

Energieforschungsprogramm

Publizierbarer Endbericht

Programmsteuerung:

Klima- und Energiefonds

Programmabwicklung:

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG)

Endbericht

erstellt am

09/09/2019

COOLSKIN –

Autarkes Kühlen über Gebäudehüllen

Projektnummer: 848871

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Ausschreibung	1. Ausschreibung Energieforschungsprogramm
Projektstart	01/09/2015
Projektende	31/08/2019
Gesamtprojektdauer (in Monaten)	48 Monate
ProjektnehmerIn (Institution)	Institut für Wärmetechnik – Technische Universität Graz, AIT Austrian Institute of Technology GmbH (AIT-Energy) SFL technologies GmbH Architekturbüro Reinberg ZT GesmbH qpunkt GMBH
AnsprechpartnerIn	Thomas Mach, Andreas Heinz
Postadresse	Institut für Wärmetechnik – Technische Universität Graz Inffeldgasse 25b A-8010 Graz
Telefon	+43 316 873 7301
Fax	+43 316 873-7305
E-mail	thomas.mach@tugraz.at , andreas.heinz@tugraz.at
Website	www.iwt.tugraz.at

COOLSKIN

Autarkes Kühlen über Gebäudehüllen

AutorInnen:

Institut für Wärmetechnik, TU Graz

Thomas Mach

Andreas Heinz

Daniel Brandl

AIT Austrian Institute of Technology

Thomas Schlager

Marcus Rennhofer

Tim Selke

AVL-QPUNKT

Harald Grantner

Markus Hinteregger

Gerald Zotter

Architekturbüro REINBERG

Georg Wolfgang Reinberg

SFL

Jakob Reckenzaun

Michael Grobbauer

Stefan Grabmaier

Mario J. Müller

Inhaltsverzeichnis

1	Das Projekt COOLSKIN.....	5
1.1	Projektziel und dessen Charakterisierung	5
1.2	Zusammenarbeit im Forschungskonsortium	6
1.3	Aufbau der Projekt-Arbeit	7
1.4	Festlegung der Fokusbereiche	7
1.5	Verknüpfung mit Projekten der Internationalen Energieagentur.....	8
1.6	Bauwerksintegration von Photovoltaik und Gebäudekühlung	8
1.7	Funktionsprinzip und Untersuchungsansatz	10
2	Komponentenuntersuchungen und Systemaufbau	12
2.1	Energietechnisches Anforderungsprofil	12
2.2	Zeitverschiebung zwischen Angebot und Nachfrage	16
2.3	System- und Betriebskonstellationen im Simulationsvergleich.....	17
2.4	Auswahl der photovoltaischen Energieversorgung	30
2.5	Elektrischer Aufbau für Labor und Feldtest.....	30
2.6	Entwicklung, Montage und Test der Konditionierungseinheit	34
2.7	Mess- und Regelungskonzept der Konditionierungseinheit	37
3	Experimenteller Einsatz im Feldtest	40
3.1	Versuchsaufbau und Messkonzept.....	40
3.2	Übersicht über den Versuchszeitraum.....	43
3.3	Auswertung der einzelnen Systemkonfigurationen bzw. Messzeiträume	46
3.4	Operative Raumtemperaturen beim und energetische Analyse	57
3.5	Elektrotechnische Bewertung der Systemperformance	60
4	Numerische Behaglichkeitsanalyse	64
4.1	Untersuchungsansatz.....	64
4.2	Strömungs- / Geschwindigkeitsverteilungen der Luftströmung	69
4.3	Temperaturverteilung in den Versuchsräumen	71
4.4	Verlauf der Temperaturen über den ganzen Tag.....	73
4.5	Komfortbewertungen (Person 1 und Person 2).....	78
5	Zusammenfassung, Schlussfolgerungen und Ausblick	80
6	Quellennachweise	84
7	Kontaktdaten.....	87

1 Das Projekt COOLSKIN

Der Bedarf an Kühlung im österreichischen bzw. europäischen Gebäudebestand steigt permanent. Sich verändernde klimatische Bedingungen, großflächige Verglasungsflächen in den Fassaden der Gebäude, sowie steigende Nutzungsanforderungen sind dabei die zentralen treibenden Kräfte. Neben Methoden zur Vermeidung bzw. Reduktion von Kühlbedarf sind Systeme gefragt, die eine möglichst klimaneutrale Kühlung von Innenräumen ermöglichen, hohe thermische Behaglichkeit für Nutzer- und Nutzerinnen bieten und zudem bauphysikalisch und architektonisch gut in Gebäude integriert werden können.

1.1 Projektziel und dessen Charakterisierung

Aus diesen Anforderungen ist das Projekt COOLSKIN entstanden, das es sich zum Ziel gesetzt hat Systemkonfigurationen zur dezentralen und fassadenintegrierten Kühlung von Innenräumen zu analysieren, ein Funktionsmuster eines vielversprechenden Systemdesigns zu konstruieren, sowie die Implementierung unter realen Einsatzbedingungen einem Monitoring zu unterziehen. Das System soll energietechnisch autark sein und somit keine zugeführte Energie aus externen Quellen brauchen. Dieser Ansatz der energietechnischen Autarkie ist in diesem Zusammenhang als Forschungsansatz zu verstehen, in dem konsequent der Extremfall einer von Energienetzen unabhängigen Lösung erprobt und technisch im Sinne eines „Proof of Concept“, evaluiert werden soll.

Der gewählte Forschungsansatz leistet in Bezug auf die Ziele des Energieforschungsprogrammes folgende Beiträge:

- **Abdeckung des steigenden Kühlbedarfs durch eine emissionsfreie Alternative**
Derzeit marktübliche Kühlsysteme verbrauchen große Mengen an zum Teil fossiler Energie. Der in COOLSKIN untersuchte Ansatz funktioniert auf Grundlage von Solarenergie und ist daher in der Nutzungsphase emissionsfrei.
- **Vermeidung von verlustbehafteten und kostenintensiven Leitungsnetzen**
Die Distanz zwischen dem Ort der Erzeugung (Umwandlung) und dem Ort des Verbrauches von thermischer Energie bedingt die Errichtung kostenintensiver und verlustbehafteter Leitungsnetze. COOLSKIN setzt den Ansatz, die Energie dort bereitzustellen, wo sie gebraucht wird, funktioniert dezentral und ist an keine Netzkoppelung gebunden.
- **Keine Abhängigkeit von Energieimporten**
Eine Verlagerung der Energiebereitstellung auf österreichische Ressourcen verringert die Abhängigkeit von außerösterreichischen Entscheidungsprozessen. Der Ansatz bedient sich ausschließlich der Solarstrahlung als Energiequelle und behält somit den Großteil der Wertschöpfung in Österreich.

- **Kein zusätzlicher Flächenverbrauch zur Energiegewinnung**

In Österreich wachsen, gleich wie in fast allen Industrienationen, die Intensität der Flächennutzung und die versiegelte Fläche rasant an. Die umweltrelevanten Folgen dieser Entwicklung sind gravierend. Der zunehmende Flächenverbrauch zur Energiegewinnung steht zudem in direkter Konkurrenz zu anderen Flächennutzungen und übt Druck auf diese aus. Die Energiegewinnung im Ansatz des Projektes COOLSKIN wird über die Gebäudefassaden bewerkstelligt - ein zusätzlicher Flächenverbrauch wird somit vermieden.

- **Erhöhte Behaglichkeit durch kombinierte Luft- und Flächenkühlung**

Im Zuge des Klimawandels und dem Anstieg der sommerlichen Maximaltemperaturen geht eine erhöhte Belastung des menschlichen Kreislaufs einher. Psychische als auch physische Leistungsfähigkeit sinken signifikant mit zu hohen Umgebungstemperaturen. Insbesondere für die immer größer werdende Gruppe der älteren Menschen stellt dies eine steigende Belastung dar. Der in COOLSKIN verfolgte Ansatz zieht sowohl die Kühlung über Flächen, als auch die Kühlung über Luft in Betracht um Vorteile für die thermische Behaglichkeit zu generieren.

- **Umsetzungseffizienz und Qualität durch Vorfertigung**

Von Bauwerk zu Bauwerk unterschiedliche Rahmenbedingungen und Voraussetzungen erzwingen oftmals individuelle Systemkonfigurationen. Die bauseitige Herstellung dieser Systeme ist den Einschränkungen der Baustellenfertigung unterworfen und muss mit beschränkten Möglichkeiten zur Qualitätskontrolle auskommen. Der in COOLSKIN gewählte dezentrale Ansatz könnte in einer späteren Umsetzung industriell geplant und gefertigt werden. Die Folge ist die Möglichkeit einer kontinuierlichen Systementwicklung, einer automatisierten Maschinenfertigung, sowie einer hochwertigen Qualitätskontrolle.

1.2 Zusammenarbeit im Forschungskonsortium

Die interdisziplinäre Zusammenarbeit wurde bereits bei der Zusammenstellung des Konsortiums in der Antragsphase definiert und in der Projektlaufzeit durchgehend gelebt. Die einzelnen Institutionen bearbeiteten die in ihrem Kompetenzbereich liegenden Aufgabenstellungen. In den Projektmeetings wurden die jeweiligen Fragestellungen, Bearbeitungsmethoden und Ergebnisse dem gesamten Projektteam präsentiert und mit diesem besprochen. Das Institut für Wärmetechnik der TU Graz kümmerte sich um die thermischen Aspekte der Untersuchungen und Entwicklungen, wie beispielweise die Entwicklung der Kältemaschine, sowohl in Bezug auf die virtuellen Methoden der Berechnung und Simulation, als auch in Bezug auf die Versuche im Labor des Institutes und den Feldtest. Die elektrischen Aspekte wurden gleichlaufend vom AIT bearbeitet, wobei die Komponenten Photovoltaik und elektrische Speicherung, im Zentrum der virtuellen und experimentellen Bearbeitung standen. AVL, als Spezialist für die Behaglichkeit in Fahrzeugkabinen, nutzte dieses Know-How um Untersuchungen zur Behaglichkeit im gekühlten Innenraum durchzuführen. Das Architekturbüro Büro Reinberg und SFL technologies bearbeiteten die konstruktiven, bauphysikalischen und gestalterischen Aspekte im Feldtest, ebenso wie die Frage der Integration dezentraler Kühlsysteme in Fassadenkonstruktionen.

1.3 Aufbau der Projekt-Arbeit

Die Bearbeitung des Projektes stützt sich auf eine Mischung aus virtuellen Untersuchungsmethoden, technischen Experimenten, sowie auf die Kommunikation mit externen Wissensträgern. Nach Präzisierung der technischen Stoßrichtung, der Rahmenbedingungen und der Verknüpfung zu Projekt-externen Forschungsaktivitäten (siehe **Kapitel 1**), wurde begonnen am Aufbau des technischen Systems zu arbeiten (siehe **Kapitel 2**). Im ersten Schritt wurde das Anforderungsprofil an die energietechnische Konditionierung, also im Wesentlichen die benötigte Kühlenergie bzw. Kühlleistung, unter unterschiedlichen Randbedingungen erarbeitet (siehe Kapitel 2.1), sowie unterschiedliche Systemkonfigurationen und deren mögliche Betriebsweisen analysiert (siehe Kapitel 2.2). Anschließend wurden der Einsatz und die Ausgestaltung der Systemkomponenten untersucht, insbesondere die photovoltaische Anlage (siehe Kapitel 2.3) und die Frage nach der Sinnhaftigkeit und Auslegung thermischer und elektrischer Speicher (siehe Kapitel 2.4 und 2.5). Darauf aufbauend konnte die Konditionierungseinheit konfiguriert und im Labor getestet werden (siehe Kapitel 2.6 und 2.7). Die Erkenntnisse aus den Laborversuchen ermöglichten den Start des Feldversuches, in dem das photovoltaische System, die Konditionierungseinheit und die Versuchsobjekte zu einem Gesamtsystem kombiniert wurden (siehe **Kapitel 3**). Der am Campus der TU Graz situierte Versuchsaufbau wurde in unterschiedlichen Betriebsweisen und klimatischen Randbedingungen, in einem ca. eineinhalbjährigen Versuchszeitraum (siehe Kapitel 3.2) betrieben und mehrmals umgebaut. Eine detaillierte messtechnische Begleitung bildete die Grundlage für umfangreiche Systemanalysen. Parallel dazu konnte die Modellierung der thermischen Behaglichkeit in den Innenräumen der Versuchsobjekte umgesetzt werden (siehe **Kapitel 4**).

1.4 Festlegung der Fokusbereiche

In den ersten Projektmeetings diskutierten die Projektpartner über die Detaillierung der im Antrag beschriebenen Ausrichtung des Projektes, wobei folgende Fokusbereiche festgelegt wurden:

Der Bürobau bietet gegenüber dem Wohnbau das passendere Einsatzpotential für dezentrale Kühlung, und somit wird der Bürobau das primäre Untersuchungsobjekt im Projekt COOLSKIN sein. Demzufolge sind die zu untersuchenden Fassadenkonfigurationen unter den Randbedingungen einer Bürofassade zu betrachten. ► **Fokus auf Bürofassaden**

Durch den Klimawandel werden Zusatzmärkte entstehen, wodurch auch dort Kühl-Potential anfallen wird, wo bisher nicht gekühlt werden musste. Aus dieser Motivation heraus und auf der Grundlage der Markt-Interessen der Konsortialpartner sollen als potentiell Einsatzgebiet alle europäischen Städte in Betracht gezogen werden. ► **Fokus auf Europa als potentielles Einsatzgebiet**

Der Fokus der Untersuchungen liegt im Projekt COOLSKIN auf dem Kühlfall. Dem gegenüber wurde vom Konsortium der hohe Wert ganzjähriger Lösungen oftmals betont und es wurde vereinbart, den Heizfall ebenso begleitend zu betrachten, um Rückschlüsse auf einen ganzjährigen Betrieb ziehen zu können.

► **Fokussierung auf die Kühlung**

1.5 Verknüpfung mit Projekten der Internationalen Energieagentur

Im ersten Projektjahr entschied sich das COOLSKIN-Projektteam mit dem **IEA SHC TASK 53**, der IEA (Internationale Energieagentur), zu kooperieren. Der Task 53 (<http://task53.iea-shc.org/>) hat sich die Identifikation, die Entwicklung und die Bewertung von marktverfügbaren und in Entwicklung befindlichen solaren Heiz- und Kühlsystemen im kleinen Leistungsbereich als Ziel gesetzt. Das Ziel der Kooperation lag im gegenseitigen Wissenstransfer zwischen dem nationalen Forschungsprojekt COOLSKIN und dem internationalen Task. Im ersten Projektjahr wurden das Konzept und die angestrebten Ergebnisse der internationalen Expertengruppe vorgestellt. Im zweiten bzw. dritten Projektjahr konnten der Expertengruppe des Task 53, neben Fortschrittsberichten, auch ausgewählte Messdaten des Langzeit-Monitorings des Feldtests zur Verfügung gestellt werden.

Die Ergebnisse des Projekts wurden und werden auch im noch laufenden **IEA HPT ANNEX 49** „Design and Integration of Heat Pumps for nearly Zero Energy Buildings“ vorgestellt und eingebracht (<https://www.annex49.net/index.php?id=16587>). Das Projekt und Zwischenergebnisse wurden im Jänner 2019 im Meeting in Obergurgl vorgestellt. Am 16.01.2020 wird in Wien ein nationaler Workshop zum Annex 49 veranstaltet, an dem auch das Projekt COOLSKIN präsentiert werden wird.

