



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

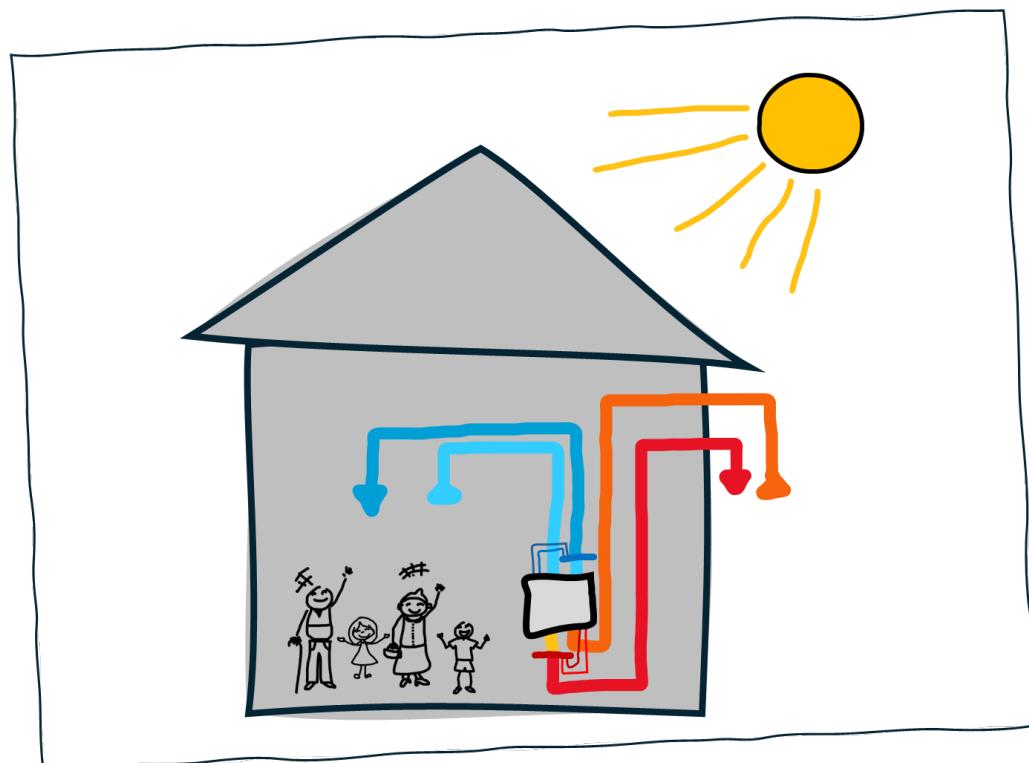
Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Energie BFE
Sektion Energieforschung und Cleantech

Zwischenbericht vom 12. November 2025

EISCH

Energieeffiziente Verbesserung des
sommerlichen Komforts durch
Abluftwärmepumpen

*Energy-efficient Improvement of Summer
Comfort through exhaust air Heat pumps*





HSLU Hochschule Luzern

Datum: 21.11.2025

Ort: Horw

Subventionsgeberin:

Bundesamt für Energie (BFE)
Sektion Energieforschung und Cleantech
Pulverstrasse 13
CH-3063 Ittigen
www.bfe.admin.ch

Ko-Finanzierung:

Stadt Zürich
Amt für Hochbauten (AHB)
Lindenhofstrasse 21, CH-8021 Zürich
<http://www.stadt-zuerich.ch/hochbau>

Subventionsempfänger/innen:

Hochschule Luzern
Institut für Gebäudetechnik und Energie
Technikumstrasse 21, 6048 Horw
www.hslu.ch

EQUA Solution AG
Untermüli 3, 6300 Zug
www.equa.ch

Autoren:

Simone Dugaria, HSLU, simone.dugaria@hslu.ch
Benoit Sicre, HSLU, benoit.sicre@hslu.ch
Dominik Hotz, HSLU, dominik.hotz@hslu.ch
Michael Näf, HSLU, michael.naef@hslu.ch

BFE-Projektbegleitung:

Martin Ménard, Low-Tech Lab GmbH (fachliche Projektbegleitung), menard@lowtechlab.ch
Andreas Eckmanns, Bundesamt für Energie, andreas.eckmanns@bfe.admin.ch

BFE-Vertragsnummer: SI/502850-01

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.



Zusammenfassung

Steigende Aussentemperaturen und Luftfeuchtigkeit werden in Zukunft zu einem erhöhten Energie- und Leistungsbedarf für Kühlung und Entfeuchtung führen. Insbesondere für Räume, in denen sich vulnerable Menschen oder Schulkinder aufhalten, erfordert dies kostengünstige, leicht nachrüstbare und effiziente Lösungen, um ein angenehmes Raumklima zu gewährleisten, das den Bedürfnissen dieser Gruppen gerecht wird.

Das Projekt wird die Machbarkeit der Nachrüstung bestehender Lüftungssysteme mit Fortluft-/Abluftwärmepumpen in Kombination mit Wärme- oder Enthalpierückgewinnung untersuchen. Dabei wird das Potenzial dieser Technologie zur Reduktion des Kühl- und Entfeuchtungsbedarfs und zur Verbesserung des Raumkomforts in Altersheimen und Schulen aufgezeigt und mit anderen Lösungen verglichen. Das schweizerische Regelwerk weist heute Lücken bezüglich Fortluft-/Abluftwärmepumpen auf, insbesondere in Kombination mit Wärmerückgewinnung. Im Projekt sollen Vorschläge für eine Bewertungsmethode und darauf aufbauende Regeln und Anforderungen für die Energievorschriften und Normen erarbeitet werden.

Der vorliegende Zwischenbericht präsentiert eine Auswahl der zentralen Ergebnisse der Arbeiten, die zur Definition der Grundlagen (AP 2) für die Energiesimulationen sowie für die experimentellen Tests an der Lüftungsanlage durchgeführt wurden:

- Analyse und Festlegung der klimatischen Randbedingungen sowie der Details der relevanten Simulationsszenarien.
- Definition der Auswertekriterien für die Simulationsergebnisse, um eine konsistente und vergleichbare Bewertung der späteren Simulationen zu gewährleisten.
- Erstellung der Gebäudemodelle für die IDA-ICE-Simulationen: vollständige Ausarbeitung des Schulgebäudemodells sowie wesentliche Fortschritte bei der Modellierung des Altersheims; anhand von sechs realen Seniorenheimen in der Stadt Zürich wurden die getroffenen Modellannahmen überprüft und plausibilisiert.
- Entwicklung des Simulationsmodells für Lüftungsgeräte mit integrierter Enthalpierückgewinnung und Abluftwärmepumpe, erarbeitet in enger Zusammenarbeit mit den Projektpartnern Nilan und EQUA Solutions.
- Analyse der normativen Grundlagen sowie Definition der Prüfbedingungen und Messmethoden zur experimentellen Validierung des Simulationsmodells; die Messkampagnen sind ab Januar 2026 geplant.
- Analyse des Lüftungsgeräts Nilan HCR 800T, eines kompakten, integrierten Lüftungssystems mit Enthalpierückgewinnung und reversibler Wärmepumpe, das im Rahmen der experimentellen Tests detailliert charakterisiert werden soll.

Die in diesem Zwischenbericht präsentierten Analysen und Schlussfolgerungen sind vorläufig und können im weiteren Projektverlauf auf Basis neuer Daten und Erkenntnisse angepasst oder erweitert werden; dies betrifft ebenso die dargestellten Simulations-szenarien und -modellen wie auch die experimentellen Untersuchungen.

Nach der vollständigen Ausarbeitung dieser Grundlagen werden die experimentellen Tests zur Überprüfung der Funktionsfähigkeit des Lüftungsmodells (AP3), das für die Gebäudesimulationen eingesetzt wird, durchgeführt. Parallel dazu erfolgt die detaillierte Festlegung der Simulationsparameter, gefolgt von der Durchführung der Gebäude- und Anlagensimulationen (AP4).



Summary

Rising outdoor temperatures and humidity levels will, in the future, lead to increased energy demand and higher cooling and dehumidification loads. This is particularly relevant for spaces occupied by vulnerable individuals or schoolchildren, where cost-efficient, easily retrofittable, and energy-efficient solutions are required to ensure a comfortable indoor environment that meets the needs of these groups.

The project investigates the feasibility of retrofitting existing ventilation systems with exhaust/extract-air heat pumps in combination with sensible or enthalpy heat recovery. It assesses the potential of this technology to reduce cooling and dehumidification requirements and to improve thermal comfort in retirement homes and schools and compares it with alternative solutions. The current Swiss regulatory framework shows gaps regarding exhaust/extract-air heat pumps, particularly when combined with heat recovery systems. The project aims to develop proposals for an evaluation method and derive corresponding rules and requirements for future energy regulations and standards.

This interim report presents a selection of the central results from the work carried out to define the foundations (WP 2) for the energy simulations, as well as for the experimental tests on the ventilation system:

- Analysis and definition of the climatic boundary conditions and the relevant simulation scenarios.
- Definition of the evaluation criteria for the simulation results to ensure a consistent and comparable assessment of the subsequent simulations.
- Development of the building models for the IDA-ICE simulations: full elaboration of the school building model and substantial progress in modelling the nursing home; assumptions were validated and plausibly using data from six real nursing homes in the city of Zurich.
- Development of the simulation model for ventilation units with integrated enthalpy recovery and exhaust-air heat pumps, carried out in close collaboration with the project partners Nilan and EQUA Solutions.
- Analysis of the normative framework and definition of the test conditions and measurement methods for the experimental validation of the simulation model; the measurement campaigns are scheduled to begin in January 2026.
- Technical analysis of the Nilan HCR 800T ventilation unit, a compact integrated system with enthalpy recovery and a reversible heat pump, which will be thoroughly characterised in the experimental tests.

The analyses and conclusions presented in this interim report are preliminary and may be refined or extended as the project progresses and new data become available. This applies both to the simulation scenarios and models and to the experimental investigations.

Once these foundations are fully developed, the experimental tests for validating the functionality of the ventilation model (WP 3), which will be used in the building simulations, will be carried out. In parallel, the detailed definition of the simulation parameters will be completed, followed by the execution of the building and system simulations (WP 4).



Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	3
Résumé	Error! Bookmark not defined.
Summary	4
Inhaltsverzeichnis	5
1 Einleitung	6
1.1 Ausgangslage und Hintergrund.....	6
1.2 Motivation des Projektes	6
1.3 Projektziele und Abgrenzungen	7
1.3.1 Ziele	7
1.3.2 Abgrenzungen	8
2 Vorgehen und Methode	10
2.1 Grundlagen.....	10
2.2 Experimentelle Messungen	11
2.3 Gebäudesimulationen.....	12
2.4 Handlungsempfehlungen.....	13
3 Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse	14
3.1 Administratives	14
3.2 Grundlagen	14
3.2.1 Simulationsszenarien	15
3.2.2 Modell der Lüftungsanlage ABLWP + ERG	24
3.2.3 Gebäudemodelle für Simulationen	28
3.2.4 Nutzungsprofile für Simulationen	32
3.2.5 Auswertekriterien für die Simulationsergebnisse	35
3.3 Experimentelle Messungen – Planung der Prüfarbeiten.....	37
3.3.1 Prüfobjekt.....	37
3.3.2 Normativer Bezugsrahmen.....	41
3.3.3 Versuchsreihen und Zielgrößen.....	42
3.3.4 Messstrategie und Instrumentierung	43
3.3.5 Versuchsablauf und Datenqualität	45
4 Weiteres Vorgehen	46
4.1 Administratives	46
4.2 Arbeitspakete	46
5 Nationale und internationale Zusammenarbeit	47
6 Publikationen	48
7 Literaturverzeichnis	49



1 Einleitung

1.1 Ausgangslage und Hintergrund

Im Hinblick auf die prognostizierten Klimaänderungen stellt der sommerliche Komfort in Gebäuden eine grosse Herausforderung dar [1]. Insbesondere vulnerablen Bevölkerungsgruppen wie ältere Menschen und Kinder können durch hohe Raumtemperaturen und Schwüle gesundheitlich stark belastet werden und, spez. relevant für Schulen, in ihrer geistigen Leistungsfähigkeit beeinträchtigt werden. Es ist absehbar, dass in diesen Bereichen vermehrt eine Kühlung und Entfeuchtung gefordert wird. Insbesondere in bestehenden Gebäuden stellt die Umsetzung eine Herausforderung dar.

Im Synthesebericht Monitoring hitzebedingter Todesfälle 2000-2022 [2] wird deutlich, dass die Altersgruppe, der über 75-Jährigen generell am stärksten von hitzebedingten Todesfällen betroffen ist. Mit dem Klimawandel nehmen Hitzewellen und sehr heisse Tage an Häufigkeit und Intensität zu. Besonders akut ist das Problem in Städten, wo eine höhere Anzahl von Hitzetagen erwartet wird und die Nachttemperaturen aufgrund des Hitzeinseleffekts bis zu 5 bis 7 °C höher liegen als in den umliegenden ländlichen Gebieten [3]. Die Analysen des Swiss TPH zeigen ausserdem, dass auch moderat heisse Temperaturen und nicht nur Hitzewellen Todesfälle verursachen. Deshalb werden Massnahmen zum Schutz der Gesundheit vor Hitze immer wichtiger.

In bestehenden Gebäuden, in denen passive Massnahmen wie Sonnenschutz oder Nachtauskühlung nicht ausreichen, sind aktive Kühl- und Entfeuchtungslösungen erforderlich [4]. Typische aktive Kühlösungen, wie z. B. Wärmepumpen mit externen Wärmesunken (Luft, Wasser, Erdreich) können jedoch bei bestehenden Gebäuden auf technische, wirtschaftliche oder rechtliche Hindernisse stossen. Daher muss in einigen Fällen auf alternative Lösungen ausgewichen werden, die keinen grossen Installationsaufwand erfordern, wie z. B. die Integration von reversiblen Fort-/ Abluftwärmepumpen mit Kühlfunktion in bestehenden Gebäudetechniksystemen (mechanische Lüftung und Flächenheizung).

1.2 Motivation des Projektes

Unter Lüftungssystemen mit Fortluft-/Abluftwärmepumpen (hier vereinfacht «Abluftwärmepumpen» - ABLWP) sind allgemein alle Lösungen zu verstehen, die die thermische Energie des Luftstroms aus einem Innenraum nutzen, um die frische Zuluft mittels einer Wärmepumpe (resp. Kälteaggregats) zu konditionieren (zu heizen oder zu kühlen und entfeuchten). Diese Wärmepumpen werden häufig mit einer passiven Wärme- oder Enthalpierückgewinnung (hier vereinfacht «Wärmerückgewinnung» - WRG) kombiniert, um die Effizienz der Energierückgewinnung zu verbessern und die Kühl- oder Heizleistung der Wärmepumpe zu erhöhen.

Lüftungsgeräte mit WRG und ABLWP können in einer Vielzahl von Kontexten und Anwendungen sinnvoll eingesetzt werden. Die ABLWP kann im Winter heizen und Warmwasser bereiten und im Sommer kühlen: dabei wird die Wärme aus der Zuluft (oder aus einem Kühlwasserstrom) entnommen und im Abluftstrom abgegeben oder zur Warmwasserbereitung genutzt.

Obwohl Lüftungsgeräte mit WRG und ABLWP inzwischen bekannt sind und in der Praxis eingesetzt werden, werden sie hauptsächlich zur Deckung der Heizlast in Neubauten mit hohem Wärmedämmwert und oft geringen Baumassen verwendet. Das Potenzial dieser Lüftungsgeräte mit WRG und ABLWP zur Reduzierung der Kühllast in bestehenden Gebäuden und zur Sicherstellung eines angemessenen thermischen Komforts, auch für empfindlichere Personen, ist noch wenig bekannt. Insbesondere, bei der Integration in bestehende Haustechnikkonzepte ist eine Bewertung der Effizienz und der praktischen Umsetzbarkeit erforderlich.

Zudem sind diese Systeme in Berechnungsstandards und Modellen für Simulationsprogramme nur rudimentär vertreten. Darüber hinaus gibt es derzeit keine Kennzahlen oder Referenzwerte zur Abschätzung der Auswirkungen dieser Kombination auf Energie und Energiebedarf unter zukünftigen



Klimaszenarien und in Abhängigkeit vom Konzept der Lüftung und Klimatisierung im Sommer. Vor allem aber fehlt es aus Sicht der nationalen Energiepolitik an Informationen. Das bedeutet, dass es im Rahmen der Energienormen und -standards keine Grundlage für die Förderung und Forderung des Einsatzes der Kombination dieser Systeme gibt.

In Deutschland werden aktuell ABLWP als regenerative Energie gefördert. Das führt dazu, dass europäische Hersteller vermehrt auf diese Lösungen setzen und sie auch in der Schweiz propagieren wollen. Dies hat bereits zu Diskussionen in der gesamten europäischen Branche geführt (Eurovent, CEN-Normenwesen), wie mit dem Thema umgegangen werden soll und wie die Kombination von WRG und ABLWP, insbesondere in Nichtwohngebäuden zu bewerten ist. Die aktuelle europäische Ökodesign-Verordnung (und damit auch die schweizerische EnEV) behandelt den Einsatz von ABLWP nicht. Somit ist die Frage, wie diese Systeme bewertet werden und welche Anforderungen sie erfüllen sollten, noch offen.

Es ist zu erwarten, dass Lüftungsgeräte mit ABLWP und WRG zunehmend in neuen Nichtwohngebäuden eingesetzt werden, da sie eine wirtschaftlich interessante Variante der Zuluftkühlung und vor allem der Zuluftentfeuchtung sind.

1.3 Projektziele und Abgrenzungen

1.3.1 Ziele

- Abschätzung des Potenzials der Kombination ABLWP + WRG zur Kühlung und Aufrechterhaltung angemessener Komfortbedingungen für verschiedene System-konfigurationen und Betriebsbedingungen.

Das Projekt wird die Machbarkeit der Nachrüstung bestehender Lüftungssysteme mit Fortluft-/Abluftwärmepumpen (vereinfacht «Abluftwärmepumpen» - ABLWP) in Kombination mit Wärmerückgewinnung (WRG) untersuchen. Eine zentrale Frage ist das tatsächliche Potenzial zur Deckung bzw. Teildeckung der Kühllast und zur Gewährleistung des zukünftigen sommerlichen Komforts in bestehenden Gebäuden für vulnerable Personen wie älteren Menschen und Schulkinder.

Dabei wird das Potenzial der Lüftungssysteme mit ABLWP in Kombination mit WRG zur Reduktion des Kühl- und Entfeuchtungsbedarfs und zur Verbesserung des Raumkomforts in Altersheimen und Schulen durch Gebäudesimulationen aufgezeigt und mit anderen Lösungen verglichen. Das Potenzial von ABLWP mit WRG wird anhand typischer Schweizer Klimastationen auf der Basis zukünftiger Klimaszenarien für die "nahe Zukunft" (2035) und die "Mitte des Jahrhunderts" (2060) mittels Gebäudesimulation abgeschätzt. Der potenzielle Deckungsanteil der Kühllast wird konkret untersucht:

Systeme, bei denen die ABLWP nur in Kombination mit einer Lüftungsanlage mit WRG betrieben wird (Teilklimatisierung, rein über die Zuluft)

Systeme, bei denen eine Kombination mit grossflächigen Wärme- bzw. Kälteverteilungssystemen (z.B. Fussbodenheizung) möglich ist

Die ABLWP wird zusätzlich für die Warmwasserbereitung benutzt.

Zudem wird die Fähigkeit zur Deckung des Raumluftentfeuchtungsbedarfs bewertet.

- Ermittlung der effizientesten Betriebsbedingungen für eine höhere System-Gesamteffizienz und Ermittlung optimierter Betriebsbedingungen zur Verbesserung des Komforts für die Bewohner

Theoretische Analysen des Leistungspotenzials und der Effizienz der Lüftungssysteme mit ABLWP und WRG werden durch Labormessungen ergänzt und unterstützt. Bekannte Konzepte für die Kombination von Abluftwärmepumpen (ABLWP) und Wärmerückgewinnung (WRG) für Nichtwohngebäude werden analysiert und bewertet. Exemplarisch werden repräsentative und praxisrelevante Leistungskenndaten eines Geräts unter realitätsnahen Betriebsbedingungen experimentell im Labor für Gebäudetechnik der



HSLU ermittelt. Aus Sicht der Energieeffizienz interessiert besonders, wie die Kombination von ABLWP und WRG in Auslegung und Betrieb optimiert werden kann.

