- und Planungsphase, in der entscheidende Parameter festgelegt werden. Diese Phase erfordert Durchsetzungsvermögen und einen langen Atem der Ideengeber. Die Integration mit anderen städtischen Infrastrukturprojekten, wie Straßenbauarbeiten, kann Synergien bieten, erhöht aber auch das Risiko von Beschädigungen der Kälteverteilungen. Abhängigkeiten von Vertragspartnern können sowohl Chancen als auch Risiken darstellen, insbesondere, wenn Vertragsbrüche auftreten oder sich die Interessen der Parteien ändern. Die Expert:innen sind uneins über den langfristigen Beitrag von Nah- bzw. Fernkältenetzen zum Klimawandel und der Nachhaltigkeit.

Zukunftsaussichten

Die Expert:innen prognostizieren, dass Nah- und Fernkältenetze in der Zukunft eine entscheidende Rolle spielen werden, bedingt durch den zunehmenden Bedarf an Kälteenergie infolge des Klimawandels und der häufigeren Hitzeperioden.

Die innerstädtische Erwärmung durch Flächenversiegelung macht die Kühlung städtischer Gebiete unverzichtbar, insbesondere in historisch geschützten Regionen. Trotz der Priorisierung von baulichen Maßnahmen wird betont, dass ein Kältebedarf bestehen bleibt. Eine ganzheitliche Energieversorgung, die auch die Nutzung von Abwärme einschließt, wird als unabdingbar betrachtet. Nah- oder Fernkältenetze erweisen sich dabei als besonders sinnvoll in Gebieten mit hoher Anschlussdichte, wie Gewerbegebieten oder dicht bebauten Liegenschaften. Die effiziente Standortwahl für die Energiezentrale sowie die Implementierung von Langzeitspeichern sind entscheidend für den wirtschaftlichen Betrieb dieser Netze. Die Meinungen über den Beitrag von Nah- und Fernkältenetzen zu Klimazielen und Dekarbonisierung gehen auseinander, während die Experten die gesamtheitliche Nutzung von Wärme und Kälte als vielversprechend ansehen. Uneinigkeit besteht hinsichtlich der politischen Verantwortung für die Lösung dieser Herausforderungen, wobei einige Expert:innen eine stärkere Einbindung der Politik fordern.

3.5. Gesetzliche Anforderungen und rechtliche Hürden

Die folgenden Ausführungen beziehen sich auf Gesetze, Verordnungen, Richtlinien, Normen und Empfehlungen, die auf dem Pariser Klimaschutzabkommen basieren. Dieses Abkommen wurde von den Mitgliedsstaaten unterzeichnet, welche die weltweite Herausforderung anerkennen, dass eine nachhaltige Entwicklung und die Implementierung erneuerbarer Energieformen entscheidend sind, um langfristige Klimaänderungen zu bewältigen und die Menschen sowie die Existenzgrundlagen der Ökosysteme zu schützen [19]. Die Ziele der Vereinbarung umfassen die Erhaltung und den Schutz der Umwelt, die umsichtige und rationelle Nutzung natürlicher Ressourcen sowie die Förderung von Maßnahmen zur Bewältigung von Umweltproblemen auf lokaler, regionaler, sub-nationaler, nationaler und internationaler Ebene. Ein besonderer Fokus liegt dabei auf der Eindämmung und Bekämpfung des Klimawandels [20].

Gesetze, Verordnungen, Richtlinien und Empfehlungen der Europäischen Union

Die Europäischen Union (EU) strebt die Klimaneutralität bis 2050 an und hat im Rahmen des europäischen grünen Deals ehrgeizige Ziele zur Transformation ihrer Wirtschaft und Gesellschaft festgelegt [21]. Dieser Deal beinhaltet eine Wachstumsstrategie für eine moderne, ressourceneffiziente und wettbewerbsfähige Wirtschaft, die bis 2050 keine Netto-Treibhausgasemissionen mehr freisetzen soll. Die Strategie umfasst verschiedene Elemente, darunter die Dekarbonisierung des Energiesektors und eine Renovierungswelle für Gebäude. Der Energiesektor spielt eine Schlüsselrolle, da etwa 75 % der Treibhausgasemissionen der EU aus diesem Bereich stammen. Die EU strebt einen Übergang zu erneuerbaren Energien, einen funktionierenden Energiebinnenmarkt und eine kontinuierliche Verbesserung der Energieeffizienz an. Der europäische grüne Deal betont die Senkung der Netto-Treibhausgasemissionen bis 2050 auf null. Maßnahmen umfassen die Modernisierung des Energiesystems und den Ausstieg aus fossilen Brennstoffen.

¹⁹ vgl. <https://eur-lex.europa.eu>, 2016, S L 282/8

²⁰ vgl. <https://eur-lex.europa.eu>, 2016, S. L 282/18

²¹ vgl. Verordnung (EU) 2021/1119, 2021 (<https://eur-lex.europa.eu/>)

Die Renovierung von Gebäuden, die rund 40 % des Energiebedarfs ausmachen, ist ein weiterer Schwerpunkt. Die EU fördert eine Verdopplung der Renovierungsquote, im öffentlichen und im privaten Sektor. Ziel ist es, Energiekosten zu senken, Energiearmut zu reduzieren und die Energieeffizienz zu erhöhen. Die EU-Richtlinie 2010/31/EU [22] legt Mindestanforderungen an die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden fest, und der grüne Deal [23] betont die Berücksichtigung erneuerbarer Energien bei Renovierungen.

Das "Fit für 55"-Paket von 2021 [24] unterstreicht das Engagement der EU zur Senkung der Emissionen um 55 % bis 2030. Der Vorschlag enthält Aktualisierungen der Erneuerbare-Energien-Richtlinie und der Energieeffizienzziele, um das Energiesystem sauberer und effizienter zu gestalten. Um die Ziele des Pariser Abkommens zu erreichen, hat die EU ein Governance-System eingeführt, das nationale Energie- und Klimapläne integriert. Jeder Mitgliedsstaat muss seine Pläne über die Sicherheit der Energieversorgung, den Energiebinnenmarkt, die Energieeffizienz, die Dekarbonisierung sowie Forschung, Innovation und Wettbewerbsfähigkeit berichten [25]. Die Verordnung zum Governance-System betont die Bedeutung einer intelligenten Infrastruktur und eines inklusiven Ansatzes, um die Klimaneutralität zu erreichen und die EU als Vorreiter im Klimaschutz zu positionieren.

Gesetze, Verordnungen, Richtlinien und Empfehlungen der österreichischen Bundesregierung
Die vorliegende Untersuchung beschäftigt sich mit der Umsetzung von unionsrechtlichen Verpflichtungen im Bereich des Klimaschutzes in Österreich. Ein spezielles Bundesgesetz, das Klimaschutzgesetz (KSG [26]), wurde erlassen, um Höchstmengen an Treibhausgasemissionen festzulegen und wirksame Klimaschutzmaßnahmen zu koordinieren. Dieses Gesetz legt Maßnahmen für verschiedene Sektoren fest, darunter Energieeffizienzsteigerung, erhöhter Anteil erneuerbarer Energien, Gesamtenergieeffizienz im Gebäudebereich, Mobilitätsmanagement und Schutz von Kohlenstoffsenken [27]. Das Nationale Klimaschutzkomitee berät über Grundsatzfragen der österreichischen Klimapolitik und erstellt jährliche Berichte über den Fortschritt bei der Einhaltung der Höchstmengen an Treibhausgasemissionen.

Ein weiteres Bundesgesetz, das Bundes-Energieeffizienzgesetz (EEffG) [28], wurde verabschiedet, um die Energieeffizienz bundeseinheitlich zu steigern, nationale Ziele festzulegen und die Vorbildwirkung des Bundes zu etablieren. Das Wärme- und Kälteleitungsausbaugesetz (WKLG) [29] zielt darauf ab, den Primärenergieträgereinsatz zu reduzieren und CO₂-Einsparungen zu fördern.

²² <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2010:153:0013:0035:de:PDF>

²³ Der europäische Grüne Deal (2019). Verfügbar unter der Webseite: <https://eur-lex.europa.eu/>

²⁴ Fit für 55": auf dem Weg zur Klimaneutralität – Umsetzung des EU-Klimaziels für 2030 (2021). Verfügbar unter der Webseite: <https://eur-lex.europa.eu/>

²⁵ Verordnung (EU) 2018/1999 des europäischen Parlaments und des Rates vom 11. Dezember 2018 über das Governance-System für die Energieunion und für den Klimaschutz. Verfügbar unter der Webseite: <https://eur-lex.europa.eu/>

²⁶ <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=20007500>

²⁷ vgl. §1, §2, §4 und §6 Klimaschutzgesetz (KSG) in der geltenden Fassung, verfügbar unter: <https://www.ris.bka.gv.at/>

²⁸ Bundes-Energieeffizienzgesetz (EEffG) in der geltenden Fassung verfügbar unter: <https://www.ris.bka.gv.at/>

²⁹ Wärme- und Kälteleitungsausbaugesetz (WKLG), <https://www.ris.bka.gv.at/>

Die Kälteanlagenverordnung regelt die Errichtung und den Betrieb von Kälteanlagen, während das Fluorierte Treibhausgase-Gesetz 2009 ^[30] die Kontrolle von fluorierten Treibhausgasen vorschreibt. Aufgrund der landesspezifischen Baugesetze und Bauordnungen in den neun Bundesländern gibt es unterschiedliche Anforderungen im Baubereich. So wird die Bedeutung der Umsetzung dieser Gesetze zur Erreichung der Klimaziele betont, wobei insbesondere die Steigerung der Energieeffizienz und die Reduktion von Treibhausgasemissionen im Fokus stehen ^[31].

Gesetze, Verordnungen, Richtlinien und Empfehlungen der Steiermärkischen Landesregierung

Der Klimawandel in der Steiermark zeigt sich bereits deutlich, wie zum Beispiel durch den Rückgang von Gletschern und vermehrte Hitzetage. Die Steiermärkischen Landesregierung reagiert darauf mit der "Klimawandelanpassung-Strategie Steiermark 2050", um die negativen Auswirkungen zu mildern und mögliche Chancen daraus zu nutzen ^[32]. Angesichts des wissenschaftlichen Konsenses über den nicht mehr aufzuhaltenden Klimawandel werden die regionalen Auswirkungen des Klimawandels erörtert, wobei der Fokus auf nationalen, regionalen und lokalen Ebenen liegt.

Die Strategie identifiziert dreizehn Bereiche, darunter Raumplanung, Bauen und Wohnen sowie Energieversorgung, um auf die klimatischen Veränderungen zu reagieren. Im Bereich Raumplanung wird die Chance einer energieeffizienten und ressourcenschonenden Planung betont. Die Landesregierung strebt an, eine Zersiedelung zu vermeiden und eine nachhaltige Raumplanung zu fördern. Die Energieversorgung steht im Fokus mit Schwerpunkten auf Effizienzsteigerung, Ausbau erneuerbarer Energien und Aufrechterhaltung einer stabilen Versorgung.

Im Bereich Bauen und Wohnen wird auf standortoptimierte Planung, effiziente Technologien und Baustoffe hingewiesen. Die Steiermärkische Bautechnikverordnung von 2020 ^[33] harmonisiert die OIB-Richtlinien ^[34] und betont die Berücksichtigung von Schallschutzanforderungen bei haustechnischen Anlagen wie Kältemaschinen. Die so betonen die OIB Richtlinien aber den Einsatz hocheffizienter alternativer Systeme und erneuerbarer Energien im Bauwesen.

Die Errichtung und der Betrieb von Kälteanlagen unterliegen der Kälteanlagenverordnung ^[35], die Sicherheitsanforderungen für verschiedene Kältemittelgruppen festlegt. Die Verordnung (EU) Nr. 517/2014 ^[36] legt Umweltschutzstandards für fluorierte Treibhausgase in Kälteanlagen fest, betont die Kontrolle auf Dichtheit und fördert alternative, umweltfreundliche Technologien zur Erreichung der Klimaziele. Weiters ist hier die Relevanz der genannten EU-Verordnung dahingehend hervorzuheben, da sie auf eine Reduzierung von fluorierten Treibhausgasen abzielt. Dies wird durch ein Quotensystem und Verbote für bestimmte Kältemittel unterstützt, um die Emissionen zu minimieren.

³⁰ Fluorierte Treibhausgase-Gesetz 2009 in der geltenden Fassung verfügbar unter: <https://www.ris.bka.gv.at/>

³¹ Baurecht und Bauordnungen in Österreich, verfügbar unter: <https://www.oesterreich.gv.at/>

³² Amt der Steiermärkischen Landesregierung (2017): Klimawandelanpassung-Strategie Steiermark 2050, Graz, verfügbar unter: <https://www.umwelt.steiermark.at/>

³³ Steiermärkische Bautechnikverordnung (StBTv), <https://www.ris.bka.gv.at/>

³⁴ OIB-Richtlinien in der aktuellen Fassung verfügbar unter: <https://www.oib.or.at/de/oib-richtlinien>

³⁵ Kälteanlagenverordnung in der aktuellen Fassung verfügbar unter: <https://www.ris.bka.gv.at/>

³⁶ Verordnung (EU) Nr. 517/2014 über fluorierte Treibhausgase verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/>

Die vorgestellten Maßnahmen und Strategien zeigen die Bemühungen der Steiermark, sich den Herausforderungen des Klimawandels anzupassen und gleichzeitig die Effizienz und Nachhaltigkeit in verschiedenen Sektoren zu fördern.

Grazer Altstadterhaltungsgesetz

Im Kontext der Forschungsfragen werden stadtspezifische Themen der Stadtregierung Graz und ihrer Kommissionen betrachtet. Bei der Errichtung von Fernkälteanlagen im innerstädtischen Bereich, insbesondere bei Bestandsgebäuden, ist das Grazer Altstadterhaltungsgesetz ^[37] von zentraler Bedeutung. Dieses Gesetz zielt darauf ab, die Altstadt von Graz in ihrer Baustruktur, Bausubstanz und insbesondere in ihrem ästhetischen Erscheinungsbild zu erhalten. Das örtliche Anwendungsgebiet des Gesetzes erstreckt sich auf Stadtteile von Graz, die durch ihre landschaftliche oder bauliche Charakteristik das Erscheinungsbild der Stadt prägen und somit in ihrer Funktion bewahrt werden sollen. Die Grazer Altstadt wird dabei in verschiedene Zonen unterteilt, darunter eine Kernzone (Zone 1) und weitere fortlaufend nummerierte Zonen ^[38]. Auflagen und Maßnahmen in den Schutzzonen werden nach Absprache und Abstimmung mit den Behörden und ihren entsprechenden Kommissionen festgelegt. Diese Regelungen verdeutlichen das Bemühen der Stadt Graz, bei baulichen Maßnahmen, insbesondere im Bereich der Altstadt, sowohl die historische Struktur als auch das ästhetische Erscheinungsbild zu bewahren und eine Abstimmung mit den relevanten Behörden sicherzustellen.

3.6. PV-Technologien am Markt und in der Wissenschaft

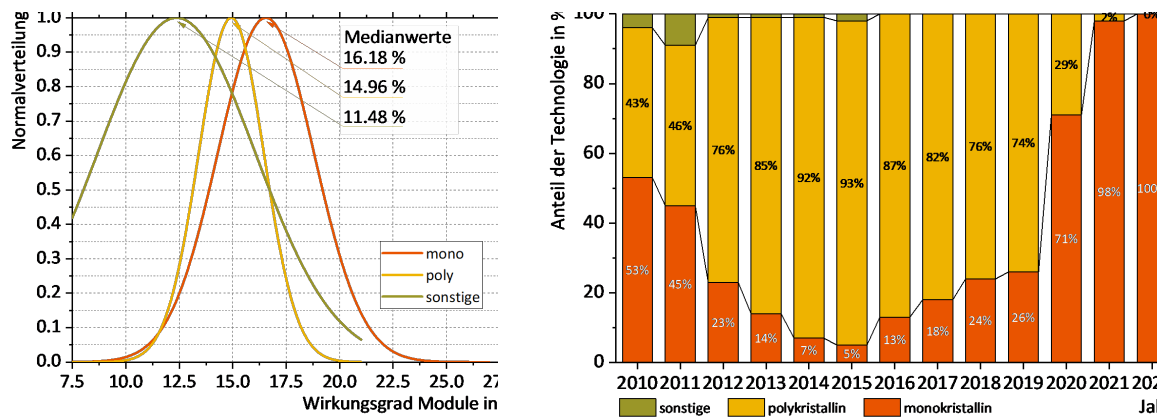
Büro- und Forschungsquartiere sind zentrale Elemente einer nachhaltigen urbanen Entwicklung. Die Integration von Photovoltaikanlagen in solche Quartiere kann maßgeblich dazu beitragen, den Energiebedarf zu decken, Betriebskosten zu senken und Umweltauswirkungen relevant zu verkleinern. Eine bedarfsgerechte Konzeption der Photovoltaikanlagen erfordert sorgfältige Planung, um die spezifischen Anforderungen des jeweiligen Quartiers zu erfüllen und bestmöglich die vorhandenen Rahmenbedingungen zu nutzen. Hierbei muss auf technische, wirtschaftliche und nachhaltige Aspekte geachtet werden, um zwischen den Zielen Effizienz, Rentabilität, Umweltverträglichkeit und Ästhetik ein ausgewogenes Verhältnis zu schaffen. Die Auswahl der geeigneten Photovoltaik (PV)-Technologie für die Integration in Dächer und Fassaden hat entscheidenden Einfluss auf die Erreichbarkeit der oben genannten Ziele. Die am häufigsten verwendete Zellentechnologie basiert auf dotiertem Silizium. Polykristalline Siliziumzellen erreichen Wirkungsgrade von 15-20 %. Der Wirkungsgrad ist in diesem Zusammenhang das Verhältnis des Energieinhalts der auf die Zelle auftreffenden Strahlung zur generierten elektrischen Energie. Monokristalline Zellen bieten höhere Wirkungsgrade (ca. 16-22 %), sind jedoch in einem etwas höheren Preisniveau angesiedelt. Dünnschicht-PV und organische PV bieten Flexibilität in Bezug auf Design und Integration, sind jedoch in der Regel weniger effizient (10-13 %) als kristallines Silizium. Sogenannte bifaziale PV-Module sind eine vielversprechende Option, da sie Sonnenstrahlung von beiden Seiten aufnehmen und eine erhöhte Effizienz (bis ca. 25 %) bieten, was sie ideal für Installationen auf unbegrüntem Flachdächern und anderen reflektierenden Oberflächen macht.

³⁷ Grazer Altstadterhaltungsgesetz, in der aktuellen Fassung verfügbar unter: <https://www.ris.bka.gv.at/>

³⁸ Schutzzonen: Altstadt & Weltkulturerbe Graz zu finden unter: <https://www.graz.at/>

Um einen Markt-Überblick zu erhalten wurde der umfangreiche Datensatz, der frei zugänglichen Modul-Datenbank [39] sowie zusätzliche Firmendaten, entnommen aus der Software Polysun [40] (mit in Summe 117.000 Einträgen), analysiert. Die Auswertung zeigt, dass im Median die Wirkungsgrade der polykristallinen Module bei 14.96 % (max. 20.74 %), der monokristallinen Module bei 16.19 % (max. 25.63 %) und die der sonstigen Modultypen bei 11.48 % (max. 20.71 %) liegen (Abbildung 2 links). Momentan zeigt sich, dass am österreichischen Markt vorwiegend monokristalline Module (100 %) nachgefragt werden (Stand 2022). Polykristalline Module und sonstige PV-Technologien (Dünnschicht: CIGS, CIS, CdTe, etc.) sind 2022 kaum noch verkauft worden (siehe Abbildung 2 rechts) [41].

Abbildung 2: Normalverteilung der Auswertung der Modul-Datenbank anhand der gängigen PV-Technologien (links) und der in Österreich verkauften Modultypen in den letzten Jahren (rechts)



Derzeit sind bereits zwei weitere Entwicklungen der PV-Technologien am Markt angekommen. Einerseits die sogenannte Passivated Emitter and Rear Cell (PERC)-Technologie - eine Weiterentwicklung der herkömmlichen Silizium-Solarzellen. PERC-Solarzellen zeichnen sich durch eine spezielle Struktur und Oberflächenbehandlung aus, die ihre Effizienz und Leistung verbessern. Der Effizienzgewinn kann je nach Hersteller und Implementierung variieren, liegt aber oft im Bereich von 1-3 %. Andererseits die Heterojunction with Intrinsic Thin layer (HJT)-Solarzellen, die sich durch ihren speziellen Aufbau auszeichnen, der die kristalline mit der Dünnschichttechnologie verbindet. Bei den HJT-Solarzellen wird ein hauchdünner monokristalliner Silizium-Wafer von einer ultradünnen amorphen (= Dünnschicht) Siliziumschicht umhüllt. So werden die Vorteile beider Technologien kombiniert: kristalline Zellen können mehr direktes Sonnenlicht in Strom umwandeln, als es bei Dünnschichtzellen der Fall ist. Diese andererseits haben ein besseres Schwachlichtverhalten und erzeugen bei diffusem Licht mehr Strom. Wegen ihres besseren Temperaturkoeffizienten verringert sich ihre Erzeugungsleistung bei steigender Temperatur weniger als kristalline Zellen. Derzeit sind mit dieser Technologie Wirkungsgrade von ca. 22 % erreichbar, wobei demnächst marktreife Module mit bis zu 24 % erwartet werden.

³⁹ Photovoltaikforum (2023): Modul-Datenbank, Photovoltaikforum GmbH, 88457 Kirchdorf, <https://www.photovoltaikforum.com/mbd/>

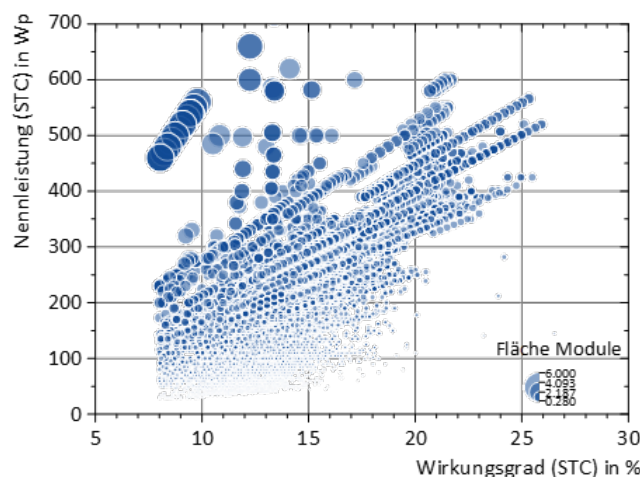
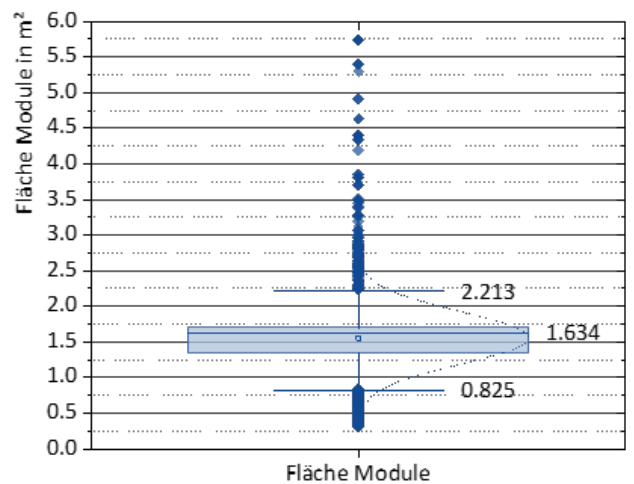
⁴⁰ Vela Solaris (2023): PV-Modul Datenbank aus der Polysun-Version 2023:10; 8400 Winterthur, Schweiz

⁴¹ P. Biermayr, et al. (2023): Innovative Energietechnologien in Österreich Marktentwicklung 2022, Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK), 1030 Wien

Am Beginn der Marktreife befinden sich weitere Technologien, die auch zukünftig einen steigenden Wirkungsgrad erwarten lassen. Als große Hoffnungsträger gelten aktuell sogenannte Perowskit-Solarzellen. Diese bestehen aus ferroelektrischen Materialien wie Bariumnitrat, Strontium- und Calciumnitrat, die positive und negative Ladungen besitzen. Der Wirkungsgrad ist mit über 29 % beachtlich, wobei sie aktuell noch anfällig für Umwelteinflüsse sind und eine kürzere Lebensdauer als ihre kristallinen Pendanten besitzen.

Hinsichtlich der Zellen-Geometrie ist derzeit noch die Zelle (M2) mit 156.75 x 156.75 mm am Markt dominant. Diese Zellen werden meist zu Modulen mit 1.68 m² verarbeitet. Neuerdings sind auch Zellen mit 182 x 182 mm (M10) und 210 x 210 mm (M12) in Verwendung, die Module mit einer Fläche von 2.01 m² ergeben. Weiters zeigt die Marktanalyse, dass auch deutlich größere Module erhältlich sind (siehe Abbildung 3 oben). Hinsichtlich der Peakleistung der Module, bewegen sich aktuelle Module zwischen 290 und 600 Wp, wobei deren Abhängigkeit von Wirkungsgrad und Größe in Abbildung 3 unten dargestellt wurde.

Abbildung 3: Auswertung verschiedener Datenbanken von PV-Modulen – oben: Flächenauswertung, unten: Peakleistung über dem Wirkungsgrad und der Modulflächen



4 Szenarien und Rahmenbedingungen

Bearbeitung: Institut für Wärmetechnik, Institut für Elektrische Anlagen und Netze, TB-Starchel

Die Definitionen aller Szenarien basieren auf dem Gebäudebestand des Referenz-Quartiers (Kapitel 4.1). Um Bandbreite und Verallgemeinerungsmöglichkeiten zu gewinnen, werden darauf aufbauend, unterschiedliche Aspekte der Kühlbedarfsursachen bzw. deren Deckung variiert und zu Szenarien kombiniert, die mittels Modelle bewertet werden. Die vergleichende Analyse der Bewertungsergebnisse soll daraufhin Erkenntnisse über die Auswirkungen der einzelnen Aspekte auf den Kühlbetrieb am Distrikt ermöglichen. In den Szenarien werden vier Strukturvarianten (Kapitel 4.2), drei Kühlbedarfsursachen (Kapitel 4.3) und zwei Varianten der Nutzung photovoltaischer Anlagen zur Generierung elektrischer Energie (Kapitel 4.4) miteinander kombiniert (siehe Abbildung 4). Für jede Strukturvariante wird zudem ein Zukunftsszenario bewertet. Dieses basiert auf einer klimatischen Prognose für das Jahr 2042. Vor dem Hintergrund der Erreichung der klimapolitischen Ziele wird davon ausgegangen, dass für das Jahr 2042 die verdichtete Ausbauvariante anzunehmen ist.

Abbildung 4: Untersuchte Szenarien

Strukturvariante	Kühlbedarf	Klima	PV Ausbau	Szenariename
01 Kälte dezentral PV dezentral	Büro	2022	aktuell	01K_B_2022_akt
		2042	verdichtet	01K_B_2042_ver
	Büro & Labor	2022	aktuell	01K_BL_2022_akt
		2042	verdichtet	01K_BL_2042_ver
02 Kälte dezentral PV im Verbund	Büro	2022	kein	02K_B_2022
		2022	aktuell	02K_B_2022_akt
		2042	verdichtet	02K_B_2042_ver
	Büro & Labor	2022	kein	02K_BL_2022
		2022	aktuell	02K_BL_2022_akt
		2042	verdichtet	02K_BL_2042_ver
03 Kälte im Verbund PV im Verbund	Büro	2022	kein	03K_B_2022
		2022	aktuell	03K_B_2022_akt
		2042	verdichtet	03K_B_2042_ver
	Büro & Labor	2022	kein	03K_BL_2022
		2022	aktuell	03K_BL_2022_akt
		2042	verdichtet	03K_BL_2042_ver
04 Kälte & Wärme im Verbund PV im Verbund (Auslegung Kälte)	Büro	2022	aktuell	04KW_B_2022_akt
		2042	verdichtet	04KW_B_2042_ver
	Büro & Labor	2022	aktuell	04KW_BL_2022_akt
		2042	verdichtet	04KW_BL_2042_ver
05 Kälte & Wärme im Verbund PV im Verbund (Auslegung Wärme)	Büro	2022	aktuell	05KW_B_2022_akt
		2042	verdichtet	05KW_B_2042_ver
	Büro & Labor	2022	aktuell	05KW_BL_2022_akt
		2042	verdichtet	05KW_BL_2042_ver

Legende

	Betriebsenergieanalyse und lebenszyklusorientierte Nachhaltigkeitsbewertung
	nur lebenszyklusorientierte Nachhaltigkeitsbewertung
	nur Betriebsenergieanalyse

4.1. Gebäude und Bedarfsstruktur

Als prototypisches Referenz-Quartier wird der Universitätscampus Inffeldgasse, der Technischen Universität Graz (TU Graz) herangezogen. Der Campus wurde im Jahr 1970 gegründet und hat sich seither mit einer Grundstücksfläche von 146 230 m² und einer Bruttogeschosfläche (BGF) von 141 408 m² zum größten der drei Standorte der TU Graz entwickelt (Bebauungsdichte: 0.9). Im Jahr 2020 wurde beschlossen den gesamten Campus bis zum Jahr 2030 zum „Innovation District Inffeld“ [42] weiterzuentwickeln und diesen Begriff in andockenden Forschungsprojekten zu verwenden. Im weiteren Verlauf des Berichtes hingegen der Begriff „Referenz-Quartier“ verwendet. Abbildung 5 zeigt den Ausbaustand des Distrikts im Jahr 2022, also jene bauliche und energietechnische Konfiguration, die im Projekt COOL-QUARTER-PLUS als Case Study verwendet wird.

Abbildung 5: Areal der Case Study „Innovation District Inffeldgasse“ (2022). Kartenmaterial: © 2022 Google, Landsat/Copernicus, Data SIO, NOAA, U.S. Navy, NGA, GEBCO. Kartendaten © 2022 Google⁴³.



⁴² <https://www.tugraz.at/tu-graz/universitaet/klimaneutrale-tu-graz/innovation-district-inffeld>

⁴³ Google. (2022). Areal Innovation District Inffeldgasse, Graz [Luftbildaufnahme]. Google Maps. Bildquellen: Landsat / Copernicus, Data SIO, NOAA, U.S. Navy, NGA, GEBCO. Kartendaten © 2022 Google. <https://maps.google.com>

Das Areal beinhaltet 27 Einzelgebäude in denen 22 Universitätsinstitute und zusätzlich 8 Forschungsgesellschaften untergebracht sind. Die Mehrzahl der Nutzer:innen kommt aus den Ingenieur- und Informationswissenschaften. Das Energiesystem ist einerseits auf die Raumkonditionierung ausgelegt, aber andererseits werden energieintensive Laboratorien, Teststände und Werkstätten betrieben. Die Innenräume der Gebäude am Innovation District Inffeld werden vom Campusmanagementsystem TUGraz_online in einer zentralen Datenbank erfasst. Jeder Innenraum ist mit Raumbezeichnung, Nutzfläche (NF), Nutzungskategorie und anderen Attributen gemäß DIN 277 [44] gelistet.

- NF1 Wohnen und Aufenthalt
- NF2 Büroarbeit
- NF3 Produktion, Experimente, Arbeit
- NF4 Lagern, Verteilen und Kaufen
- NF5 Bildung, Kultur und Unterricht
- NF6 Helfen und Pflegen
- NF7 Sonstige Nutzflächen
- TF8 Technische Anlagen
- VF9 Verkehrserschließung, -sicherung

In der vorliegenden Analyse werden die 27 Einzelgebäude zu 14 Gebäudekonfigurationen (Gebäude A bis N) zusammengefasst. Die Zusammenfassung der Einzelgebäude zu spezifischen Konfigurationen beruht auf der räumlichen Nähe, ähnlichen Nutzungstypen, technischen Systemen und der vorhandenen Messinfrastruktur. Diese Konfigurationen ermöglichen einen effizienten und aussagekräftigen Vergleich zwischen simulierten und gemessenen Energieverbrauchsdaten. Der direkte Vergleich von simulierten mit tatsächlichen Daten ist entscheidend, um die Zuverlässigkeit der einzelnen Simulationsmodelle zu bewerten und zu analysieren. Abbildung 6 zeigt die Zusammensetzung der Flächennutzung nach Nutzungskategorien.

Abbildung 6: Zusammensetzungen der Gebäudekonfigurationen nach ihren Funktionen gemäß DIN 277 [44]

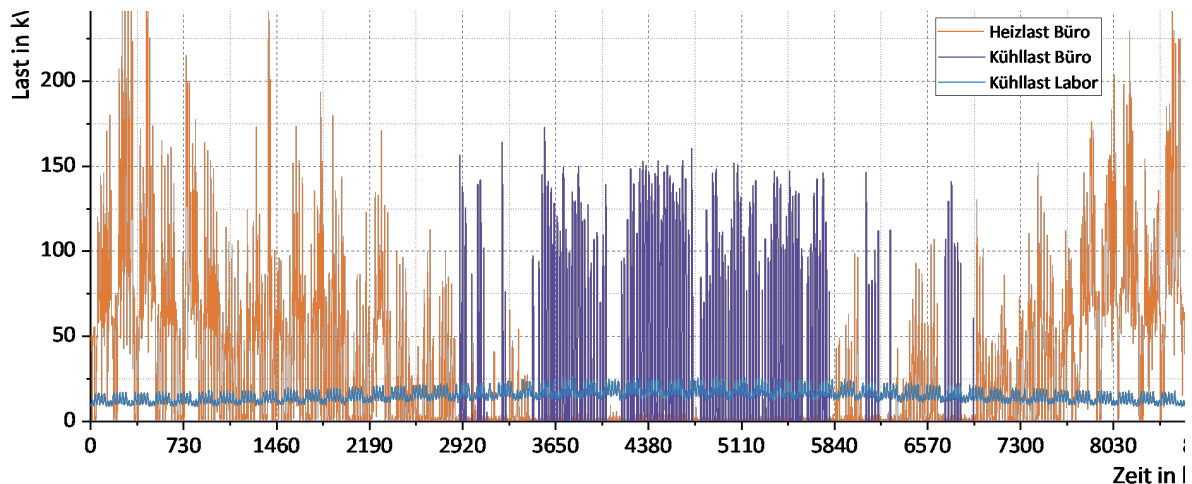
Gebäude	Nutzungskategorie							
	NF1	NF2	NF3	NF4	NF5	NF7	TF8	VF9
A	14.9%	14.9%	17.2%	2.1%	27.8%	2.9%	3.7%	16.5%
B	2.0%	15.2%	37.6%	7.4%	9.5%	2.0%	6.7%	19.5%
C	0.6%	17.5%	34.9%	2.9%	6.1%	2.1%	9.7%	26.1%
D	2.1%	34.5%	10.7%	2.4%	4.7%	2.6%	11.9%	31.2%
E	0.9%	29.3%	22.7%	2.6%	5.0%	2.3%	0.6%	36.5%
F	0.8%	13.9%	34.7%	12.5%	8.9%	1.5%	6.4%	21.2%
G	1.1%	0.4%	35.7%	18.5%	0.0%	2.2%	21.8%	20.3%
H	4.6%	54.3%	5.0%	7.4%	4.0%	2.3%	2.3%	20.1%
I	1.4%	25.0%	19.4%	8.8%	3.8%	2.1%	10.9%	28.7%
J	0.3%	13.9%	49.2%	14.8%	1.0%	1.9%	2.5%	16.4%
K	0.9%	11.9%	31.8%	8.3%	5.5%	7.5%	12.5%	21.6%
L	0.0%	58.3%	1.2%	20.8%	0.0%	5.9%	2.3%	11.6%
M	0.0%	30.5%	28.9%	2.2%	2.1%	3.5%	8.4%	24.4%
N	38.5%	1.4%	1.8%	12.6%	0.0%	12.1%	5.1%	28.6%
Quartier	2.5%	19.8%	27.3%	7.6%	6.3%	4.0%	9.5%	22.9%

⁴⁴ <http://architekturverzeichnis.blogspot.com/2011/06/din-277-ermittlung-von-grundflachen-und.html>

4.2. Kühlcharakteristiken verschiedener Gebäudeanteile

Die Ursache für den Kühlbedarf ist meist eng mit der jeweiligen Nutzung und Funktion des Gebäudes verbunden. In einem Bildungs- und Forschungsquartier ist in der Regel eine Vielzahl an unterschiedlichen Nutzungen (siehe Abbildung 7) vertreten. Im vorliegenden Projekt werden davon mit Büro und Labor zwei in ihrer Charakteristik sehr unterschiedliche Nutzungsarten näher betrachtet. Der Serverbereich wird hier nicht näher betrachtet, da er sich in Laboren, nur in einer erhöhten Grundlast widerspiegeln würde.

Abbildung 7: Exemplarischer Verlauf der Kühllast (Büro und Labor) und der Heizlast des Gebäudes M



Gebäudeanteil: **Büro**

Der Kühlbedarf von Büroräumen hängt von gebäudebezogenen Faktoren (z.B. Fensterflächen, Verschattung) und nutzungsbezogenen Faktoren (z.B. Belegungsdichte, Nutzungszeiten, Nutzung von Geräten) ab. Zudem besteht ein eindeutiger zeitlicher Zusammenhang mit den klimatischen Bedingungen. Die Außenlufttemperatur und die solare Einstrahlung verursachen Schwankungen im Tagesverlauf Spitzenwerten um die Mittagszeit sowie jahreszeitliche Abhängigkeiten mit Spitzenwerten in den Sommermonaten.

Gebäudeanteil: **Labor**

Labore zeichnen sich einerseits durch einen Raumkühlungsbedarf aus, wie er auch in Büros vorkommt, haben aber zusätzlich einen prozessbedingten Kühlbedarf, der direkt von den ablaufenden Laborprozessen abhängt. In dem Referenz-Quartier sind diese Prozesse größtenteils forschungsgetrieben und ihre Intensität sowie zeitliche Struktur sind auf die jeweiligen Forschungsprojekte abgestimmt. Insgesamt ergibt sich über einen ganzen Forschungscampus eine Grundlast durch die Summe aller Einzelkühlanlagen, die durch starke, unregelmäßige Spitzenwerte ergänzt wird.

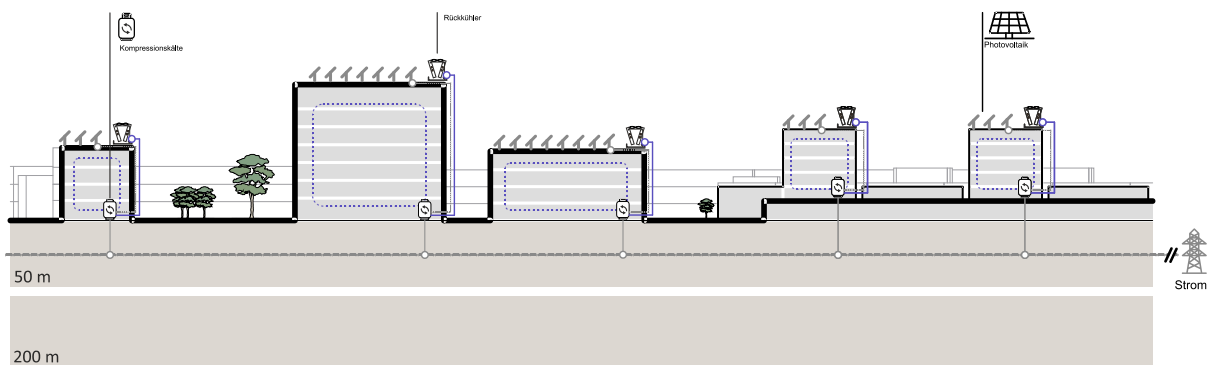
4.3. Strukturvarianten der Systemgestaltung

Ausgehend von einem dezentralen, d.h. gebäudebezogenen Ansatz zur Kälteerzeugung und PV-Stromnutzung, wird von Variante zu Variante, der Grad der energietechnischen Vernetzung, bis hin zu einer distrikt-zentralen Versorgungsstruktur gesteigert. Die Vernetzung in technischen Energieversorgungssystemen ist nicht ausschließlich durch technische Aspekte bestimmt, sondern spiegelt auch aktuelle und historisch gewachsene Verwaltungs- und Entscheidungsstrukturen wider. Die Notwendigkeit der Kommunikation zwischen den Teilsystemen sowie häufig auch eine wirtschaftliche Vernetzung, z.B. durch Abrechnungsprozesse im laufenden Betrieb und bei der Finanzierung der verbindenden Elemente, sind wesentliche Bestandteile dieser Systeme. Der Begriff „dezentral“ wird hier relativ und als Synonym für „pro Gebäude“ zur Beschreibung der Verteilung und Verwaltung der Systeme innerhalb einzelner Gebäude verwendet. Der Begriff „Kälte“ wird als Oberbegriff verwendet, um die schnelle Erfassung und das Verständnis der behandelten Technologie zu erleichtern.

Strukturvariante „Kälte dezentral – PV dezentral“

Diese Strukturvariante zeichnet sich durch einen konsequent dezentralen Ansatz aus, der davon ausgeht, dass jedes Gebäude ein eigenständiges Klimatisierungssystem besitzt. Diese Variante steht für den üblichen Fall, dass die Gebäude als eigenständige Verwaltungs- bzw. Nutzungseinheiten konfiguriert sind. Jedes Gebäude verfügt über eine Kompressionskältemaschine, einen Rückkühler am Dach, einen Pufferspeicher und falls möglich eine PV-Anlage, die beide mit anderen Gebäuden des Distrikts energietechnisch nicht in Verbindung stehen. Das einzige gemeinsame Element ist die Versorgung mit elektrischer Energie (Strom) aus dem übergeordneten Versorgungsnetz (Abbildung 8).

Abbildung 8: Symbolisierung Strukturvariante „Kälte dezentral – PV dezentral“

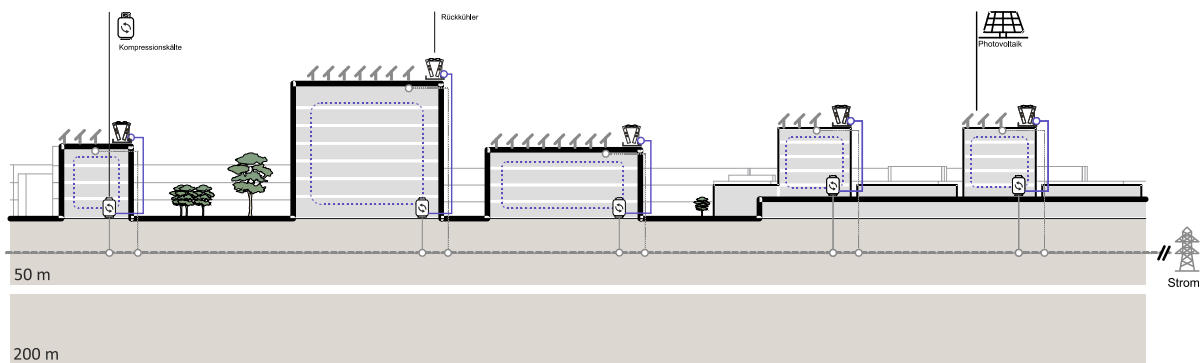


Die Integration von PV-Anlagen ist direkt abhängig von der verfügbaren Fläche innerhalb des Quartiers, da sie die maximal installierbare Leistung begrenzen. In einem dezentralen System ohne Verbundlösung können PV-Überschüsse einzelner Gebäude nicht effektiv innerhalb des Quartiers genutzt werden. Kühlsysteme müssen speziell für die individuellen Anforderungen jedes Gebäudes ausgelegt werden. Da die meisten Kühlsysteme fast ausschließlich im Teillastbereich betrieben werden, ist eine genaue Auslegung entscheidend, um eine Überdimensionierung zu vermeiden und die Energieeffizienz zu maximieren. Eine genaue Abstimmung zwischen Kühlbedarf und Energieverfügbarkeit ist notwendig, um einen optimalen Betrieb zu gewährleisten.