1.6 Bauwerksintegration von Photovoltaik und Gebäudekühlung

Die Bauwerksintegration von Photovoltaik (BIPV - Building-integrated Photovoltaic), also die strukturelle und funktionelle Integration von photovoltaischen Bauelementen in Gebäudeteile, hat in den letzten 50 Jahren eine lange Tradition entwickelt und ist in vielen Bereichen gut etabliert. Die Herausforderung beim Einsatz von Photovoltaik im oder am Gebäude ist die Integration energietechnischer Systeme, die bauphysikalischen Anforderungen an die Gebäudehülle und architektonische Aspekte in einem einzigen Bauteil zu lösen [siehe Quesada et al. 2012, Zogou et al. 2011]. Schon im 19. Jh. wurde die Grundlage einer erfolgreichen BIPV-Applikation definiert:

*„Die Photovoltaik hat nur eine Zukunft, wenn sie sich harmonisch in die Architektur integrieren lässt“
(Charles Frittes, Erfinder der Solarzelle, 1885)“*

Ein weiterer wesentlicher Aspekt von BIPV ist der Mehrfachnutzen der Integration. Da ein konventionelles Bauteil sublimiert wird, wird neben der reinen Stromerzeugung zumindest ein weiterer (z.B. baulicher) Aspekt abgedeckt. Diese sogenannte Multifunktionalität kann viele Seiten haben, von Sonnenschutz, über Schalldämmung zu Klimatisierung [Brinkworth et al. 2000, Yun et al. 2010, Han et al. 2010]. Dieser letzte Punkt erweist sich in Gebäuden mit erhöhtem Kühlbedarf als besonders sinnvoll. Setzt man z.B. in einem mehrgeschossigen, großvolumigen Bürobau statt Standardfenstern, BIPV-Fenster [Han et al. 2013] ein, kann man von vorn herein bis zu 80% des Wärmeeintrages reduzieren und zusätzlich Strom erzeugen [Rennhofer et al. 2012].

Allgemein kann man sagen, dass in den letzten Jahren sehr viele bauphysikalische Fragestellungen im BIPV-Bereich gelöst wurden und weitere vor ihrer Lösung stehen, wie z.B. Brandschutz. Im architektonischen Bereich wurden hinlänglich viele erfolgreiche und ästhetische Integrationsarten gezeigt. Für den Architekten ist aber heute noch die ästhetische Konsequenz des Einsatzes von PV-Elementen sehr schwer abschätzbar (sich ständig ändernde PV-Technologien und Erscheinungsbilder, schwer abschätzbare Verkabelungen und für den Fußgänger sichtbare Untersichten etc.). Vorgefertigte standardisierte Fassaden könnten die Kontrolle der ästhetischen Qualität für den Architekten wieder besser abschätzbar machen [Gosztonyi et al. 2013].

Offene Fragestellungen, die auf Grund ihrer Komplexität bisher noch unzureichend untersucht wurden, sind konstanter Teil europäischer Forschung. Dazu gehören unter anderem Lebensdauer, Energy- bzw. Power Rating, thermisches Verhalten, Systemankopplung, dezentrale Lösungen mit anderen Technologien zusammen, Demand-side-management und Lastprofile [Rennhofer et al. 2012, Abawi et al. 2014]. Insbesondere sind Fragestellungen zu Systeminteraktion und Energy Rating (d.h. Ertragsvorhersagen) unter den Rahmenbedingungen einer Integration in Gebäude und gleichzeitiger Erfüllung architektonischer Anforderungen schwierige Themenbereiche. [Parameshwaran et al. 2012, Guiavarch et al. 2006, Zogou et al. 2011, Lau et al. 2012, Gan et al. 2009, Bhamjee et al. 2013, Coussirat et al. 2008, Saelens et al. 2004, Zanghirella et al. 2011]. Die adäquate Behandlung der ästhetischen Konsequenzen von Energiefassaden fehlt aber noch weitestgehend.

Das **Klimatisieren von Gebäuden** zur Erzeugung und Aufrechterhaltung eines gleichmäßigen Raumklimas wird derzeit auf unterschiedliche Art und Weise bewerkstelligt. Besonders in größeren Gebäuden kommen meist **zentrale Anlagen** zum Einsatz, bei denen die „Kälte“- Bereitstellung zentral - meist über Kompressionskälteanlagen - erfolgt und über ein Verteilsystem die einzelnen Räume im Gebäude versorgt werden. Diese Anlagen haben den Nachteil, dass der Planungsaufwand (individuelle Planung je nach Gegebenheiten) und auch der Installationsaufwand hoch sind. Durch das notwendige Wärme- und Kälte-Verteilungssystem im Gebäude entstehen zum einen ein zusätzlicher Platzbedarf (insbesondere bei luftbasierter Verteilung), zum anderen aber auch beträchtliche Energieverluste.

Bei **dezentralen Klimageräten** erfolgt die Kälteerzeugung direkt im bzw. an der Außenfassade des zu kühlenden Raums. Dafür gibt es grundsätzlich mehrere Möglichkeiten, wobei aber sehr häufig Split- oder Multisplit-Klimageräte zum Einsatz kommen. Diese haben den Vorteil, dass kein „Kälte“-Verteilsystem im Gebäude erforderlich und somit auch eine relativ einfache Nachrüstung solcher Anlagen möglich ist. Als nachteilig sind hier die mangelnde Integrationsmöglichkeit der Außengeräte in die Gebäudefassade, die sich vor allem hinsichtlich des optischen Erscheinungsbilds der Fassade oftmals negativ auswirkt, sowie Geräuschentwicklung des Kompressors, Zugerscheinungen und die relativ niedrige Effizienz zu nennen.

1.7 Funktionsprinzip und Untersuchungsansatz

Der im Projekt COOLSKIN verfolgte Ansatz stützt sich auf drei grundlegende Prozess-Schritte. Im ersten Schritt wird die auf die Gebäudefassade auftreffende Solarstrahlung in elektrischen Strom umgewandelt. Im zweiten Schritt wird mit der elektrischen Energie direkt, oder zeitversetzt über einen Speicher, eine Kältemaschine angetrieben. Die mit der Kältemaschine generierte Kühlenergie wird, im dritten Schritt, mittels Luft und/oder über Strahlungsaustausch an einen Innenraum abgegeben (Abbildung 1).

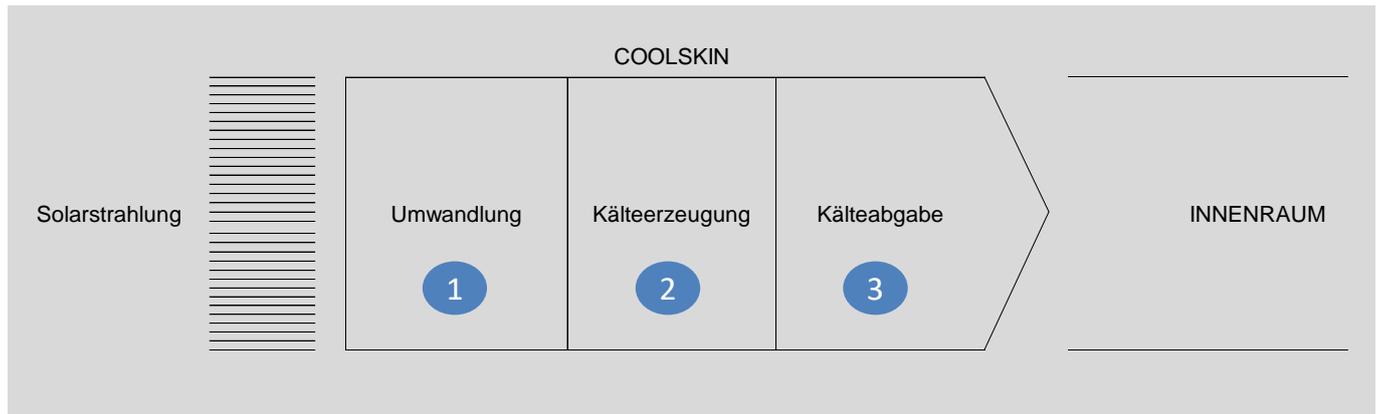


Abbildung 1: Die drei zentralen Schritte im Ansatz des Projektes COOLSKIN

Umwandlung

Am Beginn des Prozesses steht die Umwandlung solarer Strahlung in elektrischen Strom mittels Photovoltaik. In der Wahl des Standortes der entsprechenden photovoltaischen Paneel-Flächen ist wenig an Einschränkung gegeben. Die Stromerzeugung könnte grundsätzlich auch außerhalb des Gebäudes stattfinden, beispielsweise zentral in einer Siedlung bzw. in einem Stadtquartier. Auch gebäudezentrale Anlagen sind denkbar, die in Bezug auf den Ausgleich der Kühlanforderungen der unterschiedlichen Innenräume eines Gebäudes wesentliche Vorteile bieten. Im Forschungsprojekt COOLSKIN wurde bewusst auf diese energietechnischen und möglicherweise auch wirtschaftlichen Vorteile nicht eingegangen um den Extremfall einer **vollständig dezentralen Lösung** einem „Proof of Concept“ zu unterziehen. Durch die Notwendigkeit der **Multiplizierbarkeit des dezentralen Ansatzes** an einer Gebäudefassade, beschränkt sich die zu Verfügung stehende Fläche zur Stromproduktion ausschließlich auf die **dem jeweiligen Innenraum zugeordnete Fassadenfläche** und ist somit in ihrer Größe begrenzt und als vertikal ausgerichtet anzunehmen. Im Projekt COOLSKIN halten sich sowohl die simulationstechnischen Untersuchungen (vgl. Abbildung 2), als auch der Feldversuch (vgl. Abbildung 25) an diese Vorgaben. Eine Ausnahme bilden die, insbesondere für Südausrichtungen geeigneten Vordächer, die als konstruktiver Sonnenschutz eingesetzt, auch **geneigte Paneelflächen** beinhalten können. Im experimentellen Feldversuch wurde diese Variation durch vertikal ausstellbare Paneele vorgesehen und getestet (Abbildung 27). Bei der Auswahl der PV-Paneele ist zu beachten, dass die **konstruktiven Anforderungen** an Fassaden erfüllt werden müssen (Absturzsicherheit, Bruchsicherheit, Reflexionsfaktoren, etc.). Im Projekt wurde daher mit einem qualifizierten Hersteller zusammengearbeitet um ausschließlich diesbezüglich geeignete Paneele in die Untersuchung einzubeziehen.

Ein wesentlicher Aspekt der Intensität der Stromproduktion ist die auf das PV-Paneel auftreffende solare Strahlung, die wesentlich vom **Standort des Gebäudes** und der **Himmelsrichtung** der Fassade abhängt. Diese energietechnischen Auswirkungen werden im Projekt COOLSKIN im Rahmen einer vergleichenden Simulationsstudie untersucht (vgl. Abbildung 3). Ein wesentlicher Aspekt bei der Umsetzung ist auch die Auswirkung auf das äußere Erscheinungsbild eines Gebäudes. Die erzielbare architektonische Wirkung wird dabei maßgeblich von der Rasterung der Paneele und von deren Farbe beeinflusst. Um neben den üblichen dunkelgrauen und dunkelblauen Paneelen eine **alternative Paneelfarbe** gegenüberzustellen, wurden auch **hellgraue Paneele** vermessen (Abbildung 14) und in den Feldtest integriert (Abbildung 27).

Kälteerzeugung

Die zeitliche Verfügbarkeit von solarem Strom ist mit dem zeitlichen Verlauf der anfallenden Kühlleistung des Innenraums in Einklang zu bringen. Die weitgehende **Zeitgleichheit zwischen dem solaren Angebot und der auftretenden Kühllast** in Gebäuden (saisonal und über den Tag) legt den Einsatz von Solarenergie zur Bereitstellung der geforderten Antriebsenergie für die „Kälte“-Bereitstellung nahe. Dennoch auftretende Asymmetrien zwischen Angebot und Nachfrage müssen entweder durch einen elektrischen bzw. einen thermischen Speicher ausgeglichen werden. Im Projekt COOLSKIN wurde der Einsatz eines **thermischen Kältespeichers** evaluiert. Die notwendigen Speichergrößen führen jedoch zu Speicherabmessungen bzw. Speichergewichten, die für die Integration in eine Gebäudefassaden als eher ungeeignet erscheinen, weshalb in der weiteren Projektbearbeitung ein fassadenintegrierter thermischer Kältespeicher nicht weiter in Betracht gezogen wurde. Sollte der jeweilige elektrische Speicher nicht in der Lage sein Energieangebot und Kühlnachfrage in Einklang zu bringen, führt dies zu einem Temperaturanstieg im Innenraum, der je nach Intensität zu kleinen oder größeren Einschränkungen im thermischen Komfort führt. Eine Möglichkeit Komforteinbußen komplett auszuschließen liegt in der Koppelung der Kältebereitstellung an die **netzgebundene Stromversorgung**. Damit wären verschiedene Effekte und Möglichkeiten verbunden. Neben der erwähnten Beseitigung etwaiger Komforteinbußen und der Möglichkeit Energieüberschüsse in das Netz einzuspeisen, könnte neben dem sommerlichen Kühlbetrieb auch ein **winterlicher Heizbetrieb** bewerkstelligt werden und somit ein monovalenter Ganzjahresbetrieb umgesetzt werden. Auch ist in einer derartigen Konstellation die Implementierung eines dezentralen elektrischen Speichers zu hinterfragen. Mit eben diesen Fragestellungen beschäftigt sich eine im Projekt durchgeführte simulationstechnische Studie (vgl. 2.3.3), die sich zudem die Frage stellt, inwieweit auch der **Strombedarf eines Büroraumes** (Beleuchtung, EDV, etc.), abseits der Klimatisierung, abgedeckt werden kann.

Kälteabgabe

Für die Kühlung des Innenraums stehen grundsätzlich zwei Möglichkeiten zur Verfügung. Zum einen kann vom Innenraum angesaugte Luft mittels einer Kältemaschine gekühlt werden und wieder an den Innenraum abgegeben werden, zum anderen kann die Kältemaschine einen Fluidkreislauf kühlen, der in eine Massivdecke integriert ist, diese kühlt und somit dem Innenraum Wärme entzieht. Die Kühlung über Luft ebenso wie die Kühlung über die **Bauteilaktivierung** wurden im Feldversuch implementiert. Die sich daraus ergebenden Auswirkungen auf die **thermische Behaglichkeit** werden in Kapitel 4 analysiert.

2 Komponentenuntersuchungen und Systemaufbau

Im ersten Schritt der Bearbeitung wurde das energietechnische Anforderungsprofil an dezentrale Kühleinheiten ermittelt, um die weiterführenden Entwicklungen zielgerichteter durchführen zu können. Daraufhin wurden Systemkonfigurationen und Betriebsweisen simulationstechnisch analysiert sowie einzelne Komponenten sowohl rechnerisch als auch experimentell im Labor untersucht. Schlussendlich konnte das gesamte Kühlsystem geplant, gefertigt und im Labor getestet werden.

2.1 Energietechnisches Anforderungsprofil

Im ersten Schritt der Untersuchungen stellte sich die Frage nach der benötigten Leistungsfähigkeit der energietechnischen Systeme. Zur Beantwortung dieser Frage bietet sich die Methode einer thermischen Gebäude- und Anlagensimulation an, wobei die klimatischen, geometrischen und nutzungsbedingten Randbedingungen so zu setzen sind, dass sie den in Kapitel 1.4 festgelegten Fokussierungen entsprechen. Der untersuchte Referenzraum wurde daher als Büroraum angenommen, der unter verschiedenen europäischen klimatischen Bedingungen und unterschiedlichen Ausrichtungen in Bezug auf seine Anforderung an Kühlung, aber auch an Heizung, analysiert wurde.

Als klimatische Randbedingungen wurden drei **Klimadatensätze** ausgewählt, die jeweils ein kaltes, ein mittleres und ein warmes europäisches Klima repräsentieren. Ein Vergleich der europäischen Hauptstädte hat gezeigt, dass die Städte Helsinki (kalt), Ljubljana (moderat) und Madrid (warm) gut geeignet sind, die in Europa zu erwartende Bandbreite an klimatischen Bedingungen abzubilden. Es wurde daher für die weiteren Arbeiten mit der Software Meteonorm [Meteotest, 2009] je Stadt ein Klimadatenatz erstellt, der ein 10-jähriges mittleres Klima repräsentiert. In Tabelle 1 sind die wesentlichen Daten der Klimadatensätze zusammengefasst.