Ein vereinfachtes Simulationsmodell für Lüftungsgeräte mit ABLWP und WRG wird entwickelt und mit den experimentellen Messungen validiert, das für Gebäudeenergiesimulationen verwendet werden kann.

- Bereitstellung von Vorschlägen für eine Bewertungsmethode und darauf aufbauende Regeln und Anforderungen für die Energievorschriften und Normen.

Das schweizerische Regelwerk weist heute Lücken bezüglich ABLWP auf, insbesondere in Kombination mit WRG. Im Projekt werden Vorschläge für eine Bewertungsmethode und darauf aufbauende Regeln und Anforderungen für die Energievorschriften und Normen erarbeitet. Das Projekt wird wissenschaftlich fundierte Grundlagen liefern, um die Kombination von ABLWP und WRG in Nichtwohngebäuden in Schweizer Energiegesetzen, Normen und der Energiestrategie 2050 beurteilen zu können. Zudem wird eine energetische und wirtschaftliche Abstimmung zwischen WRG und ABLWP im Hinblick auf die Anforderungen der Ökodesign-Verordnung und europäischen Normen (z. B. SN EN 13053) diskutiert.

Als vorgeschaltetes Element beeinflusst die WRG den Betrieb der ABLWP und damit die Effizienz des Gesamtsystems. Daher werden die folgenden Aspekte untersucht:

- Anpassung der Effizienz der Wärmerückgewinnung zur Erhöhung der Energieeffizienz (und der Spitzenleistung) des Gesamtsystems in Kombination mit einer ABLWP

Anforderungen (z.B. an die thermische Effizienz des Wärmerückgewinnungssystems), die in nationalen Energievorschriften und SIA-Normen für Systeme mit WRG in Kombination mit einer ABLWP festgelegt werden sollten

- Erarbeitung von Handlungsempfehlungen (Fachleute aus Planung und Betrieb sowie Normungsgremien).

Es werden Handlungsempfehlungen erarbeitet, wie das Potenzial der ABLWP energetisch und wirtschaftlich sinnvoll auszuschöpfen wäre. Im Vordergrund steht dabei das Ziel, Überhitzungsstunden zu reduzieren und die Raumluftfeuchte insbesondere für vulnerable Menschen in einem angemessenen Bereich zu halten. Auf dieser Basis werden Handlungsempfehlungen erarbeitet, welche sich an Planungs- und Betriebsfachleute sowie an Normengremien und Fachverbände richten.

1.3.2 Abgrenzungen

Gebäude und Systeme

Der Schwerpunkt des Projekts liegt auf den Gebäudenutzungen Altersheim und Schule (und ist offen gegenüber ähnlichen Nutzungen), in denen keine Klimatisierung oder Teilklimatisierung vorhanden ist.

Eine mechanische Lüftung (zumindest für einen Teil des Gebäudes) ist jedoch eine Voraussetzung. Nicht mechanisch belüftete Gebäude sind daher von der Analyse ausgeschlossen. Ebenfalls von der Analyse ausgeschlossen sind Ein- und Mehrfamilienhäuser sowie Hotels, Bürogebäude und andere Nichtwohngebäude, die nicht mit den beiden oben genannten Gebäudetypen gleichzusetzen sind.

Thermische Behaglichkeit

Die thermische Behaglichkeit wird in erster Linie auf der Grundlage der in den Normen genannten Bedingungen und Anforderungen betrachtet.

Weitergehende Recherchen werden nur durchgeführt, soweit sie als Grundlage für die Simulation von Altersheimen erforderlich sind. Zu diesem Zweck schliesst das Projekt die Möglichkeit nicht aus, Ergebnisse von Feldmessungen und Fragebögen in Pflegeheimen (ausserhalb des Projekts recherchierte Ergebnisse) einzubeziehen. Diese Informationen können zur Interpretation und



Diskussion der Simulationsergebnisse und zur Entwicklung von Handlungsempfehlungen herangezogen werden.

Kältekreislauf und Kältemittel

Bei der Wärmepumpe wird die Frage des Kältekreislaufs nicht im Detail behandelt, ebenso wenig wie die Frage der Kältemittel und der Umstellung von fluorierten Gemischen auf umweltfreundliche Alternativen.

Diese Fragen werden betrachtet, aber es werden keine spezifischen Ziele festgelegt, wie z. B. die Optimierung des Kältekreislaufs, um die Leistung der Wärmepumpe bei gleicher Kältemittelfüllung zu erhöhen, oder die Festlegung spezifischer Sicherheitsmaßnahmen, um die Einhaltung der Vorschriften für Wärmepumpen mit brennbaren Kältemitteln (EN 378+A1:2021) zu gewährleisten.



2 Vorgehen und Methode

Zur Erreichung der im Projekt definierten Ziele wurde die Umsetzung eines Vorgehens beschlossen, welches auf der Nutzung von energetischen Gebäudesimulationen basiert. Der erste grundlegende Schritt besteht in der Erarbeitung der notwendigen Grundlagen, um die Bedingungen und Parameter für die energetischen Gebäudesimulationen festzulegen. Gleichzeitig ist es von entscheidender Bedeutung, experimentelle Messungen durchzuführen, um die erforderlichen Daten für die Validierung des Modells einer Luft-Wärmepumpe in Kombination mit einer Wärme- oder Enthalpierückgewinnung zu gewinnen, welches in den Simulationen verwendet werden soll. Des Weiteren erfolgt eine detaillierte Untersuchung der schweizerischen und europäischen Normen sowie Vorschriften. Die daraus resultierenden Erkenntnisse und Simulationsergebnisse dienen als Basis für die Entwicklung von Handlungsempfehlungen, die auf die Praxis ausgerichtet sind und den Projekterfolg sicherstellen sollen.

2.1 Grundlagen

Die Erarbeitung und Dokumentation der Grundlagen für die energetische Gebäudesimulation ist ein wesentlicher Schritt im Projekt. Zunächst ist es notwendig, repräsentative Modelle von Gebäuden zu definieren, die derzeit in der Schweiz für ältere Menschen (z.B. Seniorenzentren und Langzeitpflegeeinrichtungen) und Schulen gebaut werden. Gleichzeitig müssen die plausibelsten und realistischsten Anlagenkonfigurationen für bestehende Heizungs- und Lüftungsanlagen identifiziert werden, die mit der Integration eines kombinierten Systems von ABLWP und WRG kompatibel sind.

Ein weiterer grundlegender Aspekt ist die Definition der Nutzungsprofile der Nutzer solcher Gebäude. Diese Tätigkeit erfordert die Verwendung bestehender gesetzlicher Normen oder, falls diese nicht vorhanden sind, die Entwicklung spezifischer repräsentativer Profile für Energiesimulationen, z. B. in Bezug auf ältere Menschen in einem Altersheim. Die speziellen Bedürfnisse bzw. Anforderungen an das Innenraumklima im Sinne der thermischen Behaglichkeit und Raumluftqualität der Zielgruppen «ältere Menschen» und «Schulkinder» werden anhand von Normen, insbesondere der SIA 382/1 [5] und deren europäischen Vorgabenormen, analysiert und festgelegt. Nutzungsprofile werden auf Basis der SIA 2024 definiert. Für das Altersheim gibt es keine spezifischen Profile in der SIA 2024:2021, sondern es werden je nach Raumnutzung unterschiedliche Daten verwendet, z.B. für Restaurant und die Versammlungsräume. Für den besonders sensiblen Bereich der Zimmer und Aufenthaltsräume müssen Profile angepasst werden, da weder die Profile der SIA 2024 für Wohnen noch diejenigen für Bettenzimmer in Spitäler für Altersheime typisch sind. Zusätzlich wird eine detaillierte Analyse der technischen und wissenschaftlichen Literatur durchgeführt. Der Schwerpunkt liegt dabei auf den gesetzlichen Anforderungen an die thermische Behaglichkeit mit besonderem Augenmerk auf sommerliche Bedingungen, Hitzewellen, Wärmeempfinden, Wärmewiderstand und thermische Belastung für ältere Menschen und Schulkinder.

Diese Analyse bildet die Grundlage für die Festlegung der Parameter zur Regulierung des Innenraumklimas, die in den Simulationen verwendet werden.

Weiterhin wird der Stand der Technik der Abluftwärmepumpe (ABLWP) für Nichtwohngebäude analysiert und zusammengefasst. Auf Basis von wissenschaftlicher und technischer Literatur, Herstellerangaben und Fachgesprächen werden die heute möglichen und, wo gefordert, zulässigen Kennwerte für den Betrieb von ABLWP dokumentiert. Mögliche Varianten dieser Technologie werden analysiert und bewertet, ebenso wie Optionen von bedarfsgeregelter Lüftung und darüber hinaus von Heizung und/oder Kühlung und/oder Warmwasserbereitung.

Zentral bei dieser Betrachtung sind die Funktionen Kühlen und Abwärmennutzung (z.B. Warmwasserbereitung). Eine effektive Steuerung der reversiblen Wärmepumpen ist ein entscheidender Faktor, um den optimalen Betrieb des Systems zu gewährleisten und die Energieeffizienz zu maximieren. Ein besonderes Augenmerk wird auf die folgenden Aspekte gelegt: Wechselwirkungen



ABLWP und WRG, Änderungen der Kühl- und/oder Entfeuchtungsleistung aufgrund von Änderungen des Außenluftvolumenstroms, Abtauintervalle des Verdampfers.

Basierend auf der vorhergehenden Analyse wird ein neues Simulationsmodell für die ABLWP entwickelt. Das Modell enthält eine Steuerlogik zur Maximierung der Kühl- und/oder Entfeuchtungsleistung der ABLWP. Die Entwicklung präziser Simulationsmodelle für ABLWP mit WRG in Lüftungsanlagen für die Gebäudesimulation ermöglicht es, die Einflüsse der Dynamik und der Interaktionen mit dem Gebäudesystem zu berücksichtigen.

Regelungsstrategien für Lüftungsanlagen mit ABLWP und WRG sowie einfache Systemlösungen (z.B. Bypass-Klappen) werden konzeptionell entwickelt, um technische Hindernisse zu erkennen und Verbesserungspotenziale aufzuzeigen.

Es werden Regelungsstrategien für Kühl- und Lüftungssysteme entwickelt, um hohe Komfortstandards zu gewährleisten und das thermische Wohlbefinden der Bewohner während der Sommermonate zu optimieren.

Die genannten Grundlagen werden in einem Arbeitsdokument einer eingehenden Analyse und Dokumentation unterzogen. Das Dokument wird als Referenz für die Erstellung von Gebäudeenergiesimulationen sowie die Auswertung von Simulationsdaten dienen.

2.2 Experimentelle Messungen

Im Rahmen des Projektes werden experimentelle Untersuchungen zur Erfassung der charakteristischen Leistungsparameter einer reversiblen ABLWP mit WRG im Sommerbetrieb durchgeführt. Besonderes Augenmerk liegt dabei auf der Leistung und dem Wirkungsgrad in verschiedenen Betriebsarten, z.B. im Kühlbetrieb mit und ohne Abwärmenutzung. Die experimentellen Untersuchungen dienen nicht nur der Überprüfung und ggf. Ergänzung der Herstellerangaben, sondern bilden auch eine zentrale Grundlage für die Validierung und Weiterentwicklung des im Projekt entwickelten Simulationsmodells für ABLWP.

Vor der Durchführung der eigentlichen experimentellen Prüfungen erfolgt eine Analyse der Prüfmethoden und Prüfbedingungen anhand der einschlägigen Normen, einschliesslich SN EN 308, SN EN 13141-7, SN EN 14511, SN EN 16573 und SN EN 13053, sowie der neuesten technischen und wissenschaftlichen Literatur. Messungen unter kontrollierten Laborbedingungen dienen dazu, die Genauigkeit des entwickelten Modells des Lüftungssystems und die Zuverlässigkeit seiner Ergebnisse zu überprüfen. Solche Laborbedingungen ermöglichen es, die Prüfparameter genau zu definieren und mögliche Unsicherheitsquellen systematisch zu minimieren.

Bei dem Lüftungsgerät, das für die Versuchsdurchführung ausgewählt wurde, handelt es sich um ein neues Modell, das vom Projektpartner der NILAN AG zur Verfügung gestellt wurde. Es handelt sich dabei um eine Wärmepumpe, die vor allem für den Einsatz in mittelgrossen Einzelräumen wie Klassenzimmern, Büros und Konferenzräumen konzipiert ist. Der Nennluftvolumenstrom beträgt 800 m³/h, kann aber bis auf 200 m³/h reduziert werden. Das Lüftungsgerät ist mit einem Rotationswärmeübertrager ausgestattet und kann wahlweise nur für die sensible Wärmerückgewinnung oder für die sensible Wärme- und Feuchterückgewinnung ausgelegt werden. Der Einsatz eines zusätzlichen Wärmeübertragers zur Erzeugung von Trinkwarmwasser kann für den experimentelle Versuch in Betracht gezogen werden.

Während der Experimente werden diverse Messgrössen erfasst, darunter die Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit, der statische Luftdruck, der Luftvolumenstrom, der externe Förderdruck sowie der elektrische Leistungsbedarf. Soweit möglich, werden auch die Parameter des Kältemittelkreislaufs gemessen, insbesondere die Verdampfungs- und Kondensationstemperaturen. Darüber hinaus wird auch die Anzahl der Rotorumdrehungen überwacht. Aus diesen Daten lassen sich Kennzahlen für das gesamte Lüftungsgerät und einzelne Komponenten wie Abluftwärmepumpe und Wärmerückgewinnungseinheit ermitteln. Zu den berechneten Kennzahlen gehören EER (Energy



Efficiency Ratio), Temperatur- und Feuchte-Effizienz nach EN 308 sowie spezifische Ventilatorleistung (SFP) nach EN 13053.

Die Messergebnisse werden in enger Zusammenarbeit mit der NILAN AG harmonisiert, um die Praxistauglichkeit und Zuverlässigkeit der Ergebnisse zu gewährleisten. Diese Ergebnisse werden im Projektabschlussbericht dokumentiert und dienen als Grundlage für die Validierung des Simulationsmodells.

Der vollständige Messbericht wird erstellt und dem Bundesamt für Energie (BFE) vertraulich zur Verfügung gestellt.

2.3 Gebäudesimulationen

Zur Evaluierung desjenigen Anteils des Kühl- und Entfeuchtungsbedarfs, welcher durch den Einsatz einer ABLWP mit WRG gedeckt werden kann, werden dynamische Gebäudesimulationen durchgeführt. Die Durchführung der Simulationen erfolgt unter Verwendung der Simulationssoftware IDA ICE. Des Weiteren ermöglicht die Simulation die Überprüfung der Komfortbedingungen, insbesondere der durch den Einsatz einer ABLWP in Kombination mit WRG erreichbaren Reduzierung der Überhitzungsstunden.

Die für die Simulationen vorgesehenen klimatischen Bedingungen umfassen zukünftige Klimaszenarien sowie Schweizer Klimastationen, in denen die Auswirkungen von Hitzewellen auf die Bevölkerung mit besonderer Deutlichkeit zu erwarten sind.

Die Definition der Gebäudemodelle sowie der Varianten für das Wärme-/Kälteverteilsystem erfolgt auf der Grundlage der in der Anfangsphase des Projekts erarbeiteten Grundlagen.

Das Modell des Schulgebäudes basiert auf dem im Projekt *Klimaszenarien für das zukünftige Raumklima (SIA 2028)* [6] entwickelten Modell. Das Gebäudemodell für das Altersheim wird in Anlehnung an ein bestehendes Gebäude entwickelt.

Die Gebäudemodelle dienen der Darstellung des Falls von Gebäuden mit bestehenden Lüftungsanlagen, welche eine Wärmerückgewinnung aufweisen und entsprechend adaptiert werden können, jedoch ohne Kühleinrichtungen in den Räumen. Es wird angenommen, dass die Installation eines zentralen Kühlsystems, beispielsweise in Form einer Kompressionskältemaschine mit Kühlтурm, nicht möglich ist. Die Versorgung mit Wärmeenergie erfolgt durch die Fernwärme, welche über Heizkörper oder Fussbodenheizungen abgegeben wird. In diesem Zusammenhang wird eine mögliche Kombination mit ABLWP zur Kühlung in Erwägung gezogen (vgl. Variante 3 im Projektantrag). Der Warmwasserbedarf wird ebenfalls grundsätzlich über die Fernwärme gedeckt, wobei eine Abwärmenutzung der ABLWP berücksichtigt werden kann.

Die in der vorangegangenen Projektpause entwickelte und validierte Modellierung des Verteilsystems mit Wärmepumpe und Wärmerückgewinnung findet Anwendung in den vorgesehenen Gebäudesimulationen.

Im Rahmen der Simulationen werden Regelungsstrategien definiert und optimiert, um den Kühlbedarf zu maximieren und die thermische Behaglichkeit der Bewohner sowie die Verringerung des Hitzestresses zu verbessern. Diesbezüglich ist beispielsweise eine Reduzierung der Überhitzungsstunden als Bewertungskriterium zu nennen.

In ausgewählten Szenarien besteht die Möglichkeit, verschiedene Arten von WRG-Kategorien im Lüftungsgerätemodell zu berücksichtigen. Dies umfasst Plattenwärmeübertrager, Rotoren sowie KVS. In Bezug auf Plattenwärmeübertrager und Rotationswärmeübertrager werden Varianten mit und ohne Feuchteübertragung (sog. Enthalpie-Rückgewinner) berücksichtigt. Diesbezüglich ist festzuhalten, dass die Wahl des WRG-systems insbesondere im Gebäudebestand häufig durch diverse Rahmenbedingungen, wie beispielsweise Platzverhältnisse, Anlagenkonzept sowie hygienische Anforderungen, beispielsweise in Bezug auf die Art der Abluft, eingeschränkt ist. Um die Anzahl der



Simulationen einzuschränken, werden lediglich Lüftungssysteme mit Rotationswärmetauschern simuliert. In der Praxis werden diese vor allem bei grösseren Anlagen ($>1'000 \text{ m}^3/\text{h}$) eingesetzt. Im für die experimentellen Messungen vorgesehenen Gerät ist ebenfalls eine Wärmerückgewinnung mittels Rotationswärmetauscher integriert.

Ein weiteres Interesse gilt der energetischen Eignung verschiedener WRG-Kategorien in Kombination mit einer ABLWP. Die WRG-modelle wurden im Rahmen des Projekts *RePPER – Reduktion von Leistungsspitzen durch Enthalpierückgewinnung* [7] des Bundesamts für Energie entwickelt.

Die Simulationsfälle werden in enger Abstimmung mit der Projektbegleitgruppe definiert und diskutiert. Eine erste Reihe von Simulationsfällen wird durchgeführt, um die Grundlage für den Kühlbedarf in den betrachteten Varianten zu schaffen und die thermischen Komfortbedingungen im Sommer zu ermitteln.

Ein zweiter Satz von Simulationsfällen nimmt die vorgeschlagenen Systemkombinationen in den verschiedenen Varianten unter Berücksichtigung einer Technologie, die für diese Anwendung in Konkurrenz zu ABLWP und WRG steht, unter die Lupe. Infrage kommen insbesondere Split-Klimageräte.

Ein (möglicher) dritter Satz von Simulationen untersucht mögliche Varianten der zuvor betrachteten Simulationsfälle, um die Steuerung des Systems zu optimieren und verschiedene Ziele zu verfolgen. Dazu zählen beispielsweise die Maximierung der Deckung des Kühlbedarfs, die Reduzierung der Stunden mit thermischer Unbehaglichkeit und ähnliches.

Die Ergebnisse der Simulationen werden in Tabellen und/oder Grafiken zusammengefasst und in einem Arbeitsdokument dokumentiert. Dabei werden die Werte für den Energie- und Leistungsbedarf sowie die Raumtemperaturen und Luftfeuchtigkeit berücksichtigt. Neben der jährlichen Energieanalyse wird auch die Spitzenleistung im Sommer dargestellt.