Strukturvariante „Kälte dezentral – PV im Verbund“

Diese Strukturvariante geht von gebäudeübergreifenden Verwaltungs- und Entscheidungsstrukturen zur Nutzung der photovoltaischen Anlagen aus (z.B. PV-Energiegemeinschaft). Sie gleicht der ersten Variante, mit dem Unterschied, dass der von den Photovoltaikanlagen erzeugte Strom gebündelt wird. Das bedeutet, dass der erzeugte Strom aller Photovoltaikanlagen den Kältemaschinen aller Gebäude gemeinsam zur Verfügung steht. Jedes Gebäude verfügt auch hier über eine Kompressionskältemaschine, einen Pufferspeicher und einen Rückkühler am Dach, die Kühlung für je ein Gebäude zur Verfügung stellen (Abbildung 9).

Abbildung 9: Symbolisierung Strukturvariante „Kälte dezentral – PV im Verbund“

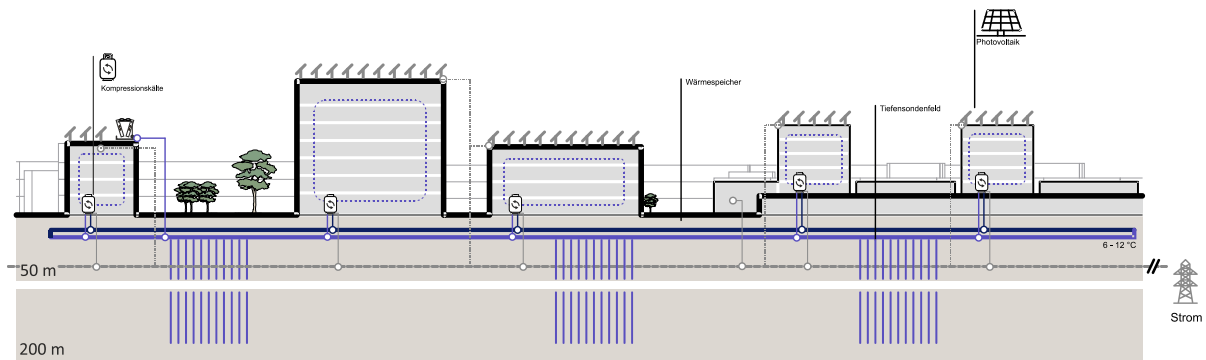


Durch die Vernetzung von PV-Anlagen können Lastspitzen und Energiebedarf effizienter gehandhabt werden. Die Vernetzung ermöglicht eine dynamische Anpassung und Verteilung der Energie zwischen den Gebäuden, je nach deren aktuellem Bedarf. Dies führt zu einer verbesserten Gesamteffizienz des Quartiers. Die koordinierte Planung und Installation der PV-Anlagen im Verbund ermöglichen eine strategischere Nutzung der verfügbaren Flächen. Der Verbund fördert die Energieautarkie des Quartiers, indem Überschüsse, die in einzelnen Gebäuden erzeugt werden, im Verbund verteilt und genutzt werden können. Dies trägt zur Verringerung der Abhängigkeit von externen Energiequellen und zur Stabilisierung der Energieversorgung bei. Durch die gemeinsame Nutzung und Verwaltung der PV-Anlagen können die Kosten für Installation, Wartung und Betrieb geteilt werden. Darüber hinaus können durch die größere Gesamtkapazität potenziell günstigere Einkaufskonditionen erzielt und finanzielle Anreize durch staatliche Förderungen effektiver genutzt werden.

Strukturvariante „Kälte und PV im Verbund“

Diese Strukturvariante geht weiter in Richtung einer zentralen Betriebsweise. Sie geht davon aus, dass am Distrikt ein zentrales Management zur Kühlung und zur Nutzung der PV-Anlagen existiert. Hier sind alle PV-Anlagen vernetzt und auch die einzelnen Kältemaschinen mit einem Leitungsnetz miteinander verbunden. Die einzelnen Kältemaschinen befinden sich, wie in den Varianten zuvor, in den einzelnen Gebäuden, sind jedoch mit einem Leitungsnetz verbunden. Die Gebäude decken ihren Kältebedarf aus dem verbindenden Kältenetz, in das die Kältemaschinen nach Bedarf sequentiell zugeschaltet werden (Abbildung 10).

Abbildung 10: Symbolisierung Strukturvariante „Kälte und PV im Verbund“

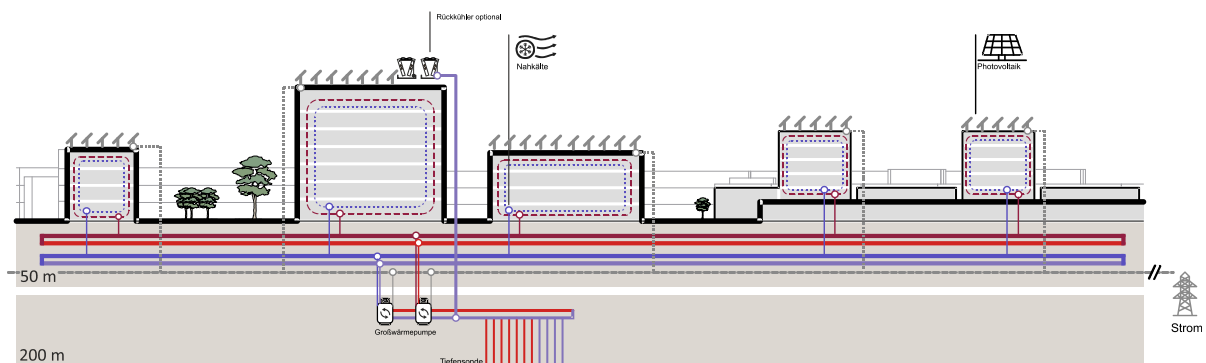


Die Integration von PV- und Kältesystemen im Verbund ermöglicht die direkte Nutzung von PV-Strom für den Betrieb der Kühlsysteme. Dies begünstigt die Energieeffizienz, da der größte Teil des Kühlbedarfs während der sonnigen Stunden anfällt, wenn die PV-Anlagen, am meisten elektrische Energie liefern. Die gemeinsame Nutzung von Energieerzeugungs- und -verbrauchsanlagen führt zu einer Senkung der Betriebskosten und kann eine koordinierte Neuanschaffung effizienterer und größerer Maschinen ermöglichen, wenn alte Kompressionskältemaschinen ausgemustert werden. Die Nutzung erneuerbarer Energien für die Kühlung trägt zur Verringerung der Umweltauswirkungen bei.

Strukturvariante „Kälte und Wärme zentral und PV im Verbund“

In der 4. Strukturvariante erfolgt die Wärme- und Kälteversorgung mittels einer zentral situierten Großwärmepumpe. Die Wärmepumpe nutzt ein Erdwärmesondenfeld, sowohl als Wärmequelle im Winterbetrieb und als Wärmesenke im Sommerbetrieb. Jedes Gebäude bezieht seinen Wärme- und Kältebedarf aus dem gemeinsamen, von der Großwärmepumpe versorgten, Netz. Auch hier steht die erzeugte elektrische Energie aller Photovoltaikanlagen den zentralen Wärmepumpen aller Gebäude gemeinsam zur Verfügung (Abbildung 11).

Abbildung 11: Symbolisierung Strukturvariante „Kälte und Wärme zentral und PV im Verbund“



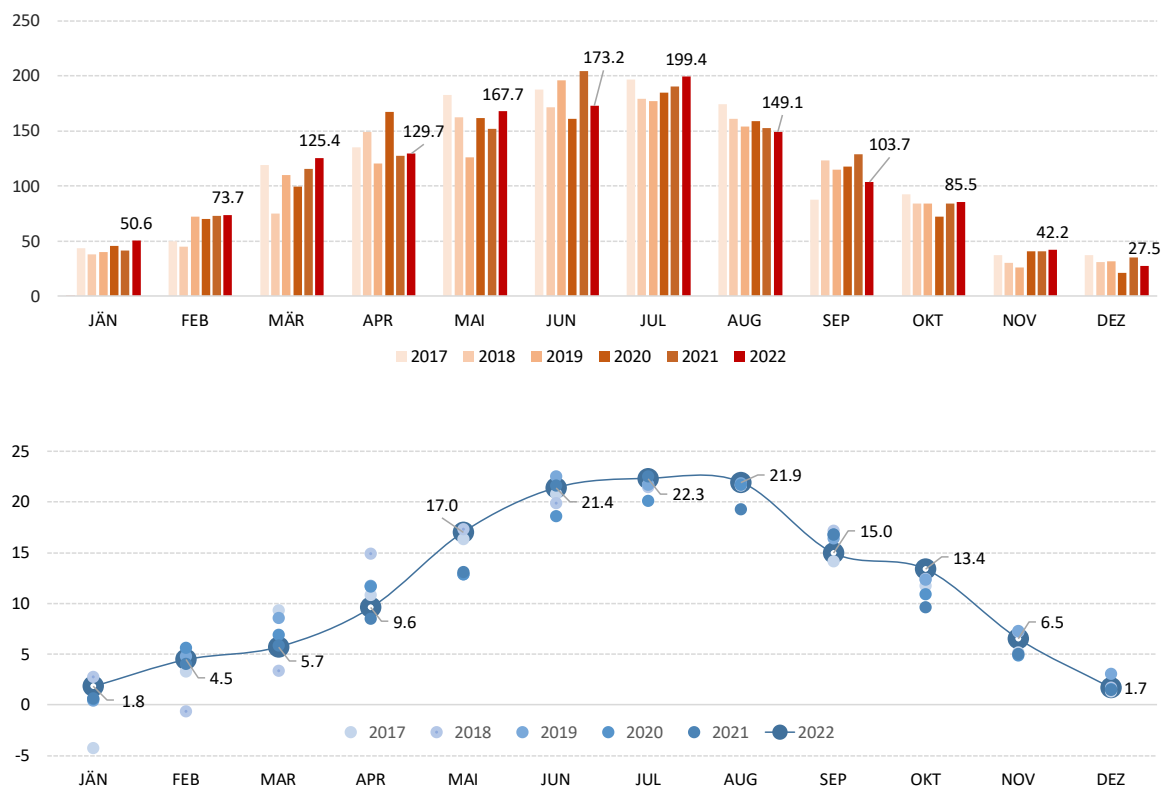
Die Kombination von PV-, Kühl- und Heizsystemen im Verbund erfordert ein fortschrittliches Energiemanagement, bei dem die Energie je nach Bedarf dynamisch zwischen den Systemen verteilt wird. Durch die Kopplung mit Wärmespeichersystemen (Pufferspeicher, Erdwärmesonden) können Energieüberschüsse aus der PV-Erzeugung effizient für Heizzwecke genutzt werden.

Die Verbundlösung ermöglicht nicht nur eine effiziente Energienutzung, sondern auch eine deutliche Reduzierung der Betriebs- und Wartungskosten. Durch die gemeinsame Infrastruktur und die zentrale Steuerung können Wartungseffizienzen realisiert und der Verwaltungsaufwand reduziert werden. Die integrative Nutzung von PV, Kälte und Wärme trägt wesentlich zur Reduktion der CO₂-Emissionen bei. Die gesteigerte Effizienz und der reduzierte Einsatz fossiler Brennstoffe führen zu einer verbesserten Umweltbilanz des Quartiers.

4.4. Klimatische Rahmenbedingungen

Außenlufttemperatur, Luftfeuchtigkeit und solare Einstrahlung, haben großen Einfluss auf den Energiebedarf eines Gebäudes. Aussagekräftige Analysen des Systemverhaltens und Bewertung von Energieverbrauch, und Effizienz können nur unter Berücksichtigung der jeweiligen klimatischen Rahmenbedingungen erfolgen. Als Basis stehen für den Standort Graz Messdaten der GeoSphere Austria [45] zur Verfügung. Abbildung 12 zeigt die in Graz in den Jahren 2017 bis 2022 gemessene Globalstrahlung auf die Horizontale (oben) und die mittlere Außenlufttemperatur (unten), in einer Auswertung nach Kalendermonaten. Derart werden die klimatischen Verhältnisse im Referenzjahr 2022 zu den vorgegangenen fünf Jahren in Relation gesetzt. Im Jahr 2022 ergibt sich als Summe der solaren Einstrahlung 1328 kWh/m² und ein Mittelwert der Außenlufttemperatur von 11.8 °C.

Abbildung 12: Gemessene solare Einstrahlung und mittlere Außenlufttemperatur der Jahre 2017-2021 und des Referenzjahres 2022 am Standort Graz – Datenquelle: GeoSphere Austria

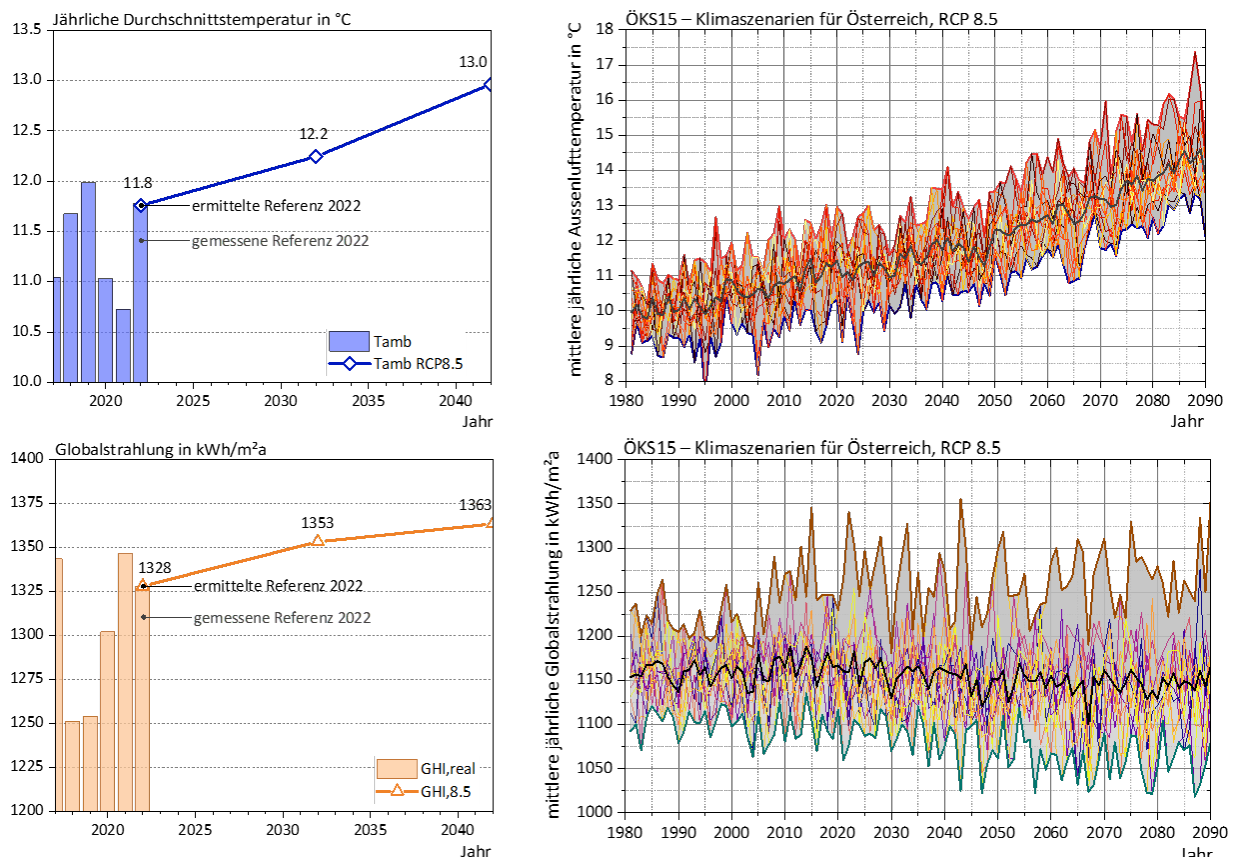


⁴⁵ GeoSphere Austria (2023): Klimadaten Graz 2017–2022. Datenabruf über das ZAMG Data Hub. Online verfügbar unter: <https://data.hub.zamg.ac.at/> [abgerufen am 01.06.2023]

Auf Basis der Messwerte des Jahres 2022 wurde mittels Klimadatengenerator Meteonorm 8 [46] ein in Stunden aufgelöster Klimadatenatz generiert. Von diesem ausgehend konnten mit Meteonorm Klimadaten zukünftiger Jahre, basierend auf Entwicklungspfaden der globalen Treibhausgas-Emissionen, generiert werden. Gewählt wurde das Szenario „Representative Concentration Pathways 8.5 (kurz: RPC8.5), des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) [47] und das Jahr 2042 als Referenzjahr für die nähere zukünftige Entwicklung. Demnach steigt die solare Einstrahlung von einer Jahressumme von 1328 kWh/m²a im Jahr 2022 auf 1363 kWh/m²a und die mittlere Außenlufttemperatur im selben Zeitraum von 11.8 °C auf 13.0 °C (Abbildung 13, links).

Aus einem Vergleich mit den in ÖKS15 publizierten Klimaszenarien für Österreich“ [48] kann abgelesen werden, dass die derart prognostizierten Außenlufttemperaturen nahe der Obergrenze der Schwankungsbreite der ÖKS15-Modelle (für das Jahr 2042: 12.96 °C) liegen. Die solare Einstrahlung liegt hingegen deutlich über der Obergrenze der Schwankungsbreite (2042: 1217 kWh/m²/a). Vergleicht man diese mit Obergrenzen des ÖKS 15 zeitlich naheliegender Jahre (2043: 1356 kWh/m²/a, 2044: 1300 kWh/m²/a), dann erscheint die Differenz zu der mit Meteonorm erstellten Prognose, deutlich geringer (Abbildung 13, rechts).

Abbildung 13: Solare Einstrahlung und mittlere Außenlufttemperatur der Referenzjahre 2022 und 2042



⁴⁶ <https://meteonorm.com/meteonorm-version-8>

⁴⁷ Riahi, K. et al. (2011). RCP 8.5 – A scenario of comparatively high greenhouse gas emissions. *Climatic Change*, 109(1–2), 33–57. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0149-y>

⁴⁸ Leuprecht, A., & Truhetz, H. (2016). ÖKS15 Bias Corrected EURO-CORDEX Models, Version 2 [Datensatz]. GeoSphere Austria / CCA Data Centre. <https://doi.org/10.60669/b37q-jd39>

4.5. Prognose des Energieertrages der PV-Anlagen

Am Ende des Jahres 2022 waren im Referenz-Quartier sieben PV-Anlagen mit einer Modulfläche von 5327 m² und einer Peak-Leistung von 966 kWp in Betrieb. Wären diese Anlagen schon zu Beginn des Jahres einsatzbereit gewesen, dann hätte mit diesen Anlagen, wie in Abbildung 14 in der ersten Zeile von oben dargestellt (PV-Variante 01 = aktuell), mit einem Ertrag von etwa 1016 MWh gerechnet werden können. Von dieser Situation bzw. der PV-Variante 2 (= Ausbau in rot) ausgehend, wurden mit Modulfläche, Ausbaufächen (Dach bzw. Fassade), eingesetzter Technologie, und Klimaprognosen wesentliche Aspekte variiert, um die jeweiligen Änderungen in Peak-Leistung und Ertrag quantifizieren zu können.

Abbildung 14: Szenarien der PV-Ernte, „mono“ steht für monokristallin und „poly“ für polykristallin

Benennung	Anlagenkonfiguration				Klima-Prognose	Energie			Änderung
	Ausbau	Modulfläche	Technologie	Wirkungsgrad		Leistung PV	Ertrag	Ertrag spez.	
		m ²		%		kWp	MWh	kWh/kWp	%
PV-Variante 01	Dach akt	5327	poly & mono	18.1	RCP85 2022	966	1016	1051	±0
PV-Variante 02	Dach ver	7555	poly & mono	19.7	RCP85 2042	1427	1539	1079	±0
PV-Variante 03	Dach ver	7555	poly & mono	19.7	RCP85 2022	1427	1512	1059	-1.8
PV-Variante 04	Dach	5305	mono, bifacial 10 %	21.4	RCP85 2022	1140	1210	1062	19.1
PV-Variante 05	Dach	7542	mono, bifacial 10 %	21.4	RCP85 2042	1620	1759	1086	14.3
PV-Variante 06	Dach	5377	mono, bifacial 30 %	25.9	RCP85 2022	1391	1464	1053	44.1
PV-Variante 07	Dach	7592	mono, bifacial 30 %	25.9	RCP85 2042	1964	2108	1073	39.5
PV-Variante 08	3 % Fassade	2667	mono	21.5	RCP85 2022	573	447	779	44.0
PV-Variante 09	6 % Fassade	5330	mono	21.5	RCP85 2022	1145	893	780	87.9
PV-Variante 10	3 % Fassade	2667	mono	21.5	RCP85 2042	573	463	808	30.1
PV-Variante 11	6 % Fassade	5330	mono	21.5	RCP85 2042	1145	927	809	60.2

Ausbau der Modulfläche auf Dächern

Ergänzend zu den im Jahr 2022 bereits installierten Anlagen waren im Jahr 2022 weitere Anlagen in Planung, mit denen die noch verblieben für PV-Anlagen geeigneten Dachflächen des Distrikts genutzt werden sollten. Die für die Jahre 2024 und 2025 geplante Umsetzung dieser Anlagen würde die Gesamtmodulfläche auf 7555 m² vergrößern, wodurch ein Jahresertrag von 1512 MWh zu erwarten ist (PV-Variante 03 = verdichtet).

Ergänzung von vertikaler PV in der Fassade

Die vorhandenen Gebäude weisen eine intensive Nutzung bzw. Verbauung der Dachflächen auf, wodurch die für PV-Anlagen zur Verfügung stehenden Flächen deutlich limitiert sind. Im Mittel über alle Gebäudedächer können 29.7 % der Flachdachfläche als Modulfläche genutzt werden. Um einen höheren Anteil des Stromverbrauchs abdecken zu können wurde die zusätzliche Installation von vertikaler fassadenintegrierter PV untersucht. Die Schätzung des potenziellen Stromertrags wurde unter Verwendung von aktivierbaren Fassadenflächen, basierend auf V. Quaschnig [49] (2000 – 3 %) und M. Kaltschmitt [50] (2013 – 6 %) durchgeführt. Die Ergänzung der verfügbaren PV-Flächen um 3 bzw. 6 % an Fassade der Gebäude (je 1/3 Süd, West und Ost angeordnet), kann den Ertrag, je nach Klimaszenario, um 447 bis 927 MWh/a erhöhen.

⁴⁹ Quaschnig Volker (2000): Systemtechnik einer klimaverträglichen Elektrizitätsversorgung in Deutschland für das 21. JHD

⁵⁰ Kaltschmitt Martin (2013): Erneuerbare Energien – Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte. Berlin, Heidelberg.

Klimatische Änderungen bis zum Jahr 2042

Um Szenarien für das Jahr 2042 zu erstellen, wurden die im „Representative Concentration Pathway RCP 8.5“ des Weltklimarates IPCC prognostizierten Auswirkungen der Klimaentwicklung herangezogen und ein entsprechender Klimadatensatz generiert (siehe Kapitel 4.4). Die Auswirkungen sind durch einen Vergleich der Erträge, die auf Basis der klimatologischen Prognose RCP85 2022 entstehen, mit den Erträgen, die auf der Prognose RCP85 2042 beruhen (Spalte Klimaprognose). Es ist zu erkennen, dass Varianten auf der Basis von RCP85 2042 immer einen etwas höheren Ertrag abwerfen, was auf die geringfügig höhere solare Strahlungsleistung zurückzuführen ist (siehe Abbildung 15).

Abbildung 15: Verwendete Module und Wechselrichter der in den Strukturvarianten hinterlegten PV-Anlagen

Verortung										Wechselrichter					
Kategorie	Anzahl	Fläche	Flächentyp	Typ	Fläche m ²	Anzahl	Anzahl	Anzahl	Anzahl	Anzahl	Anzahl	Anzahl	Anzahl	Anzahl	Anzahl
B	1	182	Dach	280 Wp poly	1.670	109	57	10	280						
	2	182	Dach	280 Wp poly	1.670	109	237	10	280	61					1
E	1	698	Dach	315 Wp poly	1.662	420	0	0	315						
	2	655	Dach	315 Wp poly	1.662	394	64	15	315						
J	3	655	Dach	315 Wp poly	1.662	394	244	15	315	381					6
	1	943	Dach	235 Wp poly	1.637	576	151	5	235	135	1		7		
PV- Ausba-	2	848	Dach	325 Wp mono	1.683	504	331	12	325	164					3
	3	552	Dach	325 Wp mono	1.683	328	57	10	325	107					2
A	1	128	Dach	325 Wp mono	1.683	76	57	10	325						
	2	135	Dach	325 Wp mono	1.683	80	238	10	325	51					1
K	1	162	Dach	325 Wp mono	1.683	96	57	10	325						
	2	192	Dach	325 Wp mono	1.683	114	238	10	325	68					2
M	1	468	Dach	380 Wp mono halfcut	1.822	255	57	10	380						
	2	468	Dach	380 Wp mono halfcut	1.822	255	238	10	380	194			2		2
F	1	59	Dach	380 Wp mono halfcut	1.822	32	30	10	380						
	2	59	Dach	380 Wp mono halfcut	1.822	32	210	10	380	24		2			
D	1	187	Dach	380 Wp mono halfcut	1.822	102	57	10	380						
	2	187	Dach	380 Wp mono halfcut	1.822	102	238	10	380	78					2
PV- Ausba-	1	70	Dach	380 Wp mono halfcut	1.822	38	57	10	380						
	2	70	Dach	380 Wp mono halfcut	1.822	38	238	10	380	29		2			
H	1	189	Dach	380 Wp mono halfcut	1.822	103	57	10	380						
	2	189	Dach	380 Wp mono halfcut	1.822	103	238	10	380	78					2
Summe	3	139	Dach	380 Wp mono halfcut	1.822	76	57	10	380						
	4	139	Dach	380 Wp mono halfcut	1.822	76	238	10	380	58					1
AB. 1	5331 m ²					3200 #					966 kWp				
AB. 2	2224 m ²					1212 #					461 kWp				
Summe	7555 m ²					4412 #					1427 kWp				

Verbesserung der Wirkungsgrade

Im Hinblick auf ein Szenario, das im Jahr 2042 angesetzt ist, muss in Betracht gezogen werden, dass bis dahin technologische Verbesserungen des Wirkungsgrades umgesetzt werden können. Stellvertretend werden unterschiedliche Arten von bifacialen PV-Modulen mit unterschiedlichen Wirkungsgraden berücksichtigt. Ersetzt man die PV-Module des Szenarios 2042 gegen aktuell sehr gute bifaciale Module mit 21.4 bis 25.9 % Wirkungsgrad, so kann der Ertrag der Anlage um 19.1 bis 39.5 % erhöht werden.

In den Strukturvarianten verwendete PV-Konfigurationen

Für die PV-Variante 01, die der Ausbaustufe 1 des Jahres 2022 entspricht, werden die aktuellen Module und Flächen verwendet, die bereits im Referenz-Quartier genutzt werden. Dies entspricht einer PV-Modulbruttofläche von 5331 m², 3200 Modulen und einer Spitzenleistung von 966 kW_p. Hierbei kommen vier verschiedene Module von unterschiedlichen Herstellern zum Einsatz. In der zweiten verdichteten Ausbaustufe (PV-Variante 02 bzw. 03), die dem Kalenderjahr 2042 entspricht, werden alle ausgewiesenen Dachflächen mit effizienteren PV-Modulen aus monokristallinen Halbzellen belegt. Fassadenflächen werden in der verdichteten Ausbaustufe noch nicht genutzt. Dies entspricht einer Erweiterung der Bruttofläche um 1921 m², 1212 Modulen und einer zusätzlichen Spitzenleistung von 461 kW_p. Ergänzend zu den möglichen Erträgen unterschiedlicher PV-Varianten aus der Abbildung 14, sind nun in der Abbildung 15 die relevanten technischen Informationen hinsichtlich der Verortung der Anlagen auf den Gebäuden und deren Dimensionierung ausgewiesen.

5 Modellierung der urbanen Kühlinfrastruktur

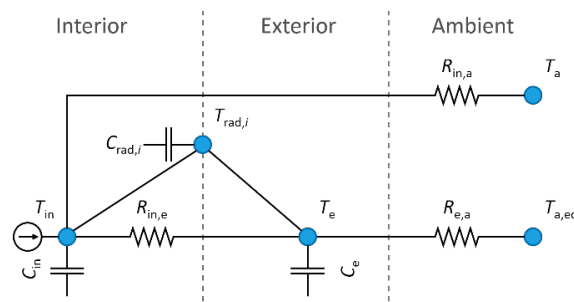
Bearbeitung: Institut für Wärmetechnik, EQUA Solutions AG

Um komplexe Simulationsmodelle realitätsnah zu entwickeln und deren Aussagekraft sicherzustellen müssen deren Ergebnisse validiert werden. Für die Simulationsmodelle von COOL-QUARTER-PLUS wurden auf Messdaten basierende Validierungen der Teilmodelle durchgeführt. Dieser methodische Ansatz ermöglicht eine genaue Bewertung der Leistung und Effizienz der Komponenten. Dazu wurden alle relevanten Datenpunkte erfasst, analysiert und, soweit möglich, Bilanzen für die jeweiligen Komponenten erstellt, die Key Performance Indicators (KPIs) ermittelt und mit dem Simulationsmodell verglichen. Als Ergebnis liegen validierte Komponentenmodelle der Gebäude, der Erdwärmesonden, der Wärmepumpe sowie der Photovoltaikanlagen vor.

5.1. Gebäudemodell

Das relevante Submodell des Gebäudes liegt in zwei unterschiedlichen Detaillierungsgraden vor. So wurden vor allem im Rahmen der Masterarbeit [51] detaillierte Simulationsmodelle in IDA ICE für mehrere Gebäude des Referenz-Quartiers erstellt. Jedoch zeichnet sich im Verlauf des Projektes ab, dass die Gesamtsimulation des Referenz-Quartiers besser mit reduzierter Modellierungsdetaillierung gelingen konnte. Diesbezüglich wurde ein eigenes RC-Grey-Box-Modell erstellt und validiert [52]. Dieses Gebäudemodell wurde zusätzlich noch mit einem weiteren kapazitiven Knoten für das Heiz- bzw. Kühlsystem erweitert. Das Simulationsmodell für jedes Gebäude besteht aus drei Kapazitäten und drei Einzelwiderständen. Die schematische Darstellung ist in (Abbildung 16) ersichtlich.

Abbildung 16: Schematische Darstellung des Gebäudemodelles (3R3C)



Wobei T_a die Außenlufttemperatur, $T_{a,eq}$ die äquivalente Außenlufttemperatur, C_e die Kapazität der thermisch aktiven Speichermasse, T_e die Temperatur der Speichermasse, C_{in} die Kapazität des Luftknotens einschließlich der Möbel, T_{in} die Raumlufttemperatur, $R_{in,e}$ der Wärmeübergangswiderstand zwischen den beiden Knotentemperaturen, $R_{in,a}$ der Wärmeübergangswiderstand zwischen der

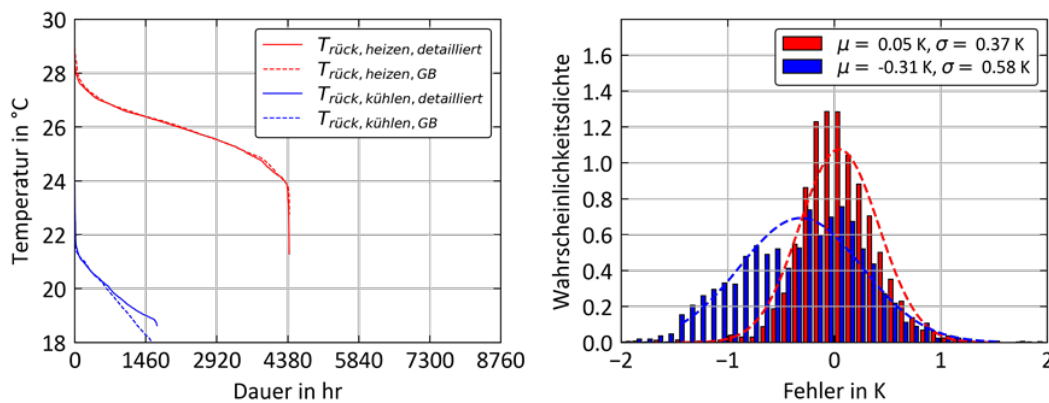
⁵¹ Mörth, Michael (2022): Thermisch-elektrische Modellierung und Validierung eines Quartier-Energiesystems am Beispiel des Innovation District Inffeld, Masterarbeit am Institut für Wärmetechnik der TU Graz.

⁵² Mörth, M., Heinz, A., Heimrath, R., Edtmayer, H., Mach, T., Kaisermayer, V., Gölls, M., & Hochenauer, C. (2025). Grey-Box Model for Efficient Building Simulations: A Case Study of an Integrated Water-Based Heating and Cooling System. Buildings, 15(11), 1959. <https://doi.org/10.3390/buildings15111959>

Außentemperatur und der Raumlufttemperatur und $R_{e,a}$ der Wärmeübergangswiderstand zwischen der thermisch aktiven Speichermasse und der äquivalenten Außenlufttemperatur ist.

C_{rad} ist die Kapazität des Radiatorsystems und T_{rad} die entsprechende Temperatur. Die Laufvariable i gibt an, in wie viele Segmente das Radiatorsystem unterteilt ist. Für die Einzelwiderstände wurden physikalisch-mathematische Beschreibungen hinzugefügt, um das Heizungssystem sowie Innenraumtemperaturen korrekt abbilden zu können. Das Modell wurde durch ein umfangreiches Validierungsverfahren, mithilfe eines detaillierten Gebäudemodells und anhand von Messdaten bestätigt. Aus der Validierung zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung bei den simulierten Rücklauftemperaturen und der Raumlufttemperatur (Abbildung 17). Darüber hinaus kann das Modell monatliche und jährliche Energiemengen sehr genau vorhersagen. Dennoch ist zu beachten, dass die Verwendung des Modells für Spitzenlasten begrenzt ist. Dies liegt vor allem an der vereinfachten Darstellung der solaren Einstrahlung und den komplexen Wechselwirkungen zwischen Nutzer: innen und Fensterlüftung.

Abbildung 17: Simulierte Rücklauftemperaturen im Heiz- und Kühlbetrieb (links) und die Differenz zwischen dem detaillierten und dem vereinfachten Gebäudemodell als Histogramm (rechts) (in Anlehnung an [59])



Da für die Validierung der Gebäude ein ganzes Kalenderjahr benötigt wird und die Gebäudemodelle hinsichtlich des Heiz- und Kühlbedarfs validiert werden, wurde aufgrund der Datenlage das Kalenderjahr 2021 gewählt. Liegt für das Jahr 2021 kein Kühlbedarf als Messwert vor, wird der Kühlbedarf für die Gebäudekühlung für das Jahr 2021 mit Gleichung 1 berechnet:

$$KEB_{Geb,i,j,2021} = (KEB_{Sum,i,j,2023} - KEB_{Lab,i,j,2023}) \cdot \frac{KGT_{2021}}{KGT_{2023}} \quad \text{Gleichung 1}$$

Hierbei ist KEB der Kühlenergiebedarf im Monat j für die Gebäudekonfiguration i und KGT die Kühlgradtage im entsprechenden Kalenderjahr. Die KGT pro Monat werden in Anlehnung der ASHRAE Fundamentals 2017 [53] berechnet:

$$KGT_{18.3} = \sum_{i=1}^N (\bar{T}_i - 18.3)^+ \quad \text{Gleichung 2}$$

⁵³ ASHRAE American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. ASHRAE Handbook - Fundamentals. Atlanta, GA: ASHRAE, 2017.

N ist die Anzahl der Tage im jeweiligen Monat, 18.3 die Referenztemperatur, bei der die KGT berechnet werden, und \bar{T}_i das arithmetische Mittel der Tagestemperatur. Das hochgestellte + bedeutet, dass nur positive Werte berücksichtigt werden. Das Jahr 2023 hat 300 KGT und das Jahr 2021, 342 KGT.

Der berechnete Kühlenergiebedarf pro Monat ist die Summe aus der Gebäudekühlung und dem Kühlenergiebedarf für den Laborbetrieb. Der Kühlenergiebedarf für die Laboratorien wird über die Monate als konstant angenommen und in Zeiten ermittelt, in denen eine reine Gebäudekühlung ausgeschlossen werden kann (d.h. Dezember bis Februar).

Die Gebäude wurden mit dem gemessenen Kühl- und Heizenergiebedarf von Abbildung 27 und Abbildung 28 kalibriert. Dabei wurde für den Heizenergiebedarf der Variationskoeffizient des mittleren quadratischen Fehlers auf monatlicher Basis verwendet. Der Kühlenergiebedarf wurde mit dem normierten mittleren Fehler, gemäß ASHRAE Guideline 14-2014 [54], kalibriert. Der Kühlenergiebedarf wurde nicht auf den Variationskoeffizienten kalibriert, da einerseits keine saubere Trennung zwischen dem Kühlenergiebedarf für Labor und Gebäude möglich war und andererseits die genaue Regelung der Kältefreigabe für die einzelnen Gebäude sehr unterschiedlich ist und auch nicht in allen Gebäuden automatisiert geregelt wird. In Abbildung 18 sind die Ergebnisse der statistischen Kennzahlen der Kalibrierung dargestellt.

Abbildung 18: Statistische Kennzahlen für Heizen und Kühlen der kalibrierten Modelle

Gebäude	Heating	Heizen	R2	Cooling	Kühlen	R2
	CV(RMSE)	NMBE		CV(RMSE)	NMBE	
-	%	%	-	%	%	-
A	10.83	-0.13	0.99	42.17	-0.60	0.94
B	15.74	0.40	0.97	45.71	-0.15	0.91
C	11.10	-1.40	0.98	28.20	-0.77	0.97
D	24.31	0.29	0.94	49.42	0.44	0.89
E	14.04	-0.05	0.97	31.46	0.52	0.96
F	14.37	-0.80	0.97	76.72	0.24	0.83
G	6.71	1.57	0.99	48.14	0.54	0.92
H	5.92	-0.76	1.00	19.31	-0.16	0.98
I	24.27	-0.12	0.94	22.57	-0.16	0.98
J	14.20	0.26	0.98	28.78	-0.22	0.97
K	10.48	-0.52	0.99	55.04	0.60	0.90
L	11.78	0.60	0.98	0.00	0.00	0.00
M	28.35	-0.02	0.90	38.77	-0.43	0.93
N	17.87	-0.76	0.96	29.77	-0.21	0.96

Für das alle 14 Gebäude des Referenz-Quartiers werden entsprechende Nutzungsprofile erstellt. Dabei wurde allen verwendeten Nutzflächen (siehe auch Abbildung 6) eine Nutzungsart nach SIA 2024:2021 zugeordnet. Anschließend werden die Zeitprofile und Lasten für Belegung, elektrische Geräte bzw. Prozessanlagen und Beleuchtung entsprechend den prozentualen Anteilen zu einer Wärmelast zusammengefasst und diese den Innenräumen aufgeprägt.

⁵⁴ ASHRAE Guideline 14-2014: Measurement of Energy, Demand and Water Savings, American Society of Heating, Ventilating, and Air Conditioning Engineers, Atlanta, 2014.

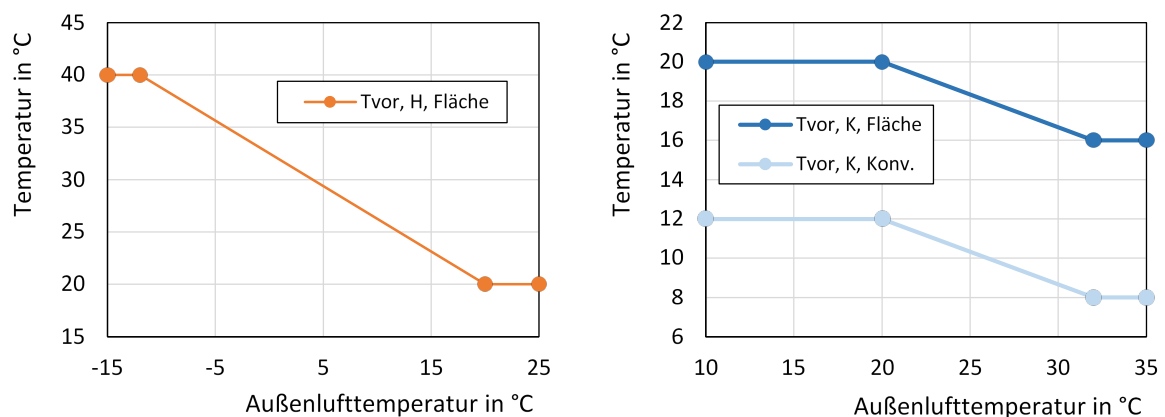
Die in Realität nutzungsbestimmte Regelung der Verschattungseinrichtungen wird durch ein Regelwerk abgebildet. Beispielsweise ist deren Aktivierung an die Anwesenheit von Personen geknüpft, sofern die solare Einstrahlung 250 W/m^2 und die Raumlufttemperatur über 23.8 °C überschritten werden.

Ebenso ist die in Realität nutzungsbestimmte Regelung der Fensterlüftung durch ein Regelwerk abgebildet. Das Gebäudemodell wird kontinuierlich mit frischer Außenluft mit einem Luftwechsel von 0.5 h^{-1} bei Anwesenheit von zumindest einer Person versorgt. Zusätzlich kann der Luftwechsel um 2.0 h^{-1} erhöht werden, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind:

- Raumtemperatur über 24.0 °C (23.8 °C)
- Mindestens eine Person ist im Gebäude anwesend
- die Temperaturdifferenz zwischen Außenluft und Raumtemperatur ist größer als 2 K
- Der gleitende 24-Stunden-Mittelwert der Außenlufttemperatur ist größer als 12.0 °C (11.8 °C).

Die maximal mögliche Kühl- und Heizleistung wird aus der gegebenen Infrastruktur und aus den Messdaten abgeleitet. Somit wird die maximal übertragbare Leistung durch die Auslegungsleistung des Wärmetauschers definiert. Die Wärmeversorgung erfolgt bei allen Gebäuden über eine Flächenheizung. Die Kälteversorgung erfolgt für die Gebäude B, D, H, I, M und N über eine Flächenkühlung, die anderen Gebäude werden über Gebläse-Konvektoren gekühlt. Im gegebenen Kontext liegt der wesentliche Unterschied zwischen den Wärme- bzw. Kälteabgabesystemen in den jeweiligen Temperaturniveaus des Vorlaufs. Abbildung 19 zeigt die definierten Vorlauftemperaturen in Abhängigkeit von der Außenlufttemperatur.