Tabelle 1: Kennzahlen der generierten Klimadatensätze der drei gewählten Standorte

		Helsinki	Ljubljana	Madrid
Längengrad	[°]	-24,97	-14,52	3,55
Breitengrad	[°]	60,32	46,07	40,45
Seehöhe	[m]	53	299	582
Jahresmittel Außenlufttemperatur	[°C]	6,06	11,25	14,52
minimale Außenlufttemperatur	[°C]	-21,7	-11,5	-4,9
maximale Außenlufttemperatur	[°C]	28,7	34,9	38,6
Globalstrahlung auf die Horizontale	[kWh/m ² a]	963	1214	1682
Diffusstrahlung	[kWh/m ² a]	472	607	591

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Als **Referenzraum** wurde ein Büroraum mit einer Belegung von drei Personen definiert und in einem thermischen Gebäudemodell in der Simulationsumgebung [TRNSYS, 2017] abgebildet. Der Raum hat eine Netto-Nutzfläche von 25 m² und wurde in der Simulation viermal identisch als separate thermische Zone abgebildet, wobei die Orientierung in die vier Haupt-Himmelsrichtungen vorgenommen wurde. Die Begrenzungswände wurden, wie in Bürogebäuden üblich, als Ständerwände mit Gipskartonplatten und Dämmung, angenommen (U-Wert: 0,25 W/m²K).

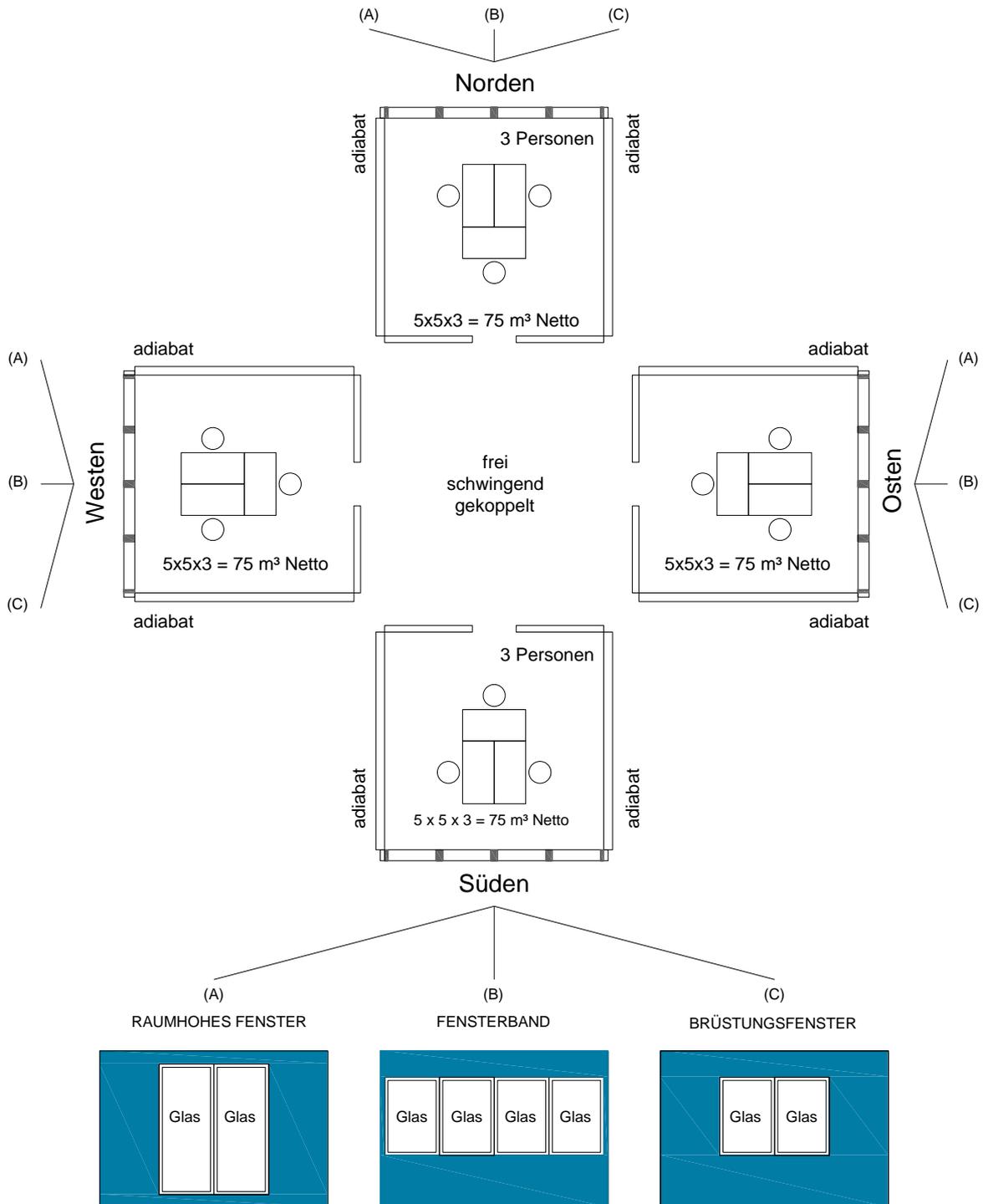


Abbildung 2: Untersuchungskonfiguration mit unterschiedlichen Ausrichtungen und Fassaden-Konfigurationen

Für die Fassade wurden drei **Fassaden-Konfigurationen** hinsichtlich der Anordnung und der Abmessungen der Verglasungsflächen definiert (Abbildung 2). Die gesamte Fassadenfläche beträgt 18,72 m², die sich je Anordnung unterschiedlich in eine PV-Kollektorfläche (PV), Rahmenfläche (RF) und Verglasungsfläche (VF) unterteilt (Raumhohes Fenster: PV = 11,22 m², RF = 1,31 m², VF = 6,19 m²; Fensterband: PV = 9,72 m², RF = 1,74 m², VF = 7,26 m²; Brüstungsfenster: PV = 14,22 m², RF = 0,87 m², VF = 3,63 m²).

Die **Fassade** wird als metallische Elementfassade angesetzt, wobei der opake Teil bei einem U-Wert von 1,0 W/m²K liegt, und der U-Wert der Verglasung mit 0,59 W/m²K angenommen wurde (g-Wert: 0,59). Es wurde eine Zwischengeschoßlage angenommen, d.h. es findet mit dem darunter und dem darüber liegenden Geschoß kein Wärmeaustausch statt. Gleiches gilt für die Zwischenwände, da davon ausgegangen wird, dass jeweils wieder ein gleich konditionierter Raum angrenzt (adiabat).

Die **Heizung und Kühlung** des Referenzraums ist in der Simulation ideal geregelt. Das bedeutet, dem Raum wird genau jene thermische Leistung zugeführt, die notwendig ist, um im Heizfall eine Raumtemperatur von über 21 °C und im Kühlfall von unter 26 °C einzuhalten. In der Mitte der vier Büroräume wurde ein zusätzlicher Raum bzw. eine thermische Zone positioniert, die im Wärmeaustausch mit den vier Büroräumen steht und als „frei schwingend“ angenommen, also nicht thermisch konditioniert wird. Für die transparenten Flächen wurde eine außenliegende Verschattung angenommen. Diese wird mit einem Verschattungsgrad von 0,75 aktiviert, wenn die Raumtemperatur über 24 °C steigt. Bei Unterschreiten einer Raumtemperatur von 22 °C wird die Verschattung wieder deaktiviert. In den Anwesenheitszeiten wird eine Frischluftzufuhr von 108 m³/h angenommen, wobei von einer kontrollierten Be- und Entlüftung mit Wärmerückgewinnung (Rückgewinnungsgrad 60%) ausgegangen wird. Im Kühlfall wird die Wärmerückgewinnung deaktiviert, wenn die Außentemperatur niedriger als die Raumtemperatur ist.

Die **Anwesenheitszeiten** wurden mit 8 bis 18 Uhr von Montag bis Freitag angenommen, wobei die Anwesenheit im Büro über den Tag variiert (Mittagspausen, Besprechungen etc.). Daraus ergibt sich ein Wochenverlauf für die **Wärmeabgabe der Personen und der Ausstattung** (Computer, Bildschirme und Beleuchtung), der über das gesamte Jahr als gleichbleibend angenommen wurde.

Für die angeführten Konfigurationen hinsichtlich der Ausrichtung des Büroraums und der Fassadenkonfiguration wurden in TRNSYS Simulationen mit einer Zeitschrittweite von einer Stunde durchgeführt. Die Ergebnisse aller berechneten Varianten sind in Abbildung 3 dargestellt. Hinsichtlich der Fassadenkonfiguration zeigt sich, dass aufgrund der im Vergleich zu den Varianten A und C größeren Verglasungsfläche bei der Variante B bei allen Ausrichtungen und Standorten der höchste Kühlenergiebedarf auftritt. Der Heizenergiebedarf ist hier niedriger, da höhere solare Gewinne erzielt werden. Der PV-Ertrag ist bei Variante B am niedrigsten, da weniger Fläche für PV-Module zur Verfügung steht. Unter der Annahme, dass die Kälteerzeugung mit einer Kälteanlage im Mittel mit einer Leistungszahl (COP) von ca. 3 stattfinden kann, zeigt sich, dass dafür grundsätzlich bei allen drei Standorten für den Kühlfall genügend Energie von der Photovoltaik zur Verfügung steht. In Ljubljana und Madrid sollte auch eine Abdeckung eines Teils der Heizwärme über die Kältemaschine (Kreislaufumkehr) mit PV-Strom möglich sein.

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

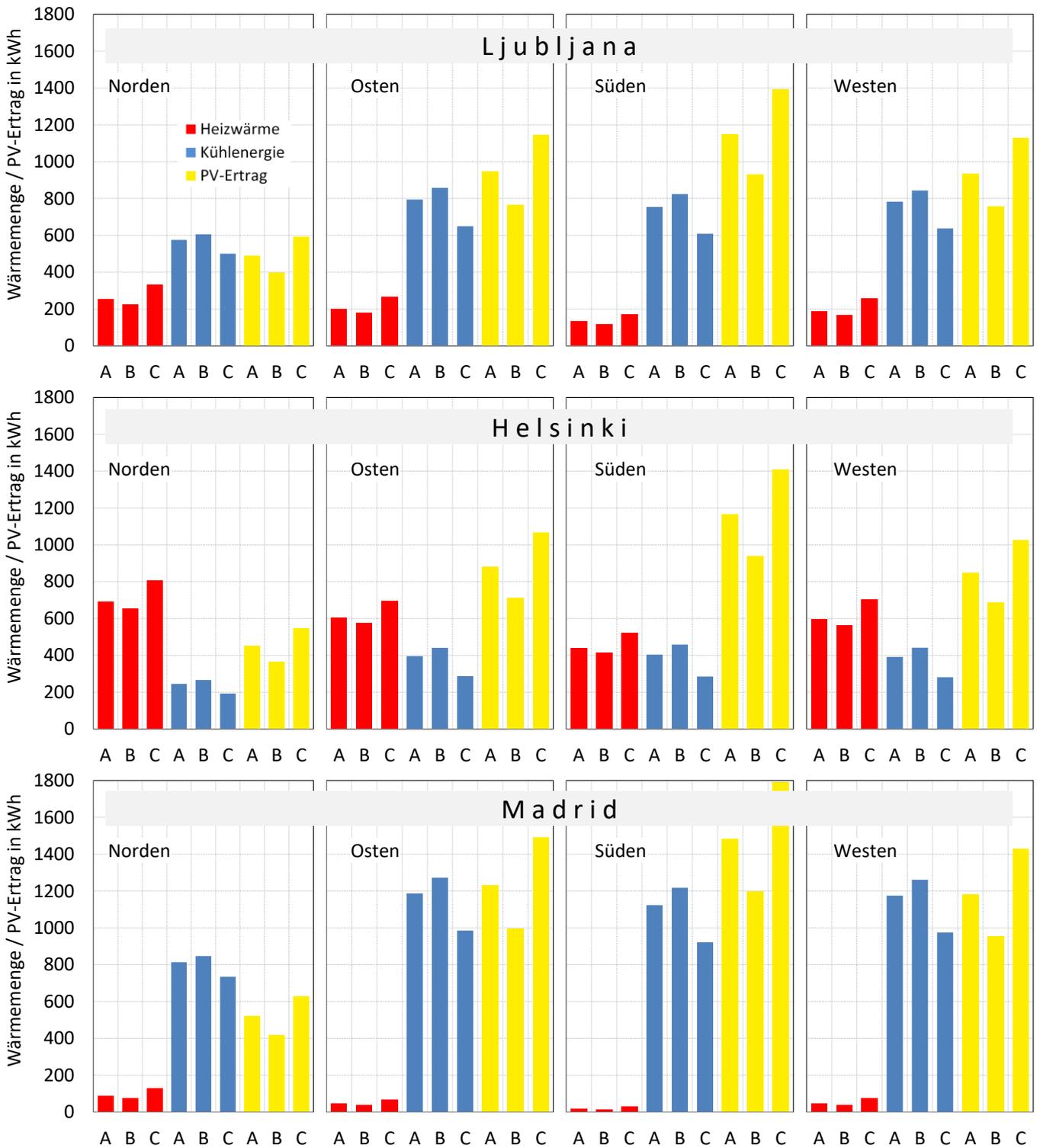


Abbildung 3: Simulationsergebnisse: Jahressummen von Heizwärme, Kühlenergie und PV-Ertrag für drei Standorte, vier Ausrichtungen und drei Fassadenkonfigurationen (A, B und C)

2.2 Zeitverschiebung zwischen Angebot und Nachfrage

Anhand der Ergebnisse der im Kapitel 2.1 beschriebenen Simulationsstudie wurde eine Analyse der zeitlichen Verschiebung zwischen Kühl-Angebot des Systems und Kühl-Nachfrage des Innenraums, sowie eine grobe Abschätzung der notwendigen Kapazität eines Energiespeichers, durchgeführt. Die relevanten Daten betreffend die auftretende Heiz- und Kühllast im Büroraum, den erzeugten Photovoltaik-Strom sowie die Raum- und Außentemperatur, standen aus den unter 2.1 beschriebenen Simulationen im Stundenraster zur Verfügung. Für die Aufbringung der notwendigen Kälteleistung durch eine Kältemaschine wurde ein stark vereinfachtes Modell einer Kompressionskältemaschine zugrunde gelegt, wobei die Verdampferleistung und die elektrische Leistungsaufnahme des Kompressors jeweils als Funktion der Raumtemperatur und der Außentemperatur angenommen wurden. Wie in Abbildung 4 qualitativ anhand eines Tagesverlaufs für ein System mit einem elektrischen Speicher dargestellt, wurde das Auftreten der zeitlichen Verläufe der Kälteleistung und der Leistungsaufnahme der Kältemaschine der auftretenden Kühllast und der PV-Leistung gegenübergestellt.