2.4 Handlungsempfehlungen

Im Rahmen des vorliegenden Projekts werden Handlungsempfehlungen erarbeitet, die sich an Planungs- und Betriebsexperten sowie an Normungsgremien und Fachverbände richten.

Die Handlungsempfehlungen basieren auf den bei der Erarbeitung der Projektgrundlagen gewonnenen theoretischen Ergebnissen sowie auf den Resultaten experimenteller Untersuchungen und insbesondere der Simulationsfälle.

Des Weiteren werden Daten und Informationen zu Abluftwärmepumpensystemen (Themen: Platzbedarf, Kosten, Wartungsaufwand etc.) sowie Empfehlungen und Erfahrungen von Errichtern, Betreibern und Nutzern realer Systeme (Umsetzungs- und Betriebsschwierigkeiten, Überwachungsdaten etc.) in ähnlichen Anwendungskontexten wie den simulierten gesammelt. Die genannten Erfahrungen dienen dazu, praktische und technische Aspekte zu veranschaulichen, die in Simulationen und Labortests unter kontrollierten Bedingungen nicht ermittelt werden können.

Für Fachleute aus Planung und Betrieb wird dargelegt, welche Auswirkungen die ABLWP auf die Auslegung und den Betrieb von bestehenden Lüftungsanlagen in Verbindung mit grossflächigen Heiz-/Kühlsystemen und WärmeverSORGUNG, insb. Warmwassererzeugung hat. Neben den Vorteilen der ABLWP wird auch auf die Nachteile und Einsatzgrenzen kritisch eingegangen. Die Kombination von ABLWP und WRG wird speziell aus Sicht der Schweizer Energiegesetze, Normen und der Energiestrategie 2050 beurteilt.

Für Gebäudetechnikkonzepte und Energiestandards wird aufgezeigt, inwieweit die ABLWP die zusätzliche Kühllast infolge Klimawandel abdecken und die Raumluftfeuchte im Komfortbereich halten kann. Zudem werden Überlegungen angestellt, wie Lüftungsgeräte mit ABLWP in den kantonalen Energievorschriften und SIA-Normen behandelt werden könnten.

Die Handlungsempfehlungen werden mit den Projektpartnern und der Projektbegleitgruppe besprochen.



3 Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

3.1 Administratives

Der Subventionsvertrag wurde am 28.10.2024 von allen Parteien unterzeichnet.

Das Projekt begann am 11.11.2024. (Der geplante Projektstart im Projektantrag war der 01.10.2024)

Am 20. November 2024 fand die erste Projektsitzung (Kickoff-Meeting) statt, zu der alle am Projekt beteiligten Parteien (Mitglieder der Arbeitsgruppe und der Begleitgruppe) eingeladen waren.

Im Rahmen des Projekts erfolgte eine wiederholte Zusammenkunft der Projektgruppe.

Am 17. November 2025 fand eine Sitzung mit der Projektbegleitgruppe statt.

3.2 Grundlagen

Im Rahmen der Projektgrundlagen (AP 2) wird derzeit an verschiedenen Themen gearbeitet.

Die folgenden Themen können als abgeschlossen betrachtet werden:

- Ermittlung der klimatischen Bedingungen und Simulationsszenarien

Die technische und wissenschaftliche Literatur zu zukünftigen Klimaszenarien für die Schweiz wurde analysiert, um die Klimastationen zu identifizieren, die im Sommer am stärksten von den Auswirkungen des Klimawandels, insbesondere von Hitzewellen, heißen Tagen und tropischen Nächten, betroffen sind. Darüber hinaus wurden die für die Projektziele relevanten möglichen Anlagenkonfigurationen definiert. Die gewonnenen Erkenntnisse wurden für die Definition der relevanten Simulationsszenarien genutzt.

- Modellierung von Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung und Wärmepumpe für Abluft

Die Modellierung von Lüftungsanlagen, die mit Wärmerückgewinnung und Wärmepumpe für Abluft ausgestattet sind, ist ein essenzieller Bestandteil der HVAC-Technologie.

Das Simulationsmodell für das Lüftungsgerät mit Abluftwärmepumpe und Enthalpierückgewinner wurde identifiziert. In Zusammenarbeit mit dem Projektpartner Nilan AG erfolgte eine Explikation der meisten Eingaben des Modells. Die Validierung des Modells steht zum gegenwärtigen Zeitpunkt noch aus.

- Definition von Gebäudemodellen für Simulationen mit IDA ICE

Für die Simulationen wurde das Gebäudemodell der Schule vollständig definiert. Die Definition des Gebäudemodells für das Seniorenheim befindet sich derzeit in der Konzeptionsphase.

- Experimentelle Messungen

Die Analyse der technischen Normen und der wissenschaftlichen Literatur kann als abgeschlossen betrachtet werden. Es wurden die richtigen Testbedingungen festgelegt, um sicherzustellen, dass die Messungen genau durchgeführt und ausgewertet werden.

Die Bearbeitung der zu anderen Themengebieten vorliegenden Arbeiten ist noch nicht als abgeschlossen zu betrachten.

Die wesentlichen Punkte der zuvor genannten Themen sind diesem Zwischenbericht zu entnehmen.

Die Resultate dieser Analysen werden systematisch in einem Arbeitspapier mit dem Titel "Grundlagen" gesammelt. Es wurde die Intention formuliert, einen Teil dieses Referenzdokuments als Anhang in den



Abschlussbericht des Projekts zu integrieren. Ziel dieser Massnahme ist es, die methodischen und theoretischen Grundlagen in transparenter Weise darzustellen.

Die in diesem Zwischenbericht dargestellten Inhalte, Analysen und daraus abgeleiteten Schlussfolgerungen sind als vorläufig zu betrachten. Sie können im weiteren Projektverlauf aufgrund neuer Erkenntnisse, zusätzlicher Datengrundlagen oder erweiterter methodischer Ansätze überarbeitet oder angepasst werden. Gleiches gilt für die präsentierten Simulationsszenarien sowie die geplanten bzw. laufenden experimentellen Untersuchungen, welche im Zuge der Projektentwicklung ebenfalls Änderungen und Ergänzungen unterliegen können.

Nach Abschluss der vorliegenden Arbeitspakete werden experimentelle Tests zur Validierung des Belüftungsmodells durchgeführt (AP3), das für die Gebäudesimulationen Verwendung finden soll.

Parallel dazu erfolgt die Festlegung der Details für die Simulationen und anschliessend die Durchführung der eigentlichen Gebäudesimulationen (AP4)

3.2.1 Simulationsszenarien

Die Simulationen des Schulhauses und des Alterszentrums basieren auf den Vorgaben der SIA-Normen und wird für die Sommerperiode vom 16. April bis 15. Oktober durchgeführt. Ziele sind die Untersuchung des sommerlichen Wärmeschutzes, der Raumluftqualität und die Ermittlung von energetischen Kennzahlen.

Als Standorte dienen die Schweizer Klimastationen Lugano (LUG), Zürich-Kloten (KLO), Zürich-Kaserne (NABZUE) und Genf/Cointrin (GVE).

Klimaszenarien und Auswahl der Referenzfälle¹

Die Analyse basiert auf den SIA/CH 2018-Klimaszenarien welche zukünftigen Entwicklungen von Temperatur, Luftfeuchte und Strahlung für verschiedene Zeiträume und Klimastationen in der Schweiz darstellen. Erhältlich sind die Daten für die Zeiträume 2020-2049 und 2045-2074 unter der Annahme verschiedener Emissionsszenarien der Treibhausgase (Representative Concentration Pathways, RCP).

Für das vorliegende Projekt erweist es sich als sinnvoll, RCP-8.5-Klimaszenarien für die Jahre 2035 und 2060 in Energiesimulationen zu berücksichtigen, da sie eine konservative und vorsorgliche Annahme in Bezug auf steigende Temperaturen und die Häufigkeit von Hitzewellen darstellen.

Im Vergleich zu anderen Szenarien (z. B. RCP 4.5 oder RCP 2.6) lassen sich mit RCP 8.5 das Verhalten von Kühlsystemen unter belastenderen Bedingungen sowie die Robustheit und Effizienz der Technologien unter strengeren klimatischen Bedingungen bewerten. Darüber hinaus können das mögliche Wachstum der Kühllasten und des Energieverbrauchs sowie die Auswirkungen zukünftiger „Worst-Case“-Szenarien untersucht werden, die für die langfristige Planung und die Analyse von Klimarisiken nützlich sind.

Mittelfristig (bis 2035–2060) entsprechen die beobachteten Entwicklungen der globalen Emissionen noch immer dem RCP 8.5. Dadurch ist es ein realistisches Szenario für vorausschauende Bewertungen des Sommerkomforts und des Kühlbedarfs.

Für die Gebäudesimulationen werden zwei Arten von Jahresdatensätzen unterschieden:

- DRY-Jahre repräsentieren ein typisches, relativ trockenes Jahr, das für die energetische Beurteilung (z. B. Jahresenergiebedarf, mittlere Komfortbedingungen) geeignet ist.
- 1-in-10-Jahre („warm summer“) repräsentieren ein heißes und feuchtes Sommerjahr, das statistisch etwa einmal pro zehn Jahre auftritt. Diese Datensätze sind besonders für die

¹ Die Analyse basiert auf den Klimaszenarien SIA/CH 2018. Obwohl im November 2025 die neuen Klimaszenarien CH 2025 veröffentlicht wurden, stehen derzeit keine stündlichen Daten zur Verfügung. Die Verfügbarkeit stündlicher Klimadaten im Rahmen der Klimaszenarien CH 2026 wird laufend geprüft; sollten sie rechtzeitig vorliegen, werden sie für die Projektsimulationen verwendet.



Überprüfung von Extremsituationen (z. B. Spitzenlasten, Behaglichkeitsgrenzen, Kondensationsrisiko) relevant.

Beide Szenarientypen sind für die Jahre 2035 und 2060 verfügbar und bilden die Grundlage für die folgende Untersuchung der Aussenklimabedingungen an den Standorten Genf (GVE), Lugano (LUG) Zürich-Kloten (KLO) und Zürich-Kaserne (NABZUE).

Die Tabelle 1 zeigt die wichtigsten Kenngrössen des Aussenklimas für den Sommerzeitraum (16. April – 15. Oktober) in den vier betrachteten Szenarien:

- Temperaturkennwerte (Mittelwert, Maximum, Stunden mit $T > 26^{\circ}\text{C}$ bzw. 28°C)
- Feuchtekennwerte (Mittel- und Maximalwert der absoluten Feuchte, Stunden oberhalb 10 / 12.1 / 13.7 g/kg)
- Mittlere relative Feuchte

Tabelle 1. Klimatische Kennwerte der Aussenluft in der Sommerperiode – Szenarien RCP 8.5 - 2035 «1-in-10» und RCP 8.5 – 2060 Dry

Klim-station	Klima-szenario	T_{mittel} [$^{\circ}\text{C}$]	T_{max} [$^{\circ}\text{C}$]	$h > 26^{\circ}\text{C}$	$h > 28^{\circ}\text{C}$	ω_{mittel} [g/kg]	ω_{max} [g/kg]	$h > 10$ g/kg	$h > 12.1$ g/kg	$h > 13.7$ g/kg	Φ_{mittel} [%]
	RCP 8.5							(26 °C 46 %)	(26 °C 55 %)	(26 °C 62 %)	
Genf (GVE)	2035 DRY	17.9	35.9	348	194	8.68	15.0	1270	271	18	68.7
	2035 1-in-10	18.6	35.3	531	342	9.03	16.1	1576	457	60	68.2
	2060 DRY	19.4	37.8	547	324	9.08	15.0	1492	436	46	66.1
	2060 1-in-10	20.6	38.4	801	523	9.82	16.6	2152	1023	267	65.8
Lugano (LUG)	2035 DRY	19.5	33.0	463	178	9.93	20.9	2140	1180	512	69.6
	2035 1-in-10	20.3	32.9	594	299	10.11	17.9	2135	1262	657	68.4
	2060 DRY	21.1	36.1	724	373	10.44	17.4	2584	1499	696	66.6
	2060 1-in-10	22.0	35.3	981	575	10.38	18.0	2570	1312	569	63.6
Zürich- Kaserne (NABZU E)	2035 DRY	18.6	34.7	382	207	8.61	15.6	1284	251	26	65.1
	2035 1-in-10	20.4	36.0	664	361	8.91	14.7	1394	220	10	61.5
	2060 DRY	19.7	37.4	501	309	9.13	16.6	1647	555	85	64.1
	2060 1-in-10	20.6	38.3	804	536	9.14	16.3	1593	614	222	61.2
Zürich- Kloten (KLO)	2035 DRY	18.1	33.9	342	170	8.78	14.9	1350	280	22	66.0
	2035 1-in-10	19.5	35.8	507	298	9.00	15.8	1432	398	47	63.8
	2060 DRY	19.3	36.7	478	281	9.11	16.2	1591	517	73	64.5
	2060 1-in-10	20.2	37.2	688	454	9.25	16.9	1738	655	154	63.2

Die Ergebnisse zeigen für alle Standorte eine deutliche Zunahme der sommerlichen Aussenbedingungen zwischen 2035 und 2060:

- Die mittlere Temperatur steigt um etwa 1.5 – 2 K, die Maximaltemperatur erreicht bis zu 38°C (Genf und Zürich-Kaserne).
- Die absolute Feuchte erhöht sich leicht ($\approx +0.5$ – 1.0 g/kg), wodurch der Latentwärmearbeit im Raumklima zunimmt.
- Die Stunden mit Temperaturen über 26°C und mit Feuchte über 12 g/kg nehmen um 50 – 100 % zu.
- Die relative Feuchte sinkt moderat, bleibt aber mit 62 – 69 % weiterhin im kritischen Bereich für Komfort und Kondensationsrisiken.

Die urbane Station Zürich-Kaserne zeigt tendenziell höhere und längere Wärmeperioden (mehr Stunden mit $T > 26/28^{\circ}\text{C}$) sowie ausgeprägtere Spitzen im 1-in-10-Szenario, was auf die städtische Wärmeinsel und geringere nächtliche Abkühlung zurückzuführen ist. Zürich-Kloten repräsentiert das regionale Aussenklima mit etwas moderateren Spitzen, jedoch mit vergleichbaren mittleren Feuchtewerten. Für die projektbezogene Beurteilung sind beide Stationen relevant: Kaserne als städtischer Belastungstest, Kloten als repräsentativer Referenzstandort.



Für die drei Klimastationen Genf (GVE), Lugano (LUG) und Zürich-Kloten (KLO) haben wir die Sommerklimadaten für die Jahre 2020 bis 2024, den Sommer 2025 und die Prognosen nach den Szenarien RCP 8.5 2035 DRY und RCP 8.5 2035 «1-in-10» verglichen.

In der Tabelle 2 und Tabelle 3 sind die durchschnittlichen Sommerwerte (vom 16. April bis zum 15. Oktober) für Temperatur und absolute Feuchte der Luft aufgeführt.

Die Analyse der stündlichen meteorologischen Daten für den Zeitraum 2020–2029 sowie der verfügbaren Messwerte des laufenden Jahres 2025 für die drei betrachteten Klimastationen (Genf GVE, Lugano LUG und Zürich-Kloten KLO) zeigt eine deutliche Annäherung – und in mehreren Fällen sogar ein Überschreiten – der klimatischen Bedingungen, die für das Jahr 2035 im Rahmen des Szenarios RCP 8.5 prognostiziert werden. Diese Konvergenz betrifft sowohl die thermischen als auch die hygrischen Kenngrößen und hat unmittelbare Bedeutung für die Planung von Lüftungs-, Kühl- und Feuchteregelungssystemen in Gebäuden.

Tabelle 2 Sommerwerte (vom 16. April bis zum 15. Oktober) für Temperatur (in °C) drei Klimastationen Genf (GVE), Lugano (LUG) und Zürich-Kloten (KLO). Durchschnittliche Werte für den Zeitraum 2020–2024, das Jahr 2025 und die Klimaszenarien RCP 8.5 2035 Dry und RCP 8.5 2035 „1-in-10“.

		Genf (GVE)	Lugano (LUG)	Zürich-Kloten (KLO)
Mittlere Temperatur [°C]				
	Tag	Messdaten 2020-2024	20.47	21.55
		Messdaten 2025	20.43	21.80
08:00 – 20:00		RCP 8.5 2035 DRY	20.36	21.24
		RCP 8.5 2035 1in10	20.96	22.00
	Nacht	Messdaten 2020-2024	14.84	17.38
		Messdaten 2025	14.63	17.42
20:00 – 08:00		RCP 8.5 2035 DRY	15.06	17.39
		RCP 8.5 2035 1in10	15.80	18.21
				13.50
				13.45
				13.53
				13.84

Tabelle 3 Sommerwerte (vom 16. April bis zum 15. Oktober) für absolute Feuchte (in g/m³) für drei Klimastationen Genf (GVE), Lugano (LUG) und Zürich-Kloten (KLO). Durchschnittliche Werte für den Zeitraum 2020–2024, das Jahr 2025 und die Klimaszenarien RCP 8.5 2035 Dry und RCP 8.5 2035 „1-in-10“

		Genf (GVE)	Lugano (LUG)	Zürich-Kloten (KLO)
Mittlere absolute Feuchte [g/m³]				
	Tag	Messdaten 2020-2024	10.02	12.17
		Messdaten 2025	9.79	12.47
08:00 – 20:00		RCP 8.5 2035 DRY	10.18	12.00
		RCP 8.5 2035 «1in10»	10.64	12.04
	Nacht	Messdaten 2020-2024	10.28	11.69
		Messdaten 2025	10.13	11.90
20:00 – 08:00		RCP 8.5 2035 DRY	10.56	11.43
		RCP 8.5 2035 «1in10»	10.83	11.77
				10.28
				10.20
				10.35
				10.89

Hinsichtlich der Lufttemperatur ergibt die Auswertung, dass das heutige Klima (2020–2029) sowie die Messwerte des Jahres 2025 systematisch in der Nähe des zukünftigen Szenarios RCP 8.5 – 2035 DRY liegen. In mehreren Fällen – insbesondere an den Stationen Genf und Lugano während der Tagesstunden – übertreffen die aktuellen Bedingungen bereits die im trockenen Szenario 2035 erwarteten Temperaturen. Die Annäherung an das intensivere Szenario RCP 8.5 – 2035 „1-in-10“ warm



summer“, das besonders warme Sommer beschreibt, ist insbesondere für Lugano und Zürich-Kloten ausgeprägt: Die aktuellen Tages- und Nachtwerte liegen dort im unteren bis mittleren Bereich der für extreme Sommer prognostizierten Spannbreite.

Die Untersuchung der absoluten Feuchte bestätigt und verstärkt diesen Befund. Besonders in den Nachtstunden zeigen die Stationsdaten eine deutliche Zunahme der absoluten Feuchte in der jüngsten Periode gegenüber den Jahren 2020–2029. Das Szenario RCP 8.5 – 2035 «1-in-10» weist zudem signifikant höhere Feuchtewerte auf, was auf eine verstärkte Persistenz warm-feuchter atmosphärischer Bedingungen hinweist. An einzelnen Stationen – beispielsweise in Lugano tagsüber – erreichen oder übertreffen die aktuellen Feuchtewerte bereits heute die im Szenario 2035 erwarteten Bedingungen.

Insgesamt lässt sich festhalten, dass die heutigen klimatischen Verhältnisse an allen drei Stationen nicht nur eine klare Annäherung an die prognostizierten Bedingungen des Jahres 2035 zeigen, sondern diese in mehreren Fällen bereits erreichen oder übertreffen. Für die gebäudetechnische Planung bedeutet dies, dass traditionelle Auslegungsgrundlagen auf Basis vergangener Klimaniveaus zunehmend unzureichend werden. Die Ergebnisse legen nahe, dass das Szenario RCP 8.5 – 2035 – und in bestimmten Anwendungen auch das „1-in-10“-Szenario – bereits heute als Mindestanforderung für die Auslegung von lüftungs- und klimatechnischen Systemen dienen sollte, um die langfristige Leistungsfähigkeit und Resilienz der Gebäudetechnik unter realistischen und zukünftigen klimatischen Bedingungen sicherzustellen.