Abbildung 19: Vorlauftemperaturen in Abhängigkeit von der Außenlufttemperatur für Flächenheizung (links), Flächenkühlung (rechts) und erforderliche Vorlauftemperaturen für Gebläse-Konvektoren (rechts).



Die Heizfreigabe erfolgt, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind (Abschaltkriterien in Klammern)

- Der gleitende 24-Stunden-Mittelwert der Außenlufttemperatur ist kleiner als 15.0 °C (14.5 °C)
- Der gleitende 2-Stunden-Mittelwert der Außenlufttemperatur ist kleiner als 17.75 °C (18.25 °C)

Die Kühlfreigabe erfolgt, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind (Abschaltkriterien in Klammern)

- Der gleitende 24-Stunden-Mittelwert der Außenlufttemperatur ist größer als 16.5 °C (16.0 °C)
- Der gleitende 2-Stunden-Mittelwert der Außenlufttemperatur ist größer als 22.25 °C (21.75 °C)

Heiz- und Kühlbedarf des Untersuchungsgebietes

Auf Grundlage der oben dargestellten Zusammenhänge wurde ein Simulationsmodell entwickelt, das die Gebäude des Untersuchungsgebietes abbildet, die über das Wärmenetz bzw. das Kältenetz versorgt werden. Abbildung 20 zeigt im oberen Diagramm den Heizleistungsverlauf über das Simulationsjahr und im unteren Diagramm die entsprechende Jahresdauerlinie, an der die Häufigkeit des Auftretens unterschiedlicher Lastspitzen abgelesen werden kann. Die farbliche Zuteilung zu den einzelnen Gebäuden (A bis M) gibt einen Eindruck über die Verteilung der gesamten Heizleistung auf die einzelnen Gebäude. Die Auswertung zeigt, dass in ca. 5000 Stunden eines Jahres (8760 Stunden hat ein ganzes Simulationsjahr) Heizleistung benötigt wird. Abbildung 21 zeigt in Äquivalenz dazu die Kühlleistung, die in ca. 150 Stunden des Jahres benötigt wird.

Abbildung 20: Heizlast im Lastverlauf (oben) und als Jahresdauerlinie (unten) für alle Gebäude die am lokalen Nahwärmenetz hängen für die Variante 01K_B_2022_akt (Jahr 2022)

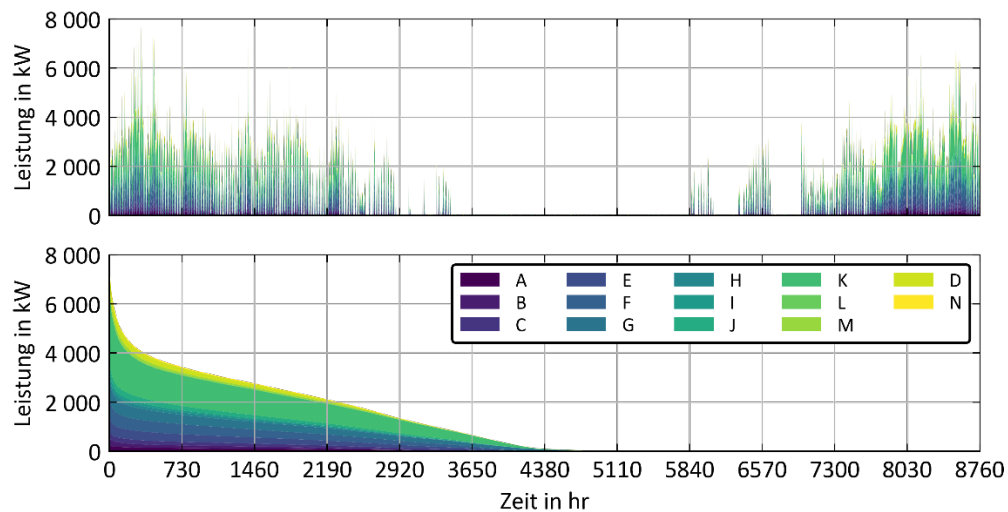
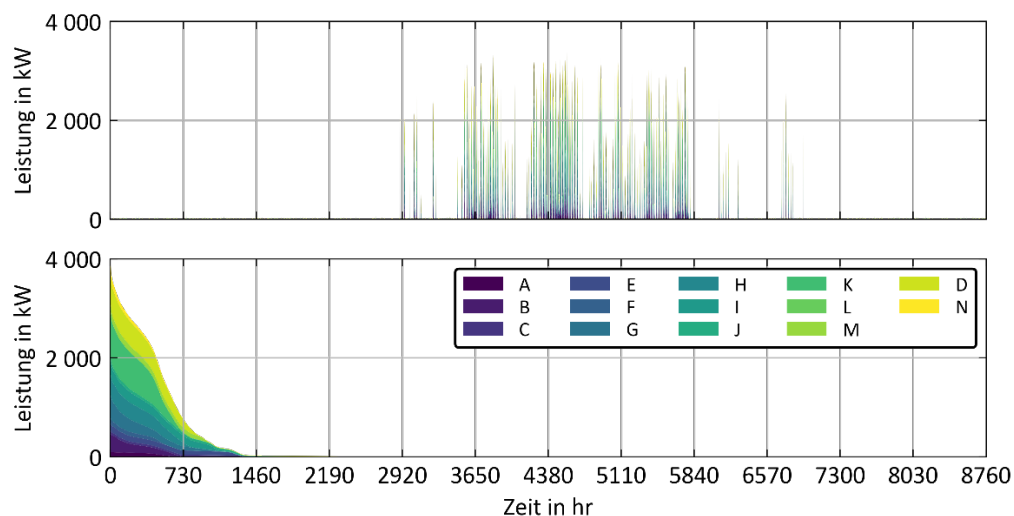


Abbildung 21: Kühllast im Lastverlauf (oben) und als Jahresdauerlinie (unten) für alle Gebäude die am lokalen Nahkältenetz hängen für die Variante 01K_B_2022_akt (Jahr 2022)



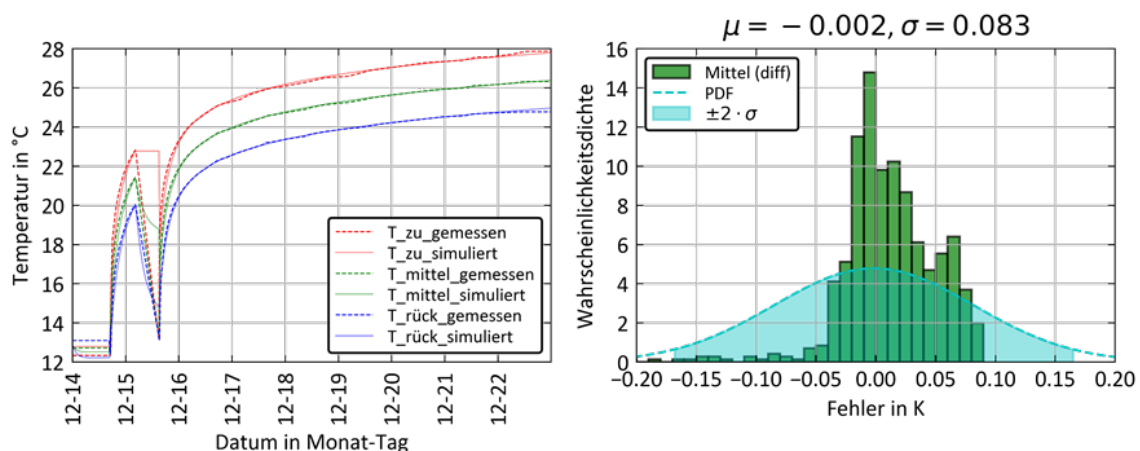
5.2. Photovoltaische Anlagen

Die Berechnung des Ertrages elektrischer Energie aus den PV-Anlagen wurde im Simulationsprogramm Polysun^[55] vorgenommen. Polysun ist ein vielfach validiertes und bewährtes Tool für derartige Bewertungen. Ergänzend wurden Simulationswerte von drei realen Anlagen im Referenz-Quartier mit Ergebnissen aus detaillierten IDA ICE Simulationsmodellen und mit Ergebnissen aus Polysun verglichen^[56]. Es zeigten sich eine gute Übereinstimmung zwischen den Ergebnissen aus IDA ICE und Polysun. Die in den Szenarien verwendeten PV-Konfigurationen zeigt Kapitel 4.5.

5.3. Erdwärmesonden

Die effiziente Nutzung geothermischer Energie durch Erdwärmesonden (EWS) ist von entscheidender Bedeutung für nachhaltige Heiz- und Kühltechnologien. Das geothermische Potenzial von EWS wird jedoch von einer Vielzahl von Faktoren beeinflusst, darunter geologische Eigenschaften, die geometrische Konfiguration des Sondenfeldes und die thermophysikalischen Eigenschaften des Untergrunds. Um detaillierte Simulationsmodelle für Erdsondenfelder zu entwickeln, ist eine genaue Bewertung dieser Eigenschaften erforderlich. Der Thermal Response Test (TRT) gilt als anerkanntes Verfahren zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit des Bodens und anderer relevanter Parameter. In COOL-QUARTER-PLUS wurde ein Erdwärmesondenmodell eines TRT-Tests (durchgeführt im Referenz-Quartier) kalibriert und validiert. Dabei konnten sowohl die gemessenen als auch die simulierten Temperaturverläufe analysiert und optimiert werden, um eine bestmögliche Übereinstimmung zu erzielen. Die Optimierung erfolgte mithilfe eines Algorithmus, der es ermöglichte, die anpassbaren Parameter des Modells systematisch zu variieren und die Abweichungen zwischen Messung und Simulation zu minimieren. Die erforderlichen thermophysikalischen Eigenschaften des Untergrunds werden aus verschiedenen Quellen sowie aus der internen Dokumentation des durchgeführten TRT-Tests bezogen. In Abbildung 22 werden die resultierenden Temperaturverläufe und die Abweichung zwischen gemessener und simulierter mittlerer Temperatur gezeigt.

Abbildung 22: Gemessene und simulierte Temperaturverläufe der TRT-Messung aus dem Jahr 2009, sowie die Darstellung der Differenz zwischen simulierter und gemessener Temperatur mit einem Histogramm



⁵⁵ Polysun V2023.11: Vela Solaris AG, Winterthur, <https://www.velasolaris.com/>.

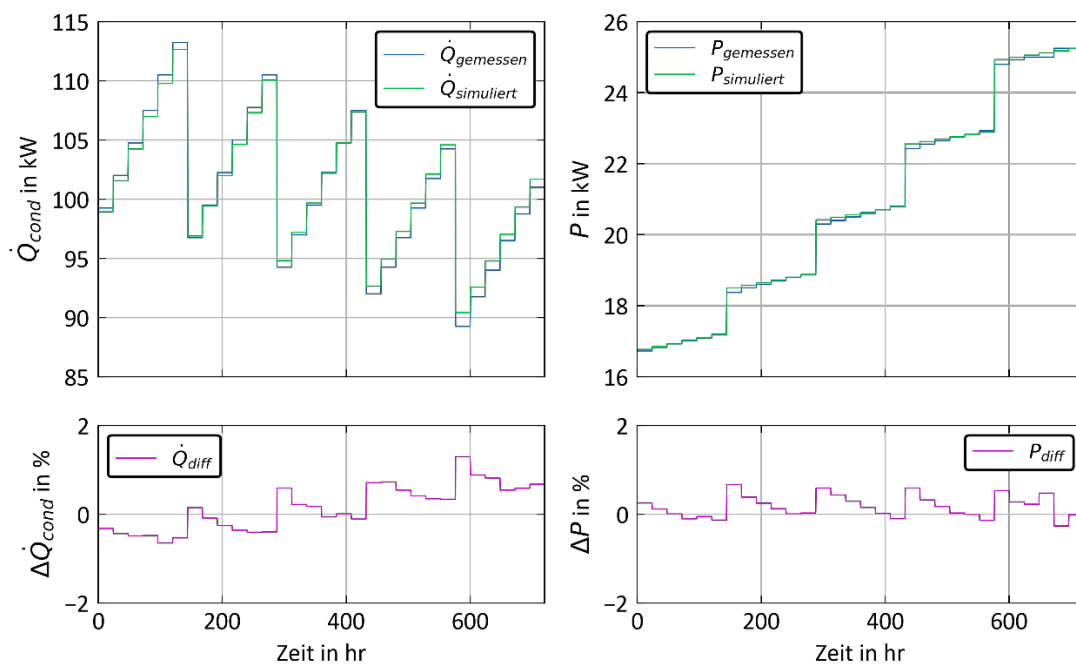
⁵⁶ Mörth, Michael (2022): Thermisch-elektrische Modellierung und Validierung eines Quartier-Energiesystems am Beispiel des Innovation District Inffeld, Masterarbeit am Institut für Wärmetechnik der TU Graz.

Auf der rechten Seite ist die Abweichung von der Messung in Form eines Histogramms dargestellt. Es zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung, wobei die Differenz der mittleren Temperatur der Erdwärmesonden vom Modell nur minimal überschätzt wird.

5.4. Kompressionskältemaschinen bzw. Wärmepumpen

Das verwendete Simulationsmodell der Verdichterleistung in IDA ICE für die Kältemaschine bzw. Wärmepumpe basiert auf einem Polynom gemäß der Norm DIN EN 12900 [57]. Die erforderlichen Polynominformationen können beim Hersteller angefragt werden. Zur Kalibrierung des Modells wurde ein Optimierungsproblem formuliert, das darauf abzielt, eine Zielfunktion zu minimieren. Diese Zielfunktion berücksichtigt anpassbare Parameter wie die logarithmische Temperaturdifferenz am Verdampfer und am Kondensator sowie Koeffizienten für Wärme- bzw. Kälteleistung und Leistungsaufnahme des Kompressors. Die Wärme- bzw. Kälteleistung wurde dabei mit der Leistungszahl normiert, um eine unerwünschte Gewichtung zu vermeiden. Die Validierung des Modells wurde durch Vergleich der gemessenen und simulierten Kondensatorleistung sowie der aufgenommenen Leistung des Kompressors unter verschiedenen Randbedingungen einer realen Wärmepumpe des Referenz-Quartiers durchgeführt. Die prozentualen Abweichungen von den Datenblattangaben wurden dabei analysiert, um die Genauigkeit des Modells zu bewerten. Für die Verflüssigungsleistung (Abbildung 23 -links) wurde ein Fehler von nicht mehr als 2 % und für die elektrische Leistungsaufnahme (rechts) ein Fehler von nicht mehr als 1 % für 30 unterschiedliche Betriebszustände aus dem Datenblatt erreicht.

Abbildung 23: Gegenüberstellung der simulierten und gemessenen Werte für die thermisch erzeugte Energie (Q_{cond}) und die aufgenommene elektrische Leistung (P) einer der Wärmepumpe im Gebäude D in verschiedenen Betriebszuständen (Stufen)



⁵⁷ DIN EN 12900 (2013): Kältemittel-Verdichter - Nennbedingungen, Toleranzen und Darstellung von Leistungsdaten des Herstellers; Deutsche Fassung EN 12900:2013, <https://www.austrian-standards.at>.

6 Vergleichende Analyse der Kühlinfrastruktur

Bearbeitung: Institut für Wärmetechnik

In diesem Kapitel wird der Kühlbedarf verschiedener Gebäudetypen analysiert um gezielte Strategien für eine energieeffiziente Kühlung entwickeln zu können. Das Referenz-Quartier hat aufgrund Büronutzung, Betrieb von Versuchsanlagen und einer intensiven Nutzung der Hörsäle einen erhöhten Kühlbedarf. Zudem zeichnet sich es sich durch eine zentrale Eigentümerstruktur und Betriebsführung, im Vergleich zu heterogen zusammengesetzten Wohn- oder Stadtquartieren, aus. Dies erleichtert eine übergeordnete Planung und erhöht damit die Umsetzungswahrscheinlichkeit von Strategien zur Minimierung des Kühlenergiebedarfs. Durch die Konzentration auf Büro- und Forschungsquartiere werden nicht nur der hohe Kühlbedarf berücksichtigt, sondern auch die strukturellen Vorteile genutzt, die eine effiziente Planung und Umsetzung von zentralen Kühlmaßnahmen ermöglichen.

Der Endenergieverbrauch in Europa (EU28) betrug im Jahr 2015 12 689 TWh^[58]. Davon entfielen 50 % auf Heiz- und Kühlzwecke, die sich wiederum auf Raumwärme (27 %), Prozesswärme (16 %), Warmwasser (4 %), Raumkälte (1 %), Prozesskälte (1 %) und sonstige Wärme (1 %). Die Verteilung ist regional sehr unterschiedlich. Im südlichen Teil der Europäischen Union ist der Anteil für Raumkühlung entsprechend höher. So beträgt der prozentuale Anteil an Raumkühlung in Griechenland 10.47 % und in Spanien 6.03 %^[59]. In Österreich entfielen 2015 51.6 % des Endenergieverbrauchs von 320 TWh in Österreich auf Heiz- und Kühlzwecke, das entspricht 165 TWh. Davon entfielen 0.2 % (0.33 TWh) auf die Raumkühlung und 1.0 % (1.65 TWh) auf die Prozesskühlung. Ein deutlicher Anstieg des Kühlbedarfs ist aufgrund generell steigender Temperaturen zu erwarten^[58,59]. Der durchschnittliche spezifische Kühlenergiebedarf im Jahr 2010 für Wohn- und Nichtwohngebäude beträgt in Österreich 49 kWh/m². In den nordischen Ländern der Europäischen Union liegt er deutlich niedriger: 27 kWh/m² in Schweden, 22 kWh/m² in den Niederlanden und 18 kWh/m² in Dänemark. In Griechenland hingegen liegt der Wert bei 84 kWh/m²^[60].

Die gemessenen spezifischen Kühlenergiebedarfe, sowie die rechnerisch gemäß österreichischem Energieausweis der Gebäude des Referenz-Quartiers ermittelten, sind in Abbildung 24 mit dem durchschnittlichen spezifischen Kühlenergiebedarf im Jahr 2010 als Referenzwert (49 kWh/m²) dargestellt. So weisen die Gebäude im Mittel einen deutlich geringeren Kühlenergiebedarf, im Vergleich zur Referenz, aus. Dies ist kann auf mehrere Faktoren, wie das Klima, die Belegung, der Baustandard und die tatsächlich gekühlte Fläche, zurückzuführen sein. Andererseits zeigt sich, dass der gerechnete Kühlbedarf (KB EA) in den meisten Fällen deutlich über dem tatsächlich gemessenen Kühlenergiebedarf liegt. Dies liegt an der Definition des Kühlenergiebedarfs, der den theoretischen Wert angibt, der zur Aufrechterhaltung einer bestimmten Innentemperatur für die gesamte Fläche erforderlich ist. Dieser kann in der Praxis stark von der Theorie abweichen. Das Gebäude D und das Gebäude I zeigen diesbezüglich eine gute Übereinstimmung.

⁵⁸ Statistics | Eurostat. [Online]. Verfügbar unter:

https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/NRG_BAL_C__custom_2022590/default/table?lang=de

⁵⁹ T. Fleiter, R. Elsland, M. Rehfeldt und J. Steinbach, „Heat Roadmap Europe Deliverable 3.1: Profile of heating and cooling demand in 2015“. Data annex, Fraunhofer Institute of Systems and Innovation Research, 2017.

⁶⁰ Persson, U., & Werner, S. (2015). Quantifying the Heating and Cooling Demand in Europe. Halmstad University. Verfügbar unter <http://stratego-project.eu> und <http://www.heatroadmap.eu>

Diese aggregierten Gebäude gehören zu den neueren Bestandsgebäuden und sind durchgängig mit Flächenkühlung ausgestattet. Hingegen weist das Gebäude G einen deutlich höheren tatsächlichen Kühlenergiebedarf auf, was darauf zurückzuführen ist, dass dieses Gebäude einen Sonderfall in der Nutzung darstellt, da es überwiegend für Prüfstände genutzt wird, wodurch auch die Flächen der Büronutzung zusätzlich thermisch belastet werden.

Abbildung 24: Gemessener spezifischer Kühlenergiebedarf der Gebäude ohne Labore, verglichen mit dem Kühlbedarf gemäß österreichischem Energieausweis (KB EA) und dem Referenzbedarf. Für die mit * gekennzeichneten Gebäude liegt kein Energieausweis vor

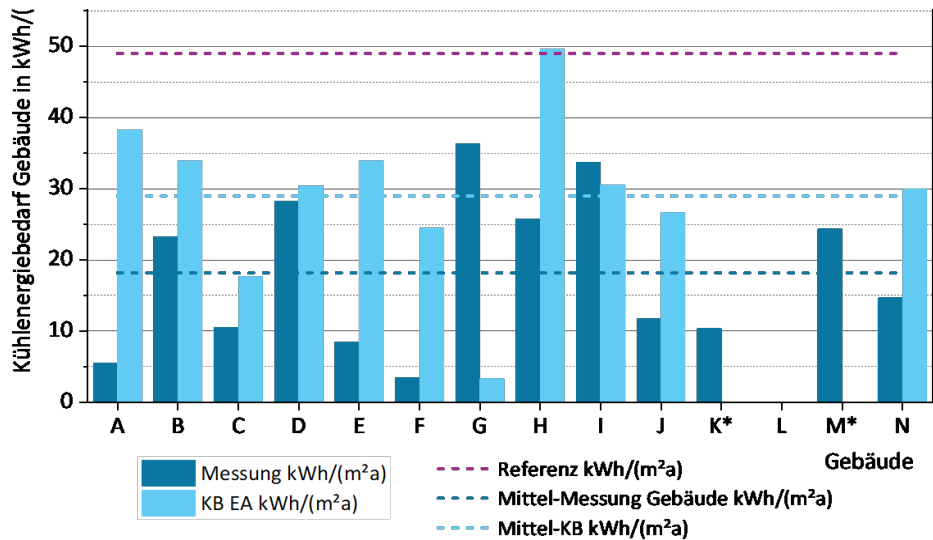
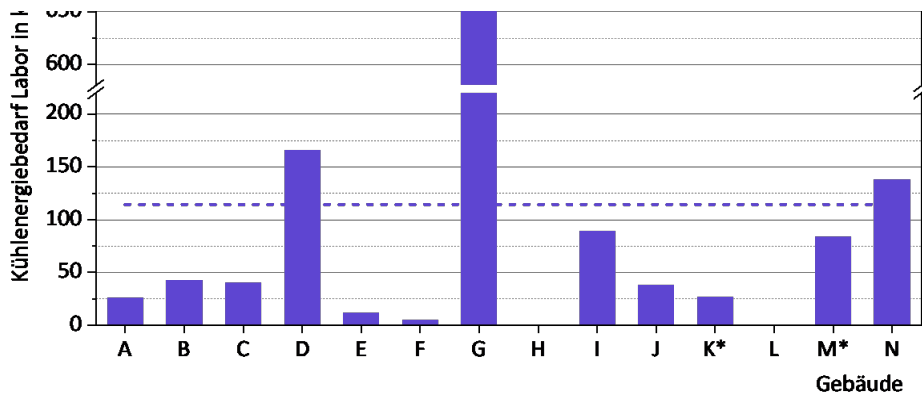


Abbildung 25: Gemessener spezifischer Kühlenergiebedarf der Labore (bezogen auf die Nutzfläche Labor)



Der Kühlenergiebedarf für die Gebäudekühlung, die Laboratorien und der Heizenergiebedarf sind in Abbildung 26, Abbildung 27 und Abbildung 28 dargestellt. Der Zeitplan für den Kühlenergiebedarf der Labore wird auf Basis der SIA 2024 / 2021 [61] und der dort definierten Nutzungskategorie 9.03 für Geräte und Prozessanlagen definiert.

⁶¹ Raumnutzungsdaten für die Energie- und Gebäudetechnik, SIA 2024:2015, Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Dezember 2021.

Abbildung 26: Kühlenergiebedarf (KB) der Labore, sowie die maximale Kühlleistung

Gebäude Labor	KB Labor	pro Monat	max. Last	KB Labor	
- NGF in m ²	MWh/a	MWh/M	MW	kWh/(m ² a)	
A	1045	32.0	2.7	10.5	26
B	2007	100.2	8.3	32.8	43
C	1686	80.1	6.7	26.2	41
D	1034	202.6	16.9	66.4	166
E	2848	39.1	3.3	12.8	12
F	3387	19.2	1.6	6.3	5
G	1789	1474.4	122.9	483.1	706
H	324	-	-	-	-
I	954	100.6	8.4	32.9	89
J	3786	165.0	13.7	54.1	38
K	11670	349.4	29.1	114.5	27
L	8	-	-	-	-
M	1320	130.0	10.8	42.6	84
N	39	6.9	0.6	2.3	138

Abbildung 27: Kühlenergiebedarf je Monat der Gebäudekonfigurationen für das Jahr 2021

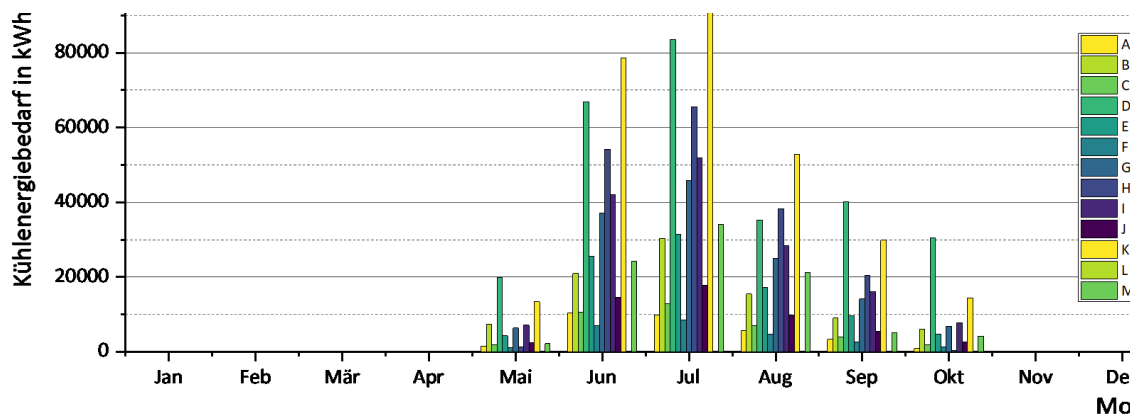
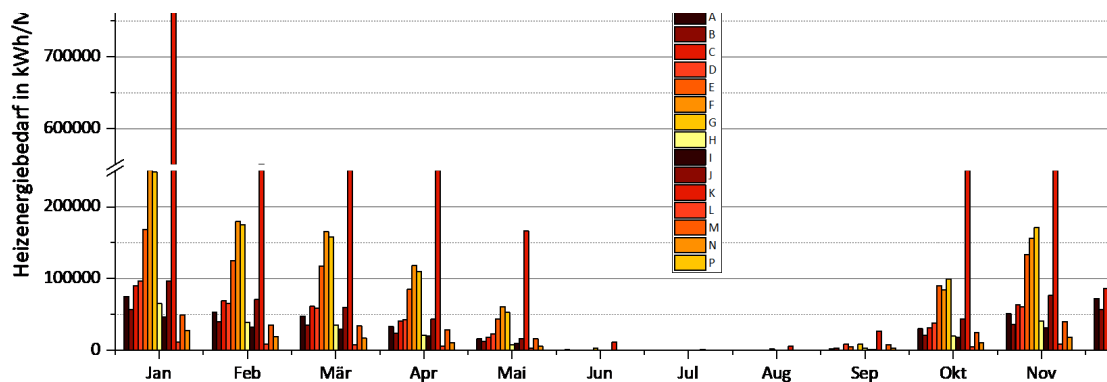


Abbildung 28: Heizenergiebedarf je Monat der Gebäudekonfigurationen für das Jahr 2021



6.1. Auslegung der Strukturvarianten

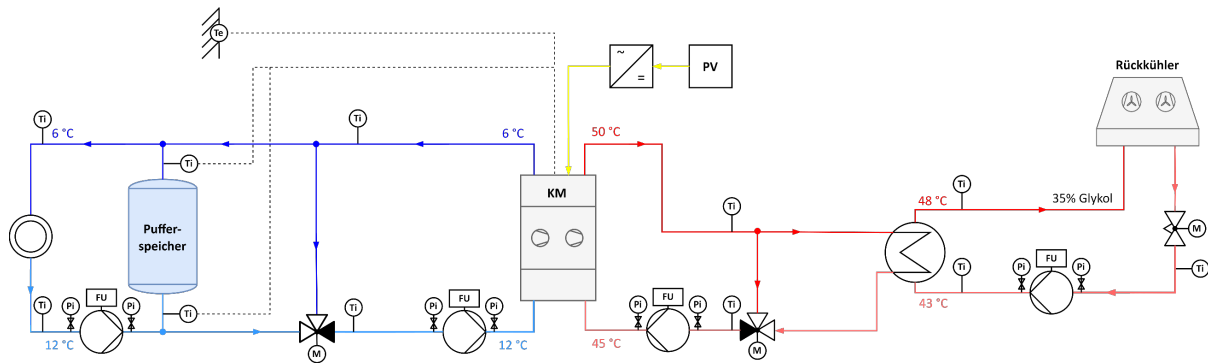
In COOL-QUARTER-PLUS werden vier Strukturvarianten miteinander verglichen, die ausgehend von einem dezentralen Ansatz der Energieversorgung schrittweise zentralisiert werden (Kapitel 4.3). Die im Folgenden in Klammern angegebenen Abkürzungen werden für die Bezeichnungen der Szenarien verwendet (Kapitel 4). Jede Strukturvariante wird mit zwei Kühlbedarfsursachen (Büro: B, Büro & Labor: BL) und jede Kühlbedarfsursache mit zwei Varianten der Nutzung von Photovoltaikanlagen (aktuell: akt, verdichtet: ver) zur Erzeugung von elektrischer Energie kombiniert. In der vierten Strukturvariante wird neben der Kältebereitstellung (Kälte: K) auch die Wärmebereitstellung berücksichtigt (Kälte & Wärme: KW). Die Auslegung des EWS-Feldes erfolgt hier nach dem Kühlenergiebedarf. Die fünfte Strukturvariante ist analog zur vierten mit Ausnahme des EWS-Feldes. Dieses wird in der fünften Strukturvariante in Bezug auf den Heizenergiebedarf ausgelegt. Zusätzlich werden die zweite und dritte Strukturvariante in der Lebenszykluskostenanalyse auch ohne Photovoltaikanlagen betrachtet. Eine Zusammenfassung der Strukturvarianten ist in Abbildung 4 dargestellt.

Strukturvariante 01K

Die erste Aufbauvariante „Kälte dezentral - PV dezentral“ (siehe Abbildung 29) besteht aus einem Pufferspeicher, einer Kältemaschine, einem Wärmetauscher, einem Rückkühler, einem PV-Modul (falls vorhanden) und insgesamt vier Pumpen. Zur Trennung des Warmwassers auf der warmen Seite der Wärmepumpe von dem 35 % Glykol enthaltenden Medium auf der Rückkühlseite ist der Wärmetauscher notwendig. Das Glykol ist erforderlich um Frostschäden am Rückkühler und an den Rohrleitungen zu vermeiden, da diese ganzjährig den natürlichen Temperaturschwankungen ausgesetzt sind. Für die Regelung von Kompressionskältemaschinen werden in dieser Strukturvariante zwei verschiedene Regelungsstrategien unterschieden. Die erste Regelstrategie ist für Kältemaschinen, die nur in Stufen geregelt werden können. Dies entspricht beispielsweise der Parallelschaltung mehrerer Kompressoren. Die zweite Regelstrategie ermöglicht eine stufenlose Regelung von 25 % bis 100 %, was zum Beispiel bei Schraubenverdichtern möglich ist.

Bei der ersten Regelungsstrategie wird die erste Stufe (50 %) aktiviert, wenn die Temperatur im oberen Bereich des Pufferspeichers 10 °C überschreitet, und wieder deaktiviert, wenn die Temperatur 6 °C unterschreitet. Steigt die Temperatur über 11 °C, wird die zweite Stufe (100 %) aktiviert und erst wieder auf die erste Stufe reduziert, wenn die obere Speichertemperatur unter 9 °C sinkt. Bei der zweiten Regelungsstrategie erfolgt eine Zuschaltung der Kältemaschine bei Überschreitung der oberen Pufferspeichertemperatur von 10 °C (25 % der Nennleistung). Reicht die Mindestleistung nicht aus, um eine Senkung der Temperatur im oberen Bereich im Pufferspeicher zu bewirken und die Temperatur steigt über 11 °C, erfolgt eine stetige Regelung mit einem PI-Regler. Dabei wird auf eine konstante Vorlauftemperatur von 6 °C zum Speicher hin geregelt, bis eine Temperatur von 6 °C im oberen Bereich des Pufferspeichers erreicht wird. Sobald die Kältemaschine aktiviert wird, werden auch die Pumpen und der Rückkühler eingeschaltet. In Abhängigkeit von der Rücklauftemperatur des Rückkühlers werden die Ventilatoren des Rückkühlers geregelt. Die erforderliche Rücklauftemperatur ist abhängig von der Außenlufttemperatur. Die Ventilatoren werden mit einem PI-Regler stufenlos so hochgefahren, dass eine Rücklauftemperatur von 7 K + Außenlufttemperatur erreicht wird. Übersteigt die Rücklauftemperatur 40 °C, laufen die Ventilatoren auf 100 %.

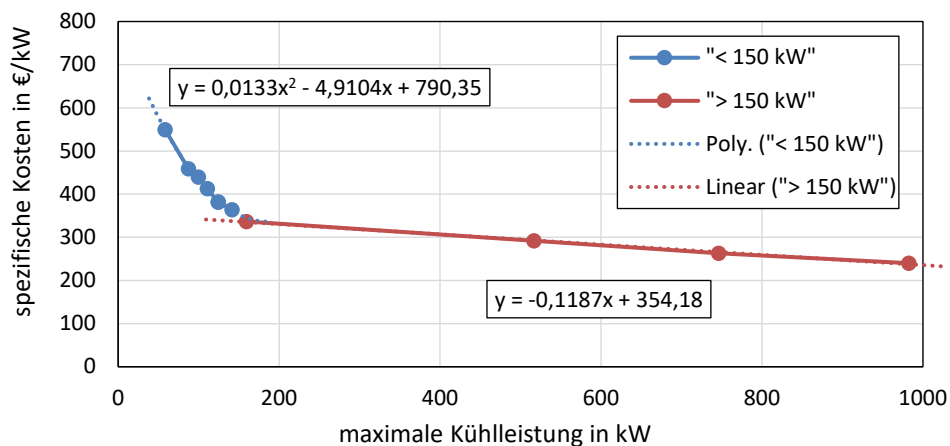
Abbildung 29: Hydraulikschema der Strukturvariante „Kälte dezentral – PV dezentral“



Kompressionskältemaschinen

Auf Basis der maximalen Kühlleistungen (Büro & Labor) und des Kühlenergiebedarfs der Gebäude erfolgt die Auswahl passender Kältemaschinen. In Abbildung 30 sind die spezifischen Anschaffungskosten pro kW über die maximale Leistung der Kompressionskältemaschine (KKM) dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Preise pro kW mit steigender maximaler Kühlleistung sinken. Die nach Kälteleistung größte Kältemaschine befindet sich im Gebäude G mit einer Kälteleistung von 982.1 kW und einer Leistungszahl von 3.39. Die Kältemaschine mit der geringsten Leistung von 87.2 kW und einer Leistungszahl von 3.26 befindet sich im Gebäude C.

Abbildung 30: Anschaffungskosten je kW in Abhängigkeit der Auslegungsleistung der Kompressionskältemaschine



In Abbildung 31 sind die maximalen Kälteleistungen der Kompressionskältemaschinen je Gebäude und der Wärmepumpe für den zentralen Einsatz (04 & 05KW) mit ihren Leistungszahlen (EER) dargestellt. Diese Leistungen dienen als Grundlage für die Ermittlung aller Massenströme der Variante und für die Auslegung aller Komponenten im System. Die entsprechenden Temperaturdifferenzen können den Hydraulikschemas der Varianten entnommen werden.

Abbildung 31: Kälteleistungen und Leistungszahlen (EER) pro Gebäude (Strukturvariante 01-03) und der zentralen Wärmepumpen der Strukturvarianten 04 & 05KW

Gebäude	Kälteleistung kW	EER
-	-	-
A	111	3.15
B	248	3.14
C	87	3.24
D	516	3.26
E	141	3.07
F	58	3.31
G	982	3.39
H	248	3.14
I	159	3.01
J	100	3.18
K	746	3.43
L	-	-
M	124	3.14
N	124	3.14
04 & 05KW	3533	4.40

Pufferspeicher

Die Pufferspeicher für die Strukturvarianten 01K bis 03K wurden überschlägig mit 30 Liter pro kW Kälteleistung angesetzt. Die Kälte- und Wärmespeicher in den Strukturvarianten 04KW und 05KW werden nach Glück ^[62] ausgelegt. Die Auslegung erfolgte mit:

$$V_b = 0.5 \cdot \frac{\dot{Q}_A \cdot 3600}{\rho c_p \Delta t n_{max}}$$

Gleichung 3

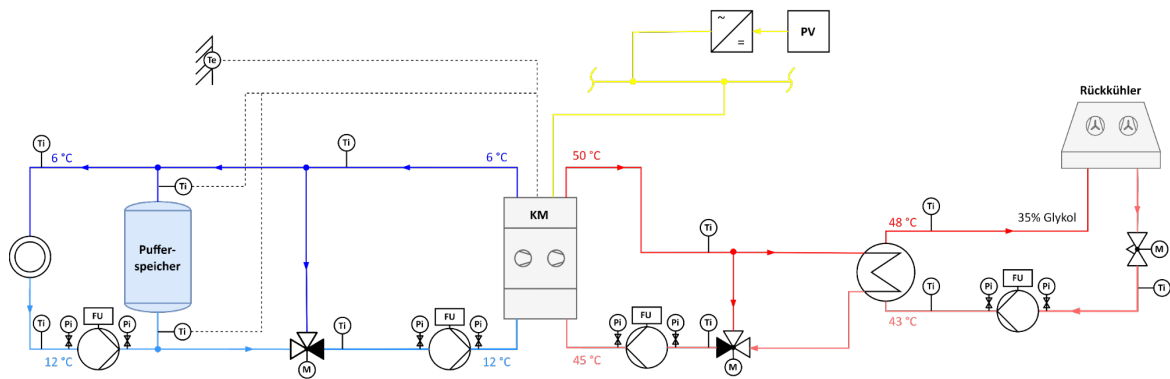
Hierbei ist V_b das wirksame Speichervolumen in m^3 , \dot{Q}_A der vorgegebene Ladefluss in W, ρ die Dichte in kg/m^3 , c_p die spezifische Wärmekapazität in $J/(kgK)$, Δt die Temperaturdifferenz in K im Speicher und n_{max} die maximal erlaubte Schalthäufigkeit der Kältemaschine pro Stunde in h^{-1} . Bei einer maximalen Schalthäufigkeit von 4-mal pro Stunde und einen Ladefluss für Heizen von 4335.9 kW ($\Delta t = 8$ K) und für Kühlen von 3532.8 kW ($\Delta t = 4$ K) ergibt sich für die Varianten 04KW und 05KW ein Volumen von 58.2 m^3 für den Wärmespeicher und 94.9 m^3 für den Kältespeicher.

Strukturvariante 02K

Die Strukturvariante 02K „Kälte dezentral PV im Verbund“ (Abbildung 32) ist analog zur Strukturvariante 01K aufgebaut und wird auch ident geregelt, mit dem Unterschied, dass der erzeugte PV-Strom allen Gebäuden und deren Kühlsystemen zur Verfügung steht. Da sich im Falle des Referenz-Quartiers alle Anlagen im Besitz des gleichen Betreibers befinden, wurden hierfür keine zusätzlichen Maßnahmen und Kosten angenommen. Zusätzliche Kosten für gemeinschaftliche Erzeugungsanlagen würden nur entstehen, wenn die Anlagen unterschiedliche Eigentümer oder Betreiber hätten.

⁶² Glück, Bernd: "Bemessung eines Pufferspeichers und Kombination mit hydraulischer Weiche", erreichbar unter: <https://berndglueck.de/dl/?dl=Waermespeicher+Pufferspeicher.pdf> [Zugriff am 1. Juli 2024]

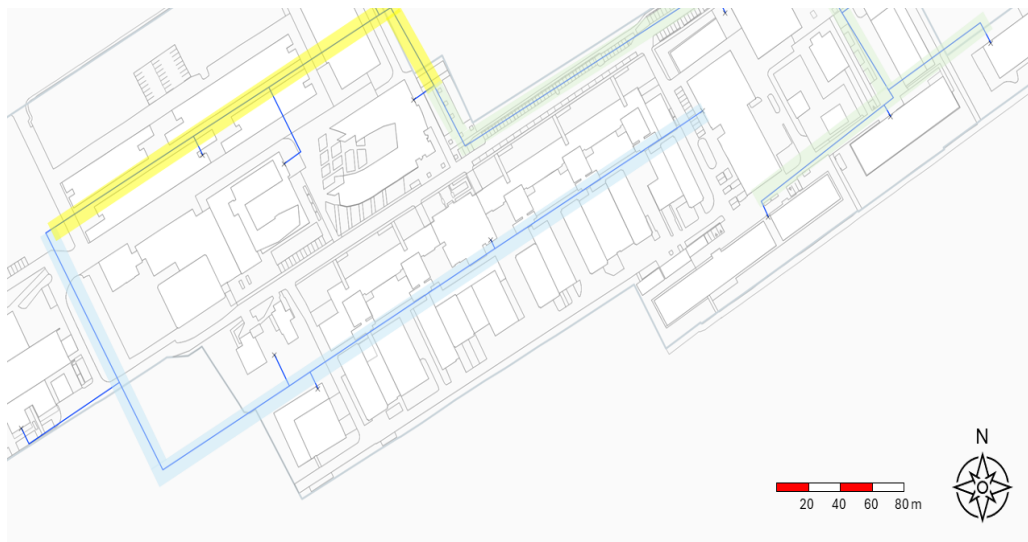
Abbildung 32: Hydraulikschema der Strukturvariante „Kälte dezentral – PV im Verbund“



Strukturvariante 03K

In der Strukturvariante 03K „Kälte und PV im Verbund“ (Abbildung 35) geht weiter in Richtung einer zentralen Betriebsweise. Sie geht davon aus, dass am Referenz-Quartier zusätzlich ein zentrales Regelungsmanagement für die Kühlung vorhanden ist. für die Kühlung vorhanden ist. Zusätzlich sind alle Gebäude an ein gemeinsames Stromverteilungs-, Wärme- und Kälteleitungsnetz angeschlossen. In Abbildung 33 ist die Lage des Kälteleitungsnetzes im Referenz-Quartier dargestellt. Zusätzlich sind die einzelnen Netzabschnitte entsprechend ihrer Lage und ihrer Übertragungskapazität farblich gekennzeichnet. Die gesamte Leitungslänge beträgt 1685 m.