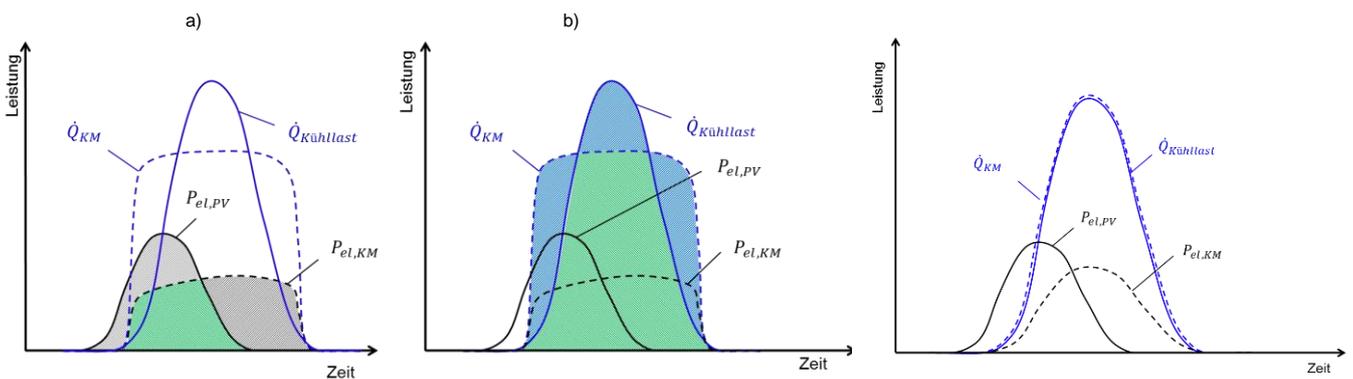


Abbildung 4: Qualitative Tagesverläufe zur Gegenüberstellung der
 a) elektrischen Leistungsaufnahme des Kompressors ($P_{el,KM}$) und der elektrischer Leistung der PV ($P_{el,PV}$)
 b) Kälteleistung der Kältemaschine (\dot{Q}_{KM}) und Kühllast im Raum ($\dot{Q}_{Kühllast}$)
 [Eckschlager, 2017]

Abbildung 5: Anpassung der Kälteleistung an den Kühlbedarf durch Takten der Kältemaschine oder Anpassung der Kompressordrehzahl

Es wurde angenommen, dass erst nach dem Auftreten einer Kühllast die Kälteleistung durch die Kältemaschine bereitgestellt wird. Durch den zeitlichen Versatz des PV-Ertrags und des elektrischen Leistungsbedarfs des Kompressors, muss elektrische Energie gespeichert werden (siehe Abbildung 4). Durch das Bereitstellen von Kälteleistung ab dem Zeitpunkt einer anfallenden Kühllast im Büro muss der zuvor überschüssig erzeugte Strom der PV-Anlage in einem elektrischen Speicher gespeichert werden, um die Energie zu späteren Zeiten bedarfsgerecht wieder aus dem Speicher beziehen zu können. Dies ist mit den grau gekennzeichneten Bereichen in Abbildung 4a dargestellt. Der grün schraffierte Bereich stellt wieder jenen Anteil des Energiebedarfes dar, der zeitgleich und ohne Speicherung gedeckt werden kann. Da kein (aktiver) thermischer Speicher vorgesehen ist, wird entgegen der Abbildung 4 angenommen, dass entweder die Kompressordrehzahl angepasst oder die Kältemaschine entsprechend getaktet wird, um die Kälteleistung im Mittel an die Kühllast anzupassen, wie in Abbildung 5 dargestellt.

Für jeden Tag des Jahres wurden das auftretende elektrische und thermische Über- und Unterangebot sowie jeweils die Differenz des Über- und Unterangebots ausgewertet. Exemplarisch sind in Abbildung 6 die Ergebnisse im Klima Ljubljana für den nach Süden orientierten Raum und die Fassadenkonfiguration A nach Abbildung 2 in Form von geordneten Dauerlinien dargestellt. Aus den Diagrammen ist ersichtlich, an wie vielen Kühltagen ein bestimmter Betrag (in kWh) an Überangebot oder Unterangebot thermisch und elektrisch überschritten wird. Ganz rechts ist auch die Differenz zwischen Über- und Unterangebot, die für jeden Tag gebildet wurde, dargestellt. Es zeigt sich bei der gewählten Auslegung, dass maximal ein Unterangebot von ca. 2 kWh aus einem elektrischen Speicher abzudecken ist, wobei dafür naturgemäß jeweils vorher ein entsprechendes Überangebot vorhanden sein muss. Aus der Betrachtung der Differenz (Abbildung 6 rechts) ist ersichtlich, dass das nicht für jeden aber für einen Großteil der betrachteten Tage der Fall ist. Zu berücksichtigen ist, dass für diese Auswertung die einzelnen Tage unabhängig voneinander betrachtet wurden, wobei davon ausgegangen wurde, dass der Speicher zu Beginn jedes Tages vollständig entladen ist. Gemäß den Resultaten sollte unter den gewählten Randbedingungen ein elektrischer Speicher mit einer Kapazität von ca. 1-2 kWh ausreichend sein, um den Kühlbedarf zu einem Großteil decken zu können.

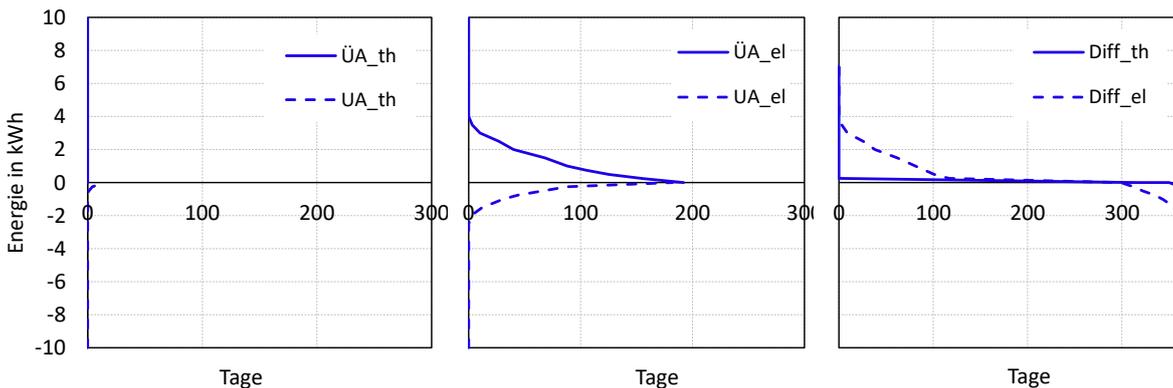


Abbildung 6: Dauerlinien von thermischem (th) und elektrischem (el) Über- und Unterangebot sowie der Differenz aus Über- und Unterangebot für den Standort Ljubljana und südliche Ausrichtung; Auslegung: 5,6 m² PV, Kältemaschine mit 0,85 kW Kälteleistung

2.3 System- und Betriebskonstellationen im Simulationsvergleich

In Vorbereitung zur Systemkonfiguration wurden mittels detaillierter Systemsimulationen verschiedene Anlagenkonfigurationen eines über Photovoltaik betriebenen Kühl- und Heizsystems analysiert. Als Anwendungsfall wird die Kühlung und Heizung des in 2.1 beschriebenen Büroraums angenommen. Die Zielsetzungen waren dabei folgende:

- Bewertung der energetischen Performance im Heiz- und im Kühlbetrieb
- Vergleich von Systemen mit und ohne elektrischem Speicher
- Bewertung von unterschiedlichen Regelungsansätzen

Eine Beschreibung der Randbedingungen, des Modellaufbaus und der simulierten Systemvarianten und deren Steuerung ist in Abschnitt 2.3.1 enthalten. Zur Beurteilung der energetischen Performance wurden Leistungskennzahlen definiert (Abschnitt 2.3.2), die einen Vergleich der untersuchten Systeme ermöglichen. Die Simulationsergebnisse sind in Abschnitt 2.3.3 dokumentiert und werden anhand der beschriebenen Leistungskennzahlen diskutiert und verglichen.

2.3.1 Systembeschreibung und Simulationssetup

Für die hier beschriebenen Simulationen wurde der gleiche Büroraum verwendet wie bereits in Abschnitt 2.1 beschrieben. Hinsichtlich der Verschattung des Gebäudes, der Lüftung, der Personenbelegung und der Beleuchtung und des Klimas wurden teilweise von Abschnitt 2.1 abweichende Annahmen getroffen, die im Folgenden beschrieben werden. Für die Fenster wurde eine außenliegende Verschattung angenommen, die mit einem Verschattungsfaktor von 0,75 aktiviert wird, wenn die Raumtemperatur über 24 °C steigt. Sinkt diese unter 22 °C, wird die Beschattung wieder deaktiviert. Die Lüftung wurde mit 90 m³/h in den Präsenzzeiten von 8:00 bis 18:00 Uhr von Montag bis Freitag definiert. Nach [SIA, 2015] wurde ein typisches Belegungsprofil mit Wärmegewinnen von 70 W und einer Feuchteabgabe von 80 g/h für jede anwesende Person angenommen. Die Wärmegewinne für die Anlagen wurden mit max. 15 W/m² angenommen, wiederum unter der Annahme eines typischen Stundenprofils an Werktagen nach [SIA, 2015] und einer jährlichen Summe von 36 kWh/m². Es wurde davon ausgegangen, dass die Beleuchtung werktags mit Wärmegewinnen von 7 W/m² von 8:00 bis 18:00 Uhr erfolgt, wenn die Sonneneinstrahlung auf die Horizontale <120 W/m² beträgt und wieder abgeschaltet wird, wenn die Strahlung 200 W/m² übersteigt, was zu Wärmegewinnen von 10 kWh/(m².a) führt. Es wird davon ausgegangen, dass sich das Gebäude in Graz, Österreich (Breitengrad 47,07°) befindet, wobei ein durchschnittlicher Klimadatensatz der Jahre 2001-2010, der mit dem Klimadatengenerator METEONORM [Meteotest, 2009] erstellt wurde, verwendet wurde. Die wichtigsten Daten des verwendeten Klimas sind: durchschnittliche / min / max / Umgebungstemperatur: 10,7 / -12,3 / 32,7 °C, Heizgradtage HDD20/12: 3102 Kd, Kühlgradtage CDD18,3: 256 Kd, Globalstrahlung auf die Horizontale: 1206 kWh/a. Unter diesen Annahmen ergibt sich bei idealer Heizung und Kühlung des Büroraums eine jährliche maximale Heizlast von 975 W und eine maximale Kühllast von 978 W (Summe aus sensibel und latent).

PV-WP Systemkonzept

Das betrachtete Anlagenkonzept besteht aus einer PV-Anlage, einem DC/AC-Wechselrichter, einer Batterie, einem Netzanschluss und einer reversiblen Kompressions-Wärmepumpe. Je nach betrachteter System-Variante werden jeweils nicht alle Systemteile verwendet, wie in 2.3.1 beschrieben. Das Gesamtsystem mit allen Komponenten ist in Abbildung 7 dargestellt. Der durch Photovoltaik aus Sonnenenergie erzeugte Gleichstrom wird von einem Wechselrichter in Wechselstrom umgewandelt, ein integrierter Laderegler speist den DC PV-Strom in die Batterie ein, damit dieser und bei Bedarf zeitversetzt genutzt werden. Wenn die verfügbare Leistung aus der PV und/oder der Batterie nicht ausreicht, um den Anlagenbedarf zu decken, wird davon ausgegangen, dass die verbleibende Leistung aus dem Netz bezogen wird. Die Batterie ist mit einem konstanten Wirkungsgrad von 0,85 über den gesamten Bereich der möglichen Lade- und Entladeleistungen und unabhängig vom Ladezustand modelliert.

Der Wirkungsgrad des DC/AC-Wechselrichters wird konstant mit 0,94 angenommen. In den Simulationen werden drei verschiedene Batteriekapazitäten (500, 1000 und 2000 Wh) berücksichtigt, um den Einfluss auf die Systemleistung zu bewerten. Dabei wird davon ausgegangen, dass die Kapazität jeweils vollständig nutzbar ist. Die Photovoltaikmodule werden mit dem Modell Type 94a [TRNSYS, 2014] simuliert, die wichtigsten Parameter der angenommenen PV-Module mit monokristallinen Zellen sind in Tabelle 1 zusammengefasst, wobei diese Daten den Modulen entsprechen, die für den Feldtest im Projekt verwendet wurden (vgl. 2.4). Der Wirkungsgrad des Maximum Power Point (MPP) Tracker wird mit 0,98 angenommen. Sechs verschiedene Größen der PV-Anlage wurden in den Simulationen (2, 3, 4, 6, 8 und 10 m²) für alle betrachteten Systemvarianten verwendet.

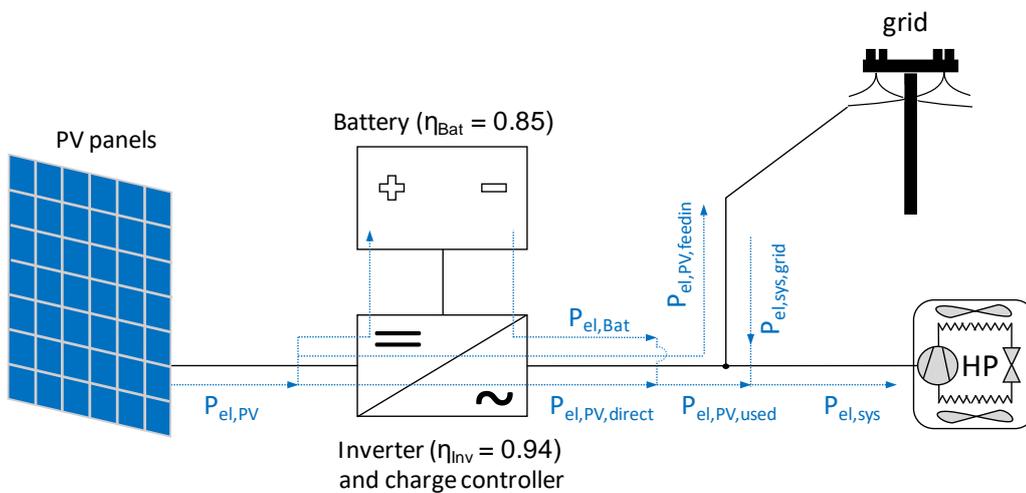


Abbildung 7: Schema des Anlagenkonzepts mit allen Komponenten, die in den verschiedenen Systemvarianten vorkommen (Batterie, Netzkopplung)

Zum Heizen und Kühlen wird eine Luft-Luft-Wärmepumpe mit reversiblen Kältemittelkreislauf eingesetzt. Im Kühlbetrieb wird die Raumluft über den Verdampfer gekühlt und die Kondensationswärme an die Umgebungsluft abgegeben. Im Heizbetrieb wird die Umgebungsluft als Wärmequelle für den Verdampfer und die Kondensationswärme zur Erwärmung der Raumluft genutzt. Der Kältemittelkreislauf ist mit dem Wärmepumpenmodell Typ 887 modelliert, das eine Weiterentwicklung des in [Dott et al., 2013] und [Hengel et al., 2014] beschriebenen Modells Typ 877 ist. Die Entfeuchtung der Luft auf der Verdampferseite wird in Abhängigkeit vom Luftvolumenstrom und der relativen Luftfeuchtigkeit am Eingang mit einem iterativen Verfahren zur Lösung der Verdampfungstemperatur und des Luftaustritts berücksichtigt. Die Modellparametrierung erfolgte nach dem im Projekt gebauten Kältemittelkreislauf, der hinsichtlich der Größe gut für die hier verwendeten Randbedingungen passt.

Die wichtigsten in den Simulationen verwendeten Parameter und Annahmen sind in Tabelle 2 aufgeführt. Es wird davon ausgegangen, dass der Verdichter einen großen Drehzahlbereich (12 bis 100%) hat, was für einige der hier betrachteten Regelstrategien von Vorteil ist, bzgl. der Fähigkeit zur Modulation und Anpassung der Leistungsaufnahme an die PV-Leistung.

Das System wurde in [TRNSYS, 2014] implementiert mit der Möglichkeit, alle im nächsten Abschnitt beschriebenen System- und Regelungsvarianten zu simulieren. Alle Simulationen wurden für ein Jahr mit einem Zeitschritt von einer Minute durchgeführt, wobei jeweils ein Monat vor dem auszuwertenden Simulationsjahr vor-simuliert wurde, um realistische Startbedingungen am Beginn des auszuwertenden Jahres zu erhalten.

Tabelle 2: Parameter des PV- und des Wärmepumpenmodells

Photovoltaik System (Type 94)	
Leistung MPP (Maximum Power Point)	137.8 W/m ²
Temperaturkoeffizient Kurzschlussstrom	0.0044 A/K
Temperaturkoeffizient Leerlaufspannung	-0.1216 V/K
Wärmepumpe (Type 887)	
Kältemittel	R134a
Kompressor Drehzahlbereich	12 – 100%
Heizleistung ¹ @ A7A20	1.59 kW
COP ¹ @ A7A20	4.04
Kälteleistung ¹ @ A35A27	2.31 kW
EER ¹ @ A35A27	3.46
Luftvolumenstrom, el. Leistung Ventilator innerer Wärmetauscher	400 m ³ /h, 30 W
Luftvolumenstrom, el. Leistung Ventilator äußerer Wärmetauscher	400 m ³ /h, 30 W

¹ bei max. Drehzahl

Systemvarianten und Regelung

Hinsichtlich Systemkonfiguration und Regelung wurden verschiedene Varianten simuliert. Abbildung 8 zeigt Simulationsergebnisse von fünf exemplarischen Sommertagen zur Veranschaulichung und besseren Verständlichkeit der verwendeten Systemkonfigurationen und Regelungsstrategien, die in den folgenden Abschnitten erläutert werden. Alle in der Abbildung gezeigten Varianten wurden mit 6 m² PV und (bei Einsatz einer Batterie im jeweiligen System) einer Batteriekapazität von 2 kWh simuliert. Die Ergebnisse der Jahressimulationen für diese System- und Regelungsvarianten werden in Abschnitt 2.3.3 diskutiert.