Auf Grundlage der Analyse der jüngsten Messdaten sowie des Vergleichs mit den Klimaprojektionen hat sich gezeigt, dass insbesondere zwei Szenarien für die Projektziele von hoher Relevanz sind. Dabei ist hervorzuheben, dass das Szenario RCP 8.5 – 2035 «1-in-10» nicht nur ein seltenes, besonders warmes und feuchtes Sommerjahr darstellt, sondern – im Lichte der bereits heute beobachteten klimatischen Bedingungen – als plausibles Modell für das wahrscheinliche zukünftige Klima der kommenden Jahre betrachtet werden kann. Die aktuellen Messreihen an mehreren Schweizer Stationen liegen bereits im Bereich der für 2035 prognostizierten Extrembedingungen, was diesem Szenario eine besondere Bedeutung verleiht.

- Die Szenario RCP 8.5 – 2035 «1-in-10» bildet einen sehr warmen und feuchten Sommer ab, der zwar statistisch selten ist, jedoch die zu erwartenden Extrembedingungen der nahen Zukunft realistisch beschreibt. Angesichts der gegenwärtigen klimatologischen Entwicklung kann es als wahrscheinlicher Referenzfall für kurzfristige Planungs- und Bewertungshorizonte herangezogen werden.
- Die Szenario RCP 8.5 – 2060 DRY repräsentiert den durchschnittlichen zukünftigen Klima-Zustand in einer weiter fortgeschrittenen Erwärmungsphase. Es ist besonders relevant für die Abschätzung der Jahresenergiebilanzen und die Dimensionierung der technischen Systeme, die Bewertung langfristiger Komfortbedingungen und die Planung robuster und energieeffizienter Betriebsstrategien unter strukturell wärmeren und trockeneren Randbedingungen.

Die parallele Berücksichtigung des kurzfristig relevanten, heiss-feuchten Szenarios RCP 8.5– 2035 «1-in-10» und des langfristigen, strukturell wärmeren 2060-DRY-Szenarios ermöglicht eine ausgewogene und realitätsnahe Betrachtung zukünftiger klimatischer Belastungen. Damit können sowohl Extremereignisse als auch die erwarteten mittleren Klimabedingungen angemessen abgebildet werden. Diese Szenarienauswahl bildet folglich eine robuste und wissenschaftlich fundierte Grundlage für alle weiteren energetischen und raumklimatischen Analysen im Rahmen des Projekts.

Das Szenario RCP 8.5 – 2035 DRY entspricht nicht nur weitgehend den heutigen klimatischen Verhältnissen, sondern seine charakteristischen Temperatur- und Feuchtewerte wurden an mehreren Schweizer Klimastationen bereits erreicht oder sogar überschritten. Aus diesem Grund kann dieses Szenario nicht mehr als repräsentative Grundlage für zukünftige Belastungen betrachtet werden, da es die zu erwartende thermische und hygrische Beanspruchung deutlich unterschätzt und somit für projektrelevante Aussagen nicht ausreichend ist. Das Szenario RCP 8.5 – 2060 «1-in-10» zeigt ein



Extrem-Szenario mit ausserordentlich hohen Temperatur- und Feuchtewerten, das für die Bewertung realistischer Betriebs- und Komfordsituationen zu drastisch ist.

Simulationsfälle

Die im Rahmen dieses Projekts vorgesehenen Energiesimulationen für Gebäude lassen sich in zwei Hauptgruppen unterteilen.

Die erste Gruppe von Simulationen verfolgt das Ziel, das Verbesserungspotenzial in Bezug auf den Innenraumkomfort und die Deckung des Kühlbedarfs für verschiedene Anlagenkonfigurationen, Gebäudetypen, Szenarien und Klimastationen zu bewerten. Bei dieser ersten Gruppe erfolgt die Steuerung der Kombinationen aus ABLWP und ERG gemäss konventionellen Regelungsstrategien, die dem aktuellen Stand der Technik entsprechen.

Die zweite Gruppe von Simulationen dient der Untersuchung der Optimierung der Kombination aus ABLWP und ERG unter verschiedenen Zielsetzungen, wie etwa der Maximierung des thermischen Komforts oder der Minimierung des Energieverbrauchs.

Die verschiedenen Anlagenkonfigurationen werden im Folgenden beschrieben:

- *Lüftung mit WRG (ohne Kühlung) – Basisfall:* Situation vor der Sanierung der Lüftungsanlage; dieser Simulationsfall dient zur Definition der Ausgangsbedingungen für den thermischen Komfort.

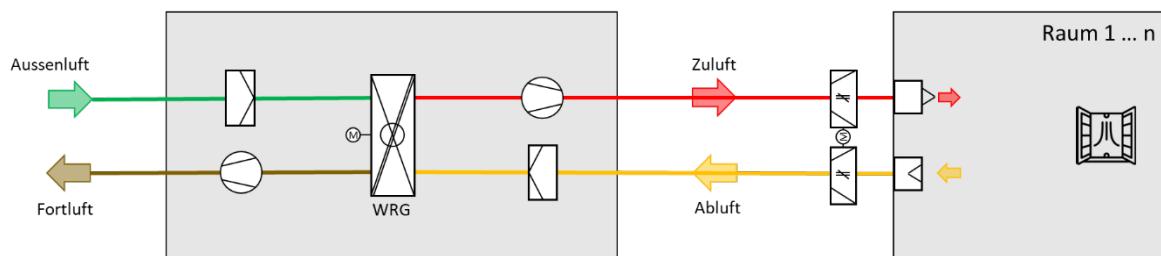


Abbildung 1. Schematische Darstellung der Anlage im Simulationsfall *Lüftung mit WRG*

- *Lüftung mit WRG + ideale Kühlanlage – Basisfall:* ebenfalls die Situation vor der Sanierung Lüftungsanlage, jedoch mit Integration einer idealen Kühlanlage, um die vom Gebäude unter idealen Komfortbedingungen erforderliche Kühllast zu quantifizieren.

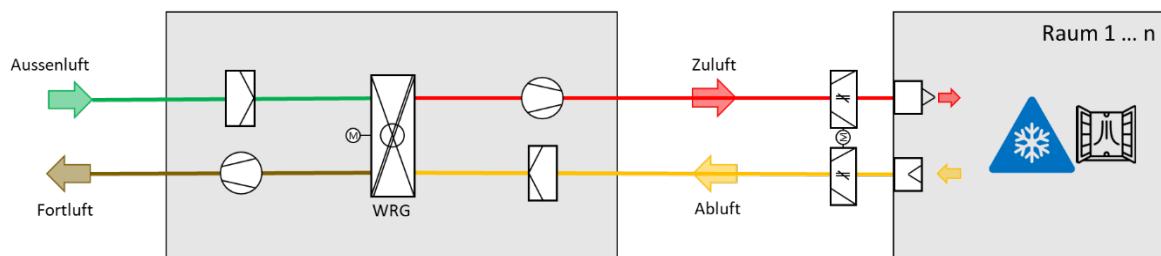


Abbildung 2. Schematische Darstellung der Anlage im Simulationsfall *Lüftung mit WRG + ideale Kühlanlage*



- **Lüftung mit ERG** – dieser Fall zeigt die Situation, in der die Lüftungsanlage saniert wird, indem die Wärmerückgewinnungseinheit (WRG) durch eine Enthalpierückgewinnungseinheit (ERG) ersetzt wird.

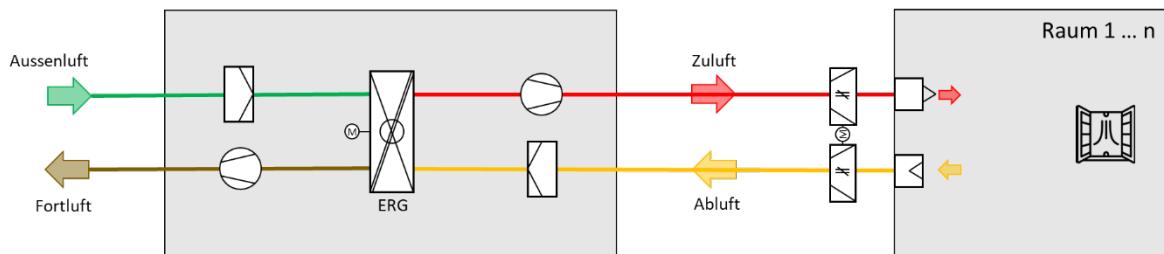


Abbildung 3. Schematische Darstellung der Anlage im Simulationsfall „Lüftung mit ERG“

- **Lüftung mit ERG** – dieser Fall zeigt die Situation, in der die Lüftungsanlage saniert wird, indem die Wärmerückgewinnungseinheit durch eine Enthalpierückgewinnungseinheit ersetzt und ein ABLWP in die Lüftungsanlage eingebaut wird.

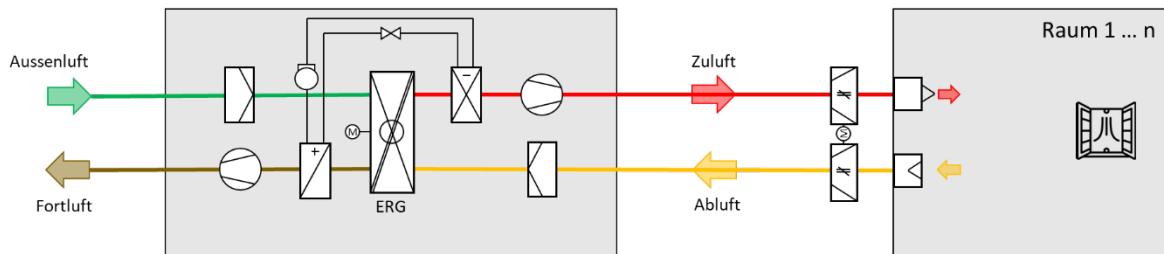


Abbildung 4. Schematische Darstellung der Anlage im Simulationsfall *Lüftung mit ERG und integrierte ABLWP*

- **Lüftung mit ERG und integrierte ABLWP (Fussbodenkühlung)** – Variante des vorherigen Falls; die Kühlleistung der Wärmepumpe wird genutzt, um das Wasser eines Fußbodenkühlsystems anstelle der Zuluft zu kühlen².

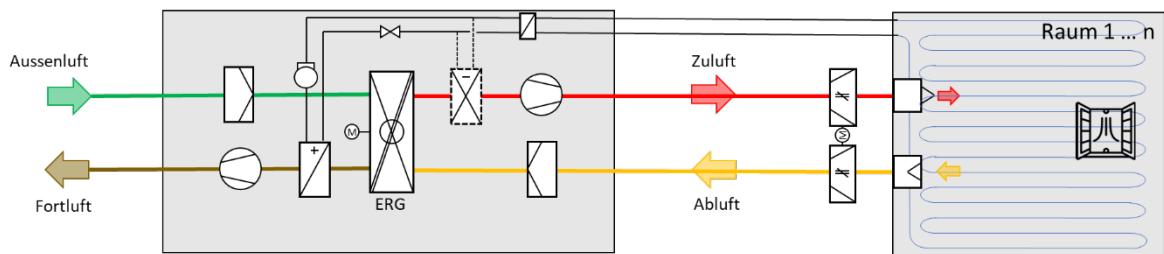


Abbildung 5. Schematische Darstellung der Anlage im Simulationsfall *Lüftung mit ERG und integrierte ABLWP (Fussbodenkühlung)*

² Die grafische Darstellung dieser Konfiguration ist stark vereinfacht, da mehrere Komponenten des Sekundärkreises fehlen, die das Systemverhalten beeinflussen können (z. B. Pumpe, Regelungselemente, Speicher).

- **Lüftung mit WRG + Split-Klimageräte** – dieser Fall zeigt eine Situation ohne Austausch des Wärmerückgewinnungeinheit, jedoch mit zusätzlicher Installation von Split-Klimageräten.

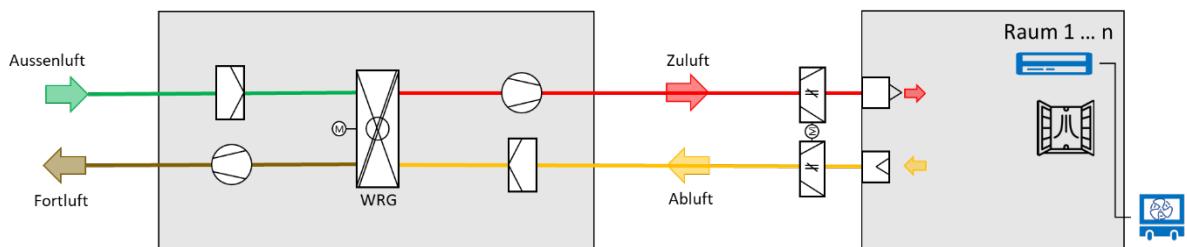


Abbildung 6. Schematische Darstellung der Anlage im Simulationsfall *Lüftung mit WRG + Split-Klimageräte*.

- **Lüftung mit WRG + Split-Klimageräte (Variante)** – wie der vorherige Fall, wobei keine Sanierung der Lüftungsanlage erfolgt, jedoch zusätzliche Split-Klimageräte installiert wird.

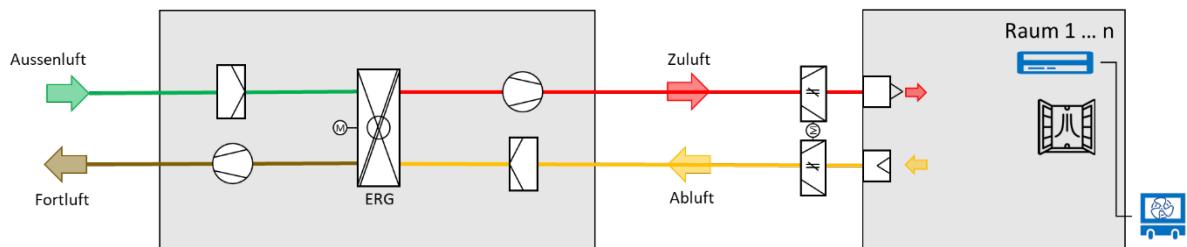


Abbildung 7. Schematische Darstellung der Anlage im Simulationsfall *Lüftung mit ERG + Split-Klimageräte*.

In Tabelle 4 ist die Liste der Simulationen der ersten Gruppe dargestellt, gegliedert nach Gebäudetyp, zukünftigem Klimaszenario, Klimastation sowie Konfiguration der vorhandenen Lüftungs- und Sommerkühlsysteme.

Dabei werden nicht alle theoretisch möglichen Simulationsfälle berücksichtigt. Stattdessen erfolgte eine gezielte Auswahl jener Kombinationen, die mit hoher Wahrscheinlichkeit die für die Projektziele relevantesten und aussagekräftigsten Ergebnisse liefern können. Insgesamt wurden 62 Simulationsfälle definiert.

Für die zweite Gruppe von Simulationen wurden 3 zusätzliche Fälle festgelegt: der erste mit konventioneller Steuerungslogik; der zweite mit einer Regelungslogik zur Maximierung der Energieeffizienz der Kombination aus WRG und ABLWP; und der dritte zur Optimierung der Aufrechterhaltung der Komfortbedingungen. Die Gesamtzahl der Simulationsfälle beläuft sich folglich auf 65.

In Absprache mit der Projektbegleitgruppe können die Simulationsfälle im Laufe des Projekts einer Überarbeitung unterzogen werden, sofern sich ergibt, dass bestimmte Bedingungen einer genaueren Untersuchung bedürfen oder einige der vorgesehenen Fälle für die Ziele des Projekts nicht entscheidend sind.

Der Unterschied zwischen WRG I und WRG II für die Simulationen der Klimaszenarien RCP 8.5 - 2035 «1-in10» und RCP 8.5 – 20260 DRY liegt im Wert der sinnvollen Wärmerückgewinnungseffizienz. Es wird davon ausgegangen, dass die Temperaturbruttoeffizienz ($\eta_t = 73\%$ gemäss den aktuellen Mindestwerten von SIA 382/1) des Basisfalls für das Jahr 2035 niedriger ist als für den Basisfall des Jahres 2060 ($\eta_t = 78\%$)



Tabelle 4. Simulationsfälle sortiert nach Gebäudetyp, Klimaszenario, Klimastation und Varianten der Lüftungs- und Kühlanlagen.

Gebäude	Klimaszenario	Klimastation	Anlagenvariante	#
Altersheim	RCP 8.5 – 2035 «1-in10»	Genf	Lüftung mit WRG I (ohne Kühlung)	1
			Lüftung mit WRG I + idealer Kühlanlage	2
			Lüftung mit ERG und integrierte ABLWP	3
		Lugano	Lüftung mit WRG I (ohne Kühlung)	4
			Lüftung mit WRG I + idealer Kühlanlage	5
			Lüftung mit ERG	6
			Lüftung mit ERG und integrierte ABLWP	7
			Lüftung mit WRG I + Split-Klimageräten	8
			Lüftung mit ERG + Split-Klimageräten	9
		Zürich - Kloten	Lüftung mit WRG (ohne Kühlung)	10
			Lüftung mit WRG + idealer Kühlanlage	11
			Lüftung mit ERG und integrierte ABLWP	12
	RCP 8.5 – 2060 DRY	Genf	Lüftung mit WRG I (ohne Kühlung)	13
			Lüftung mit WRG I + idealer Kühlanlage	14
			Lüftung mit ERG und integrierte ABLWP	15
			Lüftung mit WRG und integrierte ABLWP (Fussbodenkühlung)	16
			Lüftung mit WRG I + Split-Klimageräten	17
			Lüftung mit ERG + Split-Klimageräten	18
		Lugano	Lüftung mit WRG II (ohne Kühlung)	19
			Lüftung mit ERG + idealer Kühlanlage	20
			Lüftung mit ERG und integrierte ABLWP	21
		Zürich - Kloten	Lüftung mit WRG II (ohne Kühlung)	22
			Lüftung mit WRG II + idealer Kühlanlage	23
			Lüftung mit ERG	24
			Lüftung mit ERG und integrierte ABLWP	25
			Lüftung mit WRG II + Split-Klimageräten	26
			Lüftung mit ERG + Split-Klimageräten	27
		Zürich - Kaserne	Lüftung mit WRG II (ohne Kühlung)	28
			Lüftung mit WRG II + idealer Kühlanlage	29
			Lüftung mit ERG und integrierte ABLWP	30



Gebäude	Klimaszenario	Klimastation	Anlagenvariante	#
Schulhaus	RCP 8.5 – 2035 «1-in-10»	Zürich - Kaserne	Lüftung mit WRG II (ohne Kühlung)	31
			Lüftung mit WRG II + idealer Kühlanlage	32
			Lüftung mit ERG und integrierte ABLWP	33
			Lüftung mit WRG und integrierte ABLWP (Fussbodenkühlung)	34
			Lüftung mit WRG II + Split-Klimageräten	35
			Lüftung mit ERG + Split-Klimageräten	36
	RCP 8.5 – 2060 DRY	Genf	Lüftung mit WRG I (ohne Kühlung)	37
			Lüftung mit WRG I + idealer Kühlanlage	38
			Lüftung mit ERG und integrierte ABLWP	39
		Lugano	Lüftung mit WRG I (ohne Kühlung)	40
			Lüftung mit WRG I + idealer Kühlanlage	41
			Lüftung mit ERG	42
		Zürich - Kaserne	Lüftung mit ERG und integrierte ABLWP	43
			Lüftung mit WRG I + Split-Klimageräten	44
			Lüftung mit ERG + Split-Klimageräten	45
			Lüftung mit WRG II (ohne Kühlung)	46
		Genf	Lüftung mit WRG II + idealer Kühlanlage	47
			Lüftung mit ERG und integrierte ABLWP	48
			Lüftung mit WRG II + Split-Klimageräten	49
			Lüftung mit WRG II (ohne Kühlung)	50
		Lugano	Lüftung mit WRG II + idealer Kühlanlage	51
			Lüftung mit ERG und integrierte ABLWP	52
			Lüftung mit WRG II (ohne Kühlung)	53
		Zürich - Kaserne	Lüftung mit WRG II + idealer Kühlanlage	54
			Lüftung mit ERG	55
			Lüftung mit ERG und integrierte ABLWP	56
			Lüftung mit WRG II + Split-Klimageräten	57
			Lüftung mit ERG + Split-Klimageräten	58
			Lüftung mit WRG II (ohne Kühlung)	59
		Genf	Lüftung mit WRG II + idealer Kühlanlage	60
			Lüftung mit ERG und integrierte ABLWP	61
			Lüftung mit WRG II + Split-Klimageräten	62



3.2.2 Modell der Lüftungsanlage ABLWP + ERG

In Bezug auf die Modellierung der Luft-Luft-Wärmepumpe mit Enthalpierückgewinnung wurde entschieden, das in der Gebäudesimulationssoftware IDA-ICE implementierte Modell einer Luft-Luft-Wärmepumpe mit dem im Rahmen des RePPER-Forschungsprojekts entwickelten Rotormodell zur Enthalpierückgewinnung zu kombinieren. Dabei wird eine vereinfachte Modulation der Austauschkapazität des Rotors berücksichtigt, um dessen Leistungsanpassung unter verschiedenen Betriebsbedingungen abzubilden.