Abbildung 33: Kälteleitungsnetz im Referenz-Quartier mit farblich gekennzeichneten Abschnitten



Netzdimensionierung

Für das Kälte- und Wärmenetz werden Einrohr-Verbundsysteme von Isoplus® eingesetzt. Für das Kältenetz werden kontinuierliche (KRE) und für das Wärmenetz diskontinuierliche (DRE) Verbundsysteme eingesetzt. Kontinuierliche Systeme haben den Vorteil, dass sie kostengünstiger in der Herstellung sind, aber nur in begrenzten Dimensionen zur Verfügung stehen. Die Auslegung der Nennweiten erfolgt in Abhängigkeit von der zu übertragende Leistung bei gegebener Temperaturdifferenz.

Dabei wurde für das Wärmenetz eine Temperaturdifferenz von 10 K und für das Kältenetz von 6 K verwendet. Aufgrund der hydraulischen Trennung der Medien durch den Pufferspeicher unterscheiden sich die Auslegungstemperaturdifferenzen von denen für die Pufferspeicherauslegung. Die Berechnung des Druckverlustes für den jeweiligen Netzabschnitt und die Hausanschlussleitung wird mit folgender Formel durchgeführt:

$$\Delta p_v = \lambda \cdot \frac{L}{d_R} \cdot \rho_w \cdot \frac{w_m^2}{2}$$

Gleichung 4

Hierbei ist λ der Rohrwiderstandsbeiwert in mm, d_R der Innendurchmesser in mm, L die Länge in m, ρ_w die mittlere Dichte in kg/m^3 und w_m die Strömungsgeschwindigkeit in m/s. Druckverluste durch Rohrleitungseinbauten werden nicht berücksichtigt. Der Rohrwiderstandsbeiwert wird dem Moody-Diagramm und die Materialeigenschaften und Geometrien des Rohrleitungssystems werden dem entsprechenden Datenblatt entnommen. Die Nennweite wird so gewählt, dass der Druckverlust pro m im Bereich von 100 bis 300 Pa/m liegt. In Abbildung 34 sind die spezifischen Druckverluste pro m, die angenommenen Preise pro Trassenmeter (trm) für das Kältenetz dargestellt.

Abbildung 34: Kosten pro Trassenmeter (trm), spezifischer Druckverlust (Pa/m) je Hausanschlussleistung (A-N) und Netzabschnitt (gelb, grün und blau)

Gebäude	Nennweite	Druckverlust	Kosten
-	DN	Pa/m	€/trm
A	65	198	654
B	100	110	792
C	65	126	654
D	125	167	891
E	80	143	713
F	50	221	595
G	150	221	990
H	100	106	792
I	80	207	713
J	65	160	654
K	150	136	990
L	-	-	-
M	80	114	713
N	80	109	713
gelb	200	115	1191
grün	200	70	1191
blau	200	161	1191

Für die Kosten wurde ein Durchschnittspreis für den innerstädtischen Bereich gebildet. Dazu wurden aus [63] und [64] zunächst die spezifischen Kosten pro Trassenmeter in Abhängigkeit von der Nennweite mit einer durchschnittlichen Inflation der Baukosten für Schweden [65] und Irland [66] bereinigt.

⁶³SEAI, "District heating and cooling: Spatial analysis of infrastructure costs and potential in Ireland, Appendix B – Heat Network Costs and Deployment.", erreichbar unter: <https://www.seai.ie/publications/District-Heating-and-Cooling-Appendix-B-Network-Costs.pdf> [Zugriff am 1. Juli 2024].

⁶⁴ Nussbaumer, T. et al. (2014). Sensitivity of system design on heat distribution cost in district heating. ISBN 3-908705-27-4

⁶⁵ <https://www.scb.se/en/finding-statistics/statistics-by-subject-area/prices-and-consumption/building-price-index-and-construction-cost-index-for-bu/construction-costs/> [Zugriff am 1. Juli 2024]

⁶⁶ <https://www.macrotrends.net/global-metrics/countries/IRL/ireland/inflation-rate> [Zugriff am 1. Juli 2024]

Für Schweden wurde vor der Inflationsbereinigung noch ein durchschnittlicher Wechselkurs von 9.25 SEK/€ für das Jahr 2007 angenommen. Schließlich wurde das arithmetische Mittel pro Nennweite (DN) aus beiden Größen berechnet und zuletzt mit einer quadratischen Funktion angenähert:

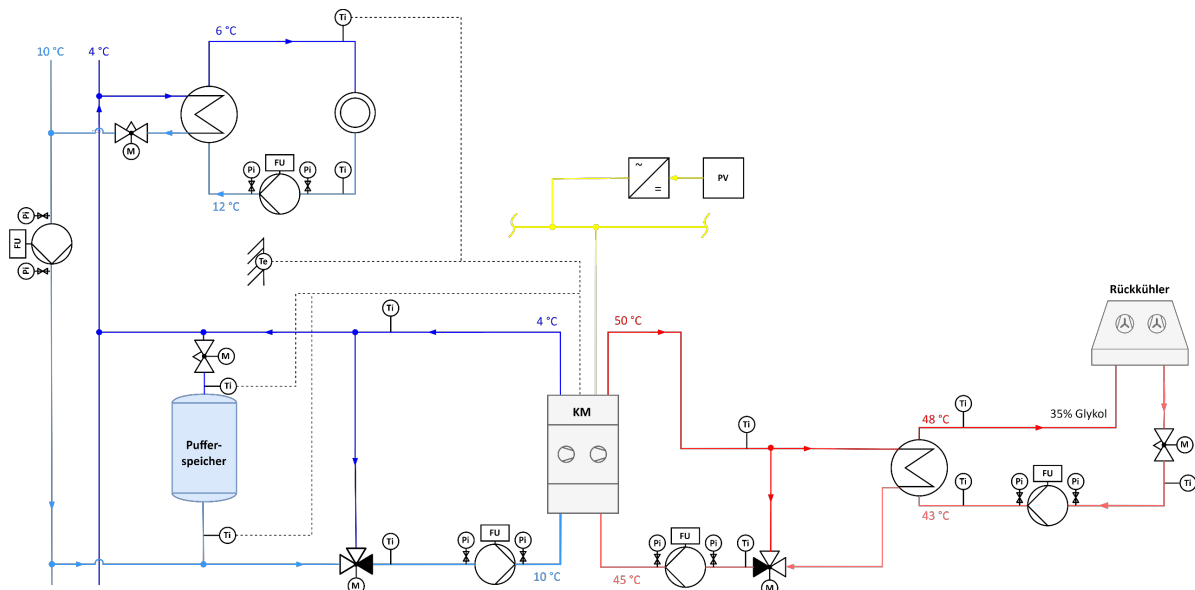
$$C_{\text{Stadt}} = 0.0004 \cdot \text{DN}^2 + 3.8701 \cdot \text{DN} + 400.83 \quad \text{Gleichung 5}$$

Hierbei ist C_{Stadt} die Kosten pro Trassenmeter in €/m und DN die Nennweite der Rohre.

Regelung

Bei der Strukturvariante 03K erfolgt die Regelung in Abhängigkeit von der aktuellen Kühlleistung der Gebäude (und Labore). Im Gegensatz zu den Strukturvarianten 01K und 02K erfolgt die Zuschaltung nicht mehr temperaturabhängig, sondern die Kältemaschinen schalten sich sequenziell von der größten zur kleinsten Kältemaschine zu und fördern die erzeugte Kälte in das Kältenetz. Bei abnehmendem Kälteleistungsbedarf erfolgt die Abschaltung von klein nach groß. Damit werden die größenabhängigen Effizienzmechanismen der Kältemaschinen ausgenutzt. Die Pufferspeicher dienen als zusätzliche Massen im System. Für die Simulation wurde vereinfachend angenommen, dass die Netzeinspeisung an einer Stelle erfolgt, diese befindet sich analog zu den Strukturvarianten 04KW und 05KW am Schnittpunkt des gelben und blauen Netzabschnittes.

Abbildung 35: Hydraulikschema der Strukturvariante 03K „Kälte und PV im Verbund“



Strukturvariante 04 & 05KW

Bei den Strukturvarianten 04KW & 05KW „Kälte und Wärme zentral und PV im Verbund“ (siehe Abbildung 36) erfolgt die Wärme- und Kälteversorgung über eine erdgekoppelte Wärmepumpe. Die Regelung der Wärmepumpe erfolgt hier primär nach dem Kältebedarf, das heißt die Kälteversorgung hat Vorrang und muss immer gewährleistet sein. Die Gebäude beziehen ihren Wärme- und Kältebedarf aus dem Netz. Die Einspeisung der Kälte- und Wärmeenergie erfolgt analog zur Strukturvariante 03K im Schnittpunkt des blauen und gelben Netzbereiches (Abbildung 33).

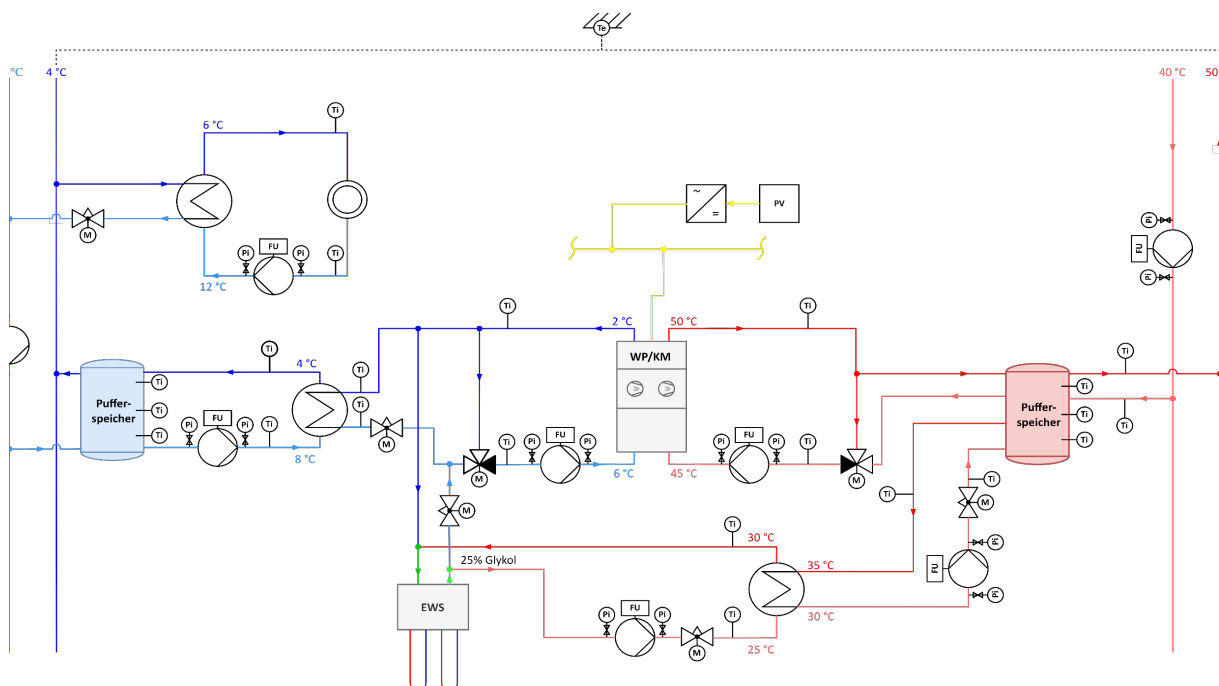
Die Auslegung des Wärmenetzes erfolgt hier analog zum Kältenetz und ist in unmittelbarer Nähe dessen situiert. Können die geforderten Temperaturen im Speicher zur Wärmebereitstellung nicht erreicht werden, dient die Fernwärme als Backup und erwärmt die oberste Schicht des warmen Pufferspeichers auf die geforderte Mindesttemperatur.

Regelung

Bei der Strukturvariante 04KW & 05KW erfolgt die Regelung der Wärmepumpe in Abhängigkeit der Speichertemperaturen im kalten und warmen Pufferspeicher. Die Regelung ist so ausgelegt, dass die Kälteversorgung sichergestellt ist und die Heizungsversorgung der Kälteversorgung untergeordnet ist. Die Heiz- und Kühlfreigabesignale werden von den Gebäuden bereitgestellt (Kapitel 5.1). Die Wärmepumpe kann zwischen Heiz- und Kühlmodus unterscheiden. Der Heizmodus ist aktiviert, wenn die Heizfreigabe von den Gebäuden aktiviert ist und der Heizenergiebedarf größer als der Kühlenergiebedarf ist und der Kühlenergiebedarf gedeckt werden kann. Kann der Kühlenergiebedarf nicht gedeckt werden, wird der Kühlmodus aktiviert.

Im Heizmodus wird die Wärmepumpe so geregelt, dass sich in der oberen Schicht des warmen Pufferspeichers eine von der Außenluft abhängige Solltemperatur einstellt. Kühlt dabei die unterste Schicht im kalten Pufferspeicher unter 4 °C ab, wird der Massenstrom vom EWS-Feld zum Verdampfer stetig erhöht und der Massenstrom zum Wärmetauscher der kalten Seite reduziert sich stetig. Das EWS-Feld dient hier dann als Wärmequelle für die Wärmepumpe. Im Kühlmodus erfolgt die Regelung der Wärmepumpe in Abhängigkeit der untersten Schicht im kalten Pufferspeicher und beträgt konstant 4 °C. Erwärmt sich dabei die obere Schicht im warmen Pufferspeicher über die maximal zulässige Temperatur, wird der Massenstrom zum EWS-Feld kondensatorseitig stetig erhöht und die Wärme zur Regeneration des EWS-Feldes (Wärmesenke) genutzt.

Abbildung 36: Hydraulikschema der Strukturvariante 04 & 05KW „Kälte und Wärme zentral und PV im Verbund“



Erdwärmesonden

Bei der Dimensionierung der Erdwärmesonden (EWS) wird davon ausgegangen, dass jede Sonde für sich allein arbeitet, d.h. Wechselwirkungen zwischen den Sonden werden nicht berücksichtigt. Der erforderliche Mindestabstand hängt von der Bodenbeschaffenheit, der geothermischen Leistung und den klimatischen Bedingungen am Standort der Sonde ab. Nach SIA 384/6 [67] sollte ein Mindestabstand von 5 m zwischen den Sonden eingehalten werden, um die gegenseitige Beeinflussung zu minimieren. Bei gemischtem Heiz- und Kühlbetrieb sind kleinere Abstände (< 5 m) möglich. Die obere und untere Temperaturgrenze der mittleren Temperatur des Wärmeträgermediums (Mittelwert von Ein- und Austrittstemperatur der EWS) nach Erreichen eines Gleichgewichtszustandes (5 bis 50 Jahre) beträgt laut ÖWAV [68] für den Heizbetrieb minimal -1.5 °C und für den Kühlbetrieb maximal +30 °C. Da Erdwärmesonden mit hohen Errichtungskosten und hohem Materialeinsatz verbunden sind, wurde nicht nur eine Grobdimensionierung anhand der Kennwerte z.B. aus der SIA [67] durchgeführt. Für eine möglichst genaue Dimensionierung wurde versucht, eine optimale Gesamtbohrmeterzahl zu ermitteln. Unter Optimum versteht man die Deckung des maximalen Heiz- und Kühlbedarfs mit der geringsten Gesamtbohrmeterzahl.

Um einen Vergleich mit international anerkannten Rahmenbedingungen zu ermöglichen, wird der ASHRAE [69] Klimadatensatz "IWEC2" für Graz Thalerhof in Österreich auf das Gesamtenergiesystemmodell für 25 Jahre angewendet und gleichzeitig die Anzahl der Erdwärmesonden variiert, bis die zuvor genannten Temperaturgrenzen eingehalten werden.

Die Auslegung des EWS-Feldes erfolgt in der Strukturvariante 04KW (Abbildung 4) primär für den Kühlbetrieb, d.h. die Auslegung der Erdwärmesonde erfolgt so, dass die anfallende Wärme in das EWS-Feld abgeführt werden kann und die für das EWS geltenden (sommerliche) Maximaltemperaturen nicht überschritten werden. Die Regelung der Kompressionskältemaschine für den Heizbetrieb in den Wintermonaten wird in dieser Strukturvariante 04KW durch die Begrenzung der mittleren stündlichen Temperatur des Wärmeträgermediums auf 0 °C begrenzt, d.h. bei Absinken der mittleren stündlichen Temperatur des Wärmeträgermediums wird die Leistung der Wärmepumpe stufenlos reduziert.

In der Strukturvariante 05KW hingegen wird das EWS auf den Heizfall ausgelegt, dass die Wärmepumpe sowohl im Kühl- als auch im Heizbetrieb die maximale Leistung abrufen kann. Dadurch ist eine optimale Ausnutzung der installierten Infrastruktur möglich und die Wärmepumpe wird nicht in Abhängigkeit von der mittleren stündlichen Wärmeträgermedium Temperatur heruntergeregelt. Die minimalen und maximalen Temperaturen des gleitenden Stundenmittelwertes der mittleren Wärmeträgertemperatur sind in Abbildung 37 dargestellt. Die Auslegung des EWS-Feldes für den Heizfall erfordert am Beispiel des Referenz-Quartier jeweils mehr Sonden, als die Auslegung nur für den Kühlfall.

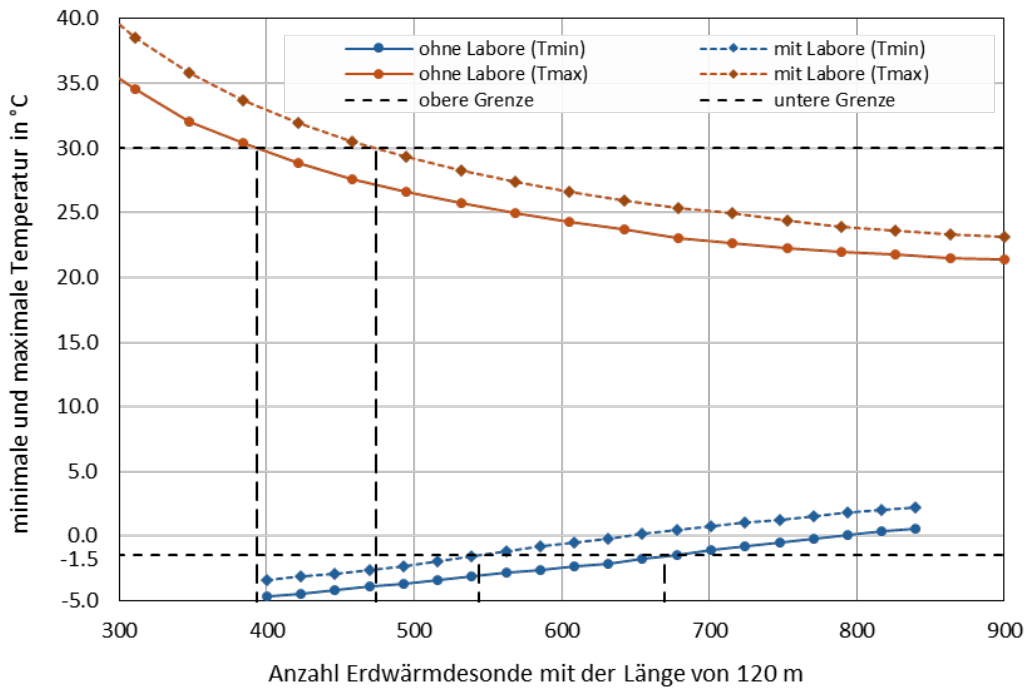
⁶⁷ Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, SIA 384/6:2010 – „Erdwärmesonden“, Norm, Nov. 2009.

⁶⁸ Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband, „ÖWAV-Regelblatt 207-2. Auflage - Thermische Nutzung des Grundwassers und des Untergrunds Heizen und Kühlen“, Richtlinie, Mai 2009

⁶⁹ IWEC2 (International Weather for Energy Calculations, Version 2) ist eine Datenbank, die von der ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) bereitgestellt wird. Sie enthält typische jährliche meteorologische Daten für eine für eine große Anzahl von Standorten weltweit und wird häufig zur Simulation des Energiebedarfs unter standardisierten Wetterbedingungen zu simulieren.

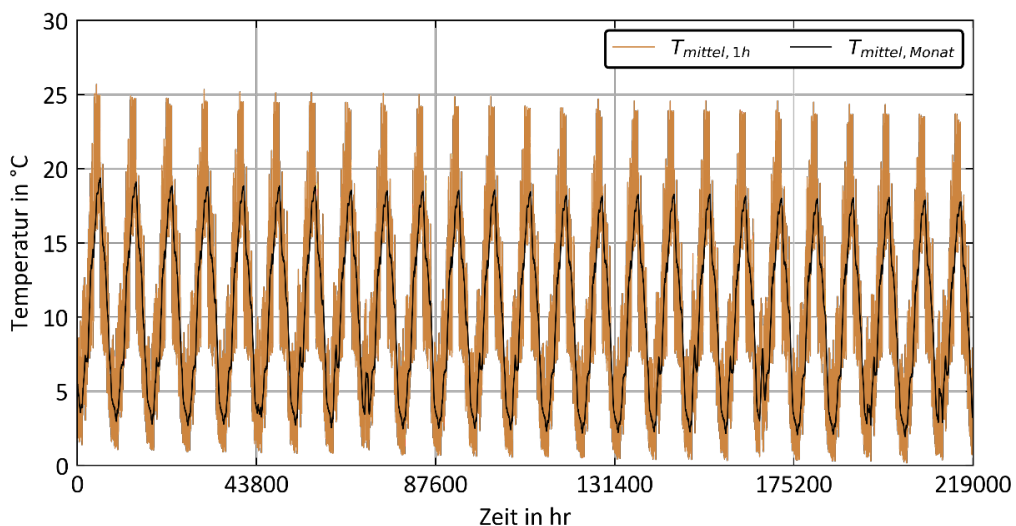
Eine zusätzliche Grundkühllast in Form eines Labors reduziert die benötigten Sonden für den Auslegungsfall Heizen um 126 Sonden. Dies entspricht 15 120 m an Sondenlänge und würde zu einer Reduzierung der Errichtungskosten um etwa 1 386 000 € führen.

Abbildung 37: Darstellung der minimalen und maximalen Temperaturen der mittleren Wärmeträgermedium-Temperaturen, in Abhängigkeit von der Anzahl der Erdwärmesonden



Der Temperaturverlauf des Wärmeträgermediums in der Strukturvariante 04KW_BL_2022_akt, mit 650 Einzelsonden über einen Zeitraum von 25 Jahren (219 000 Stunden), ist beispielhaft in der Abbildung 38 dargestellt. Es ist ersichtlich, dass die stündliche, mittlere Wärmeträgertemperatur auch nach 25 Jahren über den geforderten 0 °C zu liegen kommt.

Abbildung 38: Verlauf (04KW) der mittleren Wärmeträgermedium-Temperatur über 25 Jahre



6.2. Analyse Kälte-, Heizenergiebedarf und THG-Emissionen

Der Kühlenergieverbrauch für Gebäude und Labore sowie die Verluste sind mit dem Strombedarf und der PV-Erzeugung für die Kühlenergieversorgung in Abbildung 39 dargestellt. Der Kühlenergiebedarf der Gebäude beträgt im Jahr 2022 1800 MWh und wird voraussichtlich bis 2042 um 650 MWh ansteigen, was einem Zuwachs von 27 % entspricht. Unter der Annahme, dass Kompressionskältemaschinen bei nicht ganzjährigem Kältebedarf nur bei aktiver Kältefreigabe betrieben werden, ergeben sich Unterschiede in den Verlusten zwischen den Varianten B (ohne Laborbedarf) und BL (mit Laborbedarf). Diese Betriebsweise führt in der Strukturvariante 04 KW zu einem Einsparpotenzial von etwa 80 MWh. Der Heizenergiebedarf der Varianten 04 KW und 05 KW verringert sich im Zeitraum von 2022 bis 2042 aufgrund steigender Durchschnittstemperaturen um 1100 MWh, von 9615 MWh auf 8499 MWh. Es ist zu beachten, dass die Ergebnisse ohne Photovoltaik (PV) nicht in den Übersichtstabellen enthalten sind. Diese Varianten unterscheiden sich von den dargestellten dadurch, dass der gesamte Strombedarf dem Netzbezug entspricht.

Abbildung 39: Übersicht der Ergebnisse der Strukturvarianten hinsichtlich Energiebedarfes und PV-Ertrag

Variante	Kühlbedarf				Heizbedarf			PV			Strombedarf	
	Gebäude	Labor	Verluste	Summe	WP	FW	Summe	Erzeugung	Einspeisung	Überschuss	Netzbezug	Summe
-	MWh _{th} /a	MWh _{th} /a	MWh _{th} /a	MWh _{th} /a	MWh _{th} /a	MWh _{th} /a	MWh _{th} /a	MWh _{el} /a	MWh _{el} /a	MWh _{el} /a	MWh _{el} /a	MWh _{el} /a
01K_B_2022_akt	1800	0	11	1811	-	-	-	1002	85	917	483	569
01K_B_2042_ver	2463	0	12	2474	-	-	-	1475	238	1237	545	782
01K_BL_2022_akt	1791	2695	23	4510	-	-	-	1002	141	862	1101	1242
01K_BL_2042_ver	2448	2695	23	5166	-	-	-	1475	347	1127	1116	1463
02K_B_2022_akt	1800	0	11	1811	-	-	-	1002	293	709	276	569
02K_B_2042_ver	2463	0	12	2474	-	-	-	1475	504	971	278	782
02K_BL_2022_akt	1791	2691	23	4506	-	-	-	1002	599	404	643	1242
02K_BL_2042_ver	2448	2695	23	5166	-	-	-	1475	828	647	635	1463
03K_B_2022_akt	1802	0	104	1906	-	-	-	1002	299	704	348	647
03K_B_2042_ver	2381	0	105	2486	-	-	-	1475	504	971	355	858
03K_BL_2022_akt	1803	2691	186	4680	-	-	-	1002	623	379	747	1371
03K_BL_2042_ver	2378	2691	185	5255	-	-	-	1475	850	624	740	1590
04KW_B_2022_akt	1806	0	103	1909	6582	3033	9615	1002	282	721	231	512
04KW_B_2042_ver	2384	0	102	2486	6288	2221	8509	1475	443	1032	231	674
04KW_BL_2022_akt	1806	2691	187	4684	9083	520	9603	1002	692	311	754	1446
04KW_BL_2042_ver	2382	2691	186	5260	8173	327	8499	1475	909	566	686	1594
05KW_B_2022_akt	1806	0	103	1910	7871	1738	9610	1002	280	722	188	468
05KW_B_2042_ver	2385	0	102	2487	7235	1270	8505	1475	418	1057	179	597
05KW_BL_2022_akt	1805	2691	187	4683	9231	373	9603	1002	690	313	710	1400
05KW_BL_2042_ver	2383	2691	187	5260	8261	240	8501	1475	895	580	636	1531

In Abbildung 40 sind die Autarkiegrade, die Jahresarbeitszahlen (JAZ) und die Summe der verursachten Treibhausgasemissionen der untersuchten Varianten dargestellt. Der Autarkiegrad ist der Anteil der genutzten PV-Energie am Gesamtenergiebedarf für die Kühlung. Der Autarkiegrad gibt den Anteil der Photovoltaik (PV)-Energie am Gesamtkühlbedarf an. Die JAZ 3, welche Speicherverluste und den Energiebedarf der Pumpen bis zum Wärmespeicher berücksichtigt, dient als Vergleichsgröße für die Systemeffizienz.

Die THG-Emissionen [70] werden maßgeblich durch die Heizenergiebedarf verursacht, wobei die ersten drei Varianten, Werte von über 2 100 t/a aufweisen. Dies ist auf den hohen Anteil an Erdgas in der Fernwärmeversorgung zurückzuführen. Durch die Kopplung von Kälte- und Wärmenetz kann dieser Wert nahezu halbiert werden. Im Gegensatz dazu fallen die THG-Emissionen für die Kühlung deutlich geringer aus. Sie liegen ohne Berücksichtigung der Labore bei durchschnittlich 120 t/a (Variante 01K_B) und steigen auf ca. 266 t/a bei Einbeziehung der Labore (Variante 01K_BL).

Abbildung 40: Ergebnisse der Strukturvarianten hinsichtlich Autarkiegrad, Jahresarbeitszahlen und Emissionen

Variante	Autarkiegrad	Jahresarbeitszahl			THG-Emissionen		
		Kühlen	Heizen	Gesamt	Kühlen-WP	Heizen-WP	Heizen-FW
-	%	-	-	-	t/a	t/a	t/a
01K_B_2022_akt	15.01%	3.19	-	-	112.64	0.00	2403.73
01K_B_2042_ver	30.37%	3.16	-	-	132.62	0.00	2127.26
01K_BL_2022_akt	11.32%	3.63	-	-	254.52	0.00	2400.78
01K_BL_2042_ver	23.74%	3.53	-	-	266.13	0.00	2124.85
02K_B_2022_akt	51.53%	3.19	-	-	74.01	0.00	2403.73
02K_B_2042_ver	64.44%	3.16	-	-	83.04	0.00	2127.26
02K_BL_2022_akt	48.21%	3.63	-	-	169.31	0.00	2400.78
02K_BL_2042_ver	56.59%	3.53	-	-	176.69	0.00	2124.85
03K_B_2022_akt	46.18%	2.94	-	-	90.72	0.00	2403.73
03K_B_2042_ver	58.68%	2.90	-	-	100.28	0.00	2127.26
03K_BL_2022_akt	45.49%	3.41	-	-	193.79	0.00	2400.78
03K_BL_2042_ver	53.49%	3.30	-	-	201.15	0.00	2124.85
04KW_B_2022_akt	55.01%	3.72	3.89	3.85	63.38	424.13	758.26
04KW_B_2042_ver	65.71%	3.69	3.91	3.85	69.91	407.30	555.14
04KW_BL_2022_akt	47.86%	3.24	4.75	4.10	198.09	625.16	129.91
04KW_BL_2042_ver	57.00%	3.30	4.81	4.08	191.31	625.16	81.64
05KW_B_2022_akt	59.85%	4.08	4.13	4.12	53.70	463.26	434.53
05KW_B_2042_ver	69.94%	4.16	4.16	4.17	57.27	424.93	317.54
05KW_BL_2022_akt	49.27%	3.35	4.83	4.21	188.04	615.23	93.15
05KW_BL_2042_ver	58.48%	3.44	4.90	4.21	179.44	615.23	59.99

In die Strukturvarianten 01K - 03K wird für die Beheizung des Quartiers Fernwärme herangezogen. In den Strukturvarianten 04KW und 05KW wird je eine unterschiedlich dimensionierte Groß-WP zur Kälte- und Wärmeversorgung genutzt, welches mit einem Erdsondenfeld gekoppelt ist. Die Analyse der dritten Strukturvariante, welche eine thermische Vernetzung der Kühlung der Gebäude vorsieht, zeigt im Vergleich zur ersten Variante (ohne Vernetzung) eine Reduktion der Jahresarbeitszahl (JAZ) um bis zu 0.2 (Abbildung 41). Dieser Effekt ist primär auf die zusätzlichen thermischen Verluste zurückzuführen, die durch das Verteilnetz entstehen. Es ist jedoch anzumerken, dass die reine Betrachtung der JAZ die potenziellen, nicht quantifizierbaren Vorteile einer thermischen Vernetzung außer Acht lässt. Hierzu zählen beispielsweise die Möglichkeit einer zentralen Anlagenkoordination und -wartung, die sukzessive Erneuerung von Kälte- und Wärmeerzeugern durch effizientere und größere Einheiten beim Ausfall kleinerer Anlagen sowie die potenziellen Vorteile durch die, in der Realität stark variierende Gleichzeitigkeit der Lastprofile einzelner Gebäude und Labore. Diese Aspekte sollten bei der Bewertung des Gesamtkonzepts jedenfalls berücksichtigt werden.

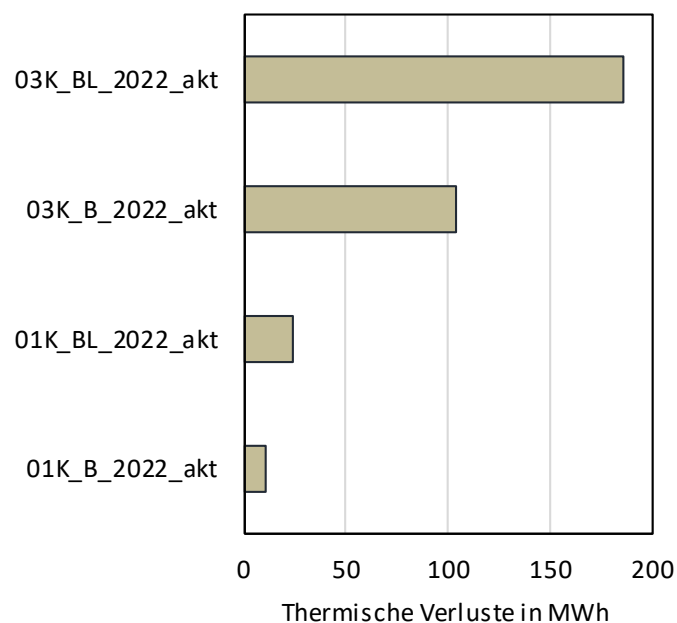
⁷⁰ THG-Emissionen stammen aus ClimCalc 2021 (Tool für die Treibhausgasbilanzierung): wobei selbst erzeugter PV-Strom mit 40 g/kWh, aus dem Netz bezogener Strom mit 226 g/kWh und die Fernwärme in Graz mit 250 g/kWh bewertet wird; <https://nachhaltigeuniversitaeten.at/arbeitgruppen/co2-neutrale-universitaeten/>

Abbildung 41: JAZ3 der ersten und dritten Strukturvarianten



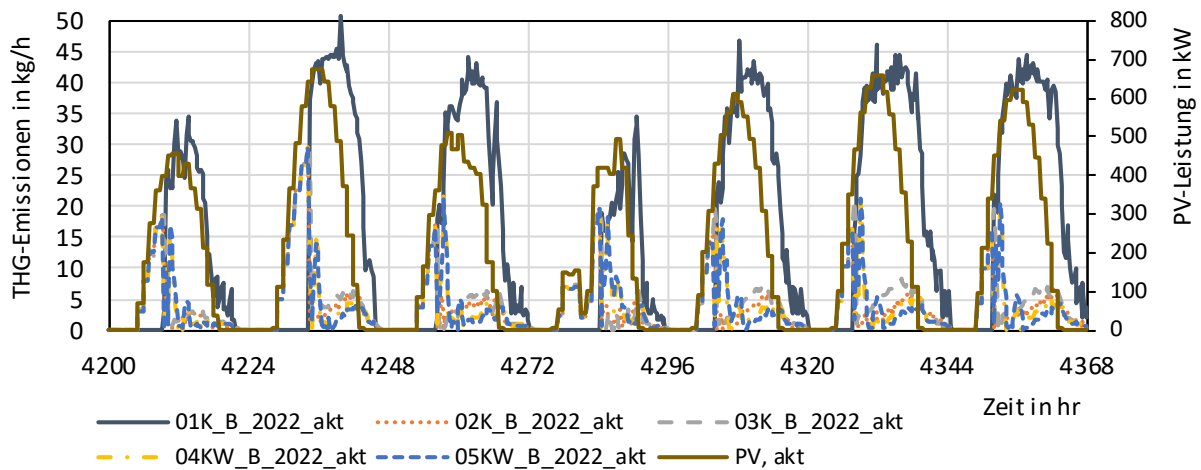
Die Abbildung 42 verdeutlicht die thermischen Verluste der untersuchten Strukturvarianten 01K und 03K. Die Strukturvariante 01K weist mit 11 MWh/a (0.60 % des gesamten Kälteenergiebedarfs) die geringsten Verluste auf, da lediglich Speicherverluste während der Kühlperiode anfallen. Bei ganzjährigem Kältebedarf (BL) steigen diese zwar auf 22 MWh/a an, doch relativ betrachtet sinken diese auf 0.52 %, da der absolute Kälteenergiebedarf überproportional zunimmt. In der Strukturvariante 03K fallen zusätzlich die Netzverluste der Kälteverteilung an. Dabei steigen die Verluste auf 104 MWh/a (5.45 %) ohne und mit Laboren auf 186 MWh/a (3.97 %). Hier reduzieren sich die relativen Verluste um über 1.00 %.

Abbildung 42: Thermische Verluste der Kälteerzeugung der ersten und dritten Strukturvariante für das Jahr 2022 mit und ohne Labore



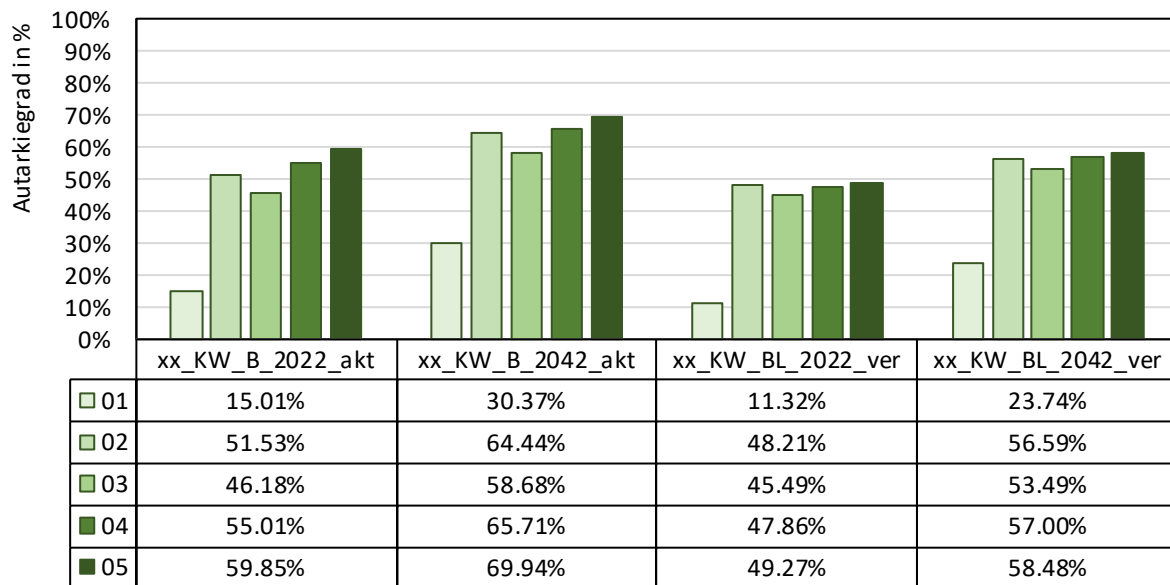
In der Abbildung 43 werden exemplarisch die THG-Emissionen für einen sommerlichen Kühlfall in der betrachteten Strukturvariante ohne Labore für eine Woche im Jahr 2022 gezeigt. Der Kühlfall umfasst vier sonnenreiche Tage, erkennbar am PV-Ertrag der Varianten, mit Außentemperaturen von bis zu 31 °C. Die Kühllast, indirekt dargestellt als Strombedarf abzüglich des direkt nutzbaren PV-Stroms, wird mit den CO₂-Äquivalent-Emissionen bewertet, um den Verlauf der THG-Emissionen für die fünf Strukturvarianten darzustellen. In den sonnigen Morgenstunden steigen die THG-Emissionen bei allen Varianten an, da die Kühllast noch nicht durch die PV-Anlage gedeckt werden kann. Mit zunehmender Sonneneinstrahlung kann die PV-Anlage jedoch Strom für die Kühlung bereitstellen. Durch die Vernetzung und Zentralisierung der PV-Erträge in den Strukturvarianten 02 bis 05 können die THG-Emissionen erheblich reduziert werden. Wobei hier die Strukturvariante 03K aufgrund der thermischen Netzverluste, im Vergleich der Strukturvarianten 02-05, geringfügig größere THG-Emissionen aufweisen.

Abbildung 43: Verlauf der THG-Emissionen in kg je Stunde, in der Kalenderwoche 26 aller Strukturvarianten, im Jahr 2022 ohne Labore



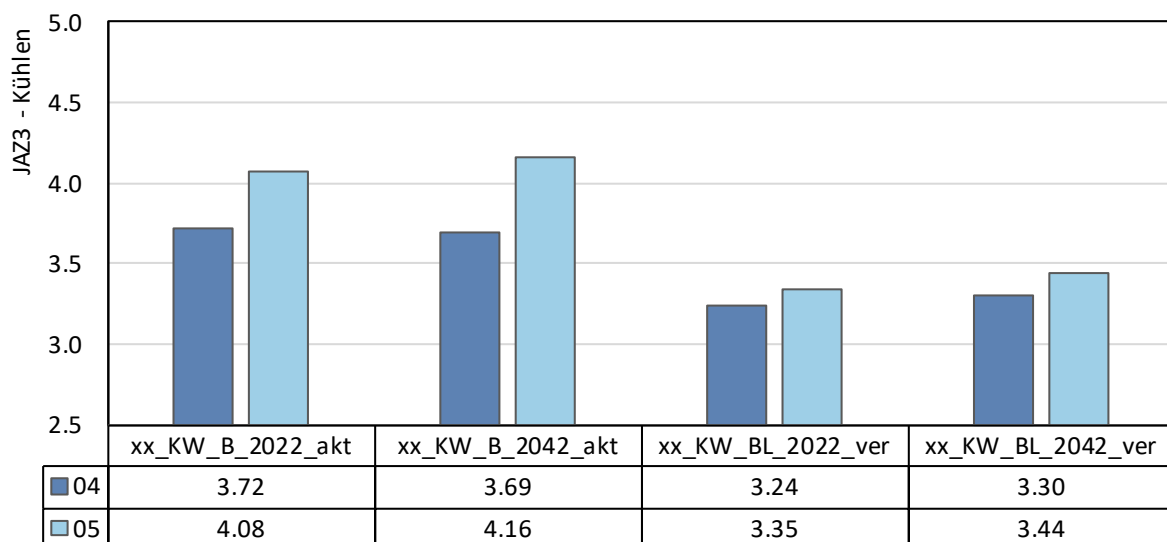
Die Darstellung in Abbildung 44 verdeutlicht das Maß an vom öffentlichen Verteilernetz unabhängiger Stromversorgung (Autarkiegrad) der verschiedenen Strukturvarianten. Die geringste Autarkie zeigt 01K, da nicht jedes Gebäude über eine PV-Anlage verfügt und somit der Strombedarf der Kältemaschinen extern gedeckt wird. Einen deutlichen Sprung verzeichnet 02K, wo der erzeugte PV-Strom allen Kältemaschinen zur Verfügung steht und nahezu 50 % des Bedarfs durch PV-Anlagen gedeckt werden können. Die Netzverluste in 03K führen zu einer leichten Abnahme des Autarkiegrades um 3 bis 6 Prozentpunkte. Bei 04KW konnte der Autarkiegrad gegenüber 02K nochmals gesteigert werden, wobei der Heizenergiebedarf hier noch nicht berücksichtigt ist. 05KW erreicht durch Effizienzsteigerung eine weitere Verbesserung um bis zu 4 %. Die Grundlast der Labore senkt den Autarkiegrad im Vergleich zu Varianten ohne Labore, da der Energiebedarf teilweise gantztägig und ganzjährig, in den Nachtstunden und insbesondere im Winter, besteht. Ein Vergleich der Jahre 2022 und 2042 zeigt eine mögliche Steigerung des Autarkiegrades um bis zu 10 %, da der durch höhere Temperaturen verursachte Kühlbedarf bis zu 27 % zunimmt und zeitlich mit der Sonneneinstrahlung und dem PV-Ertrag korreliert.