Ohne Batterie, ohne Netzanbindung (oBoN)

Bei dieser Variante wird davon ausgegangen, dass das System nicht ans Netz angeschlossen ist und keine Batterie installiert ist. Der Anlagenbetrieb ist somit nur möglich, wenn der Stromverbrauch geringer oder gleich dem aktuellen PV-Stromertrag ist. In der Simulation wird davon ausgegangen, dass die Verdichterdrehzahl angepasst werden kann, um den Systemverbrauch an die PV-Leistung (unter Berücksichtigung des möglichen Verdichter-Drehzahlbereichs) anzupassen. Bezüglich der Raumtemperaturregelung wird das System mit einer Hysterese von 1 K über und unter einer eingestellten Soll-Raumlufttemperatur ein- und ausgeschaltet, die mit 22 °C beim Heizen und 25 °C beim Kühlen gewählt wurde.

In Abbildung 8 (oBoN) ist das resultierende Systemverhalten an fünf exemplarischen Sommertagen zu sehen. In der ersten Hälfte des ersten Tages wird das System periodisch ein- und ausgeschaltet (Steuer-signal CF_{HP}), da die Raumtemperatur um die eingestellte Temperatur $t_{set,c}$ schwankt. Während der restlichen Zeit bleibt CF_{HP} auf ein, da die Raumtemperatur nicht unter die eingestellte Temperatur minus der Hysterese abgekühlt werden kann. Wie bereits erläutert, kann der Verdichter aber nur dann eingeschaltet werden, wenn genügend PV-Leistung zur Verfügung steht.

Mit Batterie, ohne Netzanbindung (mBoN)

Wenn eine Batterie installiert ist, kann die Last vom PV-Ertrag entkoppelt werden, d.h. das System kann immer dann betrieben werden, wenn der Ladezustand der Batterie oder der aktuelle PV-Ertrag es zulässt. Das System wird so betrieben, dass die eingestellte Solltemperatur $t_{set,c}$ gehalten wird, indem diese über die Variation der Verdichterdrehzahl über einen PID-Regler geregelt wird. Abbildung 8 (mBoN) zeigt, wie das System in Abhängigkeit vom Ladezustand der Batterie (ChargeStage_{Bat}: 1...voll geladen, 0...komplett entladen) betrieben werden kann. Im Vergleich zum System oBoN ist es im betrachteten Zeitraum besser möglich, die eingestellte Soll-Raumtemperatur zu halten, da die Anlage bei entsprechendem Ladezustand der Batterie auch betrieben werden kann, wenn zum aktuellen Zeitpunkt kein ausreichender PV-Ertrag zur Verfügung steht.

Ohne Batterie, mit Netzanbindung (oBmN)

In dieser Variante ist das System an das Netz angeschlossen, so dass es bei Bedarf immer betrieben werden kann. Es wird davon ausgegangen, dass die Raumtemperaturregelung mit dem System mBoN identisch ist, es werden der gleiche PID-Regler und die gleichen Solltemperaturen verwendet. Eine Anpassung der Verdichterdrehzahl an den Verbrauch und die aktuelle PV-Leistung wie in oBoN wird hier nicht durchgeführt, so dass die Regelung als unabhängig von der PV-Leistung betrachtet werden kann. Mit dieser Art der Steuerung und ohne Batterie nutzt die Wärmepumpe nur dann PV-Strom, wenn bei Wärmepumpenbetrieb zufällig ein PV-Ertrag vorhanden ist. Wie in Abbildung 8 (oBmN) ersichtlich ist, kann im Vergleich zu oBoN ein kleinerer Teil des verfügbaren PV-Stromes genutzt werden, da der Anlagenbetrieb unabhängig vom PV-Ertrag erfolgt, was dazu führt, dass Strom aus dem Netz bezogen wird. Der Energieaustausch mit dem Netz wird mit $P_{el,grid}$ dargestellt ($P_{el,grid} > 0$... Energiebezug, $P_{el,grid} < 0$... Energieeinspeisung).

Mit Batterie, mit Netzanbindung (mBmN)

Wenn die Anlage an das Stromnetz angeschlossen ist und die Regelung unabhängig vom PV-Ertrag ist, zeigt sich deutlich der Vorteil der Verwendung einer Batterie beim Vergleich von mBmN mit oBmN in Abbildung 8. Hier erfolgt ein Energiebezug aus dem Netz erst am vierten Tag, der einen niedrigen PV-Ertrag aufweist, nach der vollständigen Entladung der Batterie. Im Vergleich zu oBmN wird auch wesentlich weniger Energie in das Netz eingespeist.

Keine Batterie, mit Netzanbindung, angepasste Regelung (oBmNctr)

Um den Anteil der Energiebereitstellung durch die PV-Anlage zu erhöhen, wird eine angepasste Regelung implementiert, die aus zwei Teilen besteht. Zum einen wird, wie bereits in nBnG erläutert, die Verdichterdrehzahl angepasst, um den el. Anlagenverbrauch an den PV-Ertrag anzupassen, wenn der Ertrag größer als 100 W ist. Dies soll zu einer höheren Ausnutzung des vorhandenen PV-Ertrags führen. Zum anderen wird, wenn sich das System im Kühlbetrieb befindet und das erste Kriterium erfüllt ist, die eingestellte Soll-Raumlufttemperatur um 1 K (auf 24 °C) gesenkt. Ist der PV-Ertrag kleiner als 100 W, wird die Solltemperatur um 1 K (auf 26 °C) erhöht. Im Heizbetrieb wird die Solltemperatur entsprechend auf 23 erhöht und auf 21 °C gesenkt. Diese Maßnahmen sollen den Anlagenbetrieb in vermehrt in Zeiten verlagern, in denen PV-Strom vorhanden ist. Der Vergleich von oBmN und oBmNctr in Abbildung 8 zeigt, dass dies im betrachteten Zeitraum zu einer signifikanten Reduktion des Energiebezugs aus dem Netz führt. Naturgemäß verursacht diese Art der Regelung, dass die Raumtemperatur von den oben definierten Solltemperaturen abweicht, wie im Ergebnisabschnitt erläutert.

Mit Batterie, mit Netzanbindung, angepasste Steuerung (mBmNctr)

Die in oBmNctr verwendete Regelungsstrategie wird hier auch angewendet, um den Anteil des PV-Stromes im System mit einer Batterie weiter zu erhöhen. Ein Vergleich zwischen mBmN und mBmNctr zeigt, dass der Netzbezug durch diese Regelung im betrachteten Zeitraum auf Null reduziert werden kann. Im Vergleich zu mBmN wird die Batterie in der Nacht nicht entladen, da es keinen Betrieb gibt, und am vierten Tag steht noch genügend Kapazität zur Verfügung, um einen Tag mit sehr geringem PV-Ertrag zu überbrücken.

2.3.2 Leistungskennzahlen

Um einen Vergleich der analysierten Systemvarianten zu ermöglichen, wurden die folgenden Leistungskennzahlen definiert, die alle auf Jahresbasis berechnet werden. Zur besseren Verständlichkeit sind die meisten der hier verwendeten Größen in Abbildung 7 grafisch dargestellt. Der Solaranteil SSR (Self Sufficiency Ratio), der beschreibt, welchen Anteil des Stromverbrauchs von der PV-Anlage gedeckt werden kann, wird getrennt für den Heizbetrieb (h) und den Kühlbetrieb (c) berechnet. Für die Systeme ohne Netzanbindung ist SSR per Definition 100%, da der Stromverbrauch aus dem Netz $W_{el,sys,grid}$ Null ist. Der Eigenverbrauch SC (self consumption) wird verwendet, um das Verhältnis des PV-Stromes, der tatsächlich von der Anlage verbraucht wird $W_{el,PV,used}$, zum Gesamtertrag $W_{el,PV}$ (einschließlich Netzeinspeisung) zu bewerten. Für die Systeme ohne Netzanbindung wird $W_{el,PV}$ dabei als theoretisch möglicher PV-Gesamtertrag angenommen, wenn jede photovoltaisch erzeugbare kWh auch genutzt werden würde. Darüber hinaus wird die vom System aufrecht erhaltene Raumtemperatur für jede Stunde des Jahres ausgewertet, um die ev. auftretende Komfortverletzungen bewerten zu können, da ein Dauerbetrieb unabhängig von der verfügbaren Sonneneinstrahlung bei diesen Systemen nicht möglich ist.

$$W_{el,sys} = \int (P_{el,HP} + P_{el,ventilators}) dt \quad (1)$$

$$W_{el,sys,grid} = \int (P_{el,sys} - P_{el,PV,used}) dt \quad (2)$$

$$W_{el,PV,used} = \int (P_{el,PV,direct} + P_{el,Bat}) dt \quad (3)$$

$$W_{el,PV,feedin} = \int (P_{el,PV} \eta_{inv} - P_{el,PV,used}) dt \quad (4)$$

$$SSR = 1 - \frac{W_{el,sys,grid}}{W_{el,sys}} \quad (5)$$

$$SSR_c = 1 - \frac{W_{el,sys,grid,c}}{W_{el,sys,c}} \quad (6)$$

$$SSR_h = 1 - \frac{W_{el,sys,grid,h}}{W_{el,sys,h}} \quad (7)$$

$$SCR = 1 - \frac{W_{el,feedin}}{W_{el,PV} \eta_{inv}} \quad (8)$$

$P_{el,PV}$	el. Energie von PV (vor Wechselrichter)
$P_{el,HP}$	el. Energieverbrauch der Wärmepumpe
$P_{el,ventilators}$	el. Energieverbrauch der Ventilatoren
$P_{el,PV,used}$	vom System verbrauchte PV-Energie
$P_{el,PV,direct}$	vom System direkt verbrauchte PV-Energie
$P_{el,Bat}$	vom System über die Batterie bezogene PV-Energie
SSR	solarer Deckungsanteil (Self Sufficiency Ratio)
SSR _c	solarer Deckungsanteil Kühlung (Self Sufficiency Ratio Cooling)
SSR _h	solarer Deckungsanteil Heizung (Self Sufficiency Ratio Heating)
SC	PV Eigenverbrauch (Self Consumption)
$W_{el,sys,grid}$	el. Energiebezug aus dem Netz
$W_{el,feedin}$	Einspeisung von el. Energie von der PV-Anlage in das Netz

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

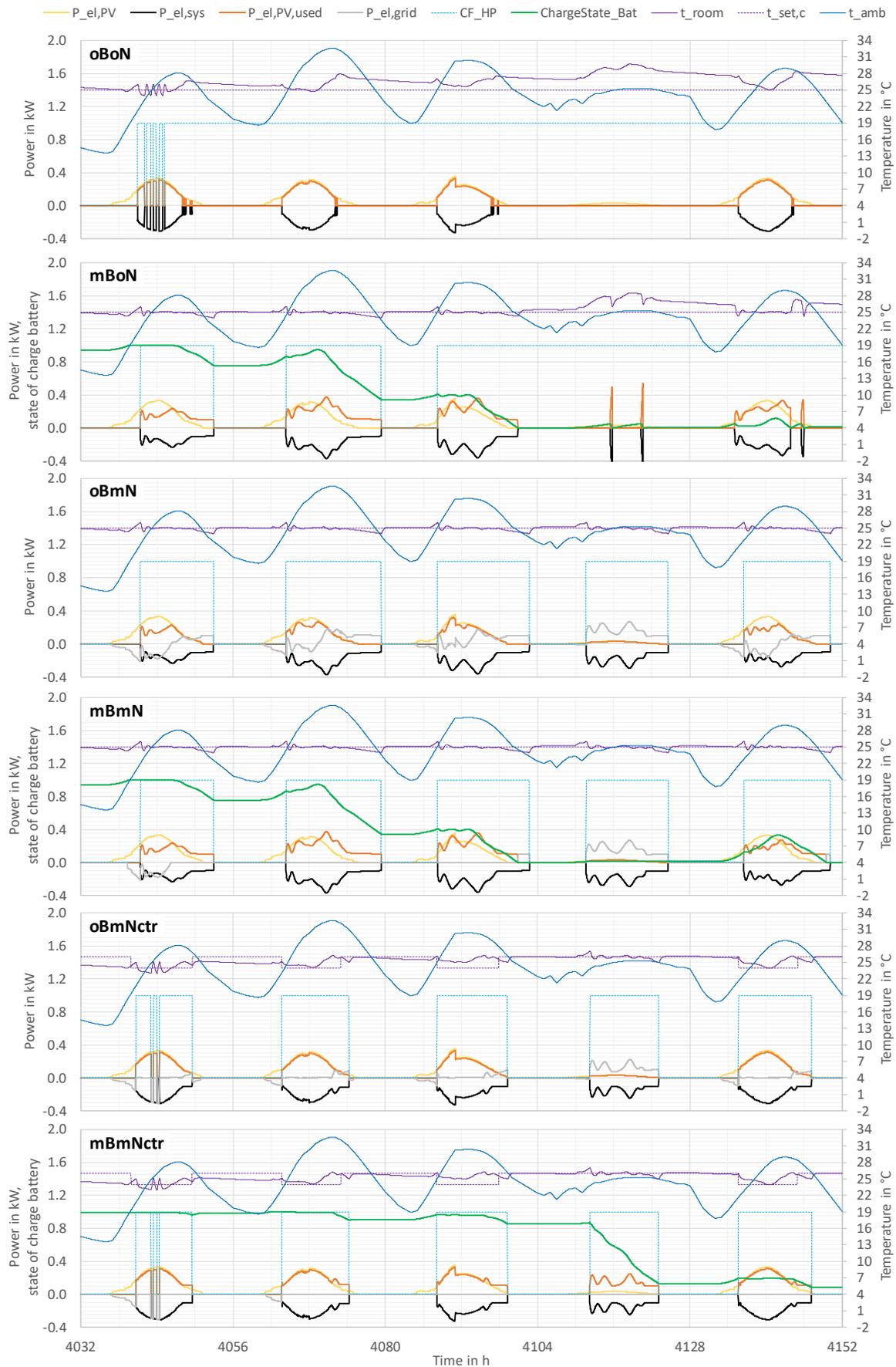


Abbildung 8: Simulationsdaten von fünf exemplarischen Sommertagen zur Veranschaulichung der verschiedenen Systemkonfigurationen und Regelungsansätze, 6 m² PV, 2 kWh Batteriekapazität (bei den Varianten „wB“)

2.3.3 Ergebnisse und Diskussion

Die Simulationsergebnisse der sechs in Abschnitt 2.3.1 beschriebenen System- und Regelungsvarianten sind in Abbildung 9 dargestellt. Mit den verwendeten Annahmen beträgt der mögliche PV-Gesamtertrag pro m² Modulfläche 125,2 kWh/(m²a), unabhängig vom betrachteten System.

Systeme ohne Netzanbindung

Für die Systeme ohne Netzanbindung (*oBoN*, *mBoN*) nimmt die Menge an thermischer Energie, die zum Kühlen (Q_c) und Heizen (Q_h) bereitgestellt werden kann, erwartungsgemäß mit der Größe der PV-Anlage zu, da diese die einzige Energiequelle ist. Die Eigenverbrauchsquote SCR nimmt mit der PV-Größe ab, da ein geringerer Anteil des bereitgestellten Stroms tatsächlich genutzt werden kann, was aber für alle simulierten Varianten gilt. Eine Ausnahme bildet das System *oBoN* beim Anstieg der PV-Fläche von 2 auf 3 m², der einen Anstieg von SCR zur Folge hat. Dies liegt an der sehr kleinen PV-Fläche, die meist nicht ausreicht, um den Verdichter (mit der angenommenen Größe) auch bei minimaler Drehzahl zu betreiben.