Da das in IDA-ICE vorhandene Luft-Luft-Wärmepumpenmodell jedoch nicht vorsieht, dass sich der Kompressor im Luftstrom befindet – wie es beim Lüftungsgerät Nilan HCR 800T der Fall ist, dessen Kompressor vom Außenluftstrom durchströmt wird – könnte es erforderlich sein, eine zusätzliche Komponente einzuführen, die die Wärmeabgabe des Kompressors an die Prozessluft abbildet. In der schematischen Darstellung in Abbildung 8, die die Kopplung der Luft-Luft-Wärmepumpe mit dem Enthalpierotor veranschaulicht, ist diese potentielle Zusatzkomponente noch nicht enthalten; ihre Notwendigkeit wird im Rahmen der experimentellen Untersuchungen bestimmt.

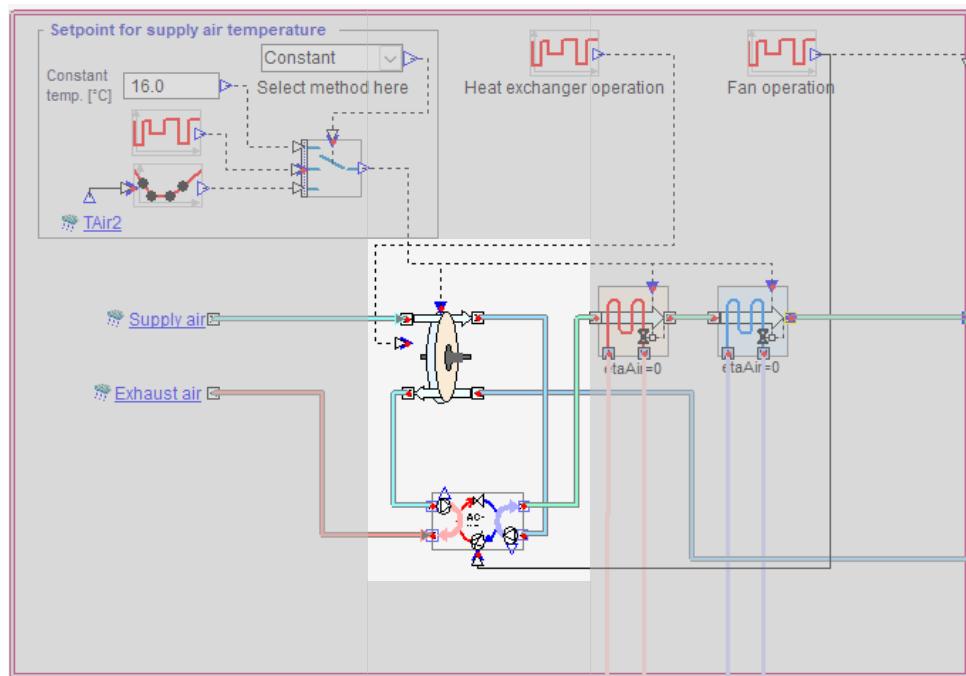


Abbildung 8. Schematische Darstellung der Kombination des Luft-Luft-Wärmepumpenmodells und des Rotormodells mit Enthalpierückgewinnung, um das Simulationsset einer ABLWP + ERG-Geräts zu bilden.

Schliesslich wird eine Steuerungslogik für das Lüftungsgerät implementiert, die sich zunächst an der Regelstrategie des Modells Nilan HCR 800T orientiert. In einem späteren Projektstadium wird diese Logik weiterentwickelt und optimiert, um sowohl die energieeffiziente Betriebsweise des Lüftungsgeräts als auch den thermischen Komfort der Raumnutzer zu maximieren.

Abluftwärmepumpe

Die Wahl des Modells für die Abluft-Wärmepumpe fiel auf das Luft-Luft-Wärmepumpen- bzw. Klimagerätemodell mit drehzahlgeregelter Verdichter A2A_HP_VS / A2A_AC_VS. Dieses Modell ist bereits in die Gebäudesimulationssoftware IDA-ICE integriert, jedoch ist die Angabe spezifischer Parameter erforderlich, um die Reproduktion der Eigenschaften eines realen Geräts zu gewährleisten. Das Modell bildet den Kältekreislauf der Wärmepumpe ab, indem es eine detaillierte Beschreibung des drehzahlgeregelten Verdichters mit thermodynamischen Modellen der Luft-Kältemittel-Wärmetauscher



(Verdampfer und Kondensator) sowie der Ventilatoren kombiniert, die den Luftstrom durch diese Wärmetauscher sicherstellen. Das in IDA ICE implementierte Modell ist ursprünglich nicht als Bestandteil einer Lüftungsanlage konzipiert, sondern als eigenständige kanalisierte Einheit, die im Kühlbetrieb zwischen der Außenluft (Kondensatorseite) und der Raumluft des zu konditionierenden Bereichs (Verdampferseite) arbeitet.

Das Modell A2A_AC_VS / A2A_HP_VS stellt eine detaillierte numerische Abbildung einer luftgeführten Wärmepumpe mit drehzahlgeregeltem Verdichter dar und ermöglicht eine dynamische Simulation des thermischen und elektrischen Verhaltens sowohl im Kühlbetrieb (A2A_AC_VS) als auch im Heizbetrieb (A2A_HP_VS).

Das kombinierte Modell A2A_AC_VS / A2A_HP_VS erlaubt die detaillierte Untersuchung von:

- Energieeffizienz und Regelstrategien bei dynamisch wechselnden Lasten,
- Einfluss der Drehzahlregelung auf COP / EER,
- Interaktion zwischen Ventilator, Wärmetauscher und Verdichter,

Damit dient es als analytisches Werkzeug zur Bewertung luftgeführter Wärmepumpensysteme in Forschungs- und Entwicklungsprojekten, insbesondere im Kontext der energetischen Optimierung von Gebäuden. Der Fokus liegt auf der normgerechten Beschreibung der Komponentenleistung unter stationären und instationären Bedingungen gemäss den europäischen Normen EN 12900 und EN 14825.

Die Modellstruktur basiert auf der Programmiersprache Modelica und ist modular aufgebaut und besteht aus folgenden Submodellen. Die Auflistung der Submodelle sowie eine kurze Beschreibung der Modelle sind in Tabelle 5 zu finden.

Die modularisierte Struktur erlaubt eine getrennte Parametrisierung und Kalibrierung der einzelnen Komponenten, wodurch das Modell flexibel an reale Anlagenkonfigurationen angepasst werden kann.

Tabelle 5. Submodelle der in IDA-ICE implementierten Luft-Luft-Wärmepumpenmodelle A2A_HP_VS und A2A_AC_VS.

Submodell	Beschreibung
A2A_HP_VS.mo	Integration der Wärmepumpe in ein Luft-Luft-System; umfasst Verdampfer, Kondensator und Regelalgorithmen.
A2A_AC_VS.mo	
heatpumpVS.mo	Basis des thermodynamischen Kreislaufs der Wärmepumpe mit variabler Drehzahlsteuerung.
airfan.mo	Modellierung der Ventilatoren mit drehzahlabhängigem Wirkungsgrad und elektrischer Leistungsaufnahme.
CCHeatL.mo	Wärmetauscher-Modul für die Kopplung zwischen Luft- und Kältemittelseite (Verdampfer/Kondensator).
hcheatline.mo	Definition und Interpolation der Kennlinien für Wärmeübertragung und Leistungscharakteristik.

Das Modell bildet die Energiebilanzen auf beiden Seiten des Kältekreislaufs ab. Dabei werden Massen-, Energie- und Impulserhaltungsgleichungen für jede Teilschleife formuliert.

Die Leistungsregelung erfolgt über zwei Hauptparameter:

- die Drehzahl des Verdichters (Variable Speed – VS), und
- die Luftvolumenströme der Ventilatoren, die ebenfalls über Frequenzumrichter gesteuert werden.



Für jede Zeitschrittintegration berechnet das Modell:

$$\dot{Q}_{out} = \dot{m}(h_{Aus} - h_{Ein}) \quad (1)$$

Wobei:

- \dot{Q}_{out} – die Kälteleistung (W) der Wärmepumpe am Verdampfer ist;
- \dot{m} – die Massenstrom (kg/s) des Kältemittels zum Verdampfer ist;
- h_{Aus} – die spezifische Enthalpie (J/kg) des Kältemittels am Austritt des Verdampfers ist;
- h_{Ein} – die spezifische Enthalpie (J/kg) des Kältemittels am Eintritt des Verdampfers ist.

Wenn man die elektrische Leistungsaufnahme (W) des Verdichters und der Ventilatoren P_{el} kennt, kann man den *EER* (Energy Efficiency Ratio) berechnen, der zeigt, wie effizient eine Wärmepumpe beim Kühlen ist. (Das ist das Äquivalent zum *COP* beim Heizen).

$$EER = \frac{\dot{Q}_{out}}{P_{el}} \quad (2)$$

Im Modell wird die Kälteleistung, sowie die elektrische Leistungsaufnahme und der Massenstrom über empirische Regressionsfunktionen beschrieben, die auf Messdaten nach EN 12900 basieren.

Die EN 12900- Kältemittel-Verdichter- Nennbedingungen, Toleranzen und Darstellung von Leistungsdaten) definiert die standardisierten Prüfbedingungen und Verfahren zur Bewertung von Verdichtern.

In der vorliegenden Norm findet eine zweidimensionale Polynomformel dritten Grades mit zehn Koeffizienten Anwendung, deren Zweck darin besteht, die Messdaten unter stationären Bedingungen des Kompressors zu approximieren.

$$X = c_1 + c_2(S) + c_3(D) + c_4(S^2) + c_5(S \cdot D) + c_6(D^2) + c_7(S^3) + c_8(S^2 \cdot D) + c_9(S \cdot D^2) + c_{10}(D^3) \quad (3)$$

Die Eingabevervariablen umfassen die Verdampfungstemperatur am Ansaugtaupunkt (S in der Formel (3)) in Grad Celsius (°C) und die Kondensationstemperatur am Auslassstaupunkt (D in der Formel (3)) in Grad Celsius (°C) oder den Auslassdruck (bar);

Die Formel (3) findet Anwendung bei der Berechnung (X in der Formel (3)) der Kälteleistung (W), des Ansaugmassenstroms (kg/s) sowie der Leistungsaufnahme (W) des Verdichters. Es ist darauf hinzuweisen, dass jedem berechneten Wert eine Reihe unterschiedlicher Polynomkoeffizienten zugeordnet ist. Ausserdem, die obige Polynomgleichung nicht zur Extrapolation über den Anwendungsbereich hinaus verwendet werden darf. Die Verwendung einer Interpolation für verschiedene Überhitzungen ist möglich, sofern die Polynome für unterschiedliche Überhitzungsbedingungen angegeben sind.

Polynome werden als Funktion der Belastbarkeit des Verdichters, d.h. als Funktion seiner Drehzahl, angegeben.

Das Modell überprüft kontinuierlich, ob die Betriebsbedingungen innerhalb der Gültigkeitsbereiche der EN 12900 liegen. Für das Modell müssen die Grenzen des Arbeitsbereichs festgelegt werden, innerhalb derer die Polynome als gültig angesehen werden können. Ausserhalb dieser Grenzen wird die Effizienz reduziert oder der Betrieb deaktiviert.



Im A2A_HP_VS/A2A_AC_VS-Modell werden die in der Norm definierten Teillastpunkte (z.B 100%, 75 %, 50 % und 25 %) durch stufenlose Verdichter-Regelung abgebildet. Das Modell bezieht sich auf EN 14825 für die Bewertung der saisonalen Energieeffizienz und das Verhalten bei Teillast.

Die Drehzahl des Verdichters n wird in Abhängigkeit der Solltemperaturdifferenz geregelt, um die geforderte Teillastleistung zu erreichen. Der Stromverbrauch wird dabei gemäss den in der EN 14825 spezifizierten Teillastkennlinien berechnet.

Die im Modell enthaltenen Steuerungsblöcke erfassen zusätzlich den Bereitschaftsverbrauch im Teillastbetrieb, wie in Abschnitt 6.2 der EN 14825:2022 gefordert.

Das Modell A2A_AC_VS / A2A_HP_VS stellt eine wissenschaftlich fundierte Implementierung einer variablen Luft-Luft-Wärmepumpe in IDA ICE dar.

Durch die Integration der EN 12900 (Verdichterkennlinien) und EN 14825 (Teillastverhalten) gewährleistet es eine hohe Übereinstimmung mit experimentellen Messdaten und eine realitätsnahe Simulation des Betriebsverhaltens. Somit bildet es eine solide Grundlage für energetische Analysen, Effizienzbewertungen und Systemvergleiche im Rahmen von Forschungsprojekten und Ingenieurstudien.

Wärmerückgewinnung

Auf Grundlage der Resultate des Projekts "RePPER" [7] erfolgt die Modellierung des Rotors für den Entropiegewinn gemäss dem Modell von Freund et al [8].

Das Modell für den Enthalpieübertrager basiert auf der bekannten ϵ -NTU-Methode für Wärmeübertrager und benötigt lediglich zwei Referenzbetriebspunkte zur Kalibrierung. Das Modell kann als halb-empirisch angesehen werden, da es experimentelle Referenzdaten anstelle von detaillierten Berechnungen oder spezifischen Korrelationen verwendet.

Die Analyse der vorliegenden Daten legt die Schlussfolgerung nahe, dass die Implementierung des von Freund et al. entwickelten Modells in den Simulationen zu verlässlichen Resultaten in Bezug auf die sensible Wärme- und Feuchterückgewinnung führen kann. Daher wurde die Entscheidung getroffen, das Modell von Freund et al. in den Simulationen des EISCH-Projekts zu integrieren. Detaillierte Informationen zur Modellierung sind im Abschlussbericht des Projekts RePPER zu finden.

Das Modell von Freund et al. basiert auf der Beobachtung, dass rotierende Enthalpieübertrager ähnliche Eigenschaften wie Gegenstrom-Wärmeübertrager aufweisen, vorausgesetzt, sie werden mit einer ausreichend hohen Rotationsgeschwindigkeit betrieben, um die Auswirkungen der periodischen Strömungsumkehr zu eliminieren (vgl. Klein et al. [21]). Daher ist eine Voraussetzung für ihre Analyse, dass der Betrieb oberhalb der kritischen Drehzahl während des Normalbetriebs erfolgt.

Im Rahmen des Projekts erfolgt die Kalibrierung des Rotormodells anhand der Daten, die aus der Auswahlsoftware des Rotorherstellers generiert werden. Im Rahmen der Modellierung werden die Ergebnisse des Modells einer Überprüfung unterzogen, die auf einem Vergleich mit den Daten aus den Versuchen basiert.

Die Auswirkung der Drehzahlreduzierung auf die Effizienz der sensiblen und latenten Wärmerückgewinnung des Rotors wird experimentell an der Lüftungsanlage ermittelt (siehe Abschnitt 3.3).



3.2.3 Gebäudemodelle für Simulationen

Schule

Das 3D Modell des Schulhauses stammt aus dem Projekt „Klimaszenarien fürs zukünftige Innenraumklima (SIA 2028)“ und besteht aus drei Obergeschossen mit identischem Grundriss: Je acht Schulzimmer und einer zentralen Erschliessungszone. Das Untergeschoss wird unbeheizt als neutrale Zone modelliert. Die Raumhöhe beträgt 3 m.



Abbildung 9: Gebäudesimulationsmodell Schulhaus



Alterszentrum

Bei der Erstellung des Gebäudemodells für das Alterszentrum werden die Erkenntnisse aus dem Bericht "Sommerlicher Wärmeschutz in Alterszentren" [11] berücksichtigt. Entsprechend besteht das Gebäudemodell aus einzelnen Zimmern mit Nasszelle, Verkehrsflächen, Gemeinschaftsräumen und Speisesaal. Die energetischen Kennwerte der Bauteile gegen Außenluft werden gemäss den Bauteilen aus dem Modell des Schulhauses verwendet. Nachfolgend ist beispielhaft der Grundriss eines einzelnen Zimmers dargestellt:

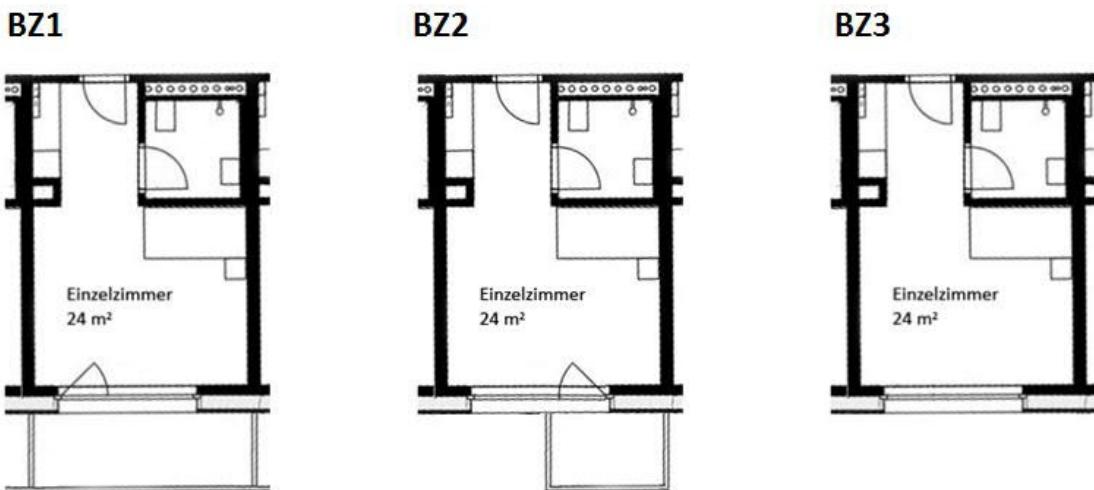


Abbildung 10: Grundrisse Einzelzimmer Alterszentrum, Quelle: [11]

Für das Projekt wird der Zimmer-Grundriss BZ3, ohne Balkonverschattung, als "worst case" hinsichtlich des sommerlichen Wärmeeintrages berücksichtigt.