Abbildung 44: Darstellung der prozentualen Anteile der PV-Stromerzeugung bezogen auf die insgesamt benötigte Kühlenergie (Autarkiegrad) aller Varianten.



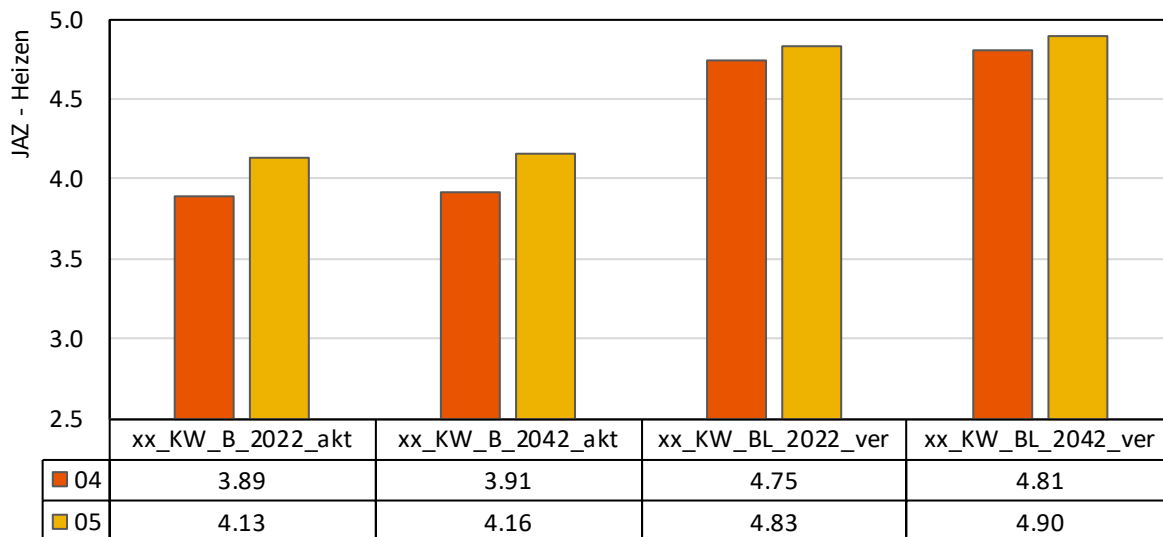
Die Jahresarbeitszahlen (JAZ) der Strukturvarianten 04KW und 05KW sind in Abbildung 45 dargestellt. Die höhere JAZ für Kühlen bei 05KW ist auf das größere Erdsondenfeld zurückzuführen, welches vorteilhafte Temperaturniveaus für die Wärmepumpe schafft. Konkret bedeutet dies eine niedrigere Kondensatortemperatur in der Kühlperiode bei 05KW, wodurch der Temperaturhub und somit die Leistungsaufnahme des Kompressors aufgrund des niedrigeren Druckniveaus verringert werden. Dies wiederum verbessert die Leistungszahl der Wärmepumpe. Eine Grundlast in Form von Laboren führt zu einer Verschlechterung der JAZ für Kühlen, da in der Winterperiode eine höhere Kondensatortemperatur vorliegt, was die aktuelle Leistungszahl bzw. den COP (Coefficient of Performance), der Wärmepumpe zur Versorgung der Grundlast verschlechtert.

Abbildung 45: JAZ3 für das Kühlen von der vierten und fünften Strukturvariante mit und ohne Labore für die Jahre 2022 und 2042



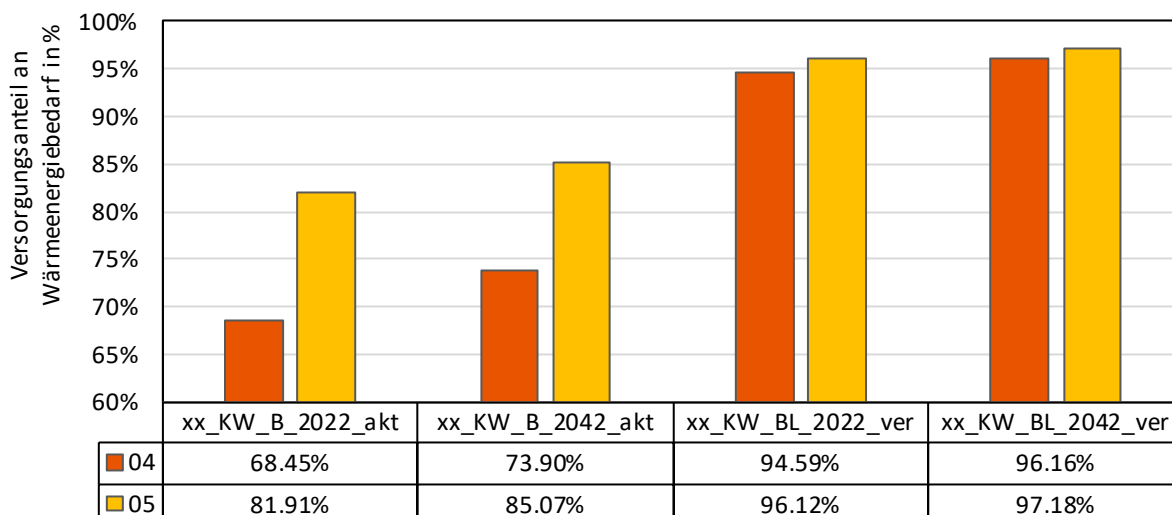
Im Gegensatz zur JAZ für Kühlen verhält sich die JAZ für Heizen (siehe Abbildung 46) genau umgekehrt hinsichtlich des Einflusses einer Grundlast durch die Labore. Die höhere Quelltemperatur steigert die JAZ der Wärmepumpe um rund 15 % auf bis zu 4.90. Die Strukturvariante 05KW weist aufgrund des größeren EWS-Felds, welches sich positiv auf die Temperaturniveaus auswirkt, eine höhere JAZ im Vergleich zu 04KW auf.

Abbildung 46: JAZ3 für das Heizen von der vierten und fünften Strukturvariante mit und ohne Labore für die Jahre 2022 und 2042



Die Abbildung 47 verdeutlicht die Auswirkungen der EWS-Feld-Auslegung und einer Grundlast auf den Anteil der Wärmepumpe am gesamten Heizenergiebedarf. Eine Vergrößerung des EWS-Felds von Strukturvariante 04KW auf 05KW erhöht den Versorgungsanteil um rund 12 %, da mehr Energie für die Wärmepumpe bereitgestellt werden kann.

Abbildung 47: Versorgungsanteil der Wärmepumpe an die Wärmeversorgung des Referenz-Quartiers von der vierten und fünften Strukturvariante

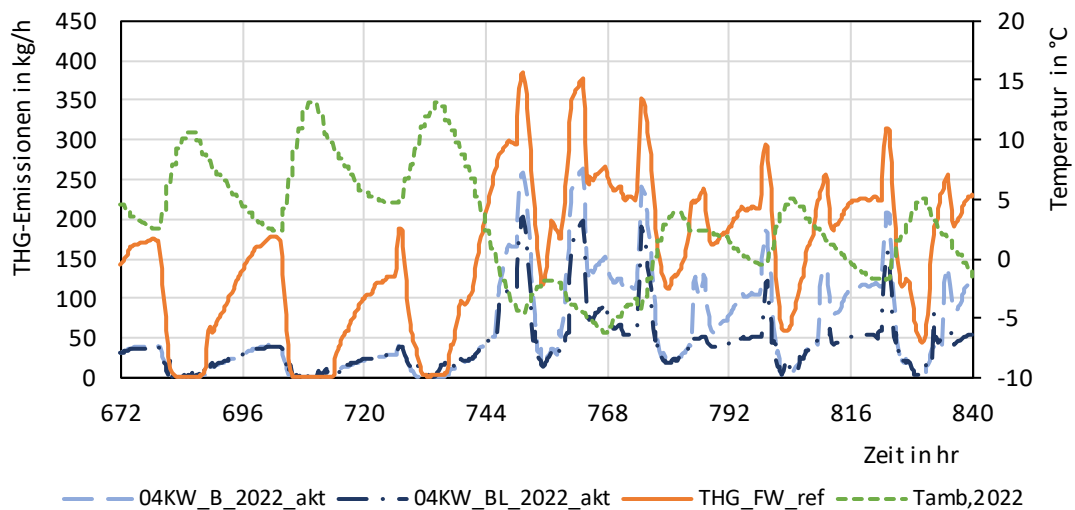


Im Jahr 2042 steigt der Versorgungsanteil ohne Grundlast (B) geringfügig im einstelligen Prozentbereich. Bei vorhandener Grundlast zeigt sich jedoch kein signifikanter Unterschied im Wärmeversorgungsanteil zwischen den beiden Strukturvarianten, da beide einen Anteil von rund 95 % erreichen. Dies ist auf die Systemregelung und das Vorhandensein der Grundlast zurückzuführen.

Heizfall

Eine exemplarische Woche für den Heizfall ist in Abbildung 48 abgebildet. Im Heizfall spielen die PV-Erträge eine untergeordnete Rolle, da die Außenlufttemperatur und die solare Einstrahlung die Heizlast der Strukturvarianten maßgeblich beeinflussen. Die THG-Emissionen verlaufen diametral zur Außenlufttemperatur. Der parallele Versatz zwischen den Strukturvarianten 04KW und 05KW resultiert aus dem abnehmenden Anteil an Fernwärme, die hohe CO₂-Äquivalent-Werte [70] aufweist. Dieser Effekt ist insbesondere bei Außentemperaturen unter 0 °C ausgeprägt. Ähnlich wie beim Versorgungsanteil zeigt sich ein positiver Effekt durch die Grundlast der Labore. Die Kompressionskältemaschine versorgt die kalte Seite mit Kälteenergie, wodurch sich der warme Pufferspeicher, in Zeiten geringen Wärmeenergiebedarfs, auf der warmen Seite bis zur Grenztemperatur aufladen kann. Dies minimiert den Einsatz der Fernwärme als Zusatzheizung und reduziert somit die THG-Emissionen in der Strukturvariante 04KW_xx_2022_akt von 898 t/a auf 708 t/a.

Abbildung 48: Verlauf der THG-Emissionen in kg/h für die Kalenderwoche 5 des Jahres 2022 in der Strukturvarianten 04KW, jeweils mit und ohne Berücksichtigung von Laboren. Zusätzlich ist ein Referenzwert für die THG-Emissionen bei ausschließlichem Betrieb mit Fernwärme dargestellt



7 Nutzer:innen-Feedback und Datenanalyse

Bearbeitung: Institut für Softwaretechnologie, dwh GmbH

Das Arbeitspaket „NutzerInnen-Feedback und Datenanalyse als Grundlage eines bedarfsorientierten Kühlbetriebs“ kann grundsätzlich in drei Teilbereiche gegliedert werden: (i) die Entwicklung von Machine Learning (ML) Modellen zur Vorhersage des Energiebedarfs, (ii) die Entwicklung von Echtzeit-Nutzer:innenfeedback und (iii) die Einbindung von Nutzer:innenfeedback in die Optimierung der Kühlung.

7.1. Methodik: Time Series Forecasting

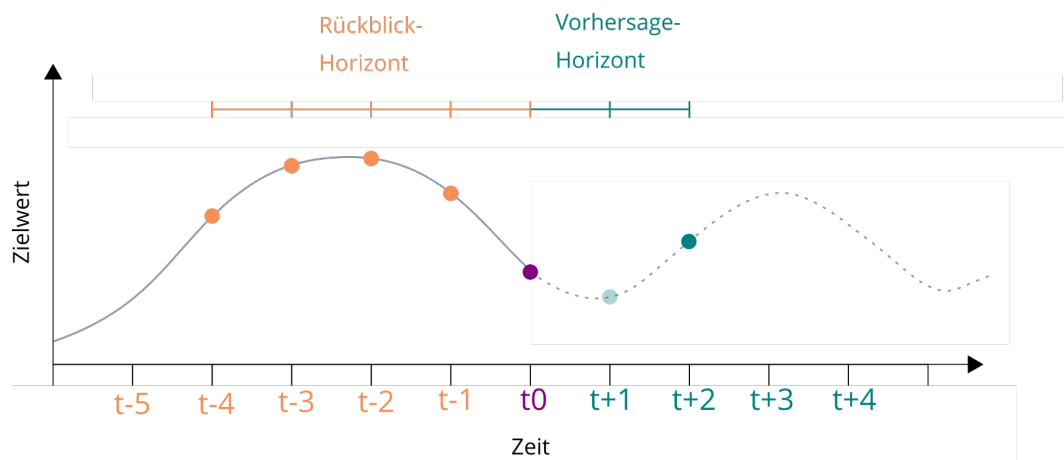
Der Use-Case ist ein fünfstöckiges, gemischt genutztes Gebäude an der Technischen Universität Graz, das Büros, Seminarräume, Labore und einen Hörsaal beherbergt ^[71]. Wir tragen zum Stand der Technik bei, indem wir die Leistungsfähigkeit und Robustheit verschiedener Methoden des maschinellen Lernens zur Vorhersage des Energiebedarfs in Gebäuden bewerten. Ein besonderer Schwerpunkt lag auf der Robustheit der Modelle, da die Entwicklungen des Projektes inmitten der COVID-19-Pandemie stattfanden, einer Zeit, in der sich die Verbrauchsmuster zwischen Trainings- und Testdaten signifikant unterschieden.

Die Wahl geeigneter Modelle basiert unter anderem auf der Wahl zwei wesentlicher Parameter: Rückblick- sowie Vorhersage-Horizont. Der Rückblick-Horizont beschreibt die Anzahl an vergangenen Messwerten, welche als Input-Daten in das Modell einfließen. Bei einem Rückblick-Horizont von 0 basiert eine Vorhersage beispielsweise ausschließlich auf dem aktuell gemessenen Wert zum Zeitpunkt t_0 , bei einem Rückblick-Horizont von 1 auf den Werten zum Zeitpunkt t_0 sowie dem vorherigen Wert zum Zeitpunkt $t-1$. Der Vorhersage-Horizont beschreibt, wie weit die Vorhersage des Modells in der Zukunft liegt. Bei einem Vorhersage-Horizont von 1 gibt das Modell eine Prädiktion des Zielwertes zum nächsten Zeitpunkt ($t+1$). Für diese Analyse wurden Modelle zur Vorhersage eines einzelnen zukünftigen Zielwertes entwickelt (single step), nicht zur Vorhersage mehrerer Werte (multi step). Die geeignete Wahl dieser Parameter ist unter anderem abhängig von der zeitlichen Auflösung der vorhandenen Daten, also von der Länge des Intervalls zwischen zwei Zeitschritten t und $t+1$.

Im Beispiel in Abbildung 49 zeigt der Graph die Entwicklung der tatsächlichen Zeitreihe, wobei die durchgezogene Linie die vergangenen (gemessenen) und die gestrichelte Linie die zukünftigen (unbekannten) Werte in Bezug auf die aktuelle Zeit t_0 darstellen. Der aktuelle Messwert (t_0) in Kombination mit den vier vorherigen Messwerten (Zeitschritte $t-1$, $t-2$, $t-3$, $t-4$, markiert durch orange Punkte) ist die Grundlage für die Vorhersage des Wertes für Zeitpunkt $t+2$ (markiert durch einen türkisen Punkt). Dies entspricht einem Rückblick-Horizont von vier Zeitschritten und einem Vorhersage-Horizont von zwei Zeitschritten.

⁷¹ Eine ausführliche Beschreibung Entwicklungen und Resultate ist in folgendem Paper zu finden: Schranz, T., Exenberger, J., Møldrup Legaard, C., Drgona, J., & Schweiger, G. (2021, September). Energy prediction under changed demand conditions: Robust machine learning models and input feature combinations. In Building Simulation 2021.

Abbildung 49: Rückblick-Horizont von vier und Vorhersage-Horizont von zwei. Der aktuelle Wert zum Zeitpunkt t_0 sowie vier vergangenen Werte ($t-1$ bis $t-4$, orange markiert) werden zur Vorhersage eines Wertes zwei Zeitschritte in der Zukunft ($t+2$, türkis markiert) verwendet. In der single step Methode wird nur ein einzelner zukünftiger Wert vorhergesagt, der Wert $t+1$ (türkiser transparenter Punkt) bleibt also unbekannt.



7.2. Analyse geeigneter Datengrundlagen

Die Daten zum Energie- und Wasserverbrauch sind vom Mai 2019 bis zum Juli 2020 in stündlichen Intervallen verfügbar. Hervorzuheben gilt, dass dieser Zeitraum durch die COVID-19-Pandemie geprägt ist, insbesondere von März 2020 bis Juli 2020. Aufgrund der Maßnahmen der österreichischen Bundesregierung und der Universitätsleitung war der Zugang zu den akademischen Einrichtungen eingeschränkt, der Präsenzunterricht ausgesetzt und die Mitarbeiter wurden angewiesen, nach Möglichkeit von zu Hause aus zu arbeiten.

Belegungsdaten werden durch Zeitpläne aus dem Ressourcenmanagementsystem der TU Graz approximiert. Der Datensatz enthält die Termine und Anmeldungen für alle Veranstaltungen und Kurse, die im Hörsaal des Gebäudes stattfinden.

Wetterdaten wurden über die GeoSphere Austria Datahub API ^[72] abgerufen, die einen offenen Zugang zu den Daten bietet. Die Daten wurden am Flughafen Graz, etwa 8 km entfernt, erfasst und enthalten stündliche Messungen.

Es wurden vier Modelle entwickelt: lineare Regression, Random Forest (Decision Tree Modell) sowie zwei neuronale Netze – ein vollständig verbundenes sequentielles Modell (NN) und ein rekurrentes Netzwerk (RNN). Zur Bewertung und zum Vergleich der Modelle wurden drei Fehler Metriken angewandt: den Variationskoeffizienten des Root Mean Square Error (CV-RMSE), den mittleren absoluten prozentualen Fehler (MAPE) und den Determinationskoeffizienten (R^2). Diese drei Metriken sind in der Literatur häufig verwendete Standards zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit von Modellen zur Vorhersage des Energiebedarfs von Gebäuden. Alle Modelle wurden separat trainiert, wobei sechs verschiedene Kombinationen von Messgrößen und Rückblick-Horizonten von 12, 48 und 72 Stunden verwendet wurden, um den stündlichen Energiebedarf für 1, 3, 6, 12 und 24 Stunden vorauszusagen.

⁷² GeoSphere Austria. (o.J.). Stationsmessdaten Graz-Thalerhof-Flughafen [Datensatz]. GeoSphere Austria Data Hub. Abgerufen am [Zugriff am 3. Juli 2023], von <https://data.hub.geosphere.at>

Die getesteten Kombinationen verschiedener Datensätze waren:

- Energiebedarf
- Energiebedarf + Wetterbedingungen
- Energiebedarf + Datum/Zeit-Features (genannt „datetime“)
- Energiebedarf + Wasserverbrauch
- Energiebedarf + Belegung
- Energiebedarf + Kombination aller oben genannten Features

Abbildung 50 und Abbildung 51 zeigen die Ergebnisse für CV-RMSE und ausgewählte Datenkombinationen mit Rückblick-Horizonten von 24 h sowie 72 h – für eine ausführliche Beschreibung aller Ergebnisse siehe [71]. Es zeigt sich, dass alle Modelle für die einstündige Vorhersage unabhängig von den gewählten Datensätzen und dem Rückblick-Horizont gut abschneiden. Im Gegensatz dazu scheint die 24-Stunden-Vorhersage für alle Modelle schwierig zu sein. Bei der Vorhersage von drei bis zwölf Stunden im Voraus sind die Leistungsunterschiede zwischen den Modellen und den gewählten Features am deutlichsten. Die Änderung des Rückblick-Horizonts von 24 auf 72 Stunden verbessert die Genauigkeit im Allgemeinen nicht, obwohl das Random Forest Modell bei Verwendung von Energieverbrauch und Datum / Zeit-Features als Eingabe leicht von einem längeren Rückblick zu profitieren scheint.

Abbildung 50: Vergleich des CV-RMSE für unterschiedliche Modell- und Feature-Kombinationen (Rückblick Horizont 24 Stunden)

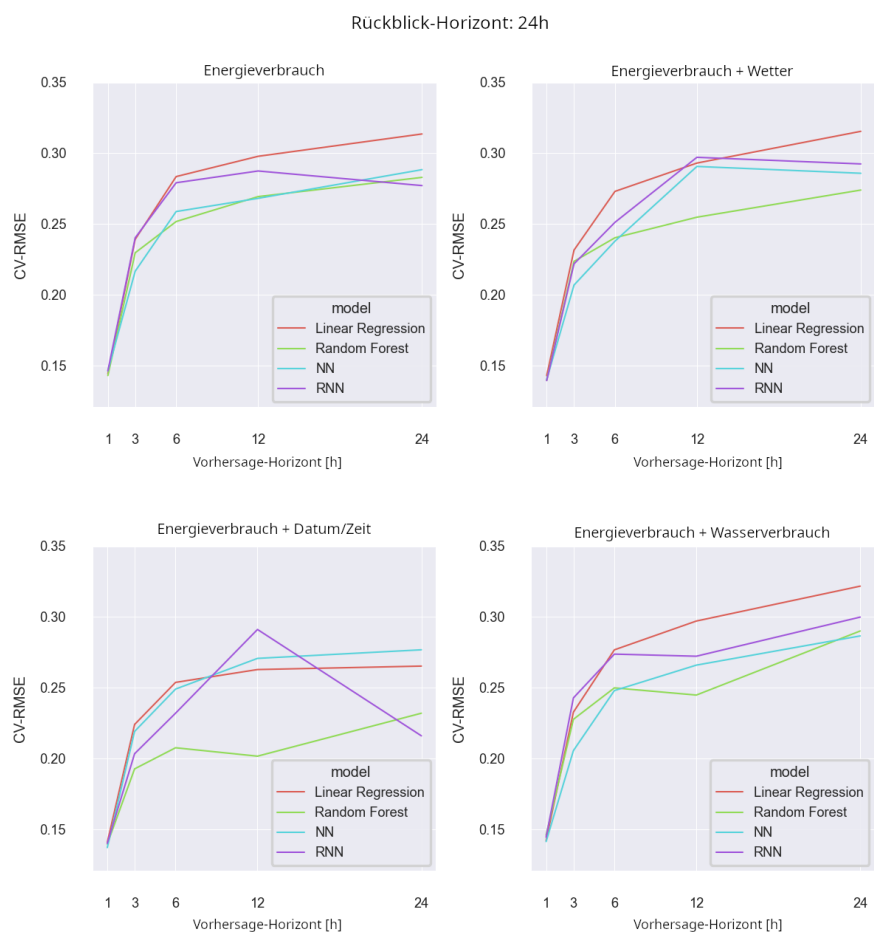
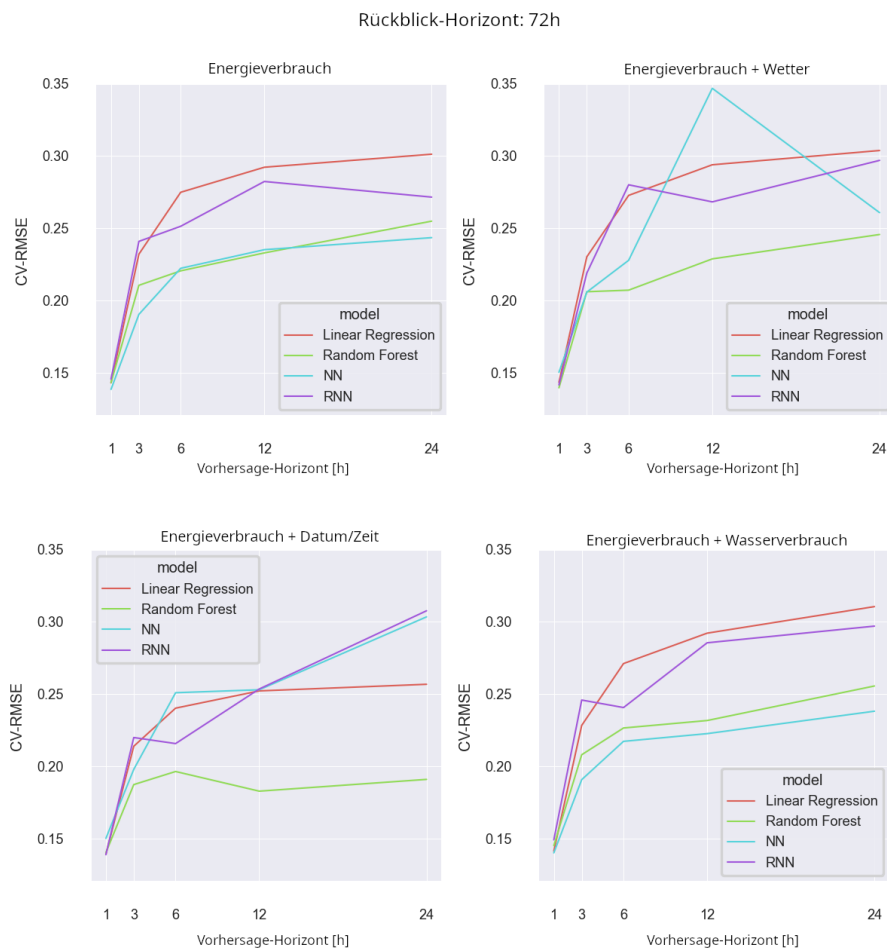


Abbildung 51: Vergleich des CV-RMSE für unterschiedliche Modell- und Feature-Kombinationen (Rückblick-Horizont 72 Stunden)

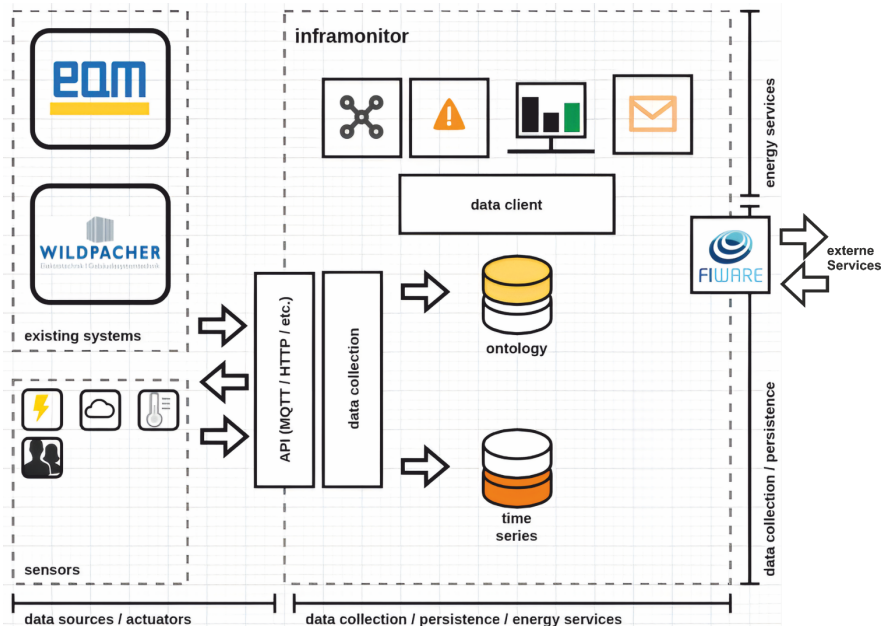


Die Ergebnisse zeigen, dass aus Datum und Uhrzeit abgeleitete Features die Vorhersage am stärksten beeinflussen, unabhängig von der Wahl des Modells und des Rückblick-Horizonts. Bei Betrachtung der Vorhersagegenauigkeit sowie Leichtigkeit in ihrer Anwendung bilden einfache Modelle wie Random Forests in Bezug auf Generalisierbarkeit sowie Robustheit gute Ergebnisse bei unterschiedlichen Kombinationen von Messgrößen und Rückblick-Horizonte. Zu große Vorhersage-Horizonte sollten vermieden werden, wobei die Wahl geeigneter Werte hier stark von der Anwendung und der zeitlichen Auflösung der Daten abhängt. In unserem Fall zeigen alle Modelle besonders zwischen Vorhersage-Horizonten von 1 und 3 große Qualitätssprünge, während der Qualitätsabfall dann deutlich abnimmt.

7.3. IKT-Plattform, Nutzer:innen-Feedback und Nutzer:innen Komfort

Die für das Projekt notwendigen Daten wurden in die IoT Plattform integriert und liefern Werte in Echtzeit; der Aufbau der IKT-Plattform ist in Abbildung 52 dargestellt. Um den Energieverbrauch der Datenerfassung möglichst gering zu halten, werden MQTT Kommunikationsprotokolle eingesetzt. Außerdem sind die Protokolle und Kommunikationsstandards so gewählt, dass sie den IoT-Middleware-Referenzmodellen der EU (SAREF Ontology) entsprechen und somit universell von einer Vielzahl von heterogenen Gerätetypen verstanden werden.

Abbildung 52: Übersicht über die IKT Plattform

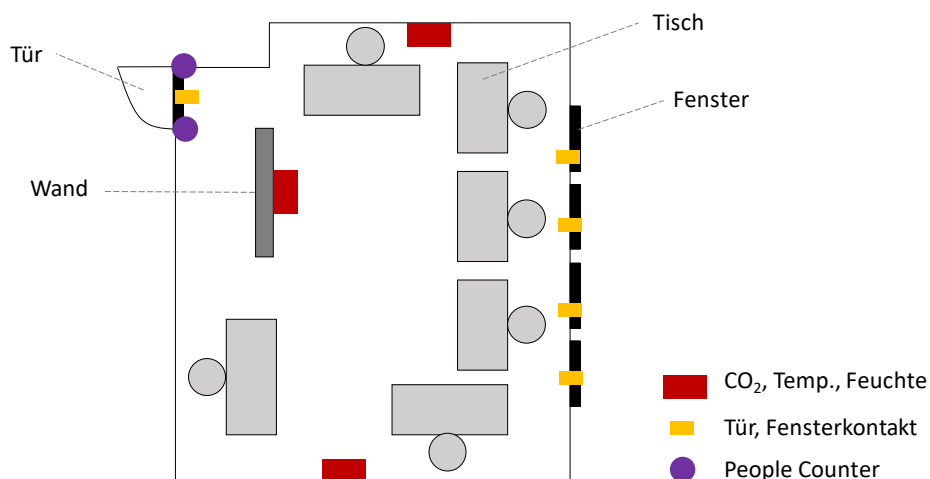


Zur Untersuchung des thermischen Komforts der Nutzer:innen wird zusätzliche Sensorik eingesetzt. Im Rahmen des Projekts wurde ein Büro mit den folgenden Sensoren ausgestattet (siehe Abbildung 53):

- Kombi-Sensor: CO₂, Feuchtigkeit und Temperatur
- Fenster- und Türkontakte: Überwachen den Status von Fenstern und Türen
- Personenzähler: Erfassen die Anzahl der im Raum befindlichen Personen

Um größtmögliche Flexibilität zu gewährleisten, wurden die Sensoren auf Basis der LoRaWAN-Funktechnologie [73] eingesetzt. Personenzähler sind erforderlich, um einen gelabelten Datensatz zu generieren, der Auskunft darüber gibt, wann sich wie viele Personen im Raum aufgehalten haben.

Abbildung 53: Installation zusätzlicher Sensoren in einem Büro



⁷³ LoRa Alliance: What is LoRaWAN®? Abgerufen am 3.7.2024, von <https://lora-alliance.org/about-lorawan/>

Im Zeitraum von April bis Juli 2023 wurde eine App-basierte Feedbackstudie durchgeführt. Hierzu wurden drei Tablets im Büro installiert, über die ein kurzes, aus fünf Fragen bestehendes Feedbackformular zum aktuellen Wohlbefinden ausgefüllt werden konnte. Zusätzlich wurde die aktuelle Raumbelegung erfasst, um diese Werte als Datengrundlage und zur möglichen Kalibrierung der mit den Infrarotsensoren gemessenen Belegungen zu verwenden. Die Ziele der Studie waren: (i) die Funktionsweise eines App-basierten Feedbacksystems zu testen, (ii) die Bereitschaft der Mitarbeitenden zur Nutzung eines solchen Systems mittels Tablets zu untersuchen und (iii) die Erstellung von Nutzerprofilen auf Basis der gewonnenen Daten.

Insgesamt wurden 133 Feedbacks registriert. Die Auswertung der Befragung zeigt eine große Streuung, aus der CO₂ Konzentration sowie der Luftfeuchte können aber Korrelationen mit allgemeinem Wohlbefinden identifiziert werden (siehe Abbildung 54 und Abbildung 55).

Abbildung 54: Nutzer:innen-Feedback zum Wohlbefinden in Innenräumen und dazu gemessene Werte

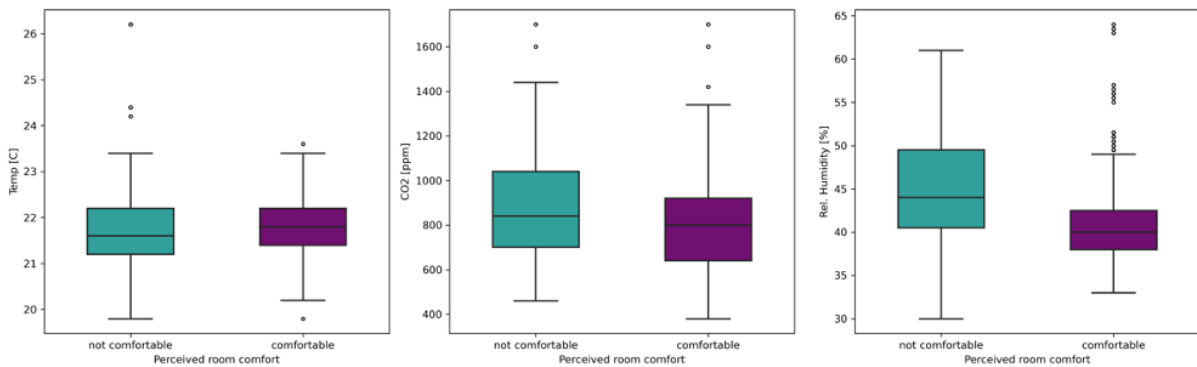
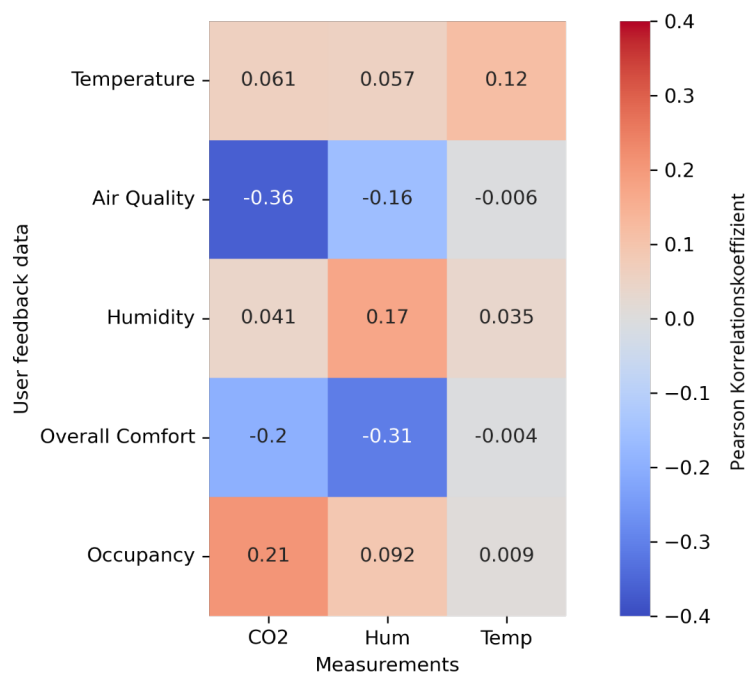


Abbildung 55: Korrelationen zwischen Nutzer:innen-Feedback und tatsächlichen Messwerten (Korrelationskoeffizient: -1 perfekte negative Korrelation, 0 keine Korrelation, +1 perfekte positive Korrelation).

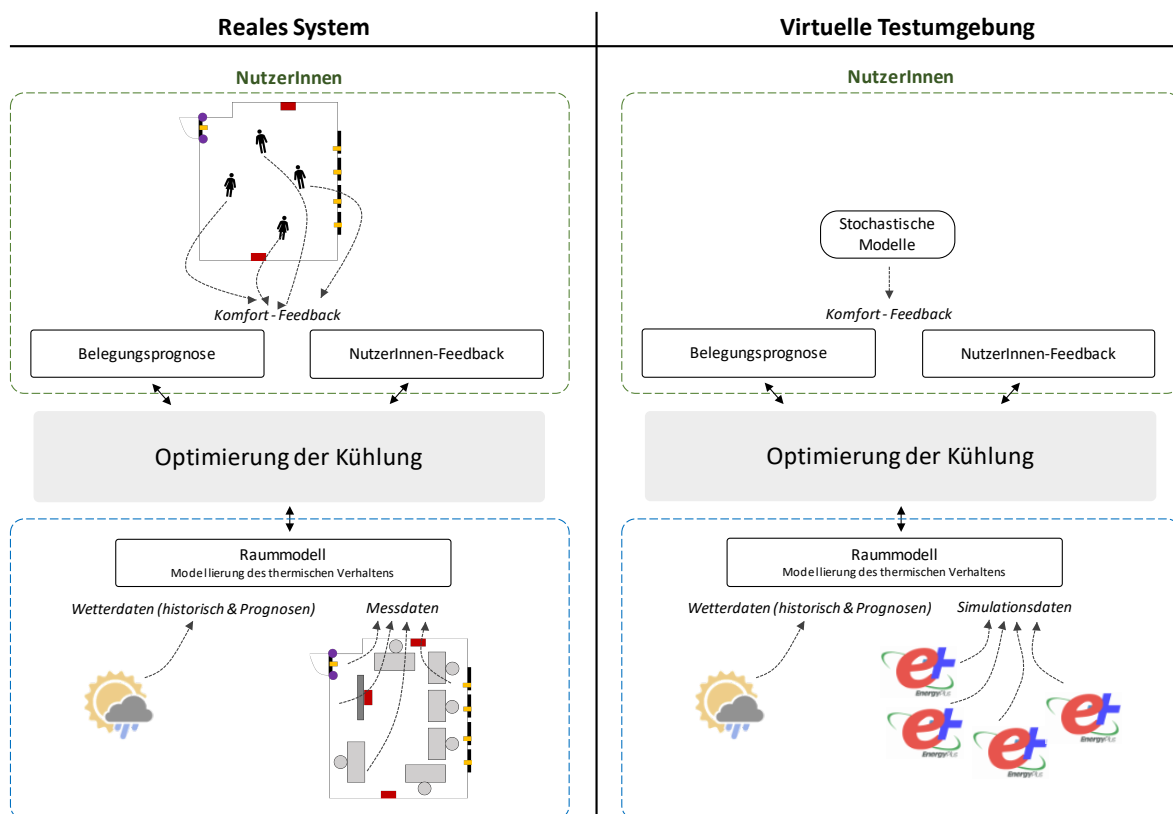


Wie erwartet, besteht eine negative Korrelation zwischen der CO₂-Konzentration und der wahrgenommenen Luftqualität sowie dem Wohlbefinden. Auch zwischen der Luftfeuchtigkeit und dem Wohlbefinden zeigt sich eine negative Korrelation. Der vermutete Zusammenhang zwischen höheren CO₂-Werten und der Anzahl an Personen im Raum wird durch die positive Korrelation dieser beiden Werte bestätigt. Es sei ausdrücklich darauf hingewiesen, dass die empirische Studie das experimentelle Setup validieren soll. Für genaue Aussagen zum Nutzer:innen-Komfort sind größere Studien mit mehr Proband:innen und verschiedenen Büro-Setups erforderlich.

7.4. Optimale Regelung der Kühlung

Ein wichtiger Aspekt des Projekts war die Entwicklung einer möglichst skalierbaren Lösung. Um sicherzustellen, dass die Ergebnisse den zukünftigen realen Anforderungen bestmöglich entsprechen, wurde das reale System im Vorfeld hinsichtlich Messdaten und Randbedingungen genau definiert (siehe Abbildung 56). Ein zentraler Aspekt war, dass der Workflow auf einfach messbaren Input-Features basiert: Für die ML-Modelle sollten nur Input-Features verwendet werden, die einfach zu messen sind und standardmäßig in modernen Gebäuden verfügbar sind. Auf komplexe Simulationen zur Berechnung von Input-Features wird verzichtet. Darüber hinaus wurde ein modularer Aufbau des gesamten Systems angestrebt, um einzelne Sub-Systeme, wie beispielsweise das User-Feedback, zukünftig durch neue Modelle ersetzen zu können.

Abbildung 56: Reales System und dessen Abbildung in der Simulationsumgebung



Im Folgenden werden die Entwicklungen für die virtuelle Testumgebung beschrieben, dessen Ziel es ist, ein möglichst einfaches und skalierbares Modell des thermischen Verhaltens von Räumen zu entwickeln, das neben den Messdaten keine zusätzlichen Informationen wie Geometrie oder Ausrichtung des Gebäudes benötigt. Dazu wurden synthetische Daten generiert: Ein Modell eines Bürogebäudes wurde mit SketchUp Studio erstellt und in OpenStudio erweitert, zur Simulation des Energieverbrauchs wurde EnergyPlus verwendet. Simulationen wurden für die Monate Juli und August 2022 durchgeführt.