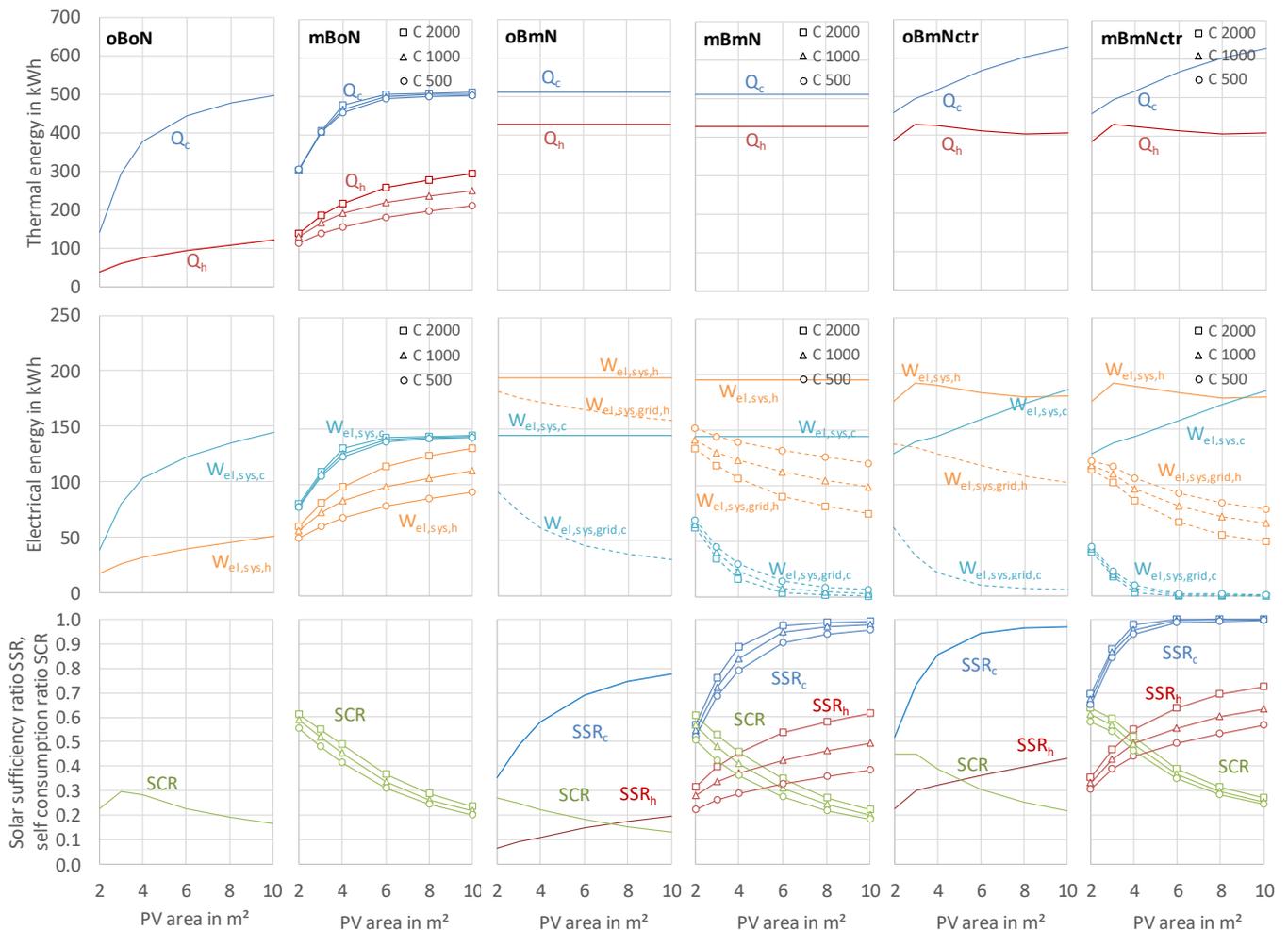


Abbildung 9: Simulationsergebnisse der simulierten Varianten

Der Vergleich von *oBoN* mit *mBoN* zeigt signifikante Vorteile für das System mit Batterie, insbesondere für kleinere PV-Anlagen und für den Heizbetrieb. Durch die Batterie kann deutlich mehr Heizenergie Q_h bereitgestellt werden, und je nach PV-Größe auch mehr Kühlenergie Q_c . Sowohl der System-Stromverbrauch, der bei den Systemen ohne Netzanbindung 100% PV-Strom ist, als auch SCR zeigen je nach PV-Größe und Kapazität der Batterie eine 1,2- bis 3-fache PV-Nutzung beim System mit (*mBoN*) im Vergleich zum System ohne Batterie (*oBoN*). Für *mBoN* wurden verschiedene Batteriekapazitäten (C2000, C1000, C500, jeweils Kapazität in Wh) betrachtet, wobei hier beim Kühlbetrieb ein im Vergleich zum Heizbetrieb eher geringer Einfluss erkennbar ist. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Heizbedarf im Gegensatz zum Kühlbedarf tendenziell in den Nachtstunden bei niedrigen Außentemperaturen ohne PV-Ertrag besteht, was die Notwendigkeit einer Batterie mit entsprechender Kapazität erhöht.

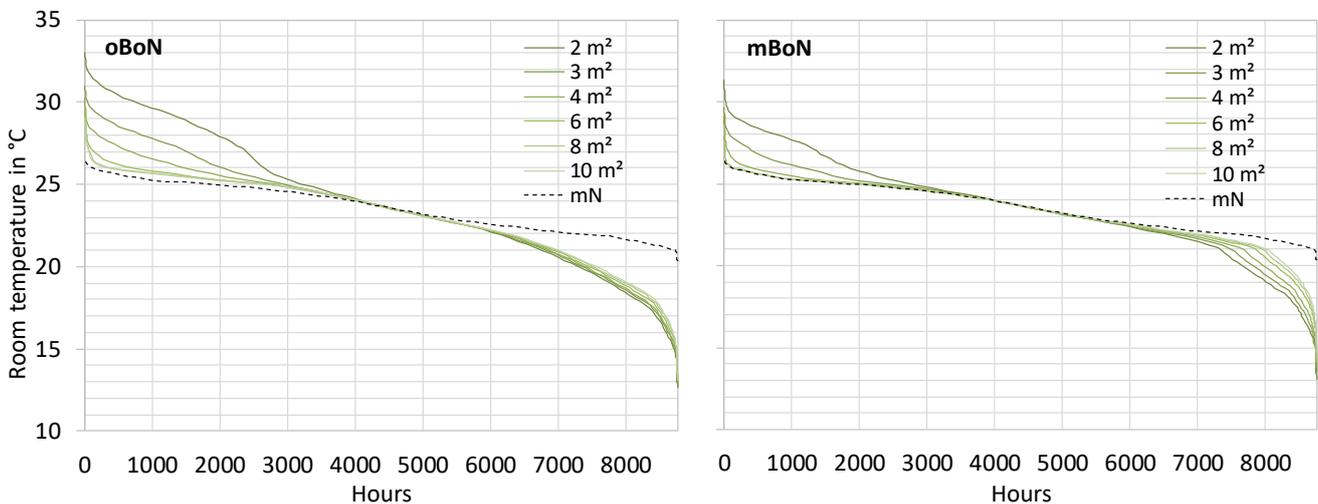


Abbildung 10: Jahresdauerlinien der operativen Raumtemperaturen für Systeme ohne Netzanbindung ohne (*oBoN*, links) und mit Batterie (*mBoN*, rechts) für verschiedene PV-Flächen im Vergleich zu einem netzgekoppelten System (grid connected)

Da der Betrieb der Systeme ohne Netzanbindung nicht immer möglich ist, ist es von Interesse, welche Raumtemperaturen mit diesen Systemen erreicht werden können. In Abbildung 10 sind die Jahresdauerlinien der Raumtemperaturen für die Systeme *oBoN* und *oBmN* dargestellt. Wie erwartet können die eingestellten Soll-Raumlufttemperaturen von 22 °C für Heizung und 25 °C für Kühlung ohne Netzananschluss nicht immer eingehalten werden. Je kleiner die PV-Fläche, desto größer ist die Abweichung von der eingestellten Temperatur und deren Dauer. Aus den bereits für Abbildung 9 dargelegten Gründen können die Raumtemperaturen im Heizungsfall bei Verwendung einer Batterie wesentlich besser gehalten werden. Zum Vergleich zeigt Abbildung 10 auch eine Dauerlinie für ein netzgekoppeltes System, bei dem die Raumtemperatur im Bereich von 21 bis 26 °C liegt. Im Kühlbetrieb können ohne Batterie (*oBoN*) bei einer PV-Fläche von ≥ 6 m² und mit Batterie (*mBoN*) bei ≥ 4 m² fast die gleichen Ergebnisse (Raumtemperaturen) wie mit einem netzgekoppelten System erzielt werden.

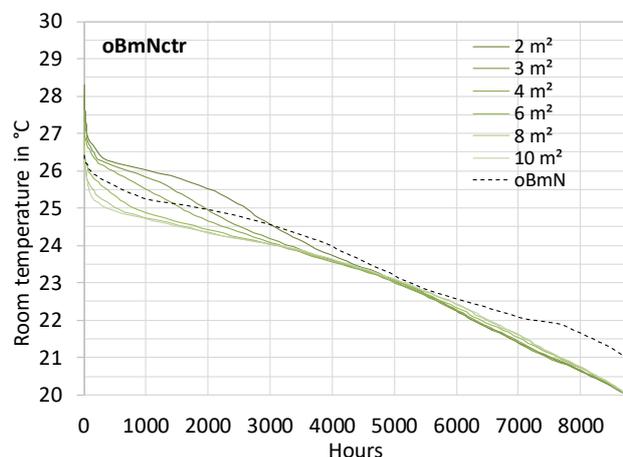
Systeme mit Netzanbindung

Für die netzgekoppelten Systeme *oBmN* und *mBmN* sind mit der angenommenen Regelung sowohl die bereitgestellte thermische Energie für Heizung (Q_h) als auch Kühlung (Q_c) unabhängig von der PV-Fläche, ebenso der Strombedarf $W_{el,sys,h}$ und $W_{el,sys,c}$. Der daraus resultierende Gesamt-Heizwärmebedarf pro m^2 Nutzfläche beträgt $17,1 \text{ kWh}/(m^2a)$ und der Kühlbedarf $20,5 \text{ kWh}/(m^2a)$. Es fällt auf, dass es für die Kühlung keinen wesentlichen Unterschied zwischen netzunabhängigen und netzgekoppelten Systemen hinsichtlich der bereitgestellten Kühlenergie Q_c gibt, wenn die PV-Fläche $\geq 6 \text{ m}^2$ ist. Zur Beheizung können die Systeme ohne Netzanbindung auch bei größeren PV-Flächen deutlich weniger Energie bereitstellen.

Für die netzgekoppelten Systeme ist die aus dem Netz bezogene Energiemenge abhängig von der verfügbaren PV-Fläche und für das System mit Batterie deutlich geringer, wiederum insbesondere im Heizbetrieb. Je nach PV-Fläche beträgt die Reduktion von $W_{el,sys,grid,h}$ gegenüber dem System ohne Batterie (*oBmN*) 17-23% bei einer Batteriekapazität von 500 Wh und 27 – 52% bei 2000 Wh. Wie bei den Systemen ohne Netzanbindung sind die Ergebnisse für den Kühlbetrieb weniger abhängig von der Batteriekapazität. Im Vergleich zu *oBmN* kann SSR_c um 17-21 Prozentpunkte (pp) bei 500 Wh und 21-31 pp bei 2000 Wh erhöht werden.

Die Verwendung der angepassten Steuerung im System ohne Batterie (*oBmNctr*) führt zu einem starken Anstieg sowohl von SSR_c (17-28 pp) als auch von SSR_h (16-24 pp) im Vergleich zu (*oBmN*), da sich der Anlagenbetrieb potenziell in Zeiten verschiebt, in denen PV-Ertrag verfügbar ist (siehe *oBmNctr* in Abbildung 8). Mit einer PV-Fläche von 6 m^2 können 94% des Strombedarfs für die Kühlung und 36% für die Heizung mit PV gedeckt werden, während es bei *oBmN* 69% bzw. 15% sind. Es ist jedoch zu erwähnen, dass die angepasste Regelung zu einer Erhöhung von $W_{el,sys,c}$ gegenüber *oBmN* bei einer PV-Fläche $\geq 6 \text{ m}^2$ führt, was auf die Reduzierung der Solltemperatur in Zeiten mit verfügbarer PV-Leistung (siehe Abschnitt 2.3.1) und die Anpassung der Verdichterdrehzahl an die verfügbare PV-Leistung zurückzuführen ist, wodurch das System mit zunehmender PV-Fläche vermehrt mit höherer Leistung läuft. Dennoch kann im Vergleich zu *oBmN* der Netzbezug $W_{el,sys,grid}$ in allen simulierten Varianten reduziert werden. Andererseits wird auch die in das Netz eingespeiste Energie $W_{el,PV,feedin}$ reduziert, bei PV-Größen $\geq 6 \text{ m}^2$ aufgrund des höheren Gesamtstromverbrauchs in größerem Ausmaß als der Netzbezug.

Abbildung 11: Jahresdauerlinien der operativen Raumtemperatur für das System *oBmNctr* für verschiedene PV-Flächen im Vergleich zu *oBmN*



Der Wärmebedarf Q_h und $W_{el,sys,h}$ werden dagegen durch die angepasste Regelung kaum beeinflusst. Wie in Abbildung 11 dargestellt, führt die angewandte Regelstrategie im Heizmodus tendenziell zu niedrigeren Raumtemperaturen. Dies liegt daran, dass hier die Erhöhung der eingestellten Raumtemperatur in Zeiten mit PV-Leistung (Abschnitt 2.3.1) tendenziell nicht zu einem Anstieg der tatsächlichen Raumtemperatur führt. Stattdessen wirkt sich eine Absenkung der Solltemperatur in Zeiten ohne Ertrag stärker aus und bewirkt eine Temperaturabsenkung, die wie in Abbildung 11 ersichtlich nicht stark von der PV-Fläche abhängt. Im Kühlbetrieb ist dies anders, speziell für PV-Flächen $\geq 6 \text{ m}^2$ führt die angewandte Regelung zu einem Temperaturabfall von ca. 0,5-1 K gegenüber dem System *oBmN* mit einer festen Solltemperatur von 25 °C. Bei den kleineren PV-Flächen steigt die Raumtemperatur tendenziell eher an, da die Erhöhung der Solltemperatur in Zeiten ohne Ertrag hier dominiert.

Abbildung 12 zeigt Stundenmittelwerte der operativen Raumtemperatur für das gesamte Simulationsjahr und nur für die Stunden mit Büronutzung (occupied) werktags von 8:00 bis 18:00 für das System *oBmN* (links) und *oBmNctr* (rechts) mit 6 m² PV. In der Abbildung sind die Komfortklassen A, B und C nach EN ISO 7730 [Austrian Standards Institute, 2006] eingezeichnet¹. Es zeigt sich beim Heizbetrieb (Außentemperatur <12 °C), dass bei *oBmNctr* in ca. 7% der Anwesenheitszeit die Temperatur unter 21 °C und damit in Kategorie B liegt, während dies bei *oBmN* nur bei 0.2% der Fall ist. Hinsichtlich der Temperaturen die im Heizbetrieb nach oben hin auftreten, sind beide Varianten sehr ähnlich. Beim Kühlbetrieb treten in 4% der Anwesenheitszeit Temperaturen über 25,5 °C (Kategorie B) und in 1% über 26 °C (Kategorie C) auf. Beim System *oBmN* liegen diese Prozentsätze bei 3% und 0%.