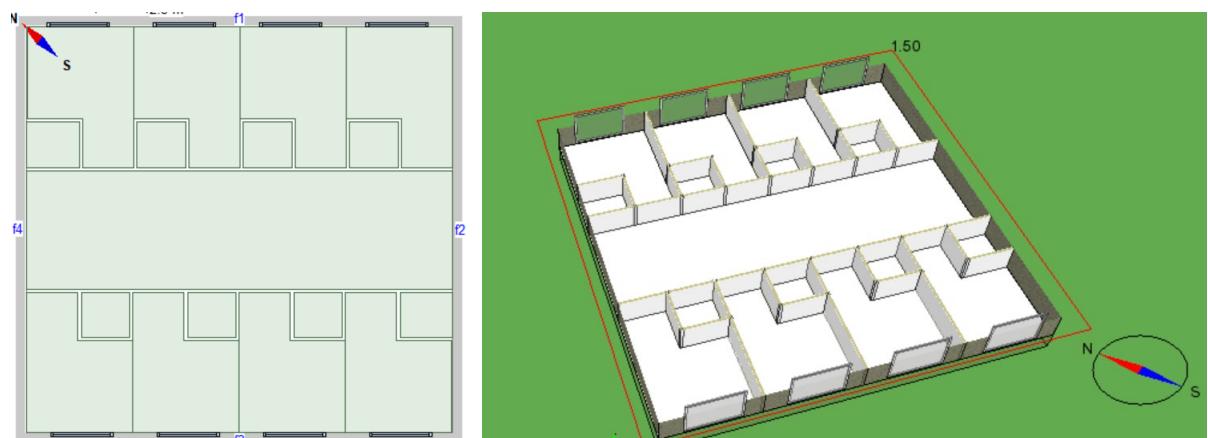


Abbildung 11: Gebäudesimulationsmodell Alterszentrum

Praxisbeispiele von realen Alterszentren

Um gewisse Annahmen für die Simulation des Versorgungsobjekts «Altersheim» qualitativ zu verifizieren und Erfahrungen bei dem Thema «Raumnutzung» und «Kühlbedarf» zu generieren, wurden sechs Objekte aus den 24 Objekten der Studie "Sommerlicher Wärmeschutz in Alterszentren" [11] analysiert. Dabei handelt sich um folgende Objekte aus dem Portfolio an Alterszentren der Stadt Zürich:

- Alterszentrum Dorflinde, Zürich



- Alterszentrum Eichrain, Zürich
- Alterszentrum Laubegg, Zürich
- Alterszentrum Mathysweg, Zürich
- Alterszentrum Trotte, Zürich
- Alterszentrum Wolfswinkel, Zürich

Diese Objekte wurden gezielt ausgewählt, weil sie Gegenstand des Monitoringprogramms EDL der Immobilien-Bewirtschaftung der Stadt Zürich sind und verfügen somit über gemessene Verbrauchsdaten. Diese sind z.B. Energiezähler (Elektro, Wärme, ggf. Kälte) oder andere Größen wie, falls vorhanden, Luftvolumenströme der Lüftungsanlage. Eine Systematik bei der Datenerfassung ist jedoch nicht vorhanden, die Messkonzepte der einzelnen Gebäude sind sehr individuell. D.h., es wird nicht systematisch die gleichen Messgrößen erfasst, was die Vergleichbarkeit zwischen den Gebäuden stark erschwert. Jedoch für eine qualitative Ermittlung eines typischen Kühllastprofils für den Standort Zürich werden sie aus ausreichend betrachtet.

Tabelle 6 fasst die wichtigsten Eckdaten zu den sechs Objekten zusammen.



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Energie BFE
Sektion Energieforschung und Cleantech

Tabelle 6: Übersichtstabelle ausgewählter Alterszentren der Stadt Zürich

Name Objekt	Dorflinde	Eichrain	Laubegg	Matthysweg	Trotte	Wolfswinkel
Ansicht						
Raumtypen	Zimmer, Speisesaal, Mehrzweckhalle, Wellnessbereich, Küche	Zimmer, Speisesaal	Zimmer, Speisesaal	Apartments, Speisesäle, Gemeinschaftsräume, Bibliothek, Küche	Zimmer, Speisesaal, Mehrzweckraum, Wellness, Küche	
Aktive Kühlung und Kälteerzeugung	Keine	Kältemaschine und Freecooling	Keine	Splitgerät	Geocooling und Kältemaschine	Fernkälte-Anschluss
Aktiv gekühlte Räume		Speisesaal		EG	Speisesaal, Lüftung und via Raumheizung	Hochhaus (Bewohnerzimmer) Sockelbau: über die Fussbodenheizung
Art der Kälteverteilung/-übergabe		Kühlsegel sowie thermische konditionierte Luft der Lüftungsanlage		Lüftung (Klimaanlage)		Hochhaus: über die Fussbodenheizung
Zeiträume der aktiven Kühlung		Mitte Juni bis Anfang September		k. A.	Anfang Juni bis Ende August	Anfang Juni bis Ende August September sporadisch
Betrieb Lüftung, falls vorhanden		Konstanter Volumenstrom (Zimmer) Bedarfsgeregelt (Mehrzwecksaal)			Konstanter Volumenstrom	Lüftung Sockelbau



3.2.4 Nutzungsprofile für Simulationen

Das Jahresprofil der Anwesenheiten berücksichtigt die Schulzeiten und Ferien der Stadt Zürich. Personenbelegung, Beleuchtung und Geräte werden nach SIA-Merkblatt 2024:2021 standardisiert angesetzt.

Schule

Das Lastprofil für die Personenanwesenheiten, Geräte- und Prozessanlagen im Schulhaus wird gemäss SIA Merkblatt 2024, Nutzung Schulzimmer, übernommen.

Nachfolgend ist das Personenlastprofil für die Nutzung Schulzimmer dargestellt:

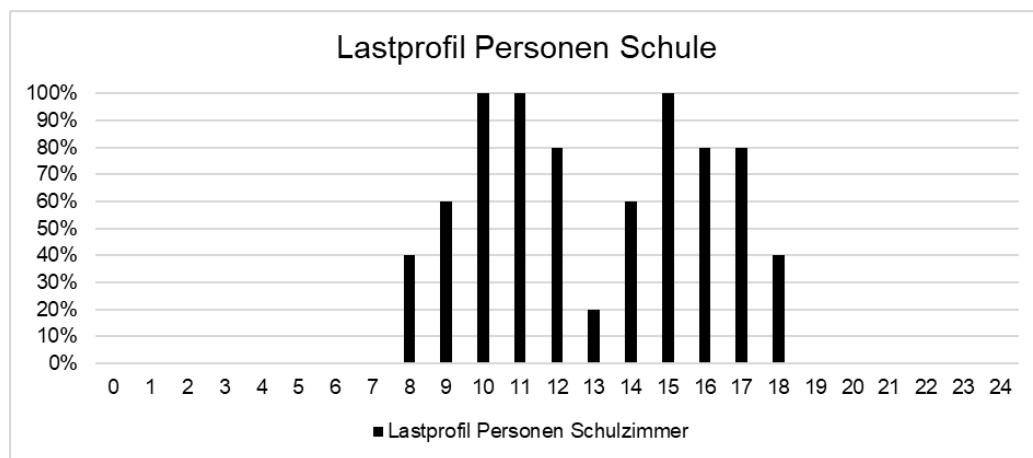


Abbildung 12: Lastprofil Personen Schulhaus

Altersheim

Das Nutzungsprofil für das Altersheim wird an die Vorgaben gemäss SIA Merkblatt 2024 [10] angelehnt. Dabei wird das Belegungsprofil für MFH als Grundlage verwendet. Aufgrund von Gesprächen mit Fachpersonen aus dem Pflegebereich wurde das Nutzungsprofil für die Personenanwesenheiten in den Bewohnerzimmern entsprechend angepasst:

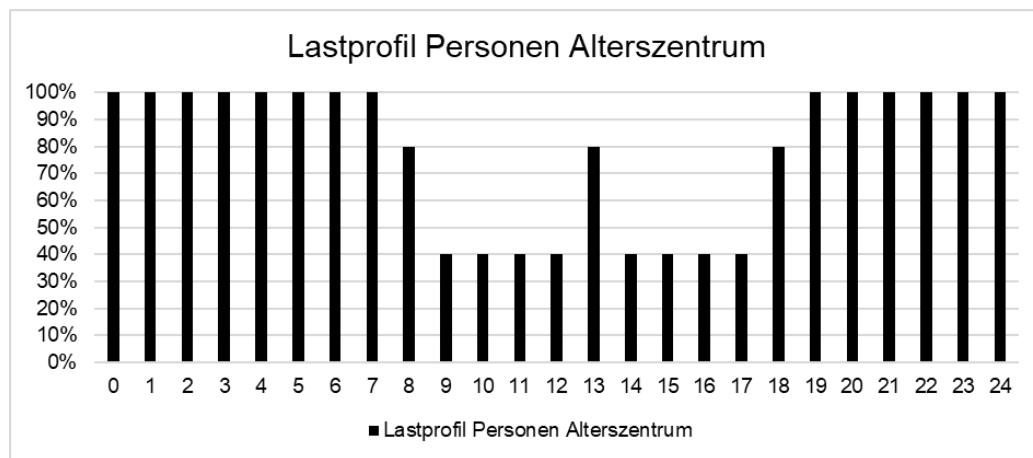


Abbildung 13: Lastprofil Personen Alterszentrum

Zusätzlich zum oben dargestellten Personenlastprofil wird ein zweites kontinuierliches Belegungsprofil berücksichtigt, das den Betrieb von Räumen mit bettlägerigen oder in ihrer Mobilität eingeschränkten Personen abbildet. Dieses Profil soll typische Nutzungsszenarien sowohl in Pflegeeinrichtungen und



Altersheimen als auch in anderen Einrichtungen mit überwiegend älteren Personen realitätsnah repräsentieren.

Lüftungsregelung

Die Lüftung erfolgt in beiden Gebäuden über eine zentrale raumluftechnische Anlage (RLT-Anlage) mit Wärmerückgewinnung.

Die Schulzimmer werden CO₂-geregelt mit variablem Volumenstrom, die Erschliessungsflächen mit konstantem Volumenstrom versorgt. Die Anlage arbeitet im Tagesbetrieb von 5:00 – 20:00 Uhr (inklusive Vor- und Nachspülung gemäss SIA 380/2:2022, Anhang C) sowie im Nachtauskühlungsbetrieb von 22:00 – 7:00 Uhr. Während der Nachtauskühlung wird die Luftmenge auf maximal 25 % des Tageswerts reduziert. Sie wird nur aktiviert, wenn die Aussenluft mindestens 2 °C kühler als die Abluft ist. Zusätzlich wird eine Infiltration von 0,15 m³/(m²h) berücksichtigt.

Für die Nachtauskühlung im Schulhaus kommt ein Aussenluft-Volumenstrom von 10 m³/(h·m²) pro NettoGESCHOSSSLÄCHE zum Einsatz (SIA 180, Ziffer 5.2.3). Die Nachtauskühlung wird mechanisch bereitgestellt, um konstante Bedingungen sicherzustellen, unabhängig von Fenstergrössen, Druckunterschieden oder anderen äusseren Einflüssen.

Für die Bewohnerzimmer in Alterszentren wird ein konstanter Zuluftvolumenstrom von 1.2 m³/(h·m²) beziehungsweise 30 m³/h pro Zimmer angenommen. Diese Werte basieren auf den Vorgaben des SIA Merkblatt 2024 [10] für den Gebäudetyp MFH, sind jedoch möglicherweise nicht vollständig repräsentativ für die spezifischen Bedingungen eines Altersheims, da dessen Belegungs- und Nutzungsmuster in mehreren Punkten deutlich abweichen können. Die zugrunde gelegten Annahmen werden daher in enger Abstimmung mit den Projektpartnern überprüft und bei Bedarf angepasst oder weiter verfeinert, um eine möglichst realitätsnahe Abbildung der tatsächlichen Nutzungsszenarien sicherzustellen.

Für die Nachtauskühlung sieht der SIA Merkblatt 2024 [10] einen Aussenluftvolumenstrom von 5 m³/(h·m²) der NettoGESCHOSSSLÄCHE vor. Auch dieser Wert kann zu einer übermässigen Auslegung der Lüftungsanlage führen, die in der Praxis sowohl wirtschaftlich als auch technisch kaum realisierbar ist.

Raumlufanforderungen

Für die Raumluftqualität gilt eine Aussenluftkonzentration von 450 ppm CO₂ (angepasst an zukünftige Szenarien). Die Sollwerte orientieren sich an SIA 382/1:2025, Kategorie IDA 2, mit maximal 1150 ppm CO₂ in der Raumluft und einem Aussenluftvolumenstrom von 29 m³/h pro Person. Gemäss SIA 382/1:2025, darf der Sollwert bei sehr hohen oder sehr tiefen Temperaturen temporär erhöht werden. Für hygienische Mindestlüftung gilt gemäss SIA 382/1:2025, ein Luftvolumenstrom von mindestens 0,5 m³/h pro m² NettoGESCHOSSSLÄCHE oder eine ausreichende Vor- und Nachspülung. Im Projekt wird täglich eine 2-stündige Vor- und Nachspülung mit maximalem Volumenstrom durchgeführt

Die Raumlufttemperaturen richten sich nach den Grenzkurven der SIA 380/2:2022 und SIA 180:2014, mit aktivem Sonnenschutz. Eine aktive Kühlung der Räume ist im Referenzmodell nicht vorgesehen.

Der zulässige Bereich der Raumlufttemperatur entspricht der SIA 380/2 mit einer Raumtemperaturregelung ohne Kommunikation oder wenn die Nutzenden eine Einflussmöglichkeit haben.

Der zulässige Bereich der Raumlufttemperatur ist in Abbildung 14 dargestellt.

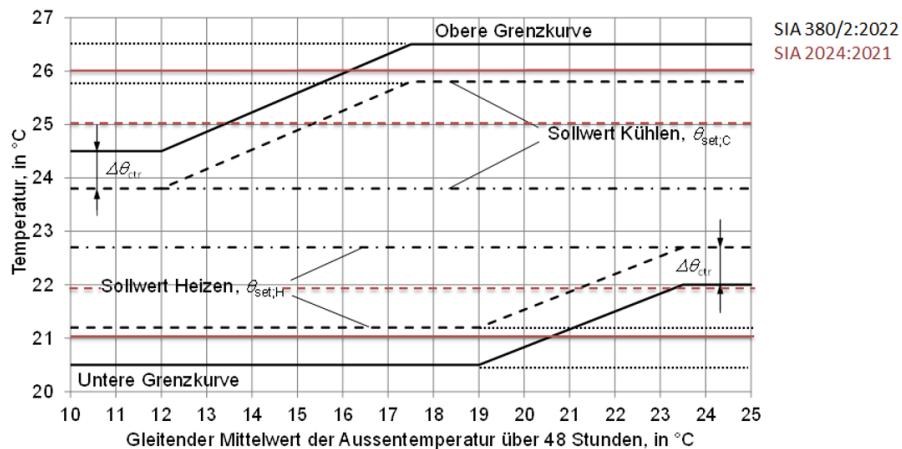


Abbildung 14: Sollwerte der Raumtemperaturen gemäss SIA 380/2:2022 und SIA 2024:2021 (Quelle: Chr. Stettler, Vorlesung Modul MoSim 2, HLSU)

Bemessungswerte der Raumluftfeuchte

Für die Bemessungswerte der Raumluftfeuchte werden die Werte aus IDA 2, Tabelle 34 382/1:2025, übernommen (s. Tabelle 7).

Tabelle 7: Bemessungswerte der Raumluftfeuchte, Tabelle 34, 382/1:2025

Beschreibung	Symbol	Einheit	IDA 1 (H_2O)	IDA 2 (H_2O)	IDA 3 (H_2O)
Bemessungswert der relativen Raumluftfeuchte im Heizfall ^{a)}	$\varphi_{IDA,des,H}$	% r.F.	40	30	20
Bemessungswert der relativen Raumluftfeuchte im Kühlfall ^{b)}	$\varphi_{IDA,des,C}$	% r.F.	50	60	70

a) Die angegebenen Werte beziehen sich auf die der jeweiligen Kategorie des Innenraumklimas (IEQx) entsprechenden Raumtemperaturen θ_i .

b) Bei Überschreitung einer Raumtemperatur von 26 °C und einer massebezogenen Raumluftfeuchte von 10 g/kg muss der vorausgesagte Prozentsatz der thermischen Akzeptanz PTA gemäss 2.2.6.8 überprüft werden.

Daher wird im EISCH-Projekt der Bedarf an Ent- und Befeuchtung durch den Vergleich der Wasserdampfgehaltswerte mit den Grenzwerten ermittelt, die durch die Anwendung der Bemessungswerte für die Raumluftfeuchte nach SIA 382/1, (Zitat):

Nach SIA 180, Ziffern 3.5.1.3 und 3.5.1.4, muss die relative Raumluftfeuchte in mechanisch belüfteten Räumen in der Regel höher als 30 % und niedriger als 62 % sein. Diese Anforderungen gelten im Schweizer Mittelland bei den Auslegungswerten für die Raumlufttemperatur von 21 °C im Heizfall¹⁰ und 26 °C im Kühlfall¹¹. Bei abweichenden Auslegungswerten für die Raumlufttemperaturen und Standorthöhen sind die Umrechnungen über die volumenbezogene Raumluftfeuchte gemäss SIA 180, Ziffern 3.5.1.3 und 3.5.1.4, vorzunehmen.

¹⁰ bei einer massebezogenen Raumluftfeuchte von 4,9 g/kg bzw. einer volumenbezogenen Raumluftfeuchte von 5,5 g/m³

¹¹ bei einer massebezogenen Raumluftfeuchte von 13,7 g/kg bzw. einer volumenbezogenen Raumluftfeuchte von 15,2 g/m³

Die Einhaltung der Anforderungen an die Raumluftfeuchte wird in Anlehnung an SIA 382/1 nachgewiesen (Zitat):



Ohne aktive Entfeuchtung darf die vereinbarte untere Grenze der relativen Raumluftfeuchte in einem typischen Jahr während maximal 10 % der jährlichen Nutzungszeit unterschritten werden. Ohne besondere Vereinbarung ist bei tiefen Außentemperaturen von der Reduktion der Außenluftrate auszugehen.

3.2.5 Auswertekriterien für die Simulationsergebnisse

Zur vergleichenden Bewertung verschiedener Konfigurationen von Kühlsystemen ist es notwendig, einheitliche Leistungskennzahlen (*Key Performance Indicators*, KPI) sowie eine standardisierte Simulationsmethodik zu definieren.

Das Ziel besteht darin, die Wirksamkeit des Kühlsystems nicht nur hinsichtlich des Energieverbrauchs, sondern auch in Bezug auf thermischen Komfort, Feuchteverhalten und Regelgüte zu bewerten.

KPI - Thermisch-hygrometrischer Komfort

Stunden ausserhalb des Komfortbereichs: Anteil der Stunden, in denen die operative Temperatur T_{op} ausserhalb der Komfortzone liegt (fix oder adaptiv nach EN 16798-1/SIA 180).

- *Degree-Hours* (DH) (Einheit: $^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$):

Summe der Temperaturabweichungen oberhalb des oberen Komfortgrenzwertes:

$$DH = \sum_t \max(0, T_{op}(t) - T_{lim,sup}(t)) \cdot \Delta t$$

Diese Kennzahl quantifiziert die Intensität und Dauer thermischer Überhitzung.

- *Predicted Mean Vote* (PMV) und *Predicted Percentage of Dissatisfied* (PPD):

Bewertung des thermischen Empfindens gemäss ISO 7730 bzw. EN 16798-1.
Gute Komfortbedingungen liegen bei $-0,5 < PMV < +0,5$ und $PPD < 10\%$.

Feuchtekontrolle: Anteil der Stunden mit relativer Luftfeuchte ausserhalb der Komfortgrenzen (typisch 40–60 %).

- *Gramm-Hours* (GH) der Entfeuchtung (Einheit $\text{g}/\text{kg}\cdot\text{h}$):

Summe der Feuchteüberschreitungen über dem oberen Komfortgrenzwert

$$GH = \sum_t \max(0, w(t) - w_{lim}(t)) \cdot \Delta t$$

mit

$w(t)$: absoluter Feuchtegehalt der Raumluft ($\text{g Wasser}/\text{kg trockene Luft}$)

$w_{lim}(t)$: Grenzwert der Komfortzone (z. B. entsprechend 60 % r.F.),

Δt : Zeitschritt (h).

Zur Beurteilung des latenten Komforts und der Luftentfeuchtung. Je kleiner der GH-Wert, desto besser die Feuchteregelung.

- *Optionale Variante – GH** (Einheit kg Wasser/Saison):

Diese Kennzahl ermöglicht eine direkte Abschätzung des Entfeuchtungsbedarfs und der entsprechenden Energieverbräuche.