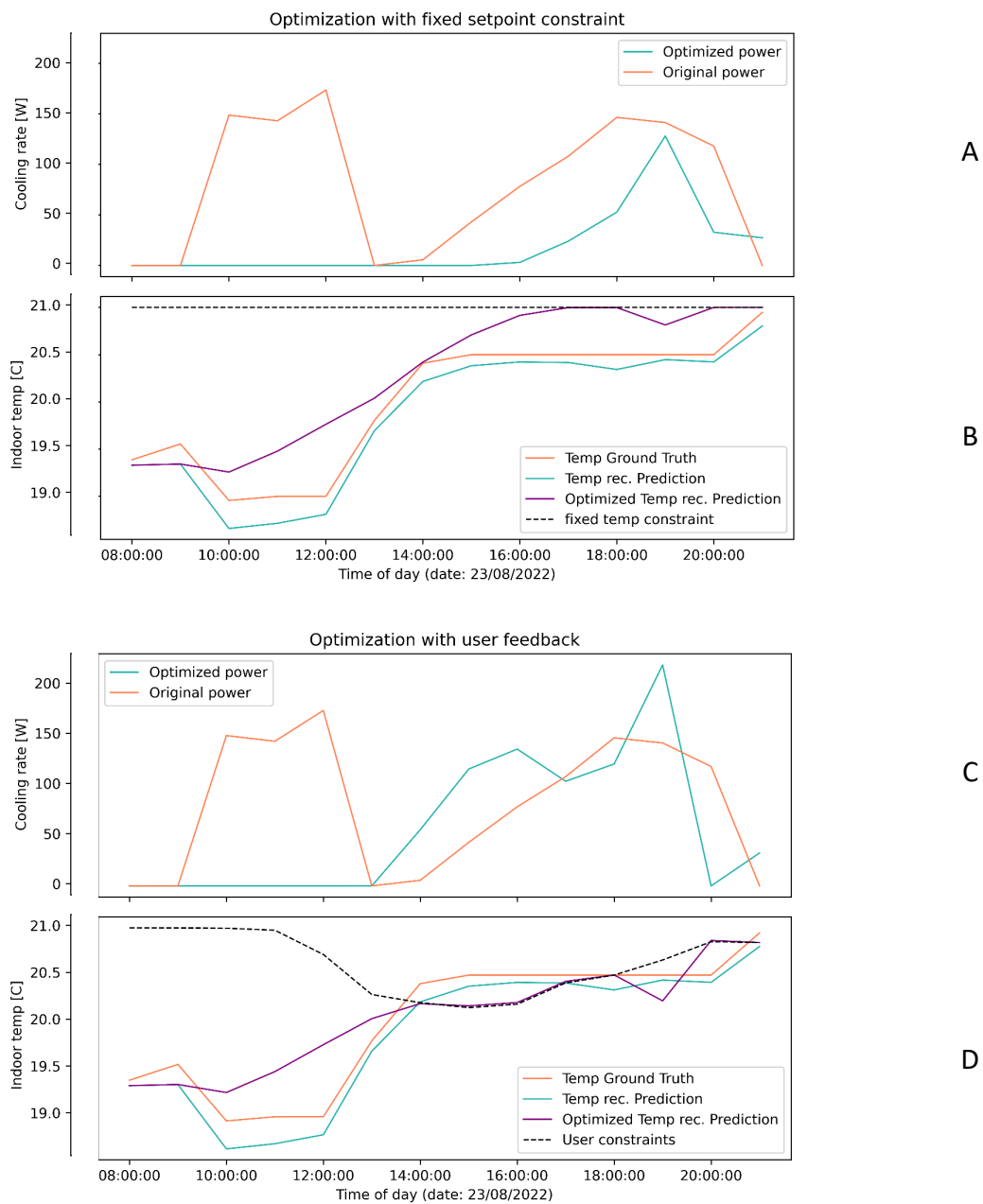
Basierend auf den vorliegenden Daten wurde ein ML-Modell trainiert. Die Input-Features umfassen die Außentemperatur, die diffuse und direkte Solarstrahlung, die Anzahl der Personen im Raum sowie die Kühlleistung. Die Zielvariable des Modells ist die Raumlufttemperatur. Das Modell nutzt die Input-Features zum aktuellen Zeitpunkt sowie die Input-Features und die Zielvariable (Raumlufttemperatur) aus einem Rückblick-Horizont von zwei Stunden. Das Modell wird rekursiv angewendet, um Vorhersagen für die nächsten 24 Stunden zu generieren. Dabei wird die Vorhersage für den aktuellen Zeitpunkt als Input-Feature für die Vorhersage des nächsten Zeitschritts verwendet.

Da die Trainingsdaten aus den Simulationsdaten eines deterministischen Modells stammen, sind die Input-Features der Vorhersagen (Außentemperatur, Globalstrahlung, Kühlleistung und Anzahl der Personen) idealisiert. In der realen Anwendung sind diese Input-Features jedoch nur mit einer gewissen Unschärfe in Form von Vorhersagen verfügbar. Zur Validierung der Methode sind diese Vereinfachungen jedoch akzeptabel.

Um die Methode zu validieren, wurde User-Feedback mittels randomisierter Userprofile modelliert, welches anschließend in den Optimierungsalgorithmus einfließt. Dafür wurden Nutzer:innen mit unterschiedlichen thermischen Komfortverhalten definiert. Individuelles Feedback wird anschließend in jedem Simulationsschritt in Abhängigkeit von der Außentemperatur modelliert. Aus den einzelnen Feedbacks wird ein durchschnittlicher Wert erzeugt. Liegt dieser auf der Likert-Skala über dem mittleren Wert (d.h. den Leuten ist es im Mittel zu warm), wird der Sollwert für die Kühlung für den nächsten Zeitschritt um 0.5 °C gesenkt. Das Ziel der Optimierung ist die Minimierung des Energieverbrauchs der Kühlung unter der Nebenbedingung, dass die Raumtemperatur den Anforderungen der Nutzer:innen entspricht. Die Optimierungsvariable sind die Kühlleistungen der nächsten Stunden.

So zeigt die Abbildung 57 (Grafik B) einerseits den Vergleich der Vorhersage der Raumtemperatur des ML-Modells (türkis) im Vergleich zur Ground Truth (orange) basierend auf den Simulationsdaten und andererseits die optimierte Temperaturvorhersage bei konstantem Sollwert (21°C). Es ist zu sehen, dass die optimierte Temperaturvorhersage den Sollwert (schwarz gestrichelte Linie) nicht überschreitet. Abbildung 57 (Grafik A) zeigt die dazugehörige Kühlleistung: in orange die Kühlleistung der Trainingsdaten und in türkis die optimierte Kühlleistung. Im Vergleich zu Abbildung 57 (Grafiken A und B) wird in Abbildung 57 (Grafik C und D) der Sollwert nicht konstant gehalten, sondern über das User-Feedback variabel definiert. Auch hier wird der Sollwert nicht überschritten.

Abbildung 57: Die Abbildung zeigt die Validierung des ML-Modells und die Optimierungsergebnisse



Grafik A vergleicht die ursprüngliche Kühlleistung (orange) mit der optimierten Kühlleistung (türkis) bei festem Sollwert. Grafik B zeigt die Temperaturverläufe: tatsächliche Temperatur (orange), Modellvorhersage (türkis) und optimierte Temperatur (violett) bei festem Sollwert (gestrichelt). Grafik C (rechts oben) und D zeigen dieselben Vergleiche, jedoch unter Einbeziehung des Benutzerfeedbacks.

8 Lebenszyklusorientierte Nachhaltigkeitsbewertungen

Bearbeitung: Institut für Tragwerksentwurf

8.1. Lebenszykluskostenberechnung

Zur Bewertung der ökonomischen Qualität der ausgewählten Kühlkonfigurationen wurde die Methode der Lebenszykluskostenberechnung (Barwert- oder Nominalwertmethode) nach ÖNORM B 1801-4 ^[74] herangezogen. Demnach umfassen die Lebenszykluskosten „die Errichtungskosten (gemäß ÖNORM B 1801-1 ^[75]) und die Folgekosten, das sind die Kosten, die sich aus dem Betrieb und der Nutzung während der Nutzungsphase eines Objekts ergeben, zuzüglich der Objektbeseitigungs- und Abbruchkosten (gemäß ÖNORM B 1801-2 ^[76])“. Bei zunehmendem Betrachtungszeitraum steigt gleichzeitig die Unschärfe in der Prognose (z.B. infolge außerplanmäßiger Systemwechsel der technischen Ausstattung aufgrund technischen Fortschrittes, geänderter gesetzlicher Rahmenbedingungen, etc.). In diesem Zusammenhang sieht die ÖNORM B 1801-4 als Betrachtungszeitraum (bei Anwendung der Barwert- oder Nominalwertmethode) die Dauer von 30 Jahren vor.

Kalkulationszinssatz, Preisentwicklung und Energiepreis wurden wie folgt als Grundlage für die Lebenszykluskostenberechnung und für die weiteren (Dominanz- und Sensitivitätsanalysen) angesetzt. Der Kalkulationszinssatz dient als Diskontierungsfaktor, um den Zeitwert des Geldes zu berücksichtigen und somit künftige Zahlungen bzw. Cashflow auf den gegenwärtigen Wert abzuzinsen. Dabei muss zwischen nominalen und realen Kalkulationszinssatz unterschieden werden. Während der nominale Kalkulationszinssatz die Inflationsrate nicht berücksichtigt, stellt der reale Kalkulationszinssatz einen inflationsbereinigten Wert dar. Der reale Kalkulationszinssatz der TU Graz orientiert sich am Euribor ^[77] und wurde mit 3.0 % angenommen. Dieser angenommene Kalkulationszinssatz deckt sich auch mit dem vorgeschlagenen Kalkulationszinssatz für die Berechnung der gebäudebezogenen Kosten im Lebenszyklus aus dem, auf der Normenreihe ÖNORM B 1801 basierendem, Gebäudezertifizierungssystem der ÖGNI ^[78]. Die weiteren relevanten Preissteigerungsraten für die unterschiedlichen Kostengruppen werden basierend auf dem Gebäudezertifizierungssystem der ÖGNI wie die „Allgemeine Baupreissteigerung“ mit 2.0 % und die Kosten für Energie mit 5.0 % festgelegt. Die Energiepreise für elektrische Energie wurden für 2016 bis 2022 mit 91.4 €/MWh netto angesetzt.

In Strukturvariante 1 (dezentrale PV-Versorgung) setzen sich die Errichtungskosten ^[79] aus den technischen Komponenten Kältemaschinen, Pumpen, Rückkühler, Wärmetauscher, Pufferspeicher, PV-Paneele, zusammen. In Strukturvariante 2 wird angenommen, dass die dezentrale PV-Versorgung zu einem Verbund zusammengeschlossen (zentrale PV-Versorgung) wird, um zwischen den einzelnen Gebäuden einen PV-Transfer zu gewährleisten.

⁷⁴ Austrian Standards International (ASI), ÖNORM B 1801 – 4, Bauprojekt- und Objektmanagement - Teil 4: Berechnung von Lebenszykluskosten, Ausgabedatum: 2014 04 01

⁷⁵ Austrian Standards International (ASI), ÖNORM B 1801 – 1, Bauprojekt- und Objektmanagement - Teil 1: Objektterrichtung, Ausgabedatum: 2022 03 01

⁷⁶ Austrian Standards International (ASI), ÖNORM B 1801 – 2, Bauprojekt- und Objektmanagement - Teil 2: Objekt-Folgekosten, Ausgabedatum: 2011 04 01

⁷⁷ <https://www.euribor-rates.eu/de/>

⁷⁸ Österreichische Gesellschaft für Nachhaltige Immobilienwirtschaft (ÖGNI), DGNB System – Kriterienkatalog Gebäude Neubau (Pilotversion), 2023

⁷⁹ Die Errichtungskosten der Komponenten beinhalten keine Lohnkosten.

In Bezug auf die Errichtungskosten ist nach Abstimmung mit den Projektpartnern dabei mit keinen zusätzlichen Kosten zu rechnen. In Strukturvariante 3 wird zu der zentralen PV-Versorgung aus Strukturvariante 2 eine zentrale Kälteversorgung umgesetzt. Dazu sind eine zusätzliche Pumpe sowie zusätzliche Rohrleitungen für das zentrale Kältenetz notwendig. Neben den oben angeführten haustechnischen Komponenten zählen zu den Errichtungskosten zusätzlich folgende Komponenten: Pumpe - Netzbereich „Gelb“, Rohrleitungen - Netzbereich „Gelb“, Rohrleitungen - Netzbereich „Grün“, Rohrleitungen - Netzbereich „Blau“ (Abbildung 33).

Die bestehenden Rohrleitungen in den jeweiligen Gebäuden (von den Technikräumen zu den Kälteabgabesystemen) wurden in allen drei Strukturvarianten nicht berücksichtigt. Die jährlichen Kosten für Instandsetzung, Wartung- und Inspektion sind für die einzelnen gebäudetechnischen Komponenten, ebenso wie die Austauschzyklen aus der VDI-Richtlinie 2067 [80]. In Abbildung 58 werden die rechnerische Nutzungsdauern, die jährlichen Kosten für Instandsetzung und die jährlichen Kosten für Wartung- und Inspektion der Komponenten nach VDI-Richtlinie 2067 dargestellt.

Abbildung 58: Rechnerische Nutzungsdauern, jährliche Kosten für Instandsetzung und jährliche Kosten für Wartung- und Inspektion der Komponenten nach VDI-Richtlinie 2067

	Rechnerische Nutzungsdauer [Jahre]	Aufwand für Instandsetzung [%]	Aufwand für Wartung und Inspektion [%]
Kältemaschinen	15	2.0	1.0
Pumpen	10	2.0	0.0
Rückkühler	20	2.0	1.0
Wärmetauscher	20	2.0	10.0
Pufferspeicher	10	1.0	0.5
PV-Paneele	25	0.5	1.0

Während in Strukturvariante 1 der erzeugte PV-Strom direkt in den Gebäuden verbraucht wird, auf welchen dieser erzeugt wird, wird der PV-Strom in Strukturvariante 2 und 3 zentral über das Referenz-Quartier verteilt. Abbildung 59 zeigt den Netzbezug der Strukturvarianten.

Abbildung 59: Kühlbedarf, PV-Erzeugung und Strombedarf in den 12 Varianten

Szenarien	Gebäude	Labor	Verluste	Summe	PV-Ernte	Einspeisung	Überschuss	Bedarf gesamt	Netzbezug
01K_B_2022	1800	0	11	1811	0	0	0	569	569
01K_BL_2022	1791	2695	23	4510	0	0	0	1242	1242
01K_B_2022_akt	1800	0	11	1811	1002	85	917	569	483
01K_BL_2022_akt	1791	2695	23	4510	1002	141	862	1242	1101
02K_B_2022	1800	0	11	1811	0	0	0	569	569
02K_BL_2022	1791	2691	23	4506	0	0	0	1242	1242
02K_B_2022_akt	1800	0	11	1811	1002	293	709	569	276
02K_BL_2022_akt	1791	2691	23	4506	1002	599	404	1242	643
03K_B_2022	1802	0	104	1906	0	0	0	647	647
03K_BL_2022	1803	2691	186	4680	0	0	0	1371	1371
03K_B_2022_akt	1802	0	104	1906	1002	299	704	647	348
03K_BL_2022_akt	1803	2691	186	4680	1002	623	379	1371	747

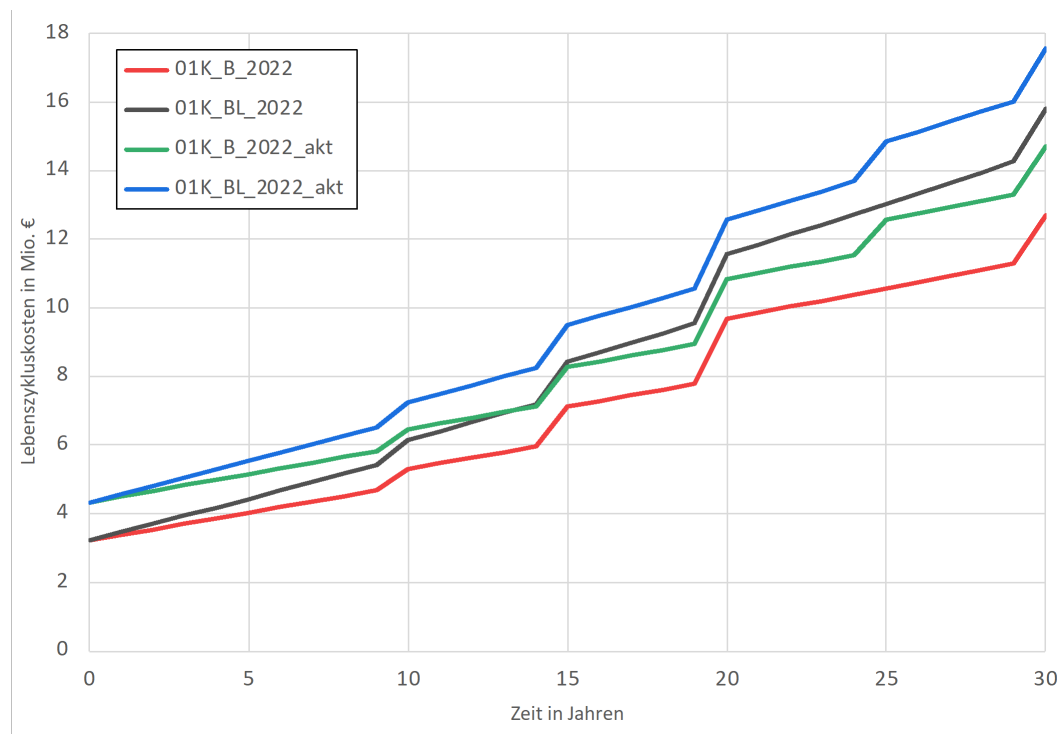
⁸⁰ VDI 2067, Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen - Grundlagen und Kostenberechnung, 2012

Beim Bedarf und somit auch beim Netzbezug wird nur die benötigte Energie für den Kühlbedarf, d.h. Klimatisierung und Prozesskälte, berücksichtigt. Energie für Wärmebereitstellung und Nutzerstrom werden in allen drei Strukturvarianten und deren Szenarien nicht berücksichtigt. Obwohl die Rückbaukosten in der Lebenszykluskostenberechnung nicht berücksichtigt wurden, ist im Hinblick auf den Variantenvergleich keine Änderung der Ergebnisse zu erwarten, da aufgrund der relativ geringen bautechnischen Unterschiede der Varianten ein eher vernachlässigbarer Kostenunterschied zu erwarten ist.

Ergebnisse der Lebenszykluskostenberechnung

Betrachtet man die Strukturvariante 1 (dezentrale PV-Versorgung) und deren Szenarien, zeigt sich, dass die erhöhten Errichtungskosten aufgrund der PV-Anlagen auf den jeweiligen Gebäuden über den Betrachtungszeitraum von 30 Jahren nicht durch die reduzierten Folgekosten (geringer Netzbezug in den Szenarien *01K_B_2022_akt* und *01K_BL_2022_akt* aufgrund der PV-Erzeugung) amortisiert werden (Abbildung 60).

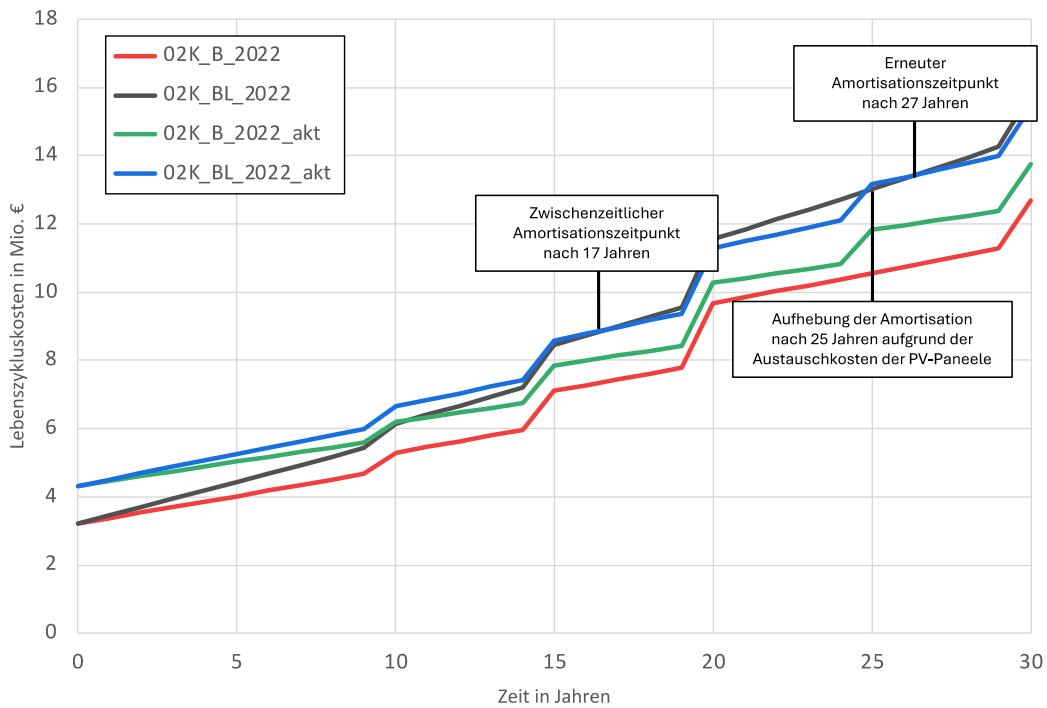
Abbildung 60: Lebenszykluskosten über einen Betrachtungszeitraum von 30 Jahren - Strukturvariante 1 ^[81]



In den Szenarien der Strukturvariante 2 (zentrale PV-Versorgung) zeigt sich in Abbildung 61, dass bei Betrachtung der Szenarien *02K_BL_2022* und *02K_BL_2022_akt* eine zwischenzeitliche Amortisation der erhöhten Errichtungskosten durch die reduzierten Folgekosten nach 17 Jahren erreicht wird. Die erhöhten Mehrkosten durch die PV-Paneele bei Szenario *02K_BL_2022_akt* im Vergleich zu Szenario *02K_BL_2022* betragen € 1.102.380. Die zwischenzeitliche Amortisation wird aufgrund der Austauschkosten der PV-Paneele nach 25 Jahren wieder aufgehoben, wobei eine erneute Amortisation bereits nach 27 Jahren wieder erreicht wird.

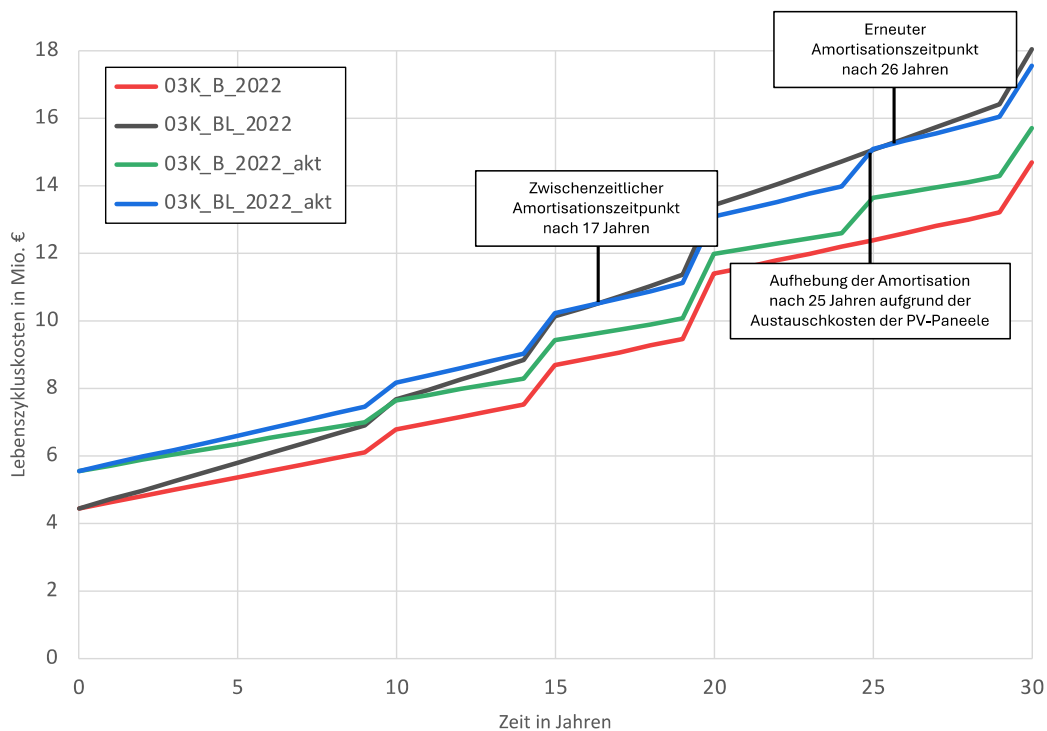
⁸¹ Vergleiche der Lebenszykluskosten zwischen den Varianten ohne Laborberücksichtigung (*_B_*) und den Varianten mit Laborberücksichtigung (*_BL_*) sind nicht zulässig

Abbildung 61: Lebenszykluskosten über einen Betrachtungszeitraum von 30 Jahren - Strukturvariante 2 [81]



Im Vergleich zu den Szenarien *01K_BL_2022* und *01K_BL_2022_akt* der Strukturvariante 1 ist dies auf die effizientere PV-Versorgung (zentrale PV-Versorgung) zurückzuführen, da der Netzbezug dadurch reduziert wird. Bei den Szenarien der Strukturvariante 3 (zentrale PV-Versorgung und zentrale Kälteversorgung) zeigt sich Abbildung 62 ein ähnliches Bild wie bei der Strukturvariante 2.

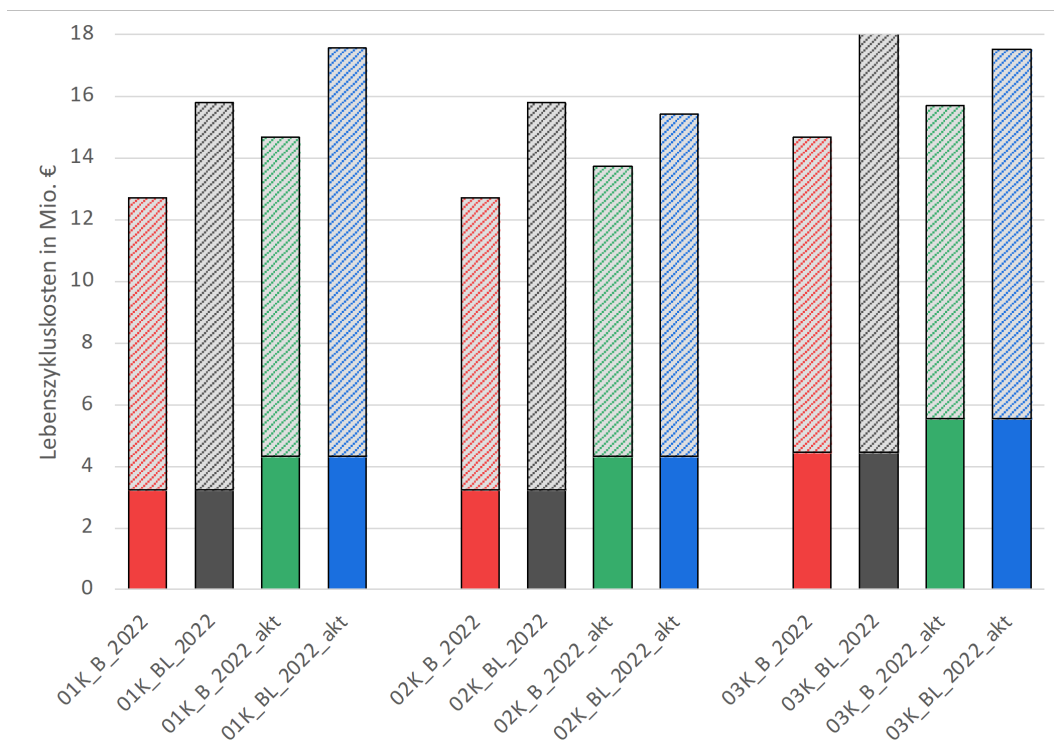
Abbildung 62: Lebenszykluskosten über einen Betrachtungszeitraum von 30 Jahren - Strukturvariante 3 [81]



Bei Gegenüberstellung der Szenarien *03K_BL_2022* und *03K_BL_2022_akt* findet eine zwischenzeitliche Amortisation der erhöhten Errichtungskosten nach 17 Jahren statt. Auch bei dieser Gegenüberstellung wird die zwischenzeitliche Amortisation aufgrund der Austauschkosten der PV-Paneele nach 25 Jahren wieder aufgehoben, wobei auch hier eine erneute Amortisation bereits nach 26 Jahren wieder eintritt.

Vergleicht man die Szenarien der drei Strukturvarianten (Abbildung 63) bei jenen Büro- und Labornutzung berücksichtigt werden (*01K_BL_2022_akt*, *02K_BL_2022_akt* und *03K_BL_2022_akt*) ist die Strukturvariante 2 (zentrale PV-Versorgung) aus ökonomischer Sicht zu bevorzugen.

Abbildung 63: Lebenszykluskosten der Strukturvarianten nach 30 Jahren (Folgekosten in schraffierter Darstellung) [82]



Dominanzanalysen der Lebenszykluskostenberechnung

In Abbildung 64 sind die Anteile der Kostenarten, Errichtungskosten und Folgekosten (Energiekosten, Instandsetzungskosten, Wartungs- und Instandhaltungskosten und Austauschkosten) über einen Betrachtungszeitraum von 30 Jahren dargestellt. Die Kreisdiagramme der jeweiligen Reihen (horizontal) stellen die Szenarien der jeweiligen Strukturvarianten dar. Die Kreisdiagramme vertikal betrachtet, erlauben eine Gegenüberstellung der Ergebnisse innerhalb der gleichen Szenarien der jeweiligen Strukturvarianten. In Abbildung 65 werden die Unterschiede der prozentualen Anteile der Kostenarten kurz erläutert. Als Basisszenario für die Vergleiche wird Szenario *01K_B_2022* herangezogen.

⁸² Vergleiche der Lebenszykluskosten zwischen den Varianten ohne Laborberücksichtigung (*_B_*) und den Varianten mit Laborberücksichtigung (*_BL_*) sind nicht zulässig

Abbildung 64: Dominanzanalyse der Kostenarten Errichtungskosten und Folgekosten (Energiekosten, Instandsetzungskosten, Wartungs- und Instandhaltungskosten und Austauschkosten) über einen Betrachtungszeitraum von 30 Jahren. [⁸³]

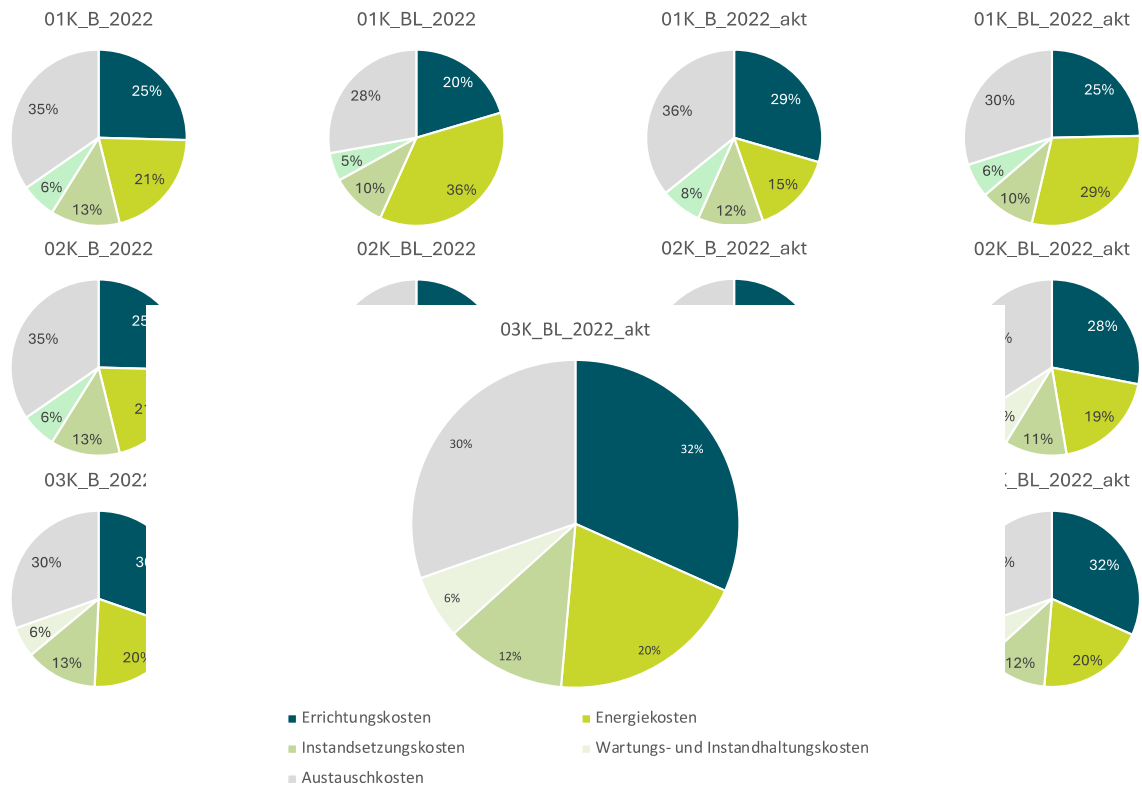


Abbildung 65: Kühlbedarf, PV-Erzeugung und Strombedarf in den 12 Szenarien

Szenarien	Errichtungskosten	Energiekosten	Weitere Folgekosten [⁸⁴]
01K_B_2022	-	-	-
01K_BL_2022	wie 01K_B_2022	Erhöhter Kühlbedarf durch Labornutzung	wie 01K_B_2022
01K_B_2022_akt	Errichtung von PV-Paneelen	wie 01K_B_2022	Errichtung von PV-Paneelen
01K_BL_2022_akt	Errichtung von PV-Paneelen	Erhöhter Kühlbedarf durch Labornutzung	Errichtung von PV-Paneelen
02K_B_2022	wie 01K_B_2022	wie 01K_B_2022	wie 01K_B_2022
02K_BL_2022	wie 01K_B_2022	Erhöhter Kühlbedarf durch Labornutzung	wie 01K_B_2022
02K_B_2022_akt	Errichtung von PV-Paneelen	wie 01K_B_2022	Errichtung von PV-Paneelen
02K_BL_2022_akt	Errichtung von PV-Paneelen	Erhöhter Kühlbedarf durch Labornutzung	Errichtung von PV-Paneelen
03K_B_2022	Errichtung eines zentralen Kühlnetzes	wie 01K_B_2022	Errichtung eines zentralen Kühlnetzes
03K_BL_2022	Errichtung eines zentralen Kühlnetzes	Erhöhter Kühlbedarf durch Labornutzung	Errichtung eines zentralen Kühlnetzes
03K_B_2022_akt	Errichtung eines zentralen Kühlnetzes und PV-Paneele	wie 01K_B_2022	Errichtung eines zentralen Kühlnetzes und PV-Paneele
03K_BL_2022_akt	Errichtung eines zentralen Kühlnetzes und PV-Paneele	Erhöhter Kühlbedarf durch Labornutzung	Errichtung eines zentralen Kühlnetzes und PV-Paneele

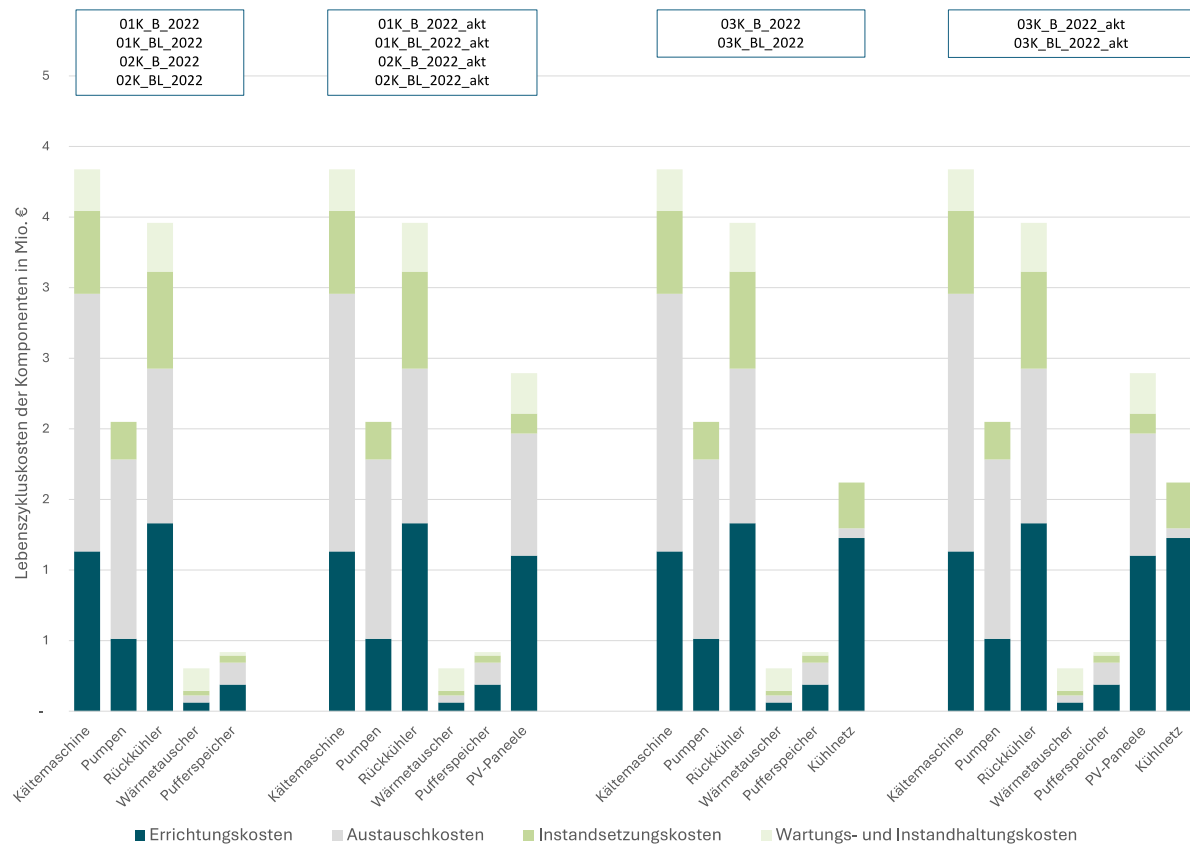
⁸³ Vergleiche der Lebenszykluskosten zwischen den Varianten ohne Laborberücksichtigung (_B_) und den Varianten mit Laborberücksichtigung (_BL_) sind nicht zulässig

⁸⁴ Die „weiteren Folgekosten“ setzen sich aus den Austauschkosten, Instandsetzungskosten sowie Wartungs- und Instandhaltungskosten zusammen.

Dominanzanalyse Komponenten

In Abbildung 66 werden die Kostenanteile der einzelnen Komponenten über einen Betrachtungszeitraum von 30 Jahren dargestellt.

Abbildung 66: Dominanzanalyse der Komponenten über einen Betrachtungszeitraum von 30 Jahren



Die Szenarien *01K_B_2022 /01K_BL_2022 /02K_B_2022 /02K_BL_2022* bestehen aus den gleichen Komponenten. Dabei fallen die höchsten Errichtungskosten bei der Rückkühlern gefolgt von den Kältemaschinen und Pumpen an.

Die Szenarien *01K_B_2022_akt /01K_BL_2022_akt /02K_B_2022_akt /02K_BL_2022_akt* bestehen auch aus den gleichen Komponenten jedoch inklusive der errichteten PV-Paneele. Die höchsten Errichtungskosten entstehen bei diesen Szenarien bei den Rückkühlern gefolgt von den Kältemaschinen und PV-Paneeelen.

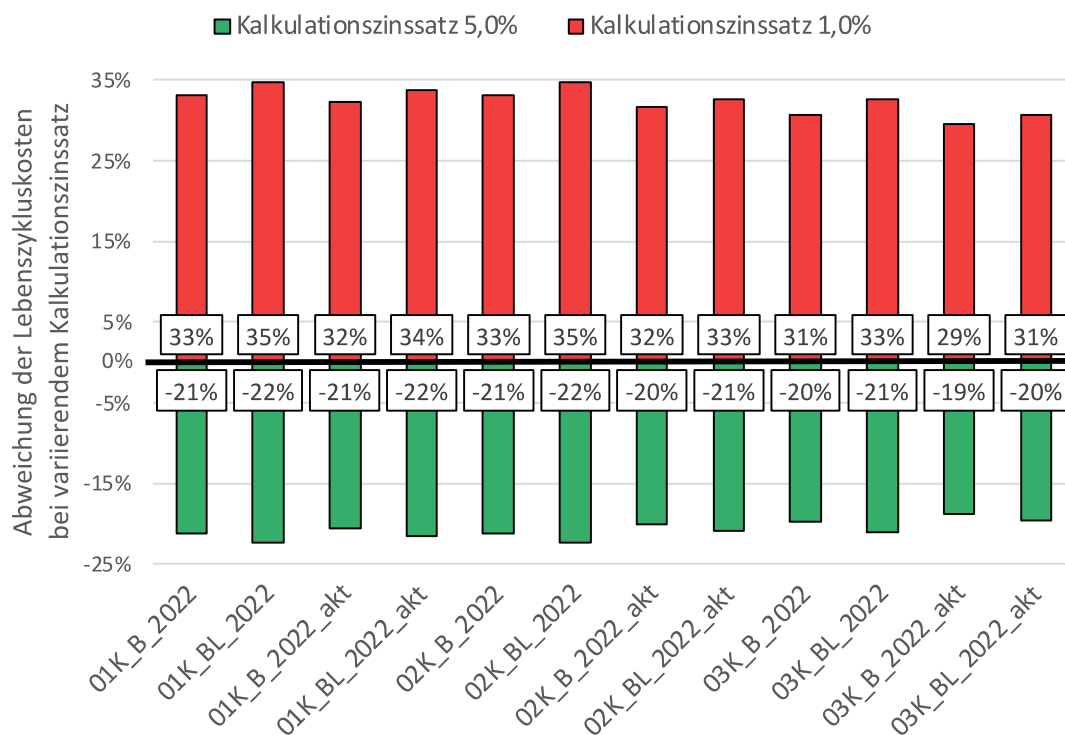
Die Szenarien *03K_B_2022_akt* und *03K_BL_2022_akt* bestehen auch aus den gleichen Komponenten wie die Szenarien *03K_B_2022* und *03K_BL_2022* jedoch inklusive der errichteten PV-Paneele. Die höchsten Errichtungskosten entstehen bei diesen Szenarien bei den Rückkühlern gefolgt von den zentralen Kühlnetzen.

An dritter Stelle liegen die Kältemaschinen knapp vor den PV-Paneeelen. Während bei allen Szenarien die Rückkühler die höchsten Errichtungskosten aufweisen, ist ersichtlich, dass über einen Betrachtungszeitraum von 30 Jahren die Kältemaschinen aufgrund des Austausches, der Instandsetzung sowie der Wartung- und Instandhaltung die höchsten Lebenszykluskosten aufweisen.

Sensitivitätsanalyse der Lebenszykluskostenberechnung

In Abbildung 67, Abbildung 68 und Abbildung 69 sind die Sensitivitätsanalysen der Lebenszykluskostenberechnung dargestellt. Dabei wurden die drei finanziellen Parameter (i) Kalkulationszinssatz, (ii) Preissteigerungsrate Baukosten und (iii) Preissteigerungsrate Energiekosten jeweils um +/- 2.0 % ausgehend von den angenommenen Eingangswerten (siehe Seite 70 ff.) verändert. Die „0 % - Linie“ stellt dabei die Lebenszykluskosten über einen Betrachtungszeitraum von 30 Jahren basierend auf den angenommenen Eingangswerten dar.