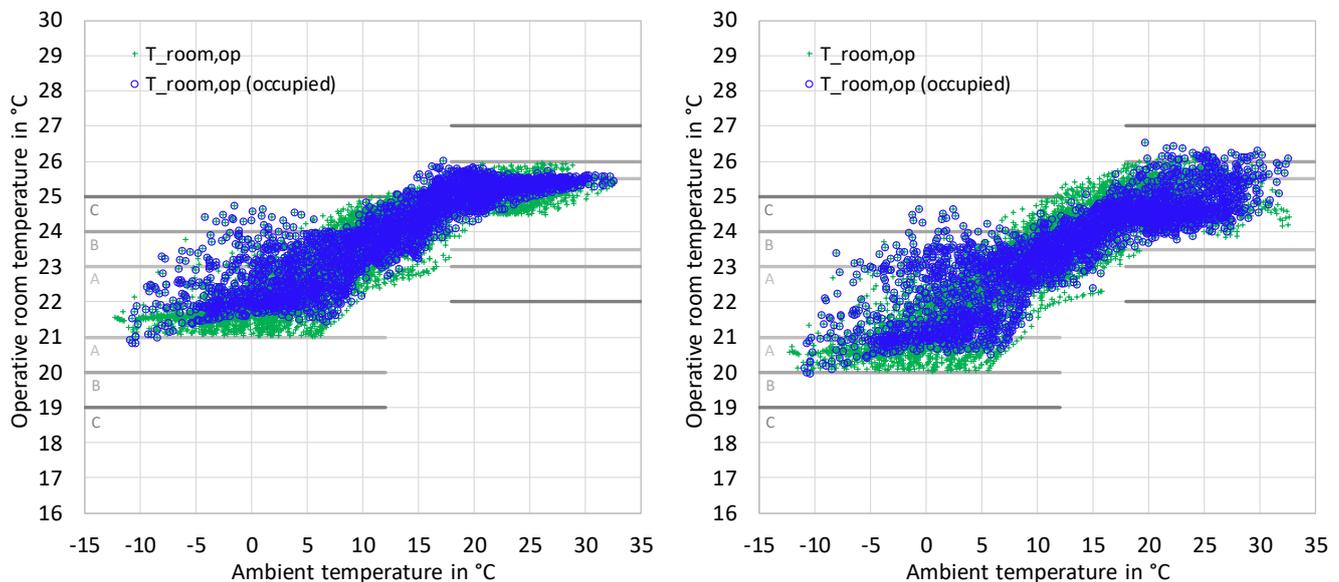


Abbildung 12: Stundenmittelwerte der operativen Raumtemperatur für das gesamte Simulationsjahr und nur für die Stunden mit Büronutzung (occupied) für die Systeme *oBmN* (links) und *oBmNctr* (rechts) mit 6 m² PV.

¹ Komfortklasse A: PPD < 6%; Komfortklasse B: PPD < 10%; Komfortklasse C: PPD < 15%
PPD: Vorausgesagter Prozentsatz an Unzufriedenen in %

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Abbildung 13 zeigt die monatlichen Energiebilanzen für die Systeme *oBmN* und *oBmNctr* mit einer PV-Fläche von 6 m². Für *oBmNctr* ist ersichtlich, wie der Netzverbrauch $W_{el,sys,grid}$ und auch die Netzeinspeisung $W_{el,feedin}$ in den verschiedenen Monaten des Jahres im Vergleich zu *oBmN* abnehmen. Der PV-Ertrag ist im Laufe der Monate relativ konstant, was auf die angenommene vertikale Installation der PV-Module in der Fassade zurückzuführen ist. Für den Ganzjahresbetrieb ist dies von Vorteil, da im Winter eine höhere PV-Leistung zur Verfügung steht als bei einer geneigten Installation.

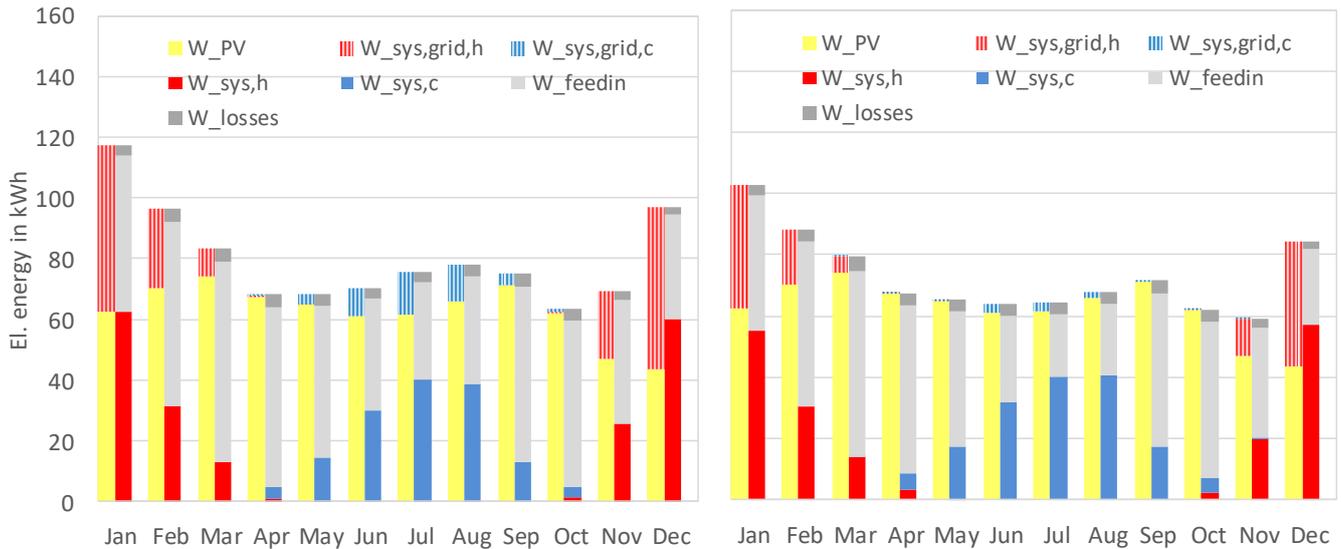


Abbildung 13: Monatliche elektrische Energiebilanz für *oBmN* (links) und *oBmNctr* (rechts) mit 6 m² PV

Auch beim netzgekoppelten System mit Batterie (*mBmNctr*) führt die Verwendung der angepassten Steuerung zu einer Reduktion des Netzverbrauchs gegenüber *oBmN* (Abbildung 9), die beim Heizen wiederum höher ist als beim Kühlen. Mit der größten PV-Anlage und Batterie können 74% des Stromverbrauchs für die Heizung mit PV gedeckt werden, SF_c ist mit 4 m² PV-Fläche bereits fast 100%.

2.4 Auswahl der photovoltaischen Energieversorgung

Die Gestaltung von Gebäudefassaden ist in der Umsetzung mit der Architektur des Gebäudes, den Eigentümern einer Immobilie und den vor Ort geltenden Regeln abzustimmen. Gängige PV-Module sind in der Regel mit dunklen Oberflächenfarben verbunden, die oftmals nicht den architektonischen Vorstellungen bzw. den bestehenden Vorschriften entsprechen. Aus dieser Motivation heraus wurden für das Projekt COOLSKIN Module mit unterschiedlicher optischer Wirkung herangezogen. Einerseits werden Module mit **hellgrauer Oberfläche** und andererseits mit einer **schwarzen Oberfläche** eingesetzt. Durch den Vergleich der beiden Modultypen soll gezeigt werden, in wie weit der Kühlbedarf auch mit PV-Modulen gedeckt werden kann, die eine hellere Oberfläche, aber auch eine geringere Effizienz aufweisen. Die Abmessungen der fassadentauglichen Glas-Glas Photovoltaikmodule wurden im Hinblick auf den Einsatz in den Versuchsobjekten im Feldtest (Abbildung 25) gewählt und in der Folge am Leistungsmesstand des AIT energietechnisch vermessen. Die hellgrauen Module sind mittels Siebdruck beschichtet „TYP1“ (Abbildung 14, links) und daher weniger leistungsfähig als die schwarz erscheinenden hocheffizienten Module „TYP2“ mit geschwärzten Busbars (Abbildung 14, rechts). Die Ergebnisse der Tests zeigen, dass die Effizienz des Modultyps „TYP1“ im Mittel um 2,6 Prozentpunkte niedriger als jene des „TYP2“ ist. Die kumulierte Leistung der vier „TYP1“ Module ist mit 952 W um etwa 18% niedriger als jene der vier „TYP2“ Module mit 1167 W. Zusätzlich wurden alle acht Module vor dem Einbau mittels Elektrolumineszenz im Hinblick auf Zellbrüche (cell cracks) getestet.

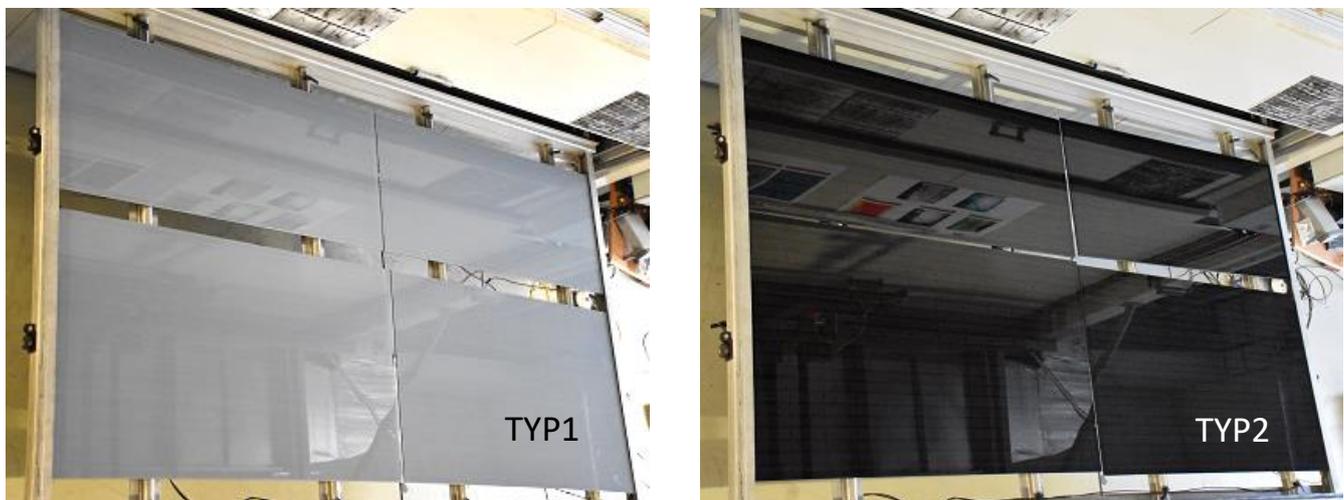


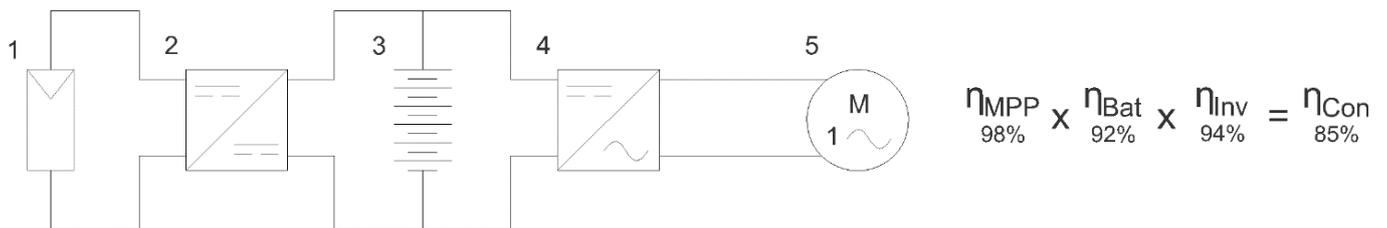
Abbildung 14: Photovoltaikmodule siebbedruckt grau (links) und schwarz emailliert (rechts) am Leistungsmesstand des AIT

2.5 Elektrischer Aufbau für Labor und Feldtest

Das elektrische System wurde im Labor des AIT aufgebaut um das Betriebsverhalten der einzelnen elektrischen Komponenten sowie des Gesamtsystems bei unterschiedlichen Last- und Ertragsbedingungen zu testen. Das Ziel war die betriebsweise experimentell abzubilden, kritisches Systemverhalten zu erkennen und für den Einsatz im Feldtest unter Realbedingungen Erkenntnisse zu gewinnen.

Als kritische Systemgrößen sind niedrige Ladezustände der Batterie, Lastbereitstellung, hohe Einschaltströme und Ladeschutzspannungen der Batterie sowie maximal zulässige Systemtemperatur durch Erhitzung der Fassade, zu sehen.

Die Photovoltaikmodule (Abbildung 14) wurden von einem statischen Sonnensimulator der ABB-Klasse bestrahlt und dienten als Energiequelle für den Kompressor der Kältemaschine und damit für den gesamten Kälteprozess. Der Solarladeregler regelte das PV-System im Maximum Power Point und regelte auch den Ladevorgang der Batterie (Regelsystem: Victron). Die Lithium-Eisen-Phosphat (LiFePO₄) Batterie (2 x 1,15 kWh) diene als Pufferspeicher zwischen PV und Kältemaschine. Die Nennspannung der Batterie von 25,6 V wurde vom Inselwechselrichter auf eine Wechselspannung mit 230 V mit 50 Hz transformiert und damit der Kompressor der Kältemaschine betrieben. Die Absicherung wurde strangseitig mit 50 A und batterie-seitig 150 A umgesetzt. Bedingt durch die Umwandlungsverluste des Solarladereglers, der Batterie und des Wechselrichters, können nicht mehr als 85% des PV-Ertrags für den Betrieb der Kältemaschine genutzt werden. Im Teillastbereich kann die Umwandlungseffizienz noch geringer sein. Die Energieverluste werden zu 100% in thermische Energie umgewandelt und müssen kontrolliert abgeführt werden. Bei Betriebstemperaturen über 60 °C schalten sich der Solarladeregler und der Wechselrichter ab.



- 1) PV-Module: grau bedruckt (TYP1); schwarz emailliert (TYP2)
- 2) MPP-Tracker (1680 W)
- 3) Batteriesystem LiFePO₄ (2 x 1,15 kWh) in Serie, Nennspannung 25,6 V; Entnahme bis 270 A
- 4) Inverter C24/1600 (1600 W),
- 5) Labortest: 280 W AC, max 10-facher Anfahrstrom, Kompressor Feldtest: 500 W AC; teillastfähig

Abbildung 15: Blockdiagramm des elektrischen Gesamtsystems mit den maximalen Umwandlungseffizienzen der Komponenten

Der **Ladevorgang** beginnt sobald die zur Verfügung stehende PV-Leistung größer ist als die Last zuzüglich der Systemverluste, und die Akkuspannung niedriger als die Ladeschlussspannung von 28,4 V ist. Der Ladevorgang wird über den Solarladeregler gesteuert, wobei dieser jeden Morgen einen neuen Ladezyklus startet. Ein beispielhafter gemessener Ladezyklus ist in Abbildung 16 ersichtlich, wobei die folgenden drei Ladungszustände bei einem Zyklus durchlaufen werden:

1. **Konstantstrom:** Während dieser Phase liefert der Regler so viel Ladestrom wie möglich, um die Batterien schnell aufzuladen.
2. **Konstantspannung:** Wenn die Batteriespannung die Einstellung für die Konstantspannung erreicht, wechselt der Regler in den Modus Konstantspannung. Treten nur schwache Entladungen auf, wird die Konstantspannungszeit kurz gehalten, um ein Überladen der Batterie zu vermeiden. Nach einer Tiefentladung wird die Konstantspannungsphase automatisch verlängert, um sicherzustellen, dass die Batterie vollständig auflädt. Die Konstantspannungsphase wird beendet, sobald der Ladestrom auf unter 2 A sinkt.
3. **Ladeerhaltungsspannung:** Während dieser Phase liegt Ladeerhaltungsspannung an der Batterie an, um sie im voll geladenen Zustand zu erhalten. Wenn die Batteriespannung mindestens 1 Minute lang unter die Ladeerhaltungsspannung abfällt, wird ein neuer Ladezyklus ausgelöst.