Wenn der Massenstrom trockener Luft \dot{m}_{da} bekannt ist:

$$GH^* = \int \dot{m}_{da}(t) \cdot \max(0, w(t) - w_{lim}(t)) dt$$



KPI – Energetische Leistungskennzahlen

- Sommerlicher Stromverbrauch für Kühlung (kWh): Kompressoren und Hilfsaggregate.
- Spitzlast der Kälteleistung als kritische Grösse für die Anlagenauslegung.
- Maximale elektrische Leistung (kW): relevant für Netzbelaistung.
- Saisonale Effizienz (EER/COP/SEER): Verhältnis der abgeführten Kälteleistung zur eingesetzten elektrischen Energie.
- Aufteilung in sensible und latente Anteile des Kühlbedarfs.
- Hilfsenergie für Verteilungssysteme: Ventilatoren und Pumpen separat ausweisen.

KPI – Regelgüte und Setpoint-Tracking

- Mittlerer Setpoint-Fehler: Durchschnittliche Abweichung $|T_{op} - T_{set}|$ während belegter Zeiten.
- *Unmet Cooling Hours* (UCH): Stunden mit unzureichender Kühlleistung bei Belegung.
- Regelstabilität: Analyse von Temperaturosillationen $> 1 \text{ K}$ innerhalb 30–60 min.

KPI – Resilienz und Robustheit

- Kritische Stunden: Anteil der Stunden mit $T_{op} > 28\text{--}30^\circ\text{C}$ während Hitzeperioden.
- Kühlwirkung: z.B durch die differenz der operativen Temperatur zwischen Szenarien

KPI – Ökonomische und ökologische Indikatoren

- Investitionskosten jeder Variante, Jährliche Betriebskosten (CHF/a), spezifische Kosten (CHF/m²), Amortisationszeit (Payback Time), Kapitalwert (Net Present Value)
- Betriebstreibhausgasemissionen (kg CO₂-äq/kWh) entsprechend dem Strommix.

Die Simulation erfolgt mit IDA ICE und liefert Kennwerte wie PPD, PMV, operative Temperatur, Luftfeuchte sowie Überhitzungs- und Komfortstunden. Es werden die sommerlichen Bedingungen ohne aktive Kühlung beurteilt, um das zukünftige Innenraumklima realistisch unter verschärften Klimabedingungen abzuschätzen.

Vorgehensweise zur Bewertung

1. Definition der Szenarien
 - Gleiches Gebäude, identische Nutzungsprofile und interne Lasten.
 - Klimadaten
 - Anlagevarianten
2. Festlegung der Komfortkriterien
 - Fixe Komfortzone (z. B. $24 \pm 1^\circ\text{C}$, 40–60 % r.F.) oder adaptive nach EN 16798-1.
 - Bewertung nur während belegter Stunden.
3. Simulation
 - Zeitschritt $\leq 15 \text{ min}$ zur Erfassung kurzzeitiger Schwankungen und Feuchtedynamik.
IDA ICE wählt einen variablen Simulationsschritt und verwendet Interpolation, um die Ausgangswerte für den gewählten Schritt zu erhalten.
4. Berechnung der KPI
 - Separat für belegte/unbelegte Zeiten sowie für Kälteerzeugung und Hilfsenergie.
5. Visualisierung der Ergebnisse (Beispiele)
 - Diagramm Komfortindikatoren (DH, GH, PMV/PPD) vs. Energieverbrauch.
 - Diagramm der KPI je Systemkonfiguration.
 - *Heatmaps* von T_{op} und relativer Feuchte während der heißesten Wochen.



Die Durchführung einer Analyse gemäss der oben beschriebenen Vorgehensweise erfordert die Bereitstellung der folgenden Simulationsausgaben:

- Operative Temperatur (°C),
- Lufttemperatur (°C),
- relative Feuchte (%), und feuchte Mischungsverhältnis (kgw/kg_{tl}),
- Luftvolumen- (m³/h oder L/s), bzw. Massenstrom (kg/h oder kg/s), (z.B. für GH*).
- PMV (-) und PPD (%),
- Kälteleistung (sensibel/latent) (W),
- elektrische Leistung (W), und Energie (kWh),
- Zustände der Regelung (-),
- Belegungsstatus (-),
- Zeitauflösung ≤ 1 h.

3.3 Experimentelle Messungen – Planung der Prüfarbeiten

3.3.1 Prüfobjekt

Ziel der experimentellen Arbeiten ist die Validierung und anschliessende Optimierung eines Simulationsmodells für ein Lüftungsgerät mit Enthälpierotor (ERG) und Abluftwärmepumpe (ABLWP).

Für die experimentellen Untersuchungen, die zur Validierung des entwickelten Simulationsmodells durchgeführt werden, wurde das Lüftungsgerät Nilan HCR 800T ausgewählt (siehe Abbildung 15).

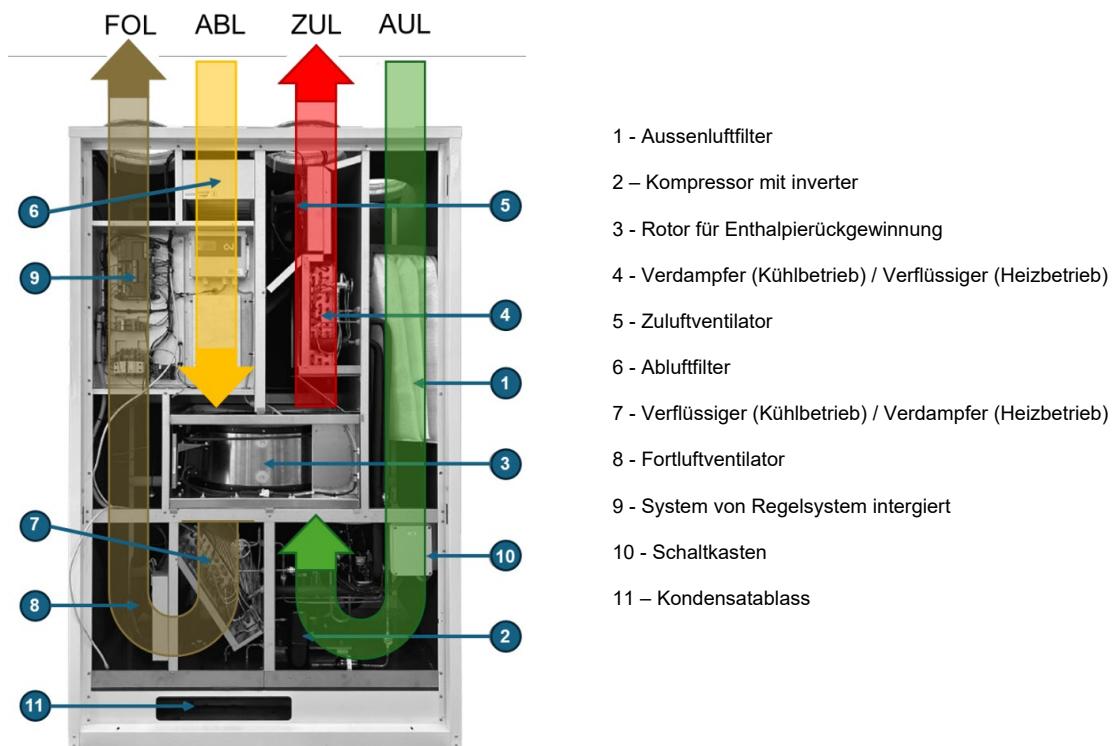


Abbildung 15: Lüftungsgerät Nilan HCR 800T, Überarbeitung der Abbildung „Die Einheit“ (Seite 9 der Bedienungsanleitung HCR 800T / B64 / Version 1.10 - 25.06.2025)

Dieses Gerät stellt ein kompaktes, vollständig integriertes Lüftungssystem mit Wärmerückgewinnung und reversibler Wärmepumpe dar, das sowohl den Heiz- als auch den Kühlbetrieb ermöglicht.



Tabelle 8 zeigt die Typenschilddaten im Winter- (Heizen) und Sommerbetrieb (Kühlen) des Lüftungsgeräts Nilan HCR 800T.

Tabelle 8 Typenschilddaten aus Produktdaten HCR 800T - CTS602 - Aktualisiert: Di, 12 Aug 2025 08:38

■ HERGESTELLT IN DÄNEMARK

Abmessungen (BxTxH)	1100 x 621 x 1890 mm
Gewicht	205 kg
Gehäusetyp	Alu-Zink, weiße Pulverlackierung RAL 9016
Max. Aufnahmleistung	2,3 kW (Ventilatoren + Kompressor)
Versorgungsspannung	1 x 230V + N, 50 Hz
Max. Strom	1 x 13 A
Kompressor	Invertergeregt
Kühlmittel Kühlkreis	R 410 A / 1,2 kg
Kondensat Kapazität	2,5 l/h (25 °C / 70% RH, nominal Luftmenge)
Kondensatablauf	PVC, Ø 20 x 1,5 mm
Filterklasse	Außenluft: Taschenfilter ePM1 65% Abluft: Filter ePM10 50%
Kondensator/Verdampfer (HxB)	404 x 352 mm
Kanalanschlüsse	Ø 250 mm
Schutzart DS/EN 1886	L2

Kühlbetrieb

Luftmenge	800 m³/h	1000 m³/h
Ablufttemperatur	+ 24 °C / 60% RH	+ 24 °C / 60% RH
Außentemperatur	+ 35 °C / 60% RH	+ 35 °C / 60% RH
Sorptionswärmetauscher	7,72 kW	8,6 kW
Verdampfer	2,95 kW	3,53 kW
Gesamte Kühlleistung	10,67 kW	12,13 kW
Zulufttemperatur	16,1 °C / 87% RH	20,1 °C / 86,1% RH
Stromverbrauch des Kompressors	1,04 kW	1,02 kW
Kühl-EER	10,26	11,9



Heizbetrieb

Luftmenge	800 m ³ /h	1000 m ³ /h
Ablufttemperatur	+ 22 °C / 50% RH	+ 22 °C / 50% RH
Außentemperatur	- 12 °C / 90% RH	- 12 °C / 90% RH
Sorptionswärmetauscher	10,98 kW	13,05 kW
Kondensator	2,43 kW	2,53 kW
Gesamte Heizleistung	13,41 kW	15,58 kW
Zulufttemperatur	24,8 °C	21,8 °C
Stromverbrauch des Kompressors	0,56 kW	0,53 kW
Heiz-COP	23,9	29,4

Die Nilan HCR 800T ist mit zwei drehzahlgeregelten EC-Ventilatoren, einem rotierenden Enthalpietauscher zur Wärme- und Feuchterückgewinnung sowie einem geschlossenen Kältekreislauf mit Inverter-Kompressor ausgestattet.

Das Lüftungsgerät Nilan HCR 800T verwendet eine integrierte Wärmepumpe, die mit dem Kältemittel R410a betrieben wird. Die Verwendung dieses Kältemittels unterliegt in Europa aufgrund seines hohen Treibhauspotenzials zunehmend strengen regulatorischen Einschränkungen. Eine vergleichbare Entwicklung zeigt sich auch in der Schweiz, wo die geltende Chemikalien-Risikoreduktions-Verordnung (ChemRRV) weitgehend an die europäische F-Gas-Regulierung angelehnt ist und ebenfalls klare Vorgaben zur Reduktion von Kältemitteln mit hohem GWP macht.

Obwohl davon auszugehen ist, dass zukünftige Gerätevarianten verstärkt Kältemittel mit niedrigerem GWP einsetzen werden, ist die aktuelle Situation von erheblichen Unsicherheiten geprägt. Viele der verfügbaren oder technisch geeigneten Alternativen zu R410a weisen eine A2L-Einstufung (leicht brennbar) auf, was zusätzliche Anforderungen an Gerätesicherheit, Installationsbedingungen und Unterhalt bedeutet. Gleichzeitig bietet Nilan derzeit in dieser Leistungsklasse keine Lüftungsgeräte an, die bereits auf ein Kältemittel mit niedrigem GWP umgestellt wurden.

Nilan untersucht gegenwärtig mögliche Alternativen wie R513a, deren thermische und betriebliche Eigenschaften voraussichtlich vergleichbare Leistungen ermöglichen. Daher kann für die experimentelle Untersuchung davon ausgegangen werden, dass sich die grundlegenden thermodynamischen Charakteristiken der integrierten Wärmepumpe, insbesondere im Hinblick auf Leistungsmodulation und Interaktion mit dem Enthalpietauscher, auch bei zukünftigen Kältemittelumstellungen nur begrenzt verändern werden.

Insgesamt ist die Wahl eines Geräts mit R410a im Rahmen dieser experimentellen Validierungsarbeiten technisch gerechtfertigt und wissenschaftlich nachvollziehbar, da es sowohl dem heutigen Stand der marktrelevanten Anlagentechnik entspricht als auch eine robuste Basis für den späteren Vergleich mit kommenden, klimafreundlicheren Systemvarianten bietet.

Das Funktionsdiagramm des Lüftungsgeräts HCR 800T ist in der Abbildung 16 dargestellt.

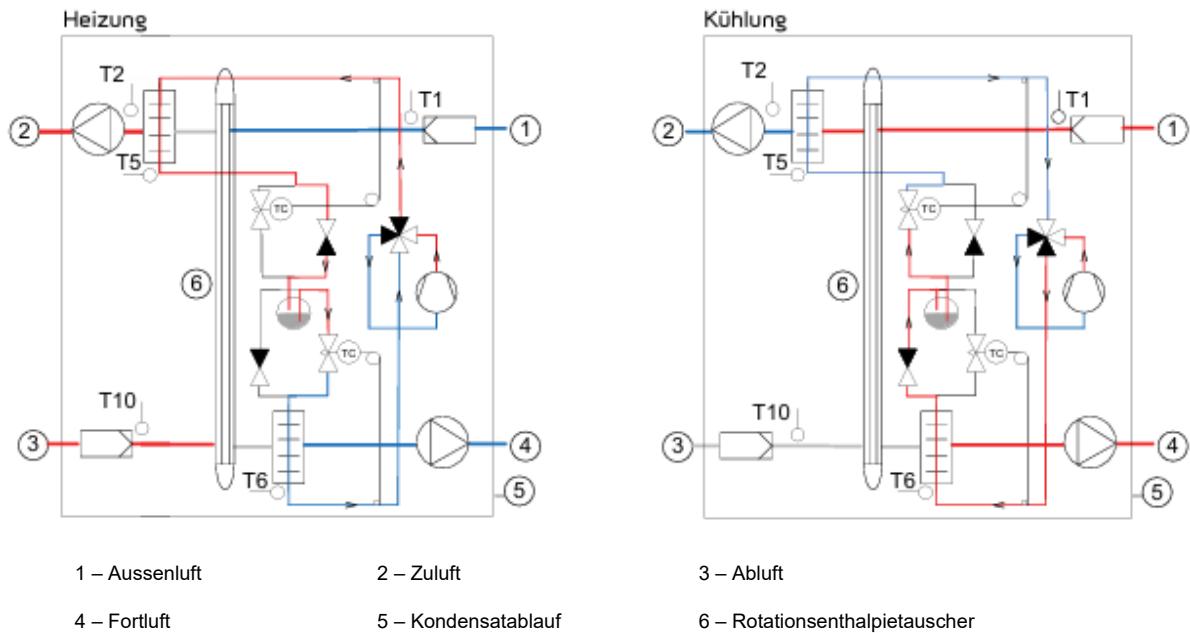


Abbildung 16. Funktionsdiagramm des Lüftungsgeräts HCR 800T aus Montageanleitung HCR 800T / M64 / Version 1.10 - 25.06.2025

Die Regelung erfolgt über das integrierte Steuerungssystem CTS602i, das eine präzise Kontrolle der Luftvolumenströme, Temperaturen und Betriebszustände erlaubt und gleichzeitig eine kontinuierliche Datenerfassung für wissenschaftliche Analysen ermöglicht.

Die Steuerungslogik des Lüftungsgeräts basiert auf einer temperaturgeführten Regelung der Zuluft-Eintrittstemperatur, die kontinuierlich mit dem festgelegten Sollwert verglichen wird. Der Sollwert ergibt sich aus der gemessenen Ablufttemperatur und einer definierten Sollwertverschiebung, welche den gewünschten thermischen Komfort im Raum sicherstellt.

In der ersten Regelungsstufe wird ausschliesslich der Rotationswärmetauscher aktiviert. Durch Anpassung der Rotordrehzahl wird versucht, den Sollwert der Zulufttemperatur allein durch passive Enthalpieübertragung zu erreichen. Kann der Sollwert trotz maximaler Rotordrehzahl nicht gehalten werden, wird in einer zweiten Regelungsstufe die Wärmepumpe zugeschaltet. Der Kompressor wird dabei moduliert betrieben, um den verbleibenden Temperaturunterschied zwischen Ist- und Sollwert auszugleichen. Nach Erreichen eines stationären Betriebszustands übernimmt der Rotationswärmetauscher die Feinregelung der Zuluft-Eintrittstemperatur. Die Wärmepumpe bleibt aktiv, arbeitet jedoch auf einem konstanten Leistungsniveau, um Schwankungen zu vermeiden und den Energieverbrauch zu minimieren.

Diese zweistufige Regelstrategie ermöglicht eine energieeffiziente und stabile Temperaturregelung, bei der der Rotationswärmetauscher primär die Grundlast und die Wärmepumpe nur die erforderliche Zusatzleistung übernimmt. Dadurch wird sowohl der elektrische Leistungsbedarf des Gesamtsystems reduziert als auch eine gleichmässige Regelung der Zulufttemperatur gewährleistet.

Die typischen Anwendungsbereiche für diesen Lüftungsgerät sind Büro- und Schulgebäude sowie andere Nichtwohngebäude, in denen eine kontrollierte Raumluft mit hohem Energieeffizienz- und Komfortniveau angestrebt wird.



3.3.2 Normativer Bezugsrahmen

Die Festlegung der Versuchsbedingungen und der Auswertelogik orientiert sich an folgenden europäischen Normen:

- EN 13141-7 (*Ventilation for buildings – Performance testing of components* – Teil 7: Leistungsprüfung von Zu-/Abluft-Geräten für den Nichtwohnbereich).
→ Referenz für Definition der Luftzustände, Messgrößen und Effizienzkennzahlen von Lüftungsgeräten mit WRG.
- EN 308 (*Heat exchangers – Test procedures for establishing the performance of air/air heat exchangers*).
→ Referenz für Bestimmung sensibler, latenter und totaler (enthapischer) Wirkungsgrade des WRG.
- EN 14511 (Reihe) (*Air conditioners, liquid chilling packages and heat pumps with electrically driven compressors*).
→ Referenz für Prüfbedingungen und Kenngrößen der Wärmepumpe (Kälteleistung, Leistungsaufnahme, COP/EER).
- EN 14825 (*Seasonal energy performance of air conditioners and heat pumps*).
→ Ergänzend zur modellbasierten Bewertung: Einordnung in jahreszeitliche Effizienzkonzepte (SEER/SCOP) und Lastprofile.

Die Versuchsplanung kombiniert normnahe Referenzpunkte mit praxisnahen Sommerzuständen, um sowohl Vergleichbarkeit als auch Relevanz für reale Betriebsfälle sicherzustellen.

Für die Untersuchungen werden Abluft- und Aussenluftzustände gewählt, die unterschiedliche Temperatur- und Feuchtegradienten erzeugen und damit die sensible wie latente Übertragung abbilden.

Abluftzustände (ABL)

- AB-1 (Referenz/Komfort): 25 °C / 50 % rF
- AB-2 (hohe Feuchte): 26 °C / 60 % rF

Aussenluftzustände (AUL)

- AUL-1 (warm-feucht): 32 °C / 55 % rF
- AUL-2 (warm-trocken): 35 °C / 20 % rF
- AUL-3 (mässig warm, feucht): 28 °C / 70 % rF
- AUL-4 (sehr feucht): 30 °C / 80 % rF

Diese Matrix ermöglicht die Bestimmung der sensiblen (η_t) und latenten (η_x) Effizienzen über ein breites Spektrum an Feuchte- und Temperaturdifferenzen sowie die Analyse der Wechselwirkungen mit der Wärmepumpe.