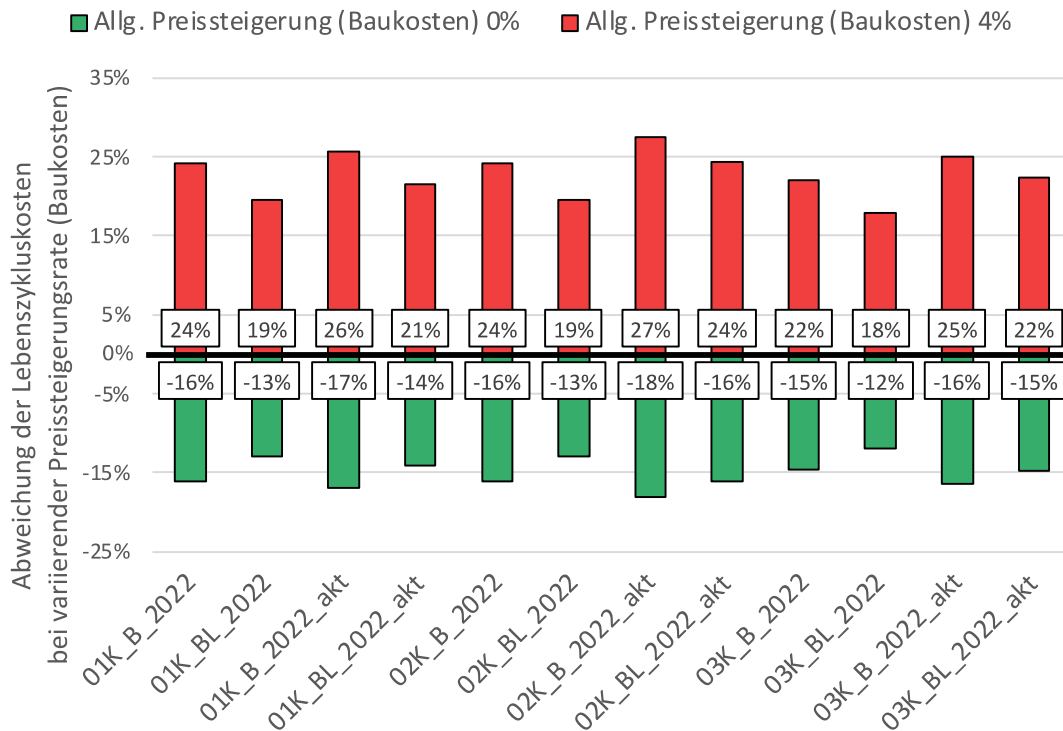
Abbildung 67: Sensitivitätsanalyse der Lebenszykluskostenberechnung bei variierendem Kalkulationszinssatz (1.0 %/3.0 %/5.0 %) über einen Betrachtungszeitraum von 30 Jahren



Die Schwankung des Kalkulationszinssatzes beeinflusst die Ergebnisse der Lebenszykluskostenberechnung am stärksten. Bei einem Kalkulationszinssatz von 5.0 % reduzieren sich die Lebenszykluskosten der betrachteten Szenarien zwischen 19 % und 22 %. Bei einem Kalkulationszinssatz von 1.0 % erhöhen sich die Lebenszykluskosten der betrachteten Szenarien zwischen 29 % und 35 %.

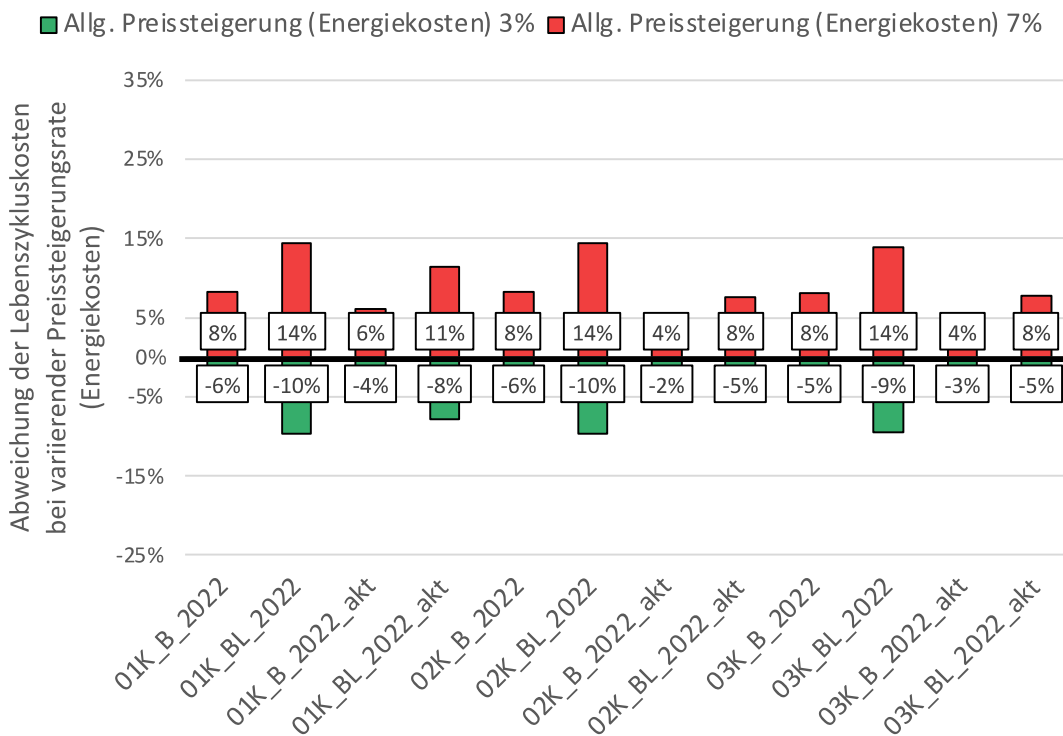
Bei einer Preissteigerungsrate (Baukosten) von 0.0 % reduzieren sich die Lebenszykluskosten der betrachteten Szenarien zwischen 12 % und 18 %. Bei einer Preissteigerungsrate (Baukosten) von 4.0 % erhöhen sich die Lebenszykluskosten der betrachteten Szenarien zwischen 18 % und 27 %.

Abbildung 68: Sensitivitätsanalyse der Lebenszykluskostenberechnung bei variierender Preissteigerungsrate (Baukosten (0.0 %/2.0 %/4.0 %)) über einen Betrachtungszeitraum von 30 Jahren.



Bei einer Preissteigerungsrate (Energiekosten) von 3.0 % reduzieren sich die Lebenszykluskosten der betrachteten Szenarien zwischen 2 % und 10 %. Bei einer Preissteigerungsrate (Energiekosten) von 7.0 % erhöhen sich die Lebenszykluskosten der betrachteten Szenarien zwischen 4 % und 14 %.

Abbildung 69: Sensitivitätsanalyse der Lebenszykluskostenberechnung bei variierender Preissteigerungsrate (Energiekosten (3.0 %/5.0 %/7.0 %)) über einen Betrachtungszeitraum von 30 Jahren



8.2. Ökobilanzierung (Module A1 - A5) - Graue Emissionen

Zur Bewertung der umweltbezogenen Qualität der ausgewählten Kühlkonfigurationen wurde die Methode der Ökobilanz, die in der ISO 14040 als die „Zusammenstellung und Beurteilung der Input- und Outputflüsse und der potenziellen Umweltauswirkungen eines Produktsystems im Verlauf seines Lebensweges“ definiert ist, herangezogen⁸⁵. Die Ökobilanz besteht aus vier Hauptphasen (i) Festlegung von Ziel- und Untersuchungsrahmen, (ii) Sachbilanzphase (engl. Life Cycle Inventory, LCI), (iii) Wirkungsabschätzung (engl. Life Cycle Impact Assessment, LCIA) und (iv) Auswertung.

In der Phase „Festlegung des Ziels- und Untersuchungsrahmens“ werden die Ziele der Studie definiert, d. h. die beabsichtigte Anwendung, die Gründe für die Durchführung der Studie und die Zielgruppe. In diesem Schritt werden die wichtigsten methodischen Entscheidungen getroffen, insbesondere die genaue Definition der funktionellen Einheit und der Systemgrenzen, die Festlegung der Allokationsmethoden, der untersuchten Wirkungskategorien und der verwendeten LCIA-Modelle sowie die Bestimmung der Anforderungen an die Datenqualität.

Die LCI-Phase umfasst die Datenerhebung und das Berechnungsverfahren zur Quantifizierung der Inputs und Outputs des untersuchten Systems. Inputs und Outputs beziehen sich auf Energie, Rohstoffe und andere physische Inputs, Produkte und Nebenprodukte sowie Abfall, Emissionen in Luft / Wasser / Boden und andere Umweltaspekte. Die gesammelten Daten beziehen sich auf Vordergrundprozesse (d.h. Prozesse, die unter der Kontrolle des Entscheidungsträgers stehen, für den eine LCA durchgeführt wird) und Hintergrundprozesse (d.h. Prozesse, auf die der Entscheidungsträger, für den eine LCA durchgeführt wird, keinen oder bestenfalls einen indirekten Einfluss hat). Die Daten werden validiert und mit den Prozesseinheiten und der funktionellen Einheit verknüpft. In der LCIA-Phase werden die LCI-Ergebnisse den Umweltwirkungskategorien und -indikatoren zugeordnet. Dies geschieht mit Hilfe von LCIA-Methoden, bei denen die Emissionen zunächst in Wirkungskategorien eingeteilt und dann in gemeinsamen Einheiten charakterisiert werden, um einen Vergleich zu ermöglichen. In der Phase der Lebenszyklusinterpretation schließlich werden die Ergebnisse der LCI und der LCIA in Übereinstimmung mit dem angegebenen Ziel und Umfang interpretiert. Dieser Schritt umfasst Prüfungen auf Vollständigkeit, Empfindlichkeit und Konsistenz. Auch die Unsicherheit und Genauigkeit der erzielten Ergebnisse werden in dieser Phase geprüft.

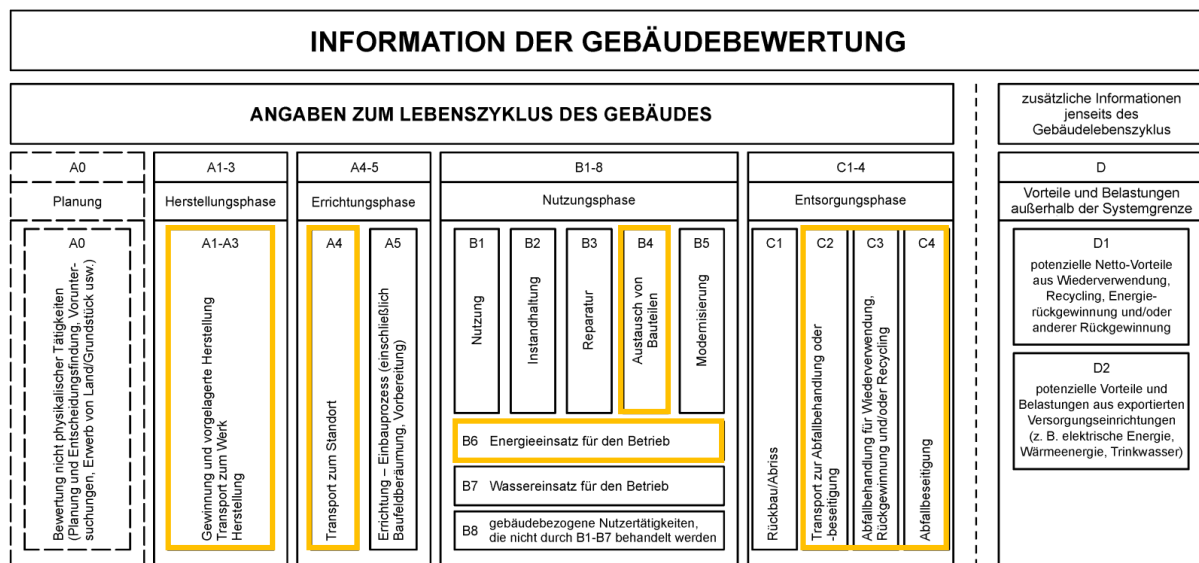
Festlegung des Ziels- und Untersuchungsrahmens

Ziel der Ökobilanz ist es, den gesamten Lebenszyklus der entwickelten Kühlkonfigurationen zu analysieren, einschließlich der grauen und betrieblichen THG-Emissionen, um Hotspots zu identifizieren und mithilfe von Dominanz- und Sensitivitätsanalysen Verbesserungsvorschläge zu entwickeln. Die Systemgrenze für den Gebäudebereich umfasst die technische Ausrüstung, die für den Betrieb des Kühlsystems erforderlich ist. Bei der Bewertung werden die Kühlsysteme in das Verteilungsnetz, die Kühlsysteme in den einzelnen Gebäuden und die PV-Anlage zur Energieerzeugung unterteilt. Die Gebäude selbst und die HLK-Anlagen in den Gebäuden sowie die elektrischen Anlagen sind von der Bewertung ausgeschlossen.

⁸⁵ Austrian Standards International (ASI), ÖNORM EN 14040, Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen, Ausgabedatum: 2021 03 01

Die Liste der Komponenten der Kühlsysteme wurde auf der Grundlage, der von den Projektpartnern und den Herstellern der technischen Ausrüstung bereitgestellten technischen Spezifikationen erstellt. Die Systemgrenzen für die technische Ausrüstung, welche die verschiedenen Phasen des Lebenszyklus voneinander trennen, werden auf der Grundlage des Modularitätsprinzips gemäß EN 15978 definiert [86]. Das bedeutet, dass die Einheitsprozesse, die die Umweltleistung des Gebäudes oder in diesem Fall der technischen Ausrüstung des Gebäudes während des Lebenszyklus beeinflussen, dem Modul im Lebenszyklus zugeordnet werden, in dem sie auftreten. Die Lebenszyklusmodule nach der europäischen Norm EN 15978 sind Abbildung 70 dargestellt.

Abbildung 70: Betrachtete Lebenszyklusmodule für die entwickelten Kühlsysteme [87]



Wie in der Lebenszykluskostenberechnung wird der Referenzstudienzeitraum für die Bewertung der entwickelten Konfigurationen mit 30 Jahren festgelegt. Die funktionelle Einheit ist definiert als ein Kühlsystem für einen Universitätscampus mit einer Bruttogeschoßfläche von 141 408 m² und einem Referenzstudienzeitraum von 30 Jahren. Die wichtigsten Aspekte sind in Abbildung 58 dargestellt.

Abbildung 71: Wesentliche Aspekte der funktionellen Einheit

Funktionelle Einheit	
Was?	Kühlung des Universitätscampus, einschließlich der für den Betrieb der Kühlsysteme erforderlichen technischen Anlagen (Verteilungsnetz, Kühlsysteme in den einzelnen Gebäuden und PV-Anlage zur Energieerzeugung), ausgenommen Gebäude, TGA- und Elektroanlagen
Wie viel?	Universitätscampus mit einer Fläche von 141 408 m ²
Wie gut?	Kühlung des Universitätscampus mit entwickelten Kühlsystemen zur emissionsneutralen Kühlung von Büros, Forschungs- und Stadtteilen
Wie lang?	Referenzstudienzeitraum von 30 Jahren

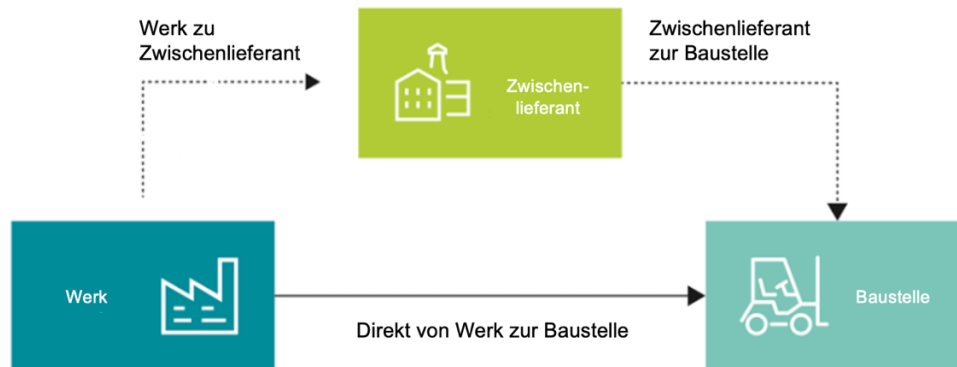
⁸⁶ Austrian Standards International (ASI), ÖNORM EN 15978-1, Nachhaltigkeit von Bauwerken - Methodik zur Bewertung der Qualität von Gebäuden - Teil 1: Umweltqualität, Ausgabedatum: 2021 10 01

⁸⁷ Eigene Darstellung in Anlehnung an Austrian Standards International (ASI), ÖNORM EN 15978-1, Nachhaltigkeit von Bauwerken - Methodik zur Bewertung der Qualität von Gebäuden - Teil 1: Umweltqualität, Ausgabedatum: 2021 10 01

Sachbilanz (LCI)

Für die Lebenszyklusmodule A1-A3 wurden die Materialmengen hauptsächlich aus den technischen Spezifikationen entnommen, da für die Berechnungen des Moduls A4 keine Informationen über Transportentfernungen vorlagen. Die Transportwerte basieren auf dem OVAM-Bericht Umweltprofil von Bauelementen von 2021^[88], der davon ausgeht, dass Materialien und Bauelemente, bzw. in diesem Fall technische Anlagen, entweder direkt vom Werk zur Baustelle oder über einen Zwischenlieferanten transportiert werden (Abbildung 72).

Abbildung 72: Schematische Darstellung des Transports im Lebenszyklusmodul A4



Der Referenzstudienzeitraum und die Austauschrate für die einzelnen Komponenten der Kühlsysteme in Modul B4 sind ident mit jenen, welche in der Lebenszykluskostenberechnung festgelegt wurden. Die Austauschzyklen der einzelnen Komponenten basieren auf der VDI-Richtlinie 2067^[89]. Für die Modellierung des End-of-Life-Szenarios werden wiederum die Werte aus dem OVAM-Bericht verwendet, was die Ermittlung von Transportentfernungen und Annahmen zur Abfallverwertung erfordert. Das End-of-Life-Szenario stellt die Transportentfernungen in Modul C2 und die Abfallverwertung in den Modulen C3-C4 dar.

Für den Transport in Modul C2 wird angenommen, dass dieser zu 100 % mit einem 16-32-Tonnen-LKW (EURO5) durchgeführt wird. Es wird davon ausgegangen, dass mit Ausnahme von Boden alle Bau- und Abbruchabfälle, unabhängig davon, ob sie auf der Baustelle sortiert wurden oder nicht, von der Bau-/Abbruchbaustelle zu einer Sortieranlage/Sammelstelle (z. B. Metallhändler oder Brecher) und von dort weiter zum Recycling, zur Wiederverwendung, zur Verbrennung, zur Energierückgewinnung oder zur Deponie transportiert werden. Der relative Anteil der Materialien, die entweder deponiert, verbrannt, wiederverwendet oder recycelt werden, wird dann durch bestimmte Faktoren für jede Materialkategorie angegeben, woraus sich die spezifischen Transportentfernungen für jedes Material ergeben. Durch die Einteilung der technischen Anlagen in die im OVAM-Bericht definierten Materialkategorien wurden für die technischen Anlagen in Modul C2 die jeweiligen Transportmengen in Tonnenkilometern ermittelt. Für die Abfallverarbeitung in den Modulen C3-C4 wird angenommen, dass die gleiche Menge an Material verarbeitet wird wie in den Modulen A1-A3.

⁸⁸ Public Waste Agency of Flanders (OVAM), Environmental profile of buildings, 2021

⁸⁹ Verein Deutscher Ingenieure (VDI), VDI 2067, Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen - Grundlagen und Kostenberechnung, 2012

Der relative Anteil der einzelnen Materialien, die durch Deponierung, Verbrennung, Wiederverwendung oder Recycling verarbeitet werden, wird durch bestimmte Faktoren bestimmt, die im OVAM-Bericht für jede Materialkategorie festgelegt sind. Für die Modellierung der Auswirkungen in den Modulen C3-C4 werden alle vier genannten Abfallverarbeitungs-kategorien berücksichtigt. Die für diese Ökobilanz-Studie verwendeten Hintergrunddaten stammen aus der ecoinvent 3.9^[90] Datenbank, die mit der Ökobilanz-Software SimaPro^[91] modelliert wurden.

Wirkungsabschätzung (LCIA)

Die in der Studie berücksichtigten Umweltindikatoren sind Kernindikatoren aus der Norm EN ÖNORM 15804+A2^[92]. Abbildung 73 enthält eine Liste der untersuchten Umweltindikatoren. Die Charakterisierungsmodelle für die untersuchten Umweltindikatoren basieren auf dem „Baseline model of 100 years of the IPCC 2013“.

Abbildung 73: Berücksichtigte Umweltindikatoren

Umweltindikator	Abkürzung	Einheit
Global warming potential (sum of the three indicators below)	GWP-total	t CO ₂ eq
Global warming potential, fossil	GWP-fossil	t CO ₂ eq
Global warming potential, biogenic	GWP-biogenic	t CO ₂ eq
Global warming potential, Land use and land use change	GWP-LULUC	t CO ₂ eq

Ergebnisse der Wirkungsabschätzung

In diesem Abschnitt werden die Treibhausgasemissionen der entwickelten Kühlsysteme angegeben, für die die Ökobilanz durchgeführt wurde. Diese Emissionen, einschließlich der Emissionen aller Verarbeitungsschritte von den Rohstoffen bis zum Ende des Lebenszyklus, werden als Umweltindikator GWP-Gesamt der EN 15804+A2 ausgedrückt.

Abbildung 74: Global Warming Potential in tCO₂ eq. der verschiedenen Lebenszyklusphasen für die untersuchten Kühlsystemvarianten

	A1-A3	A4	B4	C2	C3-C4	TOTAL
01K_B_2022	9.76E+02	3.36E+00	9.88E+02	7.29E-01	2.28E+00	1.97E+03
01K_BL_2022	9.76E+02	3.36E+00	9.88E+02	7.29E-01	2.28E+00	1.97E+03
01K_B_2022_akt	2.14E+03	4.65E+00	9.88E+02	1.11E+00	3.61E+00	3.14E+03
01K_BL_2022_akt	2.14E+03	4.65E+00	9.88E+02	1.11E+00	3.61E+00	3.14E+03
02K_B_2022	9.76E+02	3.36E+00	9.88E+02	7.29E-01	2.28E+00	1.97E+03
02K_BL_2022	9.76E+02	3.36E+00	9.88E+02	7.29E-01	2.28E+00	1.97E+03
02K_B_2022_akt	2.14E+03	4.65E+00	9.88E+02	1.11E+00	3.61E+00	3.14E+03
02K_BL_2022_akt	2.14E+03	4.65E+00	9.88E+02	1.11E+00	3.61E+00	3.14E+03
03K_B_2022	1.07E+03	4.41E+00	9.96E+02	1.02E+00	3.31E+00	2.08E+03
03K_BL_2022	1.07E+03	4.41E+00	9.96E+02	1.02E+00	3.31E+00	2.08E+03
03K_B_2022_akt	2.24E+03	5.70E+00	9.96E+02	1.40E+00	4.65E+00	3.25E+03
03K_BL_2022_akt	2.24E+03	5.70E+00	9.96E+02	1.40E+00	4.65E+00	3.25E+03

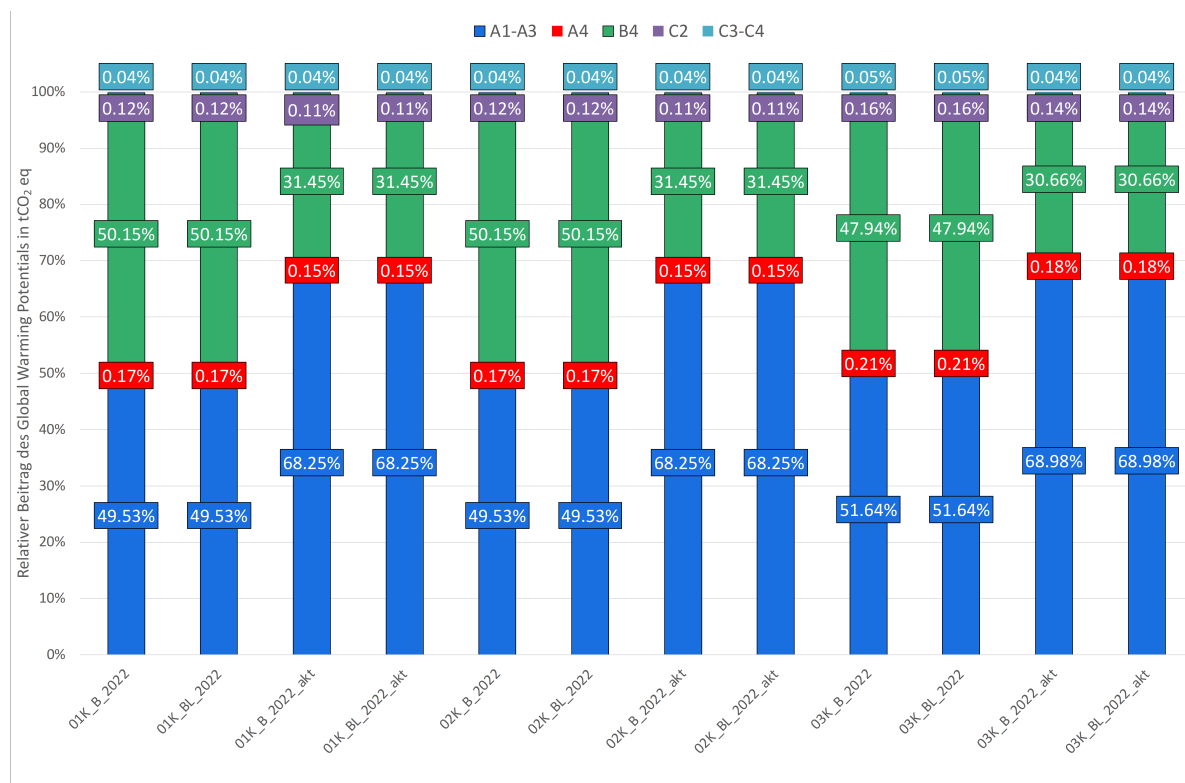
⁹⁰ ecoinvent, <https://ecoinvent.org/database/>

⁹¹ Pré Sustainability, SimaPro, <https://pre-sustainability.com/solutions/tools/simapro/>

⁹² Austrian Standards International (ASI), ÖNORM EN 15804, Nachhaltigkeit von Bauwerken - Umweltproduktdeklarationen - Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte, Ausgabedatum: 2022 02 15

Für die verschiedene Kühlsystemvarianten unterscheiden sich die Ergebnisse des GWP-Gesamtwertes ebenso wie der Beitrag der verschiedenen Lebenszyklusphasen. Abbildung 74 zeigt die Ergebnisse in Form einer tabellarischen Übersicht über die grauen THG-Emissionen für die 12 Kühlsystemvarianten über den Lebenszyklus. Abbildung 75 zeigt den relativen Beitrag der verschiedenen Lebenszyklusphasen für die untersuchten Kühlsystemvarianten.

Abbildung 75: Relativer Beitrag des Global Warming Potentials in tCO₂ eq. der verschiedenen Lebenszyklusphasen für die bewerteten Kühlsystemvarianten



Die Abbildung zeigt, dass durch die zusätzliche Errichtung der PV-Paneele (01K_B_2022 / 01K_BL_2022 / 02K_B_2022 / 02K_BL_2022 im Vergleich zu 01K_B_2022_akt / 01K_BL_2022_akt / 02K_B_2022_akt / 02K_BL_2022_akt) in den Modulen A1-A3 rund 20 % höhere graue Treibhausgasemissionen entstehen.

Die grauen Treibhausgasemissionen der Strukturvariante 3 sind im Vergleich zu den Strukturvarianten 1 und 2 aufgrund der zusätzlichen Errichtung der Kühlnetze um ca. 2 % höher. Andere bewertete Lebenszyklusphasen, d. h. der Transport in der Bauphase (A4) und die End-of-Life-Phase (C2-C4), tragen weniger als 1 % bei und ihr relativer Beitrag ist im Vergleich zur Produktphase (Modul A1-A3) und dem Austausch von Komponenten (Modul B4) während des Lebenszyklus von Kühlsystemen vernachlässigbar.

Dominanzanalyse Komponenten

In Abbildung 76 werden die grauen Treibhausgasemissionen der einzelnen Komponenten über einen Betrachtungszeitraum von 30 Jahren dargestellt. Die Dominanzanalyse der Ökobilanz hat gezeigt, dass in allen betrachteten Kühlkonfigurationen die Rückkühler (38 % bis 62 %), die PV-Paneele (wenn vorhanden 36 % bis 37 %) sowie die Kältemaschinen (18 % bis 30 %) den größten Beitrag zu den grauen THG-Emissionen leisten. Die Pufferspeicher (3 % bis 6 %) sowie die Pumpen (1 % bis 2 %) und die Wärmetauscher (1%) leisten einen verhältnismäßig geringen Beitrag zu den grauen THG-Emissionen. Die Errichtung des Kühlnetzes bei der Kühlkonfiguration 3 hat einen Anteil von 3 % bis 5%.

Abbildung 76: Relativer und absoluter Beitrag des Global Warming Potentials in tCO₂ eq. der verschiedenen Komponenten der Kühlsystemvarianten

	Kältemaschine		Pumpen		Rückkühler		Wärmetauscher		Pufferspeicher		PV-Paneele		Kühlnetz	TOTAL		
01K_B_2022	5.94E+02	30%	2.28E+01	1%	1.22E+03	62%	1.84E+01	1%	1.11E+02	6%	0.00E+00	0%	0.00E+00	0%	1.97E+03	100%
01K_BL_2022	5.94E+02	30%	2.28E+01	1%	1.22E+03	62%	1.84E+01	1%	1.11E+02	6%	0.00E+00	0%	0.00E+00	0%	1.97E+03	100%
01K_B_2022_akt	5.94E+02	19%	2.28E+01	1%	1.22E+03	39%	1.84E+01	1%	1.11E+02	4%	1.17E+03	37%	0.00E+00	0%	3.14E+03	100%
01K_BL_2022_akt	5.94E+02	19%	2.28E+01	1%	1.22E+03	39%	1.84E+01	1%	1.11E+02	4%	1.17E+03	37%	0.00E+00	0%	3.14E+03	100%
02K_B_2022	5.94E+02	30%	2.28E+01	1%	1.22E+03	62%	1.84E+01	1%	1.11E+02	6%	0.00E+00	0%	0.00E+00	0%	1.97E+03	100%
02K_BL_2022	5.94E+02	30%	2.28E+01	1%	1.22E+03	62%	1.84E+01	1%	1.11E+02	6%	0.00E+00	0%	0.00E+00	0%	1.97E+03	100%
02K_B_2022_akt	5.94E+02	19%	2.28E+01	1%	1.22E+03	39%	1.84E+01	1%	1.11E+02	4%	1.17E+03	37%	0.00E+00	0%	3.14E+03	100%
02K_BL_2022_akt	5.94E+02	19%	2.28E+01	1%	1.22E+03	39%	1.84E+01	1%	1.11E+02	4%	1.17E+03	37%	0.00E+00	0%	3.14E+03	100%
03K_B_2022	5.94E+02	29%	3.51E+01	2%	1.22E+03	59%	1.84E+01	1%	1.11E+02	5%	0.00E+00	0%	9.54E+01	5%	2.08E+03	100%
03K_BL_2022	5.94E+02	29%	3.51E+01	2%	1.22E+03	59%	1.84E+01	1%	1.11E+02	5%	0.00E+00	0%	9.54E+01	5%	2.08E+03	100%
03K_B_2022_akt	5.94E+02	18%	3.51E+01	1%	1.22E+03	38%	1.84E+01	1%	1.11E+02	3%	1.17E+03	36%	9.54E+01	3%	3.25E+03	100%
03K_BL_2022_akt	5.94E+02	18%	3.51E+01	1%	1.22E+03	38%	1.84E+01	1%	1.11E+02	3%	1.17E+03	36%	9.54E+01	3%	3.25E+03	100%

Unsicherheitsanalyse

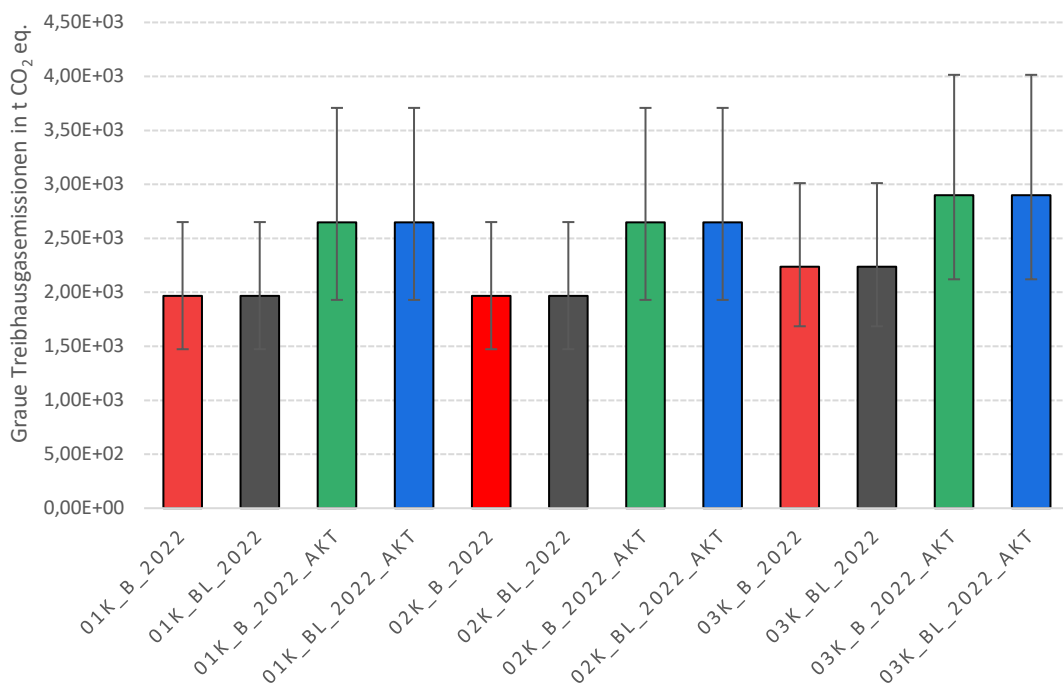
Als Methode zur Bewertung der Umweltauswirkungen in allen Phasen des Lebenszyklus eines Produkts, eines Prozesses oder einer Dienstleistung ist die Ökobilanz in verschiedenen Bereichen weit verbreitet. Der Methode der Ökobilanz liegt jedoch eine gewisse Unsicherheit, vor allem bei den Bestandsdaten, zu Grunde. Aufgrund des Mangels an effektiven, gültigen Standardinventardaten und der verschiedenen unvermeidlichen Fehler bei der Datenerfassung spiegeln die Inventardaten eines bestimmten Prozesses oder einer bestimmten Phase in der Ökobilanz oft nicht die tatsächliche Situation wider. In vielen Fällen schwankt der tatsächliche Wert einiger Parameter in der Bestandsaufnahme stark. Diese Unsicherheiten haben direkte Auswirkungen auf die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Schlussfolgerungen der Ökobilanzergebnisse. Um diese Arten von Unsicherheiten zu berücksichtigen und die Datenunsicherheit in den Ökobilanzergebnissen zu berechnen, wurde die Monte-Carlo-Methode verwendet.

Die Monte-Carlo-Methode, die auch als statistische Simulationsmethode bekannt ist, basiert auf der statistischen Wahrscheinlichkeitstheorie. Sie verwendet Zufallszahlen (oder häufiger Pseudozufallszahlen), um viele Berechnungsprobleme zu lösen. Die Anwendung der Monte-Carlo-Methode bei der Lösung praktischer Probleme besteht aus zwei Hauptkomponenten: Zum einen werden Zufallsvariablen mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeitsverteilung erzeugt, und zum anderen werden die numerischen Eigenschaften des Modells mit Hilfe statistischer Methoden geschätzt, um die numerische Lösung der eigentlichen Probleme zu erhalten. Die Monte-Carlo-Methode kann die Werte der unsicheren Variablen auf der Grundlage einer probabilistischen Analyse zufällig bestimmen und sie mit der vorgegebenen Methode der Umweltverträglichkeitsprüfung kombinieren, um statistisch signifikante Ergebnisse der Umweltverträglichkeitsprüfung zu erhalten, die den Einfluss der unsicheren Faktoren genauer widerspiegeln können.

Die Monte-Carlo-Methode wurde in dieser Studie mit der Software SimaPro ^[93] durchgeführt. Als Parameter für das Stopp-Kriterium wurde eine feste Anzahl von Läufen (100 Läufe) verwendet, die als ausreichend angesehen wird, um eine Abschätzung von den Ergebnissen zu erhalten.

In der verwendeten ecoinvent-Datenbank sind fast alle Datenpunkte mit einer Unsicherheit behaftet. Ecoinvent ^[94] liefert immer einen Standardwert zusammen mit einer Unsicherheit. Der Standardwert kann als „best guess“-Wert interpretiert werden. Wenn dieser „best guess“-Wert durch Stichproben aus vielen verschiedenen Messungen ermittelt wurde, ist er in der Regel der Mittelwert einer Lognormalverteilung. Obwohl die Messungen manchmal eindeutig eine Normalverteilung zeigen, geht ecoinvent immer von einer Lognormalverteilung aus. Lognormalverteilungen zeichnen sich durch eine Standardabweichung aus. Ecoinvent verwendet die sogenannte Pedigree-Matrix, um die geometrischen Standardabweichungen zu schätzen. Die Ergebnisse der Monte-Carlo Simulationen sind in Abbildung 77 dargestellt.

Abbildung 77: Graue Treibhausgasemissionen in tCO₂ eq. unter Berücksichtigung der Unsicherheiten in den Inventardaten



Wie aus der Abbildung ersichtlich, gibt es eine größere Bandbreite an Ergebnissen für die jeweiligen Szenarien (abgebildet durch die Antennen), was auf die Unsicherheit der Inventardaten hinweist. Es gibt auch eine größere Überschneidung zwischen den grauen Treibhausgasemissionen der betrachteten Kühlsystemvarianten. Da aber die betrachteten Varianten aus bauähnlichen Komponenten bestehen, ist zu erwarten, dass die Ergebnisunsicherheiten alle Varianten ähnlich stark beeinflussen, und somit keine Änderungen der Ergebnisse zu erwarten sind.

⁹³ PRé Sustainability B.V. (2024). SimaPro (Version 9.6) [Software]. PRé Sustainability B.V. <https://simapro.com>

⁹⁴ Wernet, G., et al. (2016). The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. The International Journal of Life Cycle Assessment, 21(9), 1218–1230. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1087-8>

8.3. Ökobilanzierung über restlichen Lebenszyklus (Modul B)

In diesem Abschnitt werden die THG-Emissionen des betrieblichen Energieverbrauchs (Modul B6) für die verschiedenen Varianten der entwickelten Kühlsysteme berechnet, um die Emissionen über den gesamten Lebenszyklus zu ermitteln.

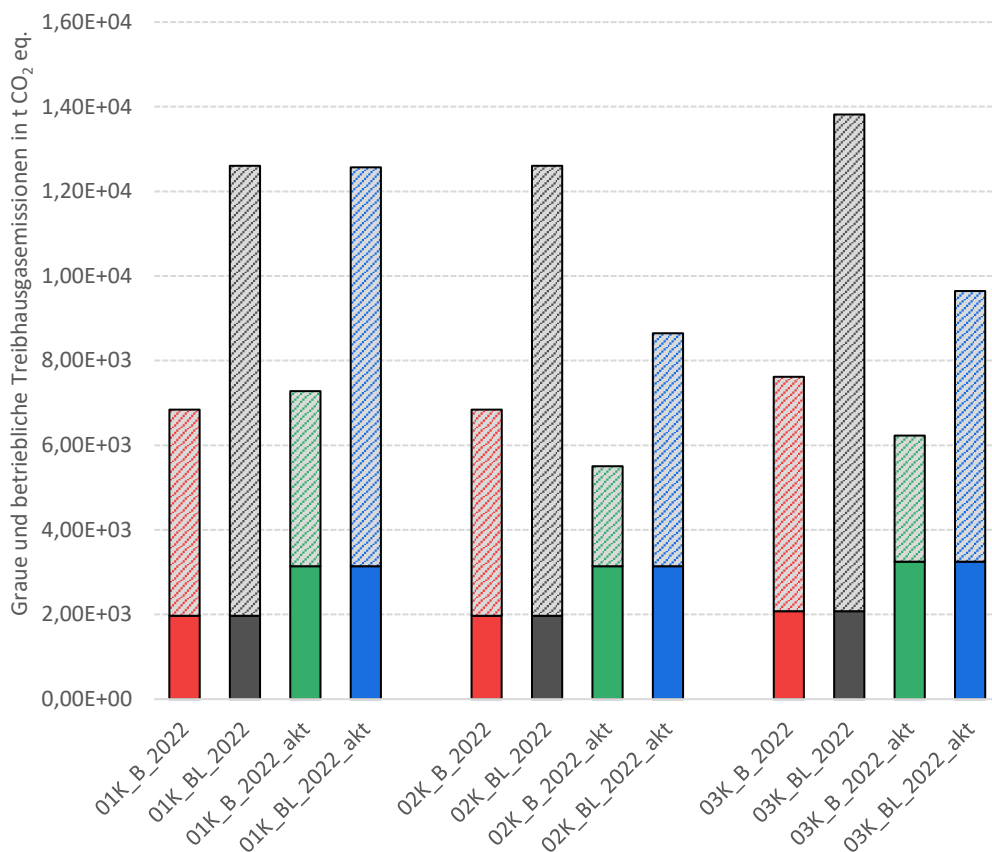
Analyse der betrieblichen Energienutzung

Der für die Berechnung der Auswirkungen verwendete Hintergrunddatensatz für die Modellierung des Strommixes stammt wiederum aus der ecoinvent 3.9 Datenbank und stellt den österreichischen Markt für Niederspannungsstrom dar. In diesem Prozess werden auch die Transformationsketten von Hoch- zu Niederspannung berücksichtigt.

Gegenüberstellung der grauen und betrieblichen Treibhausgasemissionen

Ein Vergleich der Treibhausgasemissionen der berücksichtigten Szenarien ist in Abbildung 78 dargestellt. Die Ergebnisse aus ökologischer Sicht zeigen, dass die Szenarien *02K_B_2022_akt* bzw. *02K_Bl_2022_akt* die geringsten Treibhausgasemissionen über den gesamten Lebenszyklus verursachen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die betrieblichen Treibhausgasemissionen durch den Verbund der PV-Versorgung (zentrale Versorgung) reduziert werden.

Abbildung 78: Gegenüberstellung der grauen und betrieblichen Treibhausgasemissionen in tCO₂ eq. der verschiedenen Szenarien (betriebliche THG in schraffierter Darstellung)



9 Ergebnisse, Schlussfolgerungen & Empfehlungen

COOL-QUARTER-PLUS betrachtet den Themenbereich der Kühlung von urbanen Quartieren aus mehreren Blickwinkeln. Kapitel 3.3 gibt einen kurzen Einblick in aktuelle technologische Möglichkeiten, Kapitel 3.4 zeigt ein Meinungsbild zu Nah- und Fernkälte, generiert aus einer Expertenbefragung. Die Kapitel 3.5 und 3.6 bringen Einblicke in für das Kühlen relevante Regelwerke und Informationen zum Stand der PV-Technologien. Die Kapitel 4 bis 8 beinhalten detaillierte Informationen zu den angesetzten Rahmenbedingungen, den verwendeten Methoden und den erhaltenen Ergebnissen eines prototypischen Referenz-Quartiers. Kapitel 9 versucht sich an einer allgemeinen Interpretation der erhaltenen Ergebnisse. Kapitel 9.1 beschreibt dabei Analysen zum energietechnischen Betrieb der für das Referenz-Quartier aufgestellten Energiesysteme. Das Kapitel 9.3 betrachtet daraus einzelne Szenarien aus der Sicht der Lebenszykluskosten und gibt erste Einblicke wie die energietechnische, auf den Betrieb konzentrierte Sichtweise, durch die Einbeziehung der Phasen der Herstellung, Wartung und Entsorgung derartiger Systeme, erweitert werden kann. Abschließend beschreiben Kapitel 9.4 und 9.5 den Konnex zwischen den in COOL-QUARTER-PLUS behandelten Themen und den Zielen der Programmlinie „Stadt der Zukunft“, sowie Aktivitäten zur Weiterverwendung der Ergebnisse.