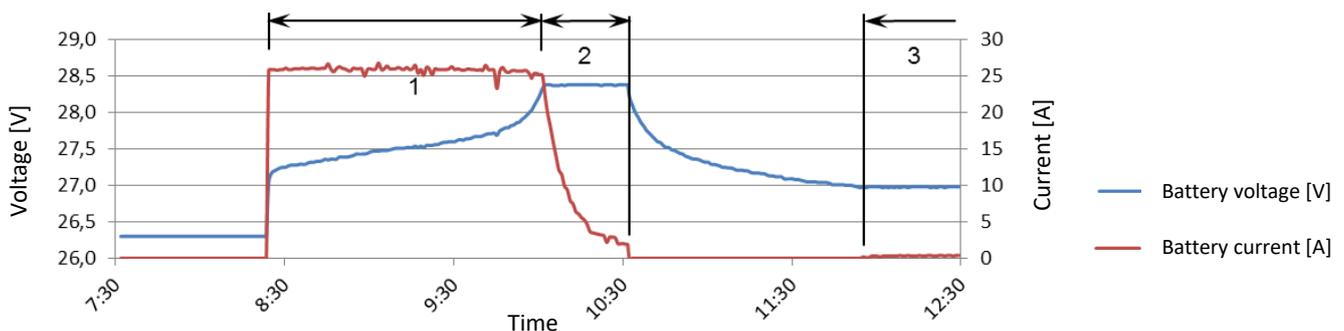


Abbildung 16: Gemessener Ladezyklus. 1 Konstantstromphase, 2 Konstantspannungsphase und 3 Ladeerhaltungsspannung

Der **Entladevorgang** beginnt sobald die Last zuzüglich etwaiger Systemverluste größer ist als der PV-Ertrag. Im gegenständlichen Versuchsaufbau wird ein 500 W Kompressor als Last verwendet. Alleine die Stand-by Verluste von Monitoringsystem, Solarladeregler und Wechselrichter betragen 10 W bis 20 W und würden im Dauerbetrieb ohne PV-Ertrag die Batterie in 5 bis 10 Tagen tiefentladen. Um eine Tiefentladung zu verhindern muss daher ein Tiefenentladeschutz eingesetzt werden. Dieser Tiefenentladeschutz wird in zwei Stufen ausgeführt. In der ersten Stufe stellt der Wechselrichter den Betrieb bei einer Batteriespannung von 23 V ein. In der zweiten Stufe wird bei einer Batteriespannung von 22 V die Batterie durch ein Relais vom restlichen elektrischen Kreis und dadurch auch von allen Stand-by Verbrauchern getrennt. In Abbildung 17 ist der Entladevorgang der Batterie ohne PV-Ertrag mit einem 500 W Kompressor als Last dargestellt. Mit der mittleren Batteriespannung von 25,8 V und einem durchschnittlichen Entladestrom von -25 A ergibt sich eine entnommene Batterieleistung von 640 W. Die Differenz aus Batterieleistung und Kompressorleistung beträgt 140 W und kann den Umwandlungsverlusten bzw. Standby-Verlusten zugeordnet werden. In diesem Testversuch wird daher eine Systemeffizienz von 78% errechnet. Laut Datenblatt beträgt die gesamte Kapazität der beiden Batterien 2304 Wh. Bei einer konstant entnommenen Leistung von 640 W wird die Batterie theoretisch in 3,6 Stunden entleert. Dieses Ergebnis konnte auch in unseren Laborversuchen bestätigt werden.

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

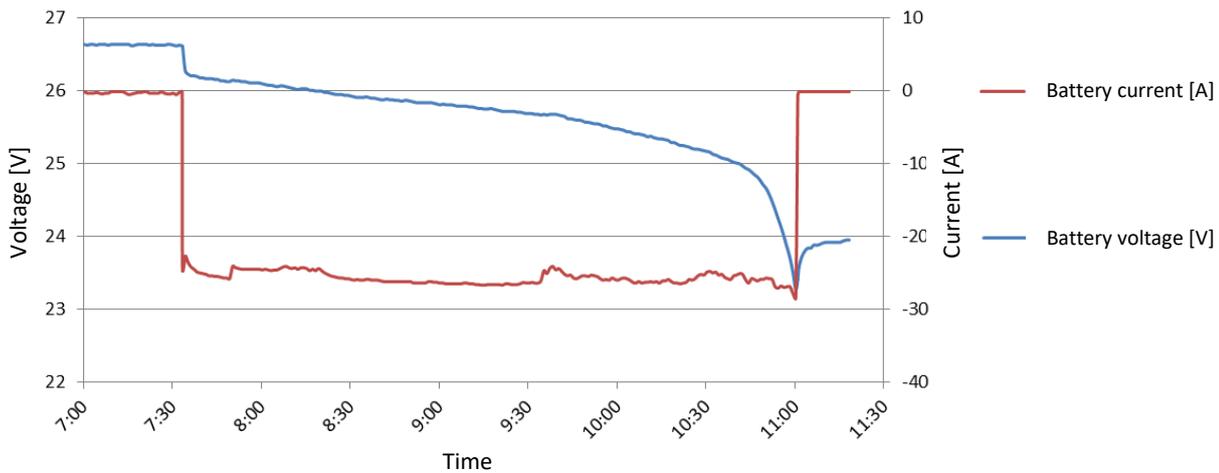


Abbildung 17: Entladevorgang mit 500 W Kompressor als Last

Es wurde insbesondere das Verhalten an der unteren **Entladegrenze** untersucht. Ist z.B. der Akku entladen und die PV-Leistung kleiner gleich der Verbraucherleistung, so kann es zu einem periodischen Wechsel zwischen Lade- und Entladezustand kommen: Durch eine Entnahmelast größer der Ladeleistung sinkt die Batteriespannung. Erreicht sie 23,0 V, wird die Last weggeschaltet. Ist nun eine geringe PV-Leistung vorhanden, wird der Akku wieder geladen. Erreicht die Akkuspannung den Einschalteschwellwert von 25,0 V, schaltet der Wechselrichter wieder ein und versorgt die Last. Der wiederholte Schaltzyklus wurde im Labor nachgestellt und ist in Abbildung 18 ersichtlich.

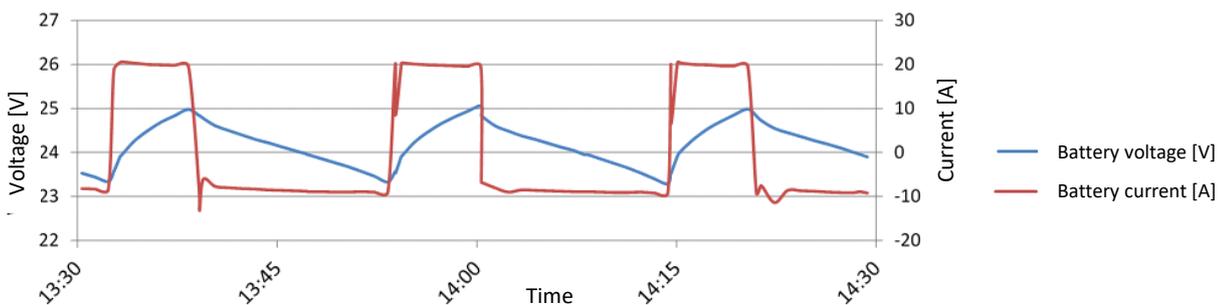


Abbildung 18: Start- Stopp- Verhalten bei entlademem Akku und höherer Verbraucherleistung als PV-Ertrag

Aus den Labormessungen ergeben sich folgende Schlussfolgerungen zum gewählten Systemaufbau:

- Bedingt durch die direkte Koppelung der Batterie mit dem Wechselrichter kann die Last nur versorgt werden, wenn die Batteriespannung einen Minimalwert überschreitet (Ausschaltsschwelle 23,0 V, Einschaltsschwelle 25,0 V). Somit ist die Batterieladung gegenüber der Lastversorgung priorisiert. Dies mag für die Langlebigkeit der Batterie von Vorteil sein, macht das System aber relativ träge. Würde eine Lastversorgung priorisiert, wäre eine Umgehung der entladenen Batterie nötig.
- Die Umwandlungsverluste sind mit mehr als 15% signifikant und machen eine aktive Kühlung unumgänglich. Durch einen DC-Kompressor könnte die Effizienz gesteigert werden.
- Ein weiterer Schwerpunkt der Laborversuche war es, alle wichtigen Systemeinstellungen zu testen. So konnten die Schwellenwerte für den Wechselrichter- und Laderegler-Betrieb definiert und getestet werden.

2.6 Entwicklung, Montage und Test der Konditionierungseinheit

Zur thermischen Raumkonditionierung ist eine Konditionierungseinheit entwickelt worden, die auf der Grundlage eines Wärmepumpenkreislaufes (Abbildung 19) funktioniert, mit dem der dahinterliegende Innenraum entweder gekühlt oder geheizt werden kann. Das linke Schaltschema beschreibt den Kühlfall, während rechts der Heizfall dargestellt ist. Die blauen Pfeile in den Schemata symbolisieren jeweils die Niederdruck-, die roten Pfeile die Hochdruckseite des Kältemittelkreislaufs. Da der Fokus auf dem Kühlfall gelegt wurde (vgl. Kapitel 1.4), war auch dieser ausschlaggebend für die Auslegung des Systems.

Das vom Kompressor auf den Hochdruck gebrachte Kältemittel R134a (3) gelangt im **Kühlfall** über ein 4-Wege Umkehrventil in den Kondensator (3–5), welcher in einem Luftkanal (oder alternativ einem Fan Coil außenseitig) positioniert ist und über die von einem Ventilator angesaugte Luft von außerhalb des Raums gekühlt wird. Anschließend wird ein interner Wärmetauscher durchflossen (5 – 6), über den das kondensierte Kältemittel Wärme an die Niederdruckseite abgibt, um einen leicht überhitzten Zustand am Eintritt des Kompressors (1–2) zu gewährleisten. Darauffolgend wird das Kältemittel über einen vorgeschalteten Filtertrockner im Expansionsventil auf das Niederdruckniveau entspannt und entweder dem Verdampfer im Innenraum (Fancoil innen) zugeführt, oder durch über einen Wasserkreislauf (Plattenwärmetauscher) verdampft (7–1''). Über das 4-Wege-Ventil gelangt das Kältemittel in einen Niederdrucksammler (Akkumulator), von wo aus es über den internen Wärmetauscher (1–2) wieder vom Kompressor angesaugt wird.

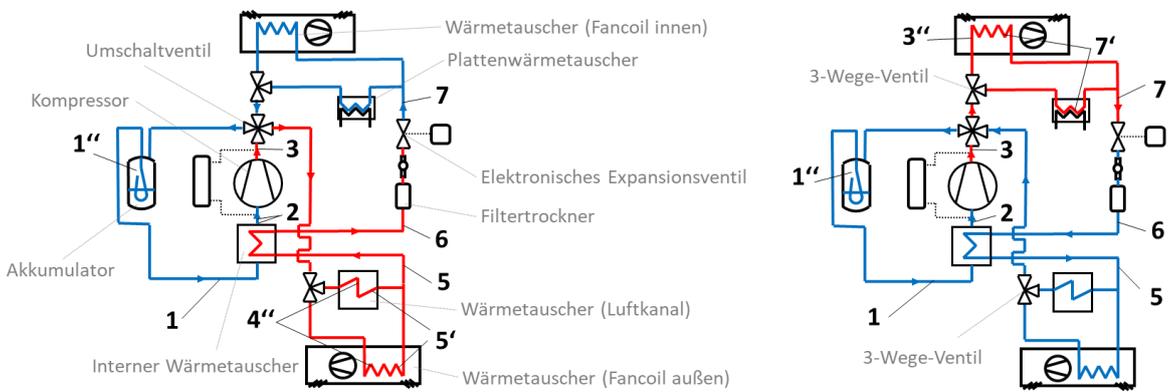


Abbildung 19: Schaltschema für den Wärmepumpenkreislauf der Konditionierungseinheit für Kühl- und Heizbetrieb

Im **Heizfall** wird die Flussrichtung des Kältemittels im 4-Wege Ventil umgekehrt, sodass das Kältemittel auf der Hochdruckseite einen dem Innenraum zugewandten Wärmetauscher zur Wärmeabgabe durchströmt (Fancoil innen oder Plattenwärmetauscher). Niederdruckseitig erfolgt die Verdampfung des Kältemittels über die Außenluft (Fancoil außen oder Wärmetauscher Luftkanal). In Abbildung 20 ist ein dreidimensionales CAD-Modell dargestellt, in dem alle wichtigen Komponenten der Konditionierungseinheit dargestellt sind. Diese besteht aus fünf Bauteilgruppen, der Stromversorgung, dem Wärmepumpenkreislauf (blau), einem im Luftkanal integrierten Wärmetauscher, dem Wasserkreislauf und zwei Fan Coils (hellgrün), einem Innen- und einem Außengerät.

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

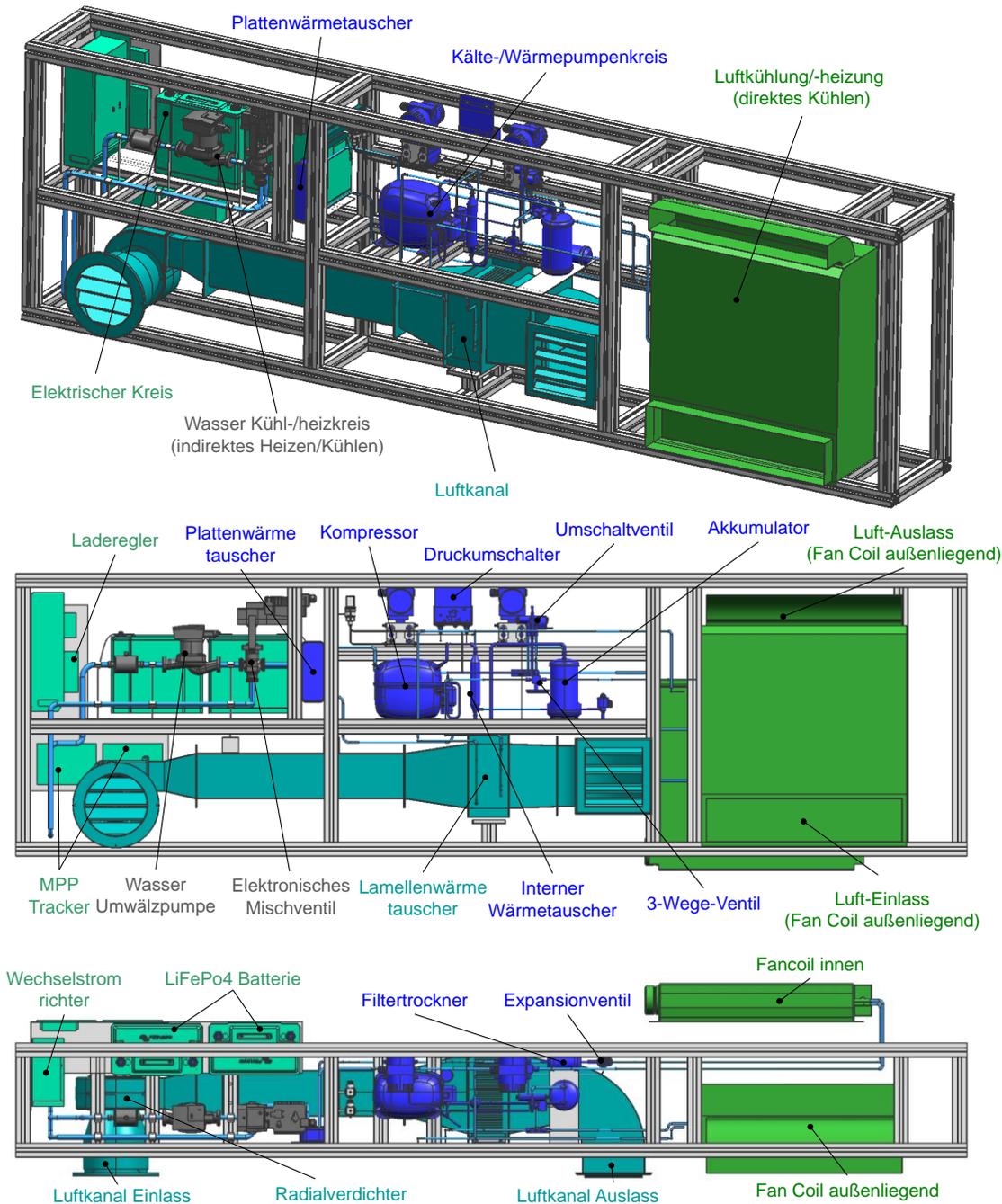


Abbildung 20: CAD-Modell der Konditionierungseinheit Bauteilgruppen der Komponenten, geordnet nach farblicher Codierung.

Über den Wärmepumpenkreislauf wird die Verbindung zum Wärmeaustauscher zwischen außen und innen hergestellt