3.3.3 Versuchsreihen und Zielgrößen

Es ist vorgesehen, zunächst mindestens drei unterschiedliche Versuchsreihen durchzuführen, um jene Messdaten zu erheben, die anschliessend mit den Ergebnissen des Simulationsmodells verglichen werden können. Dabei werden sowohl die identischen Aussen- und Abluftbedingungen als auch die gleichen Betriebszustände des Kompressors und des rotierenden Enthalpietauschers berücksichtigt, sodass eine direkte und konsistente Validierung des Modells gewährleistet ist.

Test 1 – Rotationswärmetauscher ERG (WP deaktiviert)

Ziel: Kalibrierung des numerischen ERG-Modells; Ermittlung der Kennlinien η_s und η_l in Abhängigkeit von Luftvolumenstrom ($\approx 33\% - 66\% - 100\%$ des Nennwerts) und Rotordrehzahl.

Betrieb: WP aus, keine Nachbehandlung; Massenströmen im Gleichgewicht (Zuluft = Abluft).
Zustände: ABL-1 (optional ABL-2) \times AUL-1/2/3/4.

Test 2 – Wärmepumpe aktiv, ERG deaktiviert

Ziel: Quantifizierung des Wärmeeintrags des Kompressors in den Luftstrom bei variabler Luftmenge und Kälteleistung (modulierter Betrieb).

Betrieb: WP ein, ERG aus; Kapazität auf niedrig/mittel/hoch; Luftvolumenstrom 33 %/66 %/100 %.

Zustände: vorzugsweise ABL-1 \times (AUL-1, AUL-2), um feuchte- vs. trockene Lastfälle zu trennen.

Test 3 – Kombinierter Betrieb (WP + ERG aktiv)

Ziel: Validierung des gekoppelten Modells (ABLWP + WRG) und Trennung der Beiträge von passiver (ERG) und aktiver (ABLWP) Konditionierung.

Betrieb: WP ein, ERG ein; Kapazität 3 Stufen; Luftvolumenstrom 33 %/66 %/100 %.

Zustände: (ABL-1, ABL-2) \times (AUL-1, AUL-2, AUL-3).

Test 4 – Regelungs-/Betriebsoptimierung ERG + ABLWP (perspektiv)

In einer fortgeschrittenen Projektphase wird eine 4. Versuchsreihe vorgesehen, um das Zusammenspiel von ERG und ABLWP zu optimieren (Bypass-Strategien, Rotordrehzahl-/Kapazitäts-Koordination, Minimierung des Gesamtenergieverbrauch je Nutzkälte).

Tabelle 9: Luftvolumenstrom, Rotordrehzahl, Kapazität der WP und Bedingungen für die Aussenluftzufuhr und Abluft für die drei geplanten Test.

Test	Luftvolumenstrom (%)	Rotordrehzahl / WP-Kapazität	Aussenluft (AUL)	Abluft (ABL)	
Test 1 ERG ein (WP aus)	33 %	Rotor niedrig	32 °C / 55 % rF (AUL-1)	25 °C / 50 % rF (ABL-1)	Basisfall
	33 %	Rotor niedrig	35 °C / 20 % rF (AUL-2)	25 °C / 50 % rF (ABL-1)	Trockenfall
	33 %	Rotor niedrig	28 °C / 70 % rF (AUL-3)	25 °C / 50 % rF (ABL-1)	Feuchtefall
	33 %	Rotor niedrig	30 °C / 80 % rF (AUL-4)	25 °C / 50 % rF (ABL-1)	sehr feucht
	66 %	Rotor mittel	32 °C / 55 % rF	25 °C / 50 % rF	mittlere Volumenstrom
	66 %	Rotor mittel	35 °C / 20 % rF	25 °C / 50 % rF	...
	100 %	Rotor hoch	32 °C / 55 % rF	25 °C / 50 % rF	Nenn-Volumenstrom
	100 %	Rotor hoch	35 °C / 20 % rF	25 °C / 50 % rF	trockener Extremfall



Test	Luftvolumenstrom (%)	Rotordrehzahl / WP-Kapazität	Aussenluft (AUL)	Abluft (ABL)	
Test 2 WP ein (ERG aus)	33 %	WP Kapazität niedrig	32 °C / 55 % rF (AUL-1)	25 °C / 50 % rF (ABL-1)	Hohes Feuchtepotenzial
	33 %	WP Kapazität niedrig	35 °C / 20 % rF (AUL-2)	25 °C / 50 % rF (ABL-1)	Trockenbasis
	66 %	WP Kapazität mittel	32 °C / 55 % rF	25 °C / 50 % rF	Wechselwirkung Volumen/Kapazität
	66 %	WP Kapazität mittel	35 °C / 20 % rF	25 °C / 50 % rF	...
	100 %	WP Kapazität hoch	32 °C / 55 % rF	25 °C / 50 % rF	Volles Leistungsszenario
	100 %	WP Kapazität hoch	35 °C / 20 % rF	25 °C / 50 % rF	Trockenextrem
Test 3 WP + ERG ein	33 %	WP niedrig + Rotor niedrig	32 °C / 55 % rF (AUL-1)	25 °C / 50 % rF (ABL-1)	Wirkungsgradkombination
	33 %	WP niedrig + Rotor niedrig	35 °C / 20 % rF (AUL-2)	25 °C / 50 % rF (ABL-1)	Trockenfall
	66 %	WP mittel + Rotor mittel	32 °C / 55 % rF	26 °C / 60 % rF (ABL-2)	höhere Abluftfeuchte
	66 %	WP mittel + Rotor mittel	35 °C / 20 % rF	26 °C / 60 % rF	...
	100 %	WP hoch + Rotor hoch	32 °C / 55 % rF	26 °C / 60 % rF	Volle Leistung
	100 %	WP hoch + Rotor hoch	28 °C / 70 % rF (AUL-3)	26 °C / 60 % rF	hoher latenter Anteil

Hinweis: Durchflussraten, Kapazitäts- und Drehzahlniveaus sind Richtwerte: Passe sie an die tatsächlichen Geräte- und Laborbedingungen an.

3.3.4 Messstrategie und Instrumentierung

Die Messstrategie verfolgt das Ziel, die energetische Performance des Gesamtsystems sowie die Wechselwirkungen zwischen Wärmerückgewinnung (WRG), Kältekreis und Luftströmen detailliert zu erfassen. Dabei kommen sowohl luftseitige als auch kältekreisinterne Messungen zum Einsatz.

Luftseitige Messungen

Die Messungen an den Luftströmen erfolgen am Prüfstand mittels des kalibrierten Labormesssystems. Erfasst werden die Ein- und Austrittspunkte der vier Luftströme – Aussenluft, Zuluft, Abluft und Fortluft – entsprechend der gerätespezifischen Definition. Zusätzlich werden Zwischenmesspunkte hinter der Wärmerückgewinnungseinheit (WRG) und vor dem Verdampfer bzw. Kondensator auf dem Zu- und Abluftpfad installiert.

Gemessene Größen umfassen:

- Trockentemperatur (T)
- Relative Feuchte (r.F.) bzw. Feuchtegehalt (w)
- Statischer Druck (Δp)
- Volumen- bzw. Massenstrom

Diese Messungen ermöglichen eine detaillierte energetische Bilanzierung und die Identifikation von Luftseiteneffekten im kombinierten Betrieb.

Kältekreisüberwachung

Die Erfassung der Kältekreisdaten erfolgt über die internen Sensorsignale des Geräts (Temperaturen, Drücke, Leistungsaufnahme). Dadurch kann auf invasive Eingriffe in den geschlossenen Kreislauf verzichtet werden.



Zwischen der Wärmerückgewinnungseinheit und dem Verdampfer bzw. Kondensator werden zusätzliche Temperatur- und Feuchtesonden platziert. Diese Anordnung erlaubt es, im kombinierten Betrieb die reale Leistung der Wärmerückgewinnungseinheit (ERG) separat zu bewerten und die indirekte Wärmeabgabe des Kompressors an die Luft zu quantifizieren. Eine direkte Messung zwischen Kompressor und WRG ist konstruktiv nicht praktikabel.

Elektrische und Kondensat-Messungen

Zur Erfassung der elektrischen Leistungsaufnahme werden Messungen an folgenden Komponenten durchgeführt:

- Ventilatoren
- Kompressor und Inverter
- Steuerungseinheit (sofern relevant)

Die Berechnung der latenten Anteile in der Gesamtenergiebilanz basiert auf den Messungen der Feuchtigkeit der ein- und ausströmenden Luftströme. Zusätzlich wird, wenn möglich, die Menge an Kondenswasser erfasst, falls sich welches bildet. **Effizienz des WRG (gemäss EN 308)**

- (Brutto) Temperatur-Effizienz: $\eta_t = \frac{T_{ZUL} - T_{AUL}}{T_{ABL} - T_{AUL}}$
- (Brutto) Feuchte-Effizienz: $\eta_x = \frac{x_{ZUL} - x_{AUL}}{x_{ABL} - x_{AUL}}$

Grössen für die Wärmepumpe (EN 14511) und Systemkennzahlen

- Kälteleistung (Zuluftpfad, sinnvoll im Kühlbetrieb): $\dot{Q}_{cool} = \dot{m}_{air} \cdot (h_{in} - h_{out})$
- Elektrische Kompressorleistung: $P_{el,comp}$
- COP/EER: $EER = \frac{\dot{Q}_{cool}}{P_{el,comp}}$
- Sensible Heat Ratio (SHR): $SHR = \frac{\dot{Q}_{sens}}{\dot{Q}_{tot}}$
- Netto-Systemleistung im Kombibetrieb (Test 3): $\dot{Q}_{sys,net} = \dot{Q}_{ERG,eff} + \dot{Q}_{WP,net}$
- Gesamt-EER im Kombibetrieb: $EER_{sys} = \frac{\dot{Q}_{sys,net}}{P_{el,tot}}$

Spezifische Auswertung in Test 2 (WP ein, ERG aus)

Zu messen:

- Luftseitig T/r.F. an Ein-/Ausgängen der relevanten Ströme (insb. Extrakt-Pfad), Luftvolumenströme, Δp Ventilatoren, elektrische Leistungen; interne Kältekreisdaten; ggf. Kondensat.

Zu berechnen:

- \dot{Q}_{cool} , $P_{el,comp}$, EER, SHR.
- Wärmeabgabe des Kompressors an die Luft: aus Δh auf dem Extrakt-Pfad (Vergleich zu WP-aus-Baseline).
- Energie- und Enthalpiebilanz des Geräts zur Abschätzung interner Verluste/Einträge.

Spezifische Auswertung in Test 3 (WP + ERG)

Zu messen:

- T/r.F./p und Volumenströme an allen Ein-/Austritten; Zusatzsonden zwischen WRG und Verdampfer/Kondensator; elektrische Leistungen; interne Kältekreisdaten; Kondensat.

Zu berechnen:

- η_t , η_x , (ERG) im Kombibetrieb, $\dot{Q}_{ERG,eff}$ (aus Zusatzsonden), $\dot{Q}_{WP,net}$, EER_{sys} , Gesamtenergieeffizienz, carry-over-Indikatoren (ΔT bzw. Massenübertragungsartefakte), τ_{resp} .



Optimierung der Kombination ERG + ABLWP – Test 4

In einer späteren Projektphase ist die Durchführung einer vierten Versuchsreihe (Test 4) vorgesehen, mit dem Ziel, den kombinierten Betrieb zwischen Enthalpierotor (ERG) und Abluftwärmepumpe (ABLWP) weiter zu optimieren.

Diese zusätzliche Testreihe baut auf den Erkenntnissen aus den vorangegangenen Tests 1–3 auf und dient der Feinabstimmung der Regelungs- und Betriebsstrategien des Gesamtsystems. Der Fokus liegt dabei auf der energetischen Effizienz, der Regelstabilität und der Feuchteführung im kombinierten Betrieb.

Die geplanten Untersuchungen verfolgen das Hauptziel der Optimierung der Koordination zwischen ERG-Drehzahl und HP-Kapazität zur Maximierung der Systemeffizienz. Dabei wird insbesondere die minimale elektrische Leistungsaufnahme pro erzeugter Nutzkälte unter Bedingungen hoher Feuchte in den Fokus genommen.

3.3.5 Versuchsablauf und Datenqualität

Der Ablauf der Versuchsreihen folgt einem strukturierten und standardisierten Vorgehen, um eine hohe Vergleichbarkeit und Aussagekraft der Messergebnisse sicherzustellen. Besondere Aufmerksamkeit gilt der Datenqualität, der Reproduzierbarkeit und der Nachvollziehbarkeit aller Prüfschritte.

- **Initiale Vorbereitung und Kalibrierung**

Zu Beginn jeder Messkampagne erfolgt die Kalibrierung und der Abgleich der Luftvolumenströme. Dabei wird der Filterstatus der Anlage dokumentiert, um eventuelle Einflüsse auf Druckverlust und Luftmengen nachvollziehen zu können.

- **Stabilisierung der Betriebszustände**

Jeder Prüfpunkt wird so lange gefahren, bis quasi-stationäre Bedingungen erreicht sind. Als Stabilitätskriterium gilt: $|dq_v/dt|$, $|dT/dt|$ und $|dx/dt| \approx 0$

Erst nach Erreichen dieser Stabilität werden die Messwerte für die Auswertung herangezogen.

- **Datenerfassung und Auswertung**

Die Datenerfassung erfolgt innerhalb eines stationären Zeitfensters, aus dem Mittelwerte gebildet werden. Die Streuungen dienen als Mass für die Messunsicherheit.

Zur Plausibilisierung der Ergebnisse werden sowohl geschlossene Enthalpiebilanzen je Luftseite als auch eine Gesamtenergiebilanz des Systems durchgeführt. Typischerweise liegt die Abweichung innerhalb eines Toleranzbereichs von $\leq 5\%$.

- **Dokumentation der Betriebszustände**

Alle relevanten Betriebsgrößen werden während der Versuche dokumentiert, darunter:

- Luftvolumenströme und Luftzustände
- Rotordrehzahl (ERG)
- Wärmepumpenleistung und zugehörige Setpoints

- **Korrektur und Qualitätssicherung**

Bei identifizierten Leckagen, Bypass-Strömungen oder carry-over-Effekten werden entsprechende Korrekturterme in der Auswertung berücksichtigt, um die energetische Bilanzierung korrekt darzustellen. Diese Massnahmen gewährleisten eine hohe Genauigkeit und Konsistenz der ermittelten Versuchsdaten.



4 Weiteres Vorgehen

4.1 Administratives

Es ist geplant, die Sitzungen der Arbeitsgruppe nach Bedarf und mindestens einmal alle drei Monate abzuhalten.

Die Organisation von bilateralen Treffen zwischen den Projektpartnern erfolgt bedarfsoorientiert.

Es ist geplant, die Sitzungen der Begleitungsgruppe mindestens einmal pro Jahr und möglicherweise alle sechs Monate abzuhalten.

Der Abschluss des Projekts ist für den 30.10.2026 vorgesehen.

4.2 Arbeitspakete

Die in den Arbeitspaketen definierten Aufgaben werden gemäss der in Kapitel 3 und Kapitel 4 des Projektantrags dargelegten Beschreibung fortgeführt.



5 Nationale und internationale Zusammenarbeit

Das Projekt ist sowohl national als auch international gut aufgestellt. Dies ist auf die intensive Zusammenarbeit mit Expertengruppen auf dem Gebiet der Simulation und die aktive Mitarbeit in Branchenverbänden und Normungsgremien zurückzuführen. Diese Kooperationen bieten eine wichtige Plattform für die Verbreitung der Projektergebnisse und eröffnen vielfältige Möglichkeiten für die Präsentation wissenschaftlicher Beiträge und den Dialog mit der akademischen und fachlichen Gemeinschaft.

Im Rahmen der Fachgruppensitzung Komfortlüftung des Verbandes *Gebäude Klima Schweiz* (GKS) sowie der Sitzung des Schweizer Begleitkomitees CH-BK-156 Lüftung von Gebäuden des europäischen Normungsgremiums CEN/TC 156 erfolgte eine kurze Vorstellung des Projekts, welche bei den anwesenden Mitgliedern auf Interesse stiess.

Die Eurovent PG-AHU hat sich zum Ziel gesetzt, eine Methodik zu entwickeln, um den Einfluss von Wärmepumpen in die Bewertung der Energieeffizienz von RLT-Geräten einzubeziehen. Damit soll das ECC-Zertifizierungssystem erweitert werden. Diese Notwendigkeit resultiert aus dem Fehlen einer Methode zur Klassifizierung von RLT-Geräten mit integrierten WP sowie der Verpflichtung zur Einhaltung der überarbeiteten VU-Verordnung.

Die CEN/TC 156 hat eine neue Arbeitsgruppe (Task Group) zum Thema "*Lüftungsgeräte, Wärmetauscher und Wärmepumpen für Nichtwohngebäude (Ventilation units, heat exchangers, and heat pumps for non-residential systems)*" etabliert. Die Zielsetzung dieser neu etablierten Arbeitsgruppe besteht in der Klärung des Bedarfs und des Zwecks eines neuen Arbeitspunktes sowie der Entwicklung einer neuen europäischen Norm.

Die HSLU wird diese Kontakte aufrechterhalten und sich für einen Austausch nützlicher Ergebnisse zwischen den Normengremien, der Eurovent-Arbeitsgruppe und dem Projektteam einsetzen.

Im Rahmen des trilateralen Treffens der Lüftungsfachleute D-A-CH im Jahr 2025 wurde das EISCH-Projekt präsentiert. Das Projekt stiess auf grosses Interesse, da es sich mit den Themen Einsatz von Lüftungsanlagen mit Fort/Abluftwärmepumpe und Wärmerückgewinnung sowie dem Thema Luftkühlung und Entfeuchtung im Sommer befasst. Dabei wurde ersichtlich, dass die Themen in allen teilnehmenden Ländern als hochaktuell erachtet werden.



6 Publikationen

Bisher wurden noch keine Publikationen veröffentlicht.



7 Literaturverzeichnis

- [1] IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
- [2] Ragettli M. S., Florian S., Röösl M.: Monitoring hitzebedingte Todesfälle 2000 bis 2022. Impact Indikator «Hitzebedingte To-desfälle». Synthesebericht Juli 2023. Im Auftrag des BAFU und BAG
- [3] Meteo Schweiz. Klima in der Schweiz: Hitze-in-Staedte
<https://www.meteoschweiz.admin.ch/klima/klima-der-schweiz/hitze-in-im-hinn.html>
- [4] Palmer J. Passivhaus Trust - Avoiding summer overheating. Guidelines for summer comfort in Passivhaus buildings and the PHT Summer overheating tool
<https://www.passivhaustrust.org.uk/UserFiles/File/Technical%20Papers/Avoiding%20summer%20overheating.pdf>
- [5] SIA 382/1:2025 Mechanische Lüftung in Gebäuden – Grundlagen und Anforderungen.
Diese Version wird im Februar 2025 in Kraft gesetzt.
- [6] Wehrli K, Sidler F, Gubler S, Kotlarski S, Settembrini G, Koschenz M, Zweifel G: Klimaszenarien fürs zukünftige Innenraumklima (SIA 2028) – Fachbericht MeteoSchweiz Nr. 279
- [7] Huber H., Frei B., Dugaria S., Naf M. Schlussbericht und ergänzende Dokumentation des BFE-Projekts RePPER Reduktion von Leistungsspitzen durch Enthalpierückgewinnung, 2024
<https://www.aramis.admin.ch/Texte/?ProjectID=51497>
- [8] Freund, Sebastian, S.A Klein, D.T. Reindl. 2003 : A Semi-Empirical Method to Estimate Enthalpy Exchanger Performance and a Comparison of Alternative Frost Control Strategies, HVAC&R Research (2003), 9:4, 493-508, DOI: 10.1080/10789669.2003.10391082
- [9] Klein, H., S.A. Klein, and J.W. Mitchell. 1990. Analysis of regenerative enthalpy exchangers. Int. Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 33.
- [10] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverband SIA. 2021. SIA Merkblatt 2024 – Raumdatenblätter
- [11] Stadt Zürich, Amt für Hochbauten, Fachstelle Nachhaltiges Bauen. 2019. Sommerlicher Wärmeschutz in Alterszentren, Schlussbericht