9.1. Interpretation energietechnischer Szenarien des Referenz-Quartiers

Vergleiche unterschiedlicher Szenarien energietechnischer Systemgestaltung müssen sich immer auf Rahmenbedingungen beziehen um untersucht werden zu können. Um diese Rahmenbedingungen möglichst realitätsnah definieren zu können, beziehen sie sich in der vorliegenden Untersuchung auf einen realen Distrikt (siehe Kapitel 4), der als Referenz-Quartier fungiert. Im ersten Schritt muss untersucht werden in wie weit dieses als prototypischer Ansatz geeignet ist.

Das Referenz-Quartier zeigt in Bezug auf den spezifischen Energiebedarf für Bürobauten adäquate Werte im Vergleich zu den DACH- und EU-Durchschnitten. Für den zusätzlichen Kühlbedarf durch die Labore fehlen jedoch vergleichbare publizierte Messdaten, da hier eine große Bandbreite abhängig von der Nutzung besteht. Der Kühlbedarf der Gebäude beträgt etwa 20 % des Heizwärmebedarfs, während der Kühlbedarf der Labore nahezu 30 % des Heizwärmebedarfs erreicht und ganzjährig besteht, im Gegensatz zu den Bürobauten, deren Kühlbedarf lediglich in den Sommermonaten anfällt.

Die Nutzung der elektrischen Energie zur Deckung des Energiebedarfs der Kälteerzeugung, durch die auf den Gebäuden installierten Photovoltaikanlagen, erweist sich als besonders vorteilhaft. Insbesondere die stromseitige Vernetzung zu einem Verbund der PV-Anlagen innerhalb eines Quartiers bietet hier signifikante Vorteile. Das unterschiedliche Platzangebot zur Anlageninstallation und der unterschiedliche Kühlbedarf, also Angebot und Nachfrage, können sich gegenseitig ausgleichen. Diese Vernetzung führt sowohl zu einer Reduktion der Leistungsspitzen als auch der Gesamtenergiemengen der Netzbezüge elektrischer Energie, was wiederum eine deutliche Senkung der Treibhausgasemissionen, insbesondere in den Sommermonaten, zur Folge hat.

Für das Referenz-Quartier konnte gezeigt werden, dass der laufende Klimawandel innerhalb der Nutzungszeit der bestehenden PV-Systeme zu einem klaren Anstieg des Kühlbedarfes führen wird. Es konnte aber auch gezeigt werden, dass der damit erhöhte Bedarf an elektrischer Energie zu Kühlzwecken, durch die stromseitige Vernetzung und einen weiteren Ausbau der PV-Kapazitäten (teilweise durch Verbesserungen anhand neuer PV-Technologien) effektiv kompensiert werden kann.

Daraufhin stellte sich die Frage welche Vorteile durch eine thermische Vernetzung der Gebäude durch ein Kältenetz generiert werden kann. Im Gegensatz zur oben beschriebenen stromseitigen Vernetzung ist hier der Transport der Kühlflüssigkeit durch Rohre, mit thermischen Verlusten behaftet. In der spezifischen Konfiguration des Referenz-Quartiers, bei der die bestehenden dezentralen Kältemaschinen verwendet werden, konnte durch die thermische Vernetzung keine wesentlichen energie-technischen Vorteile erzielt werden. Einerseits erhöhen sich die thermischen Verluste durch die Kälteverteilung und andererseits erhöhen sich die Temperaturdifferenzen zwischen der Quelle und Senke, durch die zusätzlich notwendigen Wärmeübertrager im System. Diese Nachteile können durch eine vorrangige Nutzung einer großen und somit effizienteren Kompressionskältemaschine nur zum Teil kompensiert werden. Hier könnte jedoch eine umfassendere Vernetzung, die verschiedene Energieströme integriert, potenziell Synergieeffekte erzielen und die Gesamteffizienz verbessern.

Auf der anderen Seite ergeben sich bei der thermischen Vernetzung einer Kälteversorgung eine Vielzahl, in der vorliegenden Untersuchung nicht quantifizierter positiver Effekte. So bringt sie eine Redundanz in der Kälteversorgung und erhöht so die Ausfallsicherheit. Des Weiteren kann eine zentrale Koordination der Wartung, die Kosten weiter reduzieren. In diesem Transformationsprozess von einer dezentralen zu einer zentralen Kälteversorgung kann auch ein Austausch älterer Kältemaschinen, hin zu effizienteren und in ihrer Leistung gestaffelten Maschinen, weitere energetische Vorteile mit sich bringen.

Für das Referenz-Quartier hat sich auch gezeigt, dass die Erweiterung der thermischen Vernetzung, indem neben der Kälteversorgung auch die Wärmeversorgung zu integrieren ist, erhebliches Potenzial für die Dekarbonisierung der Energieversorgung eines Quartiers bietet. Durch den Einsatz von Wärmepumpen kann nicht nur Kälte sondern auch Wärme effizient bereitgestellt werden, wobei die beim Kühlen und Heizen freiwerdende Abwärme und -kälte direkt gespeichert bzw. genutzt werden kann. Dabei ist es wichtig, dass der Jahresbedarf an Kälteenergie möglichst in einem ähnlichen Verhältnis zum Wärmebedarf des Quartiers steht. Diese Balance kann durch die Integration des Kältebedarfs von Laboren im betrachteten Referenz-Quartier erreicht werden, wodurch trotz erhöhtem Kühlbedarf das Erdwärmesondenfeld kleiner und kostengünstiger ausgelegt werden kann.

Die Weiterentwicklung dieser kombinierten Kälte- und Wärmeversorgung könnte zu einem einheitlichen und damit kosteneffizienten Verteilnetz führen, das mit minimalen Verlusten arbeitet (kalte Fernwärme oder Anergienetz). Ein Betrieb bei einem Temperaturniveau von 8-25 °C ermöglicht die effiziente Nutzung sowohl der kalten als auch der warmen Seite von Wärmepumpen. Zusätzlich kann Abwärme aus verschiedenen Prozessen in das kalte Verteilnetz eingebracht und von den Wärmepumpen verwertet werden.

Diese Maßnahmen könnten die Treibhausgasemissionen der Energieversorgung im Vergleich zu einer zentralen Wärmepumpenlösung deutlich reduzieren. Der Einsatz von Strom aus zertifizierten erneuerbaren Quellen (z.B. UZ 46⁹⁵) könnte das System zudem nahezu THG-neutral machen.

9.2. Zusammenfassung Nutzer:innen-Feedback

Um einen möglichst effizienten und auf Nutzer:innen - Präferenzen optimierten Kühlbetrieb zu ermöglichen, ist die Einbindung von deren Verhalten und Wünschen zentral. Im Projekt wurde eine IKT-Datenplattform entwickelt, welche die Partizipation der NutzerInnen ermöglichte. Weiteres wurde eine Methode entwickelt, welche die Integration von Nutzer:innen - Feedback in die optimale Regelung des Kühlbetriebs ermöglicht. Eine zentrale Anforderung war, dass die Methode nur Input-Features verwendet, die einfach zu messen sind und standardmäßig in modernen Gebäuden verfügbar sind. Auf komplexe Simulationen zur Berechnung von Input-Features wurde verzichtet.

Um den thermischen Komfort der NutzerInnen zu ermitteln, wurden zusätzliche Sensoren installiert und eine App-basierte Feedbackstudie durchgeführt, in der Nutzer:innen ihr Wohlbefinden über Tablets rückmelden konnten. Die Ergebnisse der Studie zeigten Korrelationen zwischen CO₂-Konzentration, Luftfeuchtigkeit und dem allgemeinen Wohlbefinden. Die entwickelte Methode zur optimalen Regelung der Kühlung nutzt ein ML-Modell, welches das thermische Verhalten des Raumes modelliert und gleichzeitig die Set-Points für die Kühlung basierend auf den Präferenzen der Nutzer:innen anpasst. Die Ergebnisse zeigen, dass die entwickelte Methode robust agiert, die Kühlenergie minimiert und gleichzeitig den thermischen Komfort der Nutzer:innen berücksichtigt.

9.3. Zusammenfassung Nachhaltigkeitsbewertung

Gleichlaufend mit den Ergebnissen der energietechnischen Betrachtung der Betriebszeit (siehe oben) zeigt sich auch aus Sicht der Lebenszykluskostenberechnung, dass sich der Zusammenschluss der PV-Anlagen zu einem Verbund des Referenz-Quartiers vorteilhaft auswirkt. Strukturvariante 2 zeigt bei direkter Gegenüberstellung der Szenarien die größten Vorteile.

Würde man die Nutzung der über dezentrale PV-Anlagen generierten elektrischen Energie auf die Kühlung einschränken und auch andere elektrische Nutzungen ausschließen, kommt es aus ökonomischer Sicht, über den betrachteten Bezugsstudienzeitraum, bei einer rein gebäudebezogenen PV-Nutzung, zu keiner Amortisation. Die durch die Installation von PV-Anlagen erhöhten Errichtungskosten, können durch die Reduktion der Folgekosten, wegen der zu geringen Reduktion des Kühlbedarfs nicht ausgeglichen werden.

Ähnliche Tendenzen wie in der Lebenszykluskostenberechnung, leitet sich auch aus der Betrachtung der Ökobilanz ab, dass die zentralen (d.h. vernetzten PV-Konfigurationen) gegenüber den dezentralen (d.h. gebäudebezogenen PV-Konfigurationen) Vorteile generieren.

⁹⁵ https://www.umweltzeichen.at/file/Richtlinie/UZ%2046/Long/Uz46_R6.0a_Richtlinie_Gruener_Strom_2022.pdf

Diesbezüglich zeigt die Ökobilanz, dass die Errichtung der vernetzten PV-Konfigurationen (Kühlkonfiguration 2 und 3), dazu führt, dass sich die THG-Emissionen über den Lebenszyklus reduzieren. Im angesetzten Referenz-Quartier kann die generierte elektrische Energie dazu genutzt werden, die betrieblichen THG-Emissionen derart zu reduzieren, dass die durch die Errichtung entstehenden grauen THG-Emissionen amortisiert werden.

Mit Ausnahme der Szenarien der Kühlkonfigurationen 1, 2 und 3 in welchen der Kühlbedarf der Labore nicht berücksichtigt wird, zeigt die Gegenüberstellung der grauen und betrieblichen THG-Emissionen, dass die grauen THG-Emissionen im Vergleich zu den betrieblichen THG-Emissionen gering sind. Das bedeutet, dass durch die Erhöhung des Kühlbedarfs, z.B. durch die Berücksichtigung der Labore, ein größerer Fokus auf die Reduktion der betrieblichen THG-Emissionen gelegt werden sollte.

Die Dominanzanalyse der Lebenszykluskostenberechnung zeigt, dass bei allen betrachteten Szenarien vor allem die Kältemaschinen und die Rückkühler die höchsten Lebenszykluskosten darstellen. Dabei haben neben den Errichtungskosten, die Austauschkosten dieser Komponenten einen erheblichen Anteil. Für eine Reduktion der Lebenszykluskosten empfiehlt sich daher die Austauschhäufigkeit der Kältemaschinen und Rückkühler durch erhöhte Instandsetzung sowie Wartung- und Instandhaltung zu verringern. Zu beachten ist dabei, dass die Wahl des Bezugsstudienzeitraums von 30 Jahren die Austauschhäufigkeit der Komponenten beeinflusst. Eine Veränderung des Bezugsstudienzeitraums kann daher das Ergebnis sowohl positiv als auch negativ beeinflussen. Neben dem Bezugsstudienzeitraum beeinflussen auch die finanziellen Parameter das Ergebnis der Lebenszykluskostenberechnung. In der Sensitivitätsanalyse der Lebenszykluskostenberechnung wurden diese Parameter einzeln variiert, um die Auswirkungen auf die Lebenszykluskosten abzuschätzen. Zu beachten ist dabei, dass es sich bei den gewählten Eingangsparametern um statische Annahmen über Jahrzehnte handelt. Finanzielle Parameter wie die allgemeine Baupreissteigerungsrate sowie die Energiepreissteigerungsrate und der Energiepreis waren vor allem in den letzten Jahren aufgrund der COVID-19 Krise sowie dem Ukraine-Russland-Konflikt deutlich höher.

Auch die Dominanzanalyse der Ökobilanz zeigt, dass über alle betrachteten Varianten, die Komponenten, Rückkühler und Kältemaschinen die verhältnismäßig höchsten THG-Emissionen verursachen. In den Varianten mit PV-Versorgung verursachen die PV-Paneele nach den Rückkühlern die zweithöchsten grauen THG-Emissionen.

Wenn aus technischer Sicht die notwendige Leistung mit kleineren oder weniger technischen Komponenten erreichbar ist, kann eine Reduktion der grauen THG-Emissionen durch einen geringeren Materialeinsatz, das heißt weniger Rückkühler, weniger PV-Paneele oder weniger Kältemaschinen, erreicht werden (Reduktion in Modul A1-A3). Eine zweite Möglichkeit ist, die rechnerische Nutzungsdauer der technischen Komponenten mittels regelmäßiger und fachlicher Wartung- und Instandhaltung auf ein Maximum auszudehnen, um die Austauschzyklen zu reduzieren (Reduktion in Modul B4). Aufgrund des verhältnismäßig geringen Beitrags der Transportwege (Modul A4 und Modul C2) und der End-of-life-Phase (Modul C3 und C4) zu den grauen THG-Emissionen haben Optimierungsmaßnahmen in diesen Modulen keine großen Auswirkungen.

9.4. Nutzung der Ergebnisse und Weiterführung

Um die Untersuchung bzw. das Referenz-Quartier auf realistische Rahmenbedingungen aufbauen zu können wurden Daten des Campus Inffeldgasse der Technischen Universität Graz herangezogen. Annahmen zur Gebäudestruktur, Nutzungsverteilung sowie Energieverbrauch beziehen sich somit grundsätzlich auf reale Verhältnisse, wurden jedoch im Rahmen der Szenarienbildung mit virtuellen, zur Verallgemeinerung geeigneten Annahmen, kombiniert.

Der Campus Inffeldgasse wurde im Jahr 2021 als Basis für energietechnische Untersuchungen und Experimente von quartiersbezogenen Energiesystemen definiert und soll sich zur Innovationszone „Innovation District Inffeld“ weiterentwickeln. Die im Projekt durchgeführten Untersuchungen erbrachten sowohl „allgemeine“ Erkenntnisse, beinhalten aber auch Komponenten, die für die Weiterentwicklung des „Innovation District Inffeld“ bzw. damit verknüpften Forschungsprojekten herangezogen werden.

Im Rahmen des Projektes COOL-QUARTER-PLUS wurden Masterarbeiten [^{17,51}] und Bachelorarbeiten [^{96,97}] erstellt, sowie an wissenschaftlichen Publikationen gearbeitet. Beide Arbeiten werden in der Form von Open Access für die Forschungsgemeinschaft zur Verfügung stehen.

- Thomas Schranz, Johannes Exenberger, Christian Møldrup Legaard, Ján Drgona, Gerald Schweiger, Energy Prediction under Changed Demand Conditions: Robust Machine Learning Models and Input Feature Combinations, Proceedings of Building Simulation 2021: 17th Conference of IBPSA
- Mörth, M., Heinz, A., Heimrath, R., Edtmayer, H., Mach, T., Kaisermayer, V., Gölles, M., & Hochenauer, C. (2025). Grey-box model for efficient building simulations: A case study of an integrated water-based heating and cooling system. Buildings, 15(11), 1959. <https://doi.org/10.3390/buildings15111959>

Die Ergebnisse des Referenz-Quartiers haben eindeutig belegt, dass die Vernetzung von PV-Anlagen innerhalb eines Distrikts die Nutzbarkeit der erzeugten elektrischen Energie verbessert. Das Ausmaß dieser Effekte hängt von der spezifischen Verteilung der dezentralen Kühlbedarfe und PV-Anlagen ab. Ebenso hat sich die synergetische Bereitstellung von Wärme und Kälte durch distriktzentrale Anlagen als positiv erwiesen.

Zur Frage der Vernetzung von dezentralen Kühlanlagen sind jedoch Antworten offengeblieben, die in zukünftigen Projekten beantwortet werden sollten. COOL-QUARTER-PLUS thematisierte die Frage nach dem zusätzlichen Aufwand an grauer Energie (Materialeinsatz in der Errichtung) und der Betriebsenergie (thermische Verluste der Rohrleitungen), und konnte diesen Aufwand quantifizieren. In der Herausarbeitung der durch die Vernetzung generierten positiven Effekte ist noch weitere Arbeit zu leisten. Die Ansatzpunkte dazu können in folgende Bereiche gegliedert werden.

⁹⁶ Xhoi Zhupani (2022): Definition und Berechnung von energie- und verbrauchsrelevanten Kennzahlen zur Darstellung in einer IoT Plattform, Bachelorarbeit am Institut für Wärmetechnik, TU Graz

⁹⁷ Roman Schett (2024): Betriebsoptimierung eines Erdwärmesondenfeldes, Bachelorarbeit am Institut für Wärmetechnik, TU Graz

- 1) Je nach Gleichzeitigkeit der Kühlbedarfe der einzelnen Gebäude können durch die Vernetzung der Gebäude mit einem Kühlnetz die einzelnen Kühlanlagen kleiner dimensioniert werden, als bei dezentraler (d.h. rein gebäudebezogener Auslegung). Dadurch ergeben sich geringere Lebenszykluskosten und ein reduzierter Einsatz an grauer Energie.
- 2) Die Vernetzung bietet auch Vorteile in der Ausfallsicherheit. Im Falle von rein dezentralen Anlagen, bedeutet eine Funktionsstörung einer Anlage den Ausfall der Kühlfunktion für das jeweilige Gebäude. Im Falle einer Vernetzung können andere Kühlanlagen einspringen und Kühlfunktionen übernehmen. Weitere regelungstechnische Vorteile könnten sich durch kaskadisches Zuschalten oder durch Vorteile in der Betriebsführung bezüglich der Wirkungsgrade bei Teil- bzw. Volllasten ergeben.
- 3) Durch die Vernetzung können auch Effekte der Semi-Zentralisierung generiert werden. Werden anstatt der dezentralen Anlagen weniger semizentrale Anlagen implementiert (z.B. eine Anlage für zwei Gebäude), dann verringern sich ebenso die Lebenszykluskosten und der Einsatz grauer Energie sinkt. Gleichlaufend sinkt der Wartungsaufwand, da weniger Anlagen pro Distrikt instandgehalten werden müssen.
- 4) Wird das Konzept der Semi-Zentralisierung bis zur distriktbezogenen Zentralisierung weitergeführt und mit der Wärmeversorgung kombiniert, dann ergibt sich der Vorteil der räumlichen Nähe der Abwärme des Kühlprozesses und des Wärmebedarfes der Wärmeversorgung. Deren Koppelung, also die Nutzung von Kühlungsabwärme, kann, wie bereits in Teilen in COOL-QUARTER-PLUS gezeigt, zu maßgeblichen Effizienzsteigerungen führen.
- 5) Die Integration eines Anergienetzes oder einer kalten Fernwärme in die Vernetzung der Kühlanlagen bietet zusätzliche Effizienzvorteile. Ein solches Netz nutzt ungedämmte Leitungen bei niedrigen Temperaturen (8-24 °C), wodurch thermische Verluste minimiert und Kühl- sowie Wärmebedarfe flexibel gedeckt werden können. Die Kombination mit bestehenden Systemen und die Nutzung von Abwärme könnte so die Effizienz weiter steigern und die Lebenszykluskosten sowie den Einsatz grauer Energie weiter reduzieren.

9.5. Einpassung in das Programm „Stadt der Zukunft“

Das Projekt COOL-QUARTER-PLUS wurde im Rahmen der 8. Ausschreibung des Programms „Stadt der Zukunft“, durch Gewährung von Fördermitteln möglich gemacht. Das Programms „Stadt der Zukunft“ verfolgt vier zentrale Zielsetzungen ^[98], die zur österreichischen Klima- und Energiestrategie beitragen.

Ziel 1: Nachhaltiges Energiesystem

Die aktuellen Forderungen zur Umstellung unseres Energieversorgungssystems auf erneuerbare Energieträger bedingt die Transformation der urbanen energietechnischen Infrastruktur. In Bezug auf die Versorgung mit Wärme wurden schon zahlreiche Studien publiziert. Informationen zur Gestaltung der Struktur urbaner Kühlsysteme sind bei Weitem schwieriger zu finden. COOL-QUARTER-PLUS trägt dazu bei, diese Asymmetrie zu verkleinern, indem zum Thema Kühlung von urbanen Einheiten Analysen und Berechnungen durchgeführt werden.

Ziel 2: Reduktion der Klimawirkung

Basis aller entwickelten und untersuchten Konzepte ist die thermische Nutzung von Umweltenergie (Außenluft und/oder Erdwärme), sowie die Produktion elektrischer Energie mittels photovoltaischer Systeme um eine möglichst geringe Menge an Treibhausgasemissionen zu verursachen. Um ein diesbezüglich generelles Optimum finden zu können, wird nicht nur die für Kühlung aufzuwendende Betriebsenergie betrachtet, sondern auch eine Bewertung des gesamten Lebenszyklus vorgenommen. Derart kann auch die klimarelevante Wirkung des verwendeten Materialeinsatzes (d.h. der grauen Energie) in die Betrachtung einbezogen werden.

Ziel 3: Erhöhung der Wettbewerbsfähigkeit

Passive Methoden zur Kühlung von Gebäuden sollten nach Ansicht der Autoren immer prioritär eingesetzt werden. Aufgrund von Klimawandel und Verdichtung stoßen passive Ansätze in dichten urbanen Arealen oftmals an ihre Grenzen. Es ist zu erwarten, dass sich aktive Kühlsysteme zu einem integralen Bestandteil urbaner Infrastruktur weiterentwickeln. Einschlägiger Wissensaufbau und Erweiterung der diesbezüglichen Planungskompetenz wird zunehmend ein wesentliches Kriterium der Wettbewerbsfähigkeit von Planern werden.

Ziel 4: Erhöhung der F&E-Qualität

Die Bearbeitung der Aufgabestellung passierte in enger Abstimmung mit der Weiterentwicklung des Referenz-Quartiers. Dieser Ansatz ermöglichte es einerseits realitätsbezogene Annahmen für die theoretische Analyse anzusetzen und andererseits die entwickelten Simulationsmodelle mit realen Messwerten abzugleichen. Die derart entstandenen Simulationsmodelle tragen dazu bei das dynamische Systemverhalten besser zu verstehen. Auch wurde mit Methoden aus dem Bereich des Machine Learnings neue Möglichkeiten der Digitalisierung erprobt um in Zukunft bedarfsgerechtere Kühlkonzepte bzw. Planungen ausarbeiten zu können.

⁹⁸ <https://nachhaltigwirtschaften.at/de/sdz/ziele-inhalte>

10 Verzeichnisse

Hinweis zu den Abbildungen: Alle Abbildungen basieren auf eigenen Simulationen und Berechnungen im Rahmen dieses Projekts. Abbildungen, die auf externen Quellen oder Fremdmaterialien beruhen, sind im zugehörigen Text oder in der Bildunterschrift entsprechend gekennzeichnet.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Kategoriensystem der Auswertung	14
Abbildung 2: Normalverteilung der Auswertung der Modul-Datenbank anhand der gängigen PV-Technologien (links) und der in Österreich verkauften Modultypen in den letzten Jahren (rechts).....	21
Abbildung 3: Auswertung verschiedener Datenbanken von PV-Modulen – oben: Flächenauswertung, unten: Peakleistung über dem Wirkungsgrad und der Modulflächen	22
Abbildung 4: Untersuchte Szenarien.....	23
Abbildung 5: Areal der Case Study „Innovation District Inffeldgasse“ (2022). Kartenmaterial: © 2022 Google, Landsat / Copernicus, Data SIO, NOAA, U.S. Navy, NGA, GEBCO. Kartendaten © 2022 Google.	24
Abbildung 6: Zusammensetzungen der Gebäudekonfigurationen nach ihren Funktionen gemäß DIN 277 [44] ...	25
Abbildung 7: Exemplarischer Verlauf der Kühllast (Büro und Labor) und der Heizlast des Gebäudes M.....	26
Abbildung 8: Symbolisierung Strukturvariante „Kälte dezentral – PV dezentral“	27
Abbildung 9: Symbolisierung Strukturvariante „Kälte dezentral – PV im Verbund“.....	28
Abbildung 10: Symbolisierung Strukturvariante „Kälte und PV im Verbund“.....	29
Abbildung 11: Symbolisierung Strukturvariante „Kälte und Wärme zentral und PV im Verbund“	29
Abbildung 12: Gemessene solare Einstrahlung und mittlere Außenlufttemperatur der Jahre 2017-2021 und des Referenzjahres 2022 am Standort Graz – Datenquelle: GeoSphere Austria.....	30
Abbildung 13: Solare Einstrahlung und mittlere Außenlufttemperatur der Referenzjahre 2022 und 2042	31
Abbildung 14: Szenarien der PV-Ernte, „mono“ steht für monokristallin und „poly“ für polykristallin	32
Abbildung 15: Verwendete Module und Wechselrichter der in den Strukturvarianten hinterlegten PV-Anlagen.....	33
Abbildung 16: Schematische Darstellung des Gebäudemodells (3R3C)	35
Abbildung 17: Simulierte Rücklauftemperaturen im Heiz- und Kühlbetrieb (links) und die Differenz zwischen dem detaillierten und dem vereinfachten Gebäudemodell als Histogramm (rechts) (in Anlehnung an [59]).....	36
Abbildung 18: Statistische Kennzahlen für Heizen und Kühlen der kalibrierten Modelle	37
Abbildung 19: Vorlauftemperaturen in Abhängigkeit von der Außenlufttemperatur für Flächenheizung (links), Flächenkühlung (rechts) und erforderliche Vorlauftemperaturen für Gebläse-Konvektoren (rechts).....	38
Abbildung 20: Heizlast im Lastverlauf (oben) und als Jahresdauerlinie (unten) für alle Gebäude die am lokalen Nahwärmenetz hängen für die Variante 01K_B_2022_akt (Jahr 2022).....	39
Abbildung 21: Kühllast im Lastverlauf (oben) und als Jahresdauerlinie (unten) für alle Gebäude die am lokalen Nahkältenetz hängen für die Variante 01K_B_2022_akt (Jahr 2022)	39
Abbildung 22: Gemessene und simulierte Temperaturverläufe der TRT-Messung aus dem Jahr 2009, sowie die Darstellung der Differenz zwischen simulierter und gemessener Temperatur mit einem Histogramm	40
Abbildung 23: Gegenüberstellung der simulierten und gemessenen Werte für die thermisch erzeugte Energie (Q_{cond}) und die aufgenommene elektrische Leistung (P) einer der Wärmepumpe im Gebäude D in verschiedenen Betriebszuständen (Stufen).....	41
Abbildung 24: Gemessener spezifischer Kühlenergiebedarf der Gebäude ohne Labore, verglichen mit dem Kühlbedarf gemäß österreichischem Energieausweis (KB EA) und dem Referenzbedarf. Für die mit * gekennzeichneten Gebäude liegt kein Energieausweis vor.....	43

Abbildung 25: Gemessener spezifischer Kühlenergiebedarf der Labore (bezogen auf die Nutzungsfläche Labor)	43
Abbildung 26: Kühlenergiebedarf (KB) der Labore, sowie die maximale Kühlleistung	44
Abbildung 27: Kühlenergiebedarf je Monat der Gebäudekonfigurationen für das Jahr 2021	44
Abbildung 28: Heizenergiebedarf je Monat der Gebäudekonfigurationen für das Jahr 2021	44
Abbildung 29: Hydraulikschema der Strukturvariante „Kälte dezentral – PV dezentral“	46
Abbildung 30: Anschaffungskosten je kW in Abhängigkeit der Auslegungsleistung der Kompressionskältemaschine	46
Abbildung 31: Kälteleistungen und Leistungszahlen (EER) pro Gebäude (Strukturvariante 01-03) und der zentralen Wärmepumpen der Strukturvarianten 04 & 05KW	47
Abbildung 32: Hydraulikschema der Strukturvariante „Kälte dezentral – PV im Verbund“	48
Abbildung 33: Kälteleitungsnetz im Referenz-Quartier mit farblich gekennzeichneten Abschnitten	48
Abbildung 34: Kosten pro Trassenmeter (trm), spezifischer Druckverlust (Pa/m) je Hausanschlussleistung (A-N) und Netzabschnitt (gelb, grün und blau)	49
Abbildung 35: Hydraulikschema der Strukturvariante 03K „Kälte und PV im Verbund“	50
Abbildung 36: Hydraulikschema der Strukturvariante 04 & 05KW „Kälte und Wärme zentral und PV im Verbund“	51
Abbildung 37: Darstellung der minimalen und maximalen Temperaturen der mittleren Wärmeträgermedium-Temperaturen, in Abhängigkeit von der Anzahl der Erdwärmesonden	53
Abbildung 38: Verlauf (04KW) der mittleren Wärmeträgermedium-Temperatur über 25 Jahre	53
Abbildung 39: Übersicht der Ergebnisse der Strukturvarianten hinsichtlich Energiebedarfes und PV-Ertrag	54
Abbildung 40: Ergebnisse der Strukturvarianten hinsichtlich Autarkiegrad, Jahresarbeitszahlen und Emissionen	55
Abbildung 41: JAZ3 der ersten und dritten Strukturvarianten	56
Abbildung 42: Thermische Verluste der Kälteerzeugung der ersten und dritten Strukturvariante für das Jahr 2022 mit und ohne Labore	56
Abbildung 43: Verlauf der THG-Emissionen in kg je Stunde, in der Kalenderwoche 26 aller Strukturvarianten, im Jahr 2022 ohne Labore	57
Abbildung 44: Darstellung der prozentualen Anteile der PV-Stromerzeugung bezogen auf die insgesamt benötigte Kühlenergie (Autarkiegrad) aller Varianten	58
Abbildung 45: JAZ3 für das Kühlen von der vierten und fünften Strukturvariante mit und ohne Labore für die Jahre 2022 und 2042	58
Abbildung 46: JAZ3 für das Heizen von der vierten und fünften Strukturvariante mit und ohne Labore für die Jahre 2022 und 2042	59
Abbildung 47: Versorgungsanteil der Wärmepumpe an die Wärmeversorgung des Referenz-Quartiers von der vierten und fünften Strukturvariante	59
Abbildung 48: Verlauf der THG-Emissionen in kg/h für die Kalenderwoche 5 des Jahres 2022 in der Strukturvarianten 04KW, jeweils mit und ohne Berücksichtigung von Laboren. Zusätzlich ist ein Referenzwert für die THG-Emissionen bei ausschließlichem Betrieb mit Fernwärme dargestellt	60
Abbildung 49: Rückblick-Horizont von vier und Vorhersage-Horizont von zwei. Der aktuelle Wert zum Zeitpunkt t_0 sowie vier vergangenen Werte ($t-1$ bis $t-4$, orange markiert) werden zur Vorhersage eines Wertes zwei Zeitschritte in der Zukunft ($t+2$, türkis markiert) verwendet. In der single step Methode wird nur ein einzelner zukünftiger Wert vorhergesagt, der Wert $t+1$ (türkiser transparenter Punkt) bleibt also unbekannt	62
Abbildung 50: Vergleich des CV-RMSE für unterschiedliche Modell- und Feature-Kombinationen (Rückblick Horizont 24 Stunden)	63

Abbildung 51: Vergleich des CV-RMSE für unterschiedliche Modell- und Feature-Kombinationen (Rückblick-Horizont 72 Stunden).....	64
Abbildung 52: Übersicht über die IKT Plattform	65
Abbildung 53: Installation zusätzlicher Sensoren in einem Büro.....	65
Abbildung 54: Nutzer:innen-Feedback zum Wohlbefinden in Innenräumen und dazu gemessene Werte	66
Abbildung 55: Korrelationen zwischen Nutzer:innen-Feedback und tatsächlichen Messwerten (Korrelationskoeffizient: -1 perfekte negative Korrelation, 0 keine Korrelation, +1 perfekte positive Korrelation).	66
Abbildung 56: Reales System und dessen Abbildung in der Simulationsumgebung	67
Abbildung 57: Die Abbildung zeigt die Validierung des ML-Modells und die Optimierungsergebnisse	69
Abbildung 58: Rechnerische Nutzungsdauern, jährliche Kosten für Instandsetzung und jährliche Kosten für Wartung- und Inspektion der Komponenten nach VDI-Richtlinie 2067	71
Abbildung 59: Kühlbedarf, PV-Erzeugung und Strombedarf in den 12 Varianten	71
Abbildung 60: Lebenszykluskosten über einen Betrachtungszeitraum von 30 Jahren - Strukturvariante 1 []	72
Abbildung 61: Lebenszykluskosten über einen Betrachtungszeitraum von 30 Jahren - Strukturvariante 2 [⁸¹]....	73
Abbildung 62: Lebenszykluskosten über einen Betrachtungszeitraum von 30 Jahren - Strukturvariante 3 [⁸¹]....	73
Abbildung 63: Lebenszykluskosten der Strukturvarianten nach 30 Jahren (Folgekosten in schraffierter Darstellung) []	74
Abbildung 64: Dominanzanalyse der Kostenarten Errichtungskosten und Folgekosten (Energiekosten, Instandsetzungskosten, Wartungs- und Instandhaltungskosten und Austauschkosten) über einen Betrachtungszeitraum von 30 Jahren. []	75
Abbildung 65: Kühlbedarf, PV-Erzeugung und Strombedarf in den 12 Szenarien	75
Abbildung 66: Dominanzanalyse der Komponenten über einen Betrachtungszeitraum von 30 Jahren	76
Abbildung 67: Sensitivitätsanalyse der Lebenszykluskostenberechnung bei variierendem Kalkulationszinssatz (1.0%/3.0%/5.0%) über einen Betrachtungszeitraum von 30 Jahren	77
Abbildung 68: Sensitivitätsanalyse der Lebenszykluskostenberechnung bei variierender Preissteigerungsrate (Baukosten (0.0%/2.0%/4.0%)) über einen Betrachtungszeitraum von 30 Jahren.	78
Abbildung 69: Sensitivitätsanalyse der Lebenszykluskostenberechnung bei variierender Preissteigerungsrate (Energiekosten (3.0%/5.0%/7.0%)) über einen Betrachtungszeitraum von 30 Jahren	78
Abbildung 70: Betrachtete Lebenszyklusmodule für die entwickelten Kühlsysteme [].....	80
Abbildung 71: Wesentliche Aspekte der funktionellen Einheit	80
Abbildung 72: Schematische Darstellung des Transports im Lebenszyklusmodul A4	81
Abbildung 73: Berücksichtigte Umweltindikatoren	82
Abbildung 74: Global Warming Potential in tCO ₂ eq. der verschiedenen Lebenszyklusphasen für die untersuchten Kühlsystemvarianten.....	82
Abbildung 75: Relativer Beitrag des Global Warming Potentials in tCO ₂ eq. der verschiedenen Lebenszyklusphasen für die bewerteten Kühlsystemvarianten	83
Abbildung 76: Relativer und absoluter Beitrag des Global Warming Potentials in tCO ₂ eq. der verschiedenen Komponenten der Kühlsystemvarianten	84
Abbildung 77: Graue Treibhausgasemissionen in tCO ₂ eq. unter Berücksichtigung der Unsicherheiten in den Inventardaten.....	85
Abbildung 78: Gegenüberstellung der grauen und betrieblichen Treibhausgasemissionen in tCO ₂ eq. der verschiedenen Szenarien (betriebliche THG in schraffierter Darstellung).....	86

11 Data Management Plan (DMP)

1: Datenerstellung und Dokumentation

Das Projekt COOL-QUARTER-PLUS verwendet im Wesentlichen Strukturdaten von Gebäuden und technischen Anlagen, sowie energietechnische Messdaten. Nach Verarbeitung dieser Daten mittels Simulationen und anderen Analysewerkzeugen ergeben sich große Datenmengen an Zeitreihen, die ausgewertet und interpretiert werden müssen.

Beschreibung der Ausgangsdaten	Format	Quelle	Zugang
Katasterplan des Untersuchungsgebietes mit Umrissen der Einzelgebäude und Grundstücksgrenzen	SHAPE	Vermessungsamt Graz	bestellbar
Grundrisse und Schnitte der Gebäude des Untersuchungsgebietes	CAD	Eigentümer (BIG)	nicht öffentlich
Bauphysikalische Nachweise und Energieausweise der Gebäude des Untersuchungsgebietes	PDF	Eigentümer (BIG)	nicht öffentlich
Zeitreihen mit Stundenwerten von Außenlufttemperatur, Feuchtigkeit und solarer Einstrahlung am Gebäudestandort	ASCII	Geosphere Austria	https://data.hub.zamg.ac.at/
Beschreibungen der wärmetechnischen Anlagen im Untersuchungsobjekt (Wärmepumpen, Wärmetauscher, Versorgungsnetze etc.)	PDF	Facility Management TU Graz	nicht öffentlich
Beschreibungen der kältetechnischen Anlagen im Untersuchungsobjekt (Kälteaggregate, Wärmetauscher, Versorgungsnetze etc.)	PDF	Facility Management TU Graz	nicht öffentlich
Beschreibungen der elektrotechnischen Anlagen im Untersuchungsobjekt (Übergabestationen, Transformatoren, Versorgungsnetze etc.)	PDF	Facility Management TU Graz	nicht öffentlich
Energetechnische Messdaten (thermisch und elektrisch) in Zeitreihen aus den Anlagen des Untersuchungsgebietes	ASCII	IoT Plattform UserGRIDS	nicht öffentlich
Nutzflächen und Nutzungsarten der Innenräume der Gebäude des Untersuchungsgebietes	XLS	Raumbuch TU Graz-online	TU Graz-online

Beschreibung der Ergebnisdaten	Format	Quelle	Zugang
Ergebnisse der energietechnischen Simulationen als Zeitreihen (Zeitschritt: 15 Minuten bzw. 60 Minuten)	ASCII	Autor:innen	Individuelle Weitergabe
Überblicksartige Zusammenstellung der Vorgangsweisen und Ergebnisse, als publizierbarer Ergebnisbericht	PDF	Förderprogramm	öffentlich
Masterarbeiten mit Beschreibungen und Analysen zu einzelnen Fragestellungen	PDF	Bibliothek der TU Graz	3 Jahre Sperrfrist
Wissenschaftliche Artikel, Vorträge und Tagungsbeiträge des Projektteams (sofern möglich in Open Access)	PDF	Journale bzw. SCOPUS	öffentlich

2: Ethische, rechtliche und Sicherheitsaspekte

Die im Projekt verwendeten Daten wurden von unterschiedlichen Datenhaltern unter dem Titel eines Forschungsprojektes zur Verfügung gestellt. Dem Forschungsteam wurde gestattet diese Daten zum Zweck der Projektbearbeitung zu nutzen und weiterzuverarbeiten.

Das Forschungsteam ist nicht befugt über die Weitergabe dieser Daten an Dritte zu entscheiden. Insbesondere betrifft einerseits Infrastrukturdaten und andererseits Messdaten aus Innenräumen, die als Arbeitsplatz fungieren.

Die Infrastruktur des Untersuchungsobjektes Innovation District Inffeld beinhalten den materiellen und den geometrischen Aufbau der Gebäude und der Energieversorgungsinfrastruktur. Diese setzt sich aus dem Wärmenetz, dem Kältenetz, dem Elektrizitätsnetz und deren wesentlichen Anlagen (Wärme- und Strom- Übergabestationen, PV Anlagen, Transformatoren, Wärmepumpen, Erdsondenfeldern, Kälteanlagen, etc.) zusammen. Zur Erfüllung der Funktion eines Forschungsstandortes gehören zudem zahlreiche Prüfstände, Servercluster bzw. Test und Versuchsanlagen. Eine vollständige Offenlegung aller Details und Zusammenhänge würde die Sicherheit des Standorts beeinträchtigen und kann deshalb nicht öffentlich zugänglich gemacht werden.

Messdaten aus einzelnen Innenräumen (Temperatur, relative Feuchtigkeit und CO₂-Gehalte der Raumluft, etc.), die Rückschlüsse auf die Nutzung zulassen können Aspekte des Daten- und des Arbeitnehmerschutzes betreffen und dürfen deshalb nur in anonymisierter Form bzw. in entsprechend kumulierter Form publiziert werden.

3: Datenspeicherung und -erhalt

Die Sicherung der Ausgangsdaten liegt beim jeweiligen Datenhalter, der als Quelle für die Daten angegeben ist (siehe Tabelle oben). Bei den Rohdaten der Ergebnisse muss zwischen Simulation und Messung unterschieden werden.

- Die Roh-Messdaten aus den energietechnischen Anlagen sind in einer IoT Plattform gespeichert, die im Rahmen des Projektes UserGRIDs entwickelt wurde. Es werden Zeitreihen energietechnischer Werte in einer INFLUX- DB und zusätzliche semantische Informationen in einer MONGO DB gespeichert. Die Datenbanken von einem Server des zentralen Informatikdienstes der TU Graz (ZID) gehostet und gesichert.
- Die Roh-Simulationsdaten liegen bei den jeweiligen Forschungspartnern, die sie erarbeitet haben, auch die Verantwortung für deren Sicherung tragen. Am Institut für Wärmetechnik werden diese Daten mehrfach, auf unterschiedlichen lokalen Datenträgern, gesichert.

Die aus den Rohdaten (Messung und Simulation) ermittelten Analysen und Interpretationen werden ebenfalls von den Forschungspartnern gesichert.

4: Wiederverwendbarkeit der Daten

Bei der Betrachtung der Wiederverwendbarkeit der Daten muss zwischen Daten, die den Daten- bzw. arbeitsrechtlichen Schutz von Mitarbeiter:innen betreffen und anderen Daten unterschieden werden. Für Erstere werden schon in der Generierung massive Einschränkungen in der Zugänglichkeit gesetzt und nach Beendigung des Projektes werden die Daten, die Rückschlüsse auf einzelne Personen zulassen, gelöscht. Zweitere werden in den Datenpool des Innovation District Inffeld aufgenommen. Die Weiternutzung dieser Daten durch Forschungsprojekte muss individuell vereinbart werden, wobei die Zustimmung der Datenhalter der jeweiligen Rohdaten einzuholen ist. Diese individuelle Vorgangsweise wird durch ein entsprechendes Zugangs- bzw. Nutzungsmanagement ersetzt werden, dass sich zurzeit aber noch in der Entwicklungsphase befindet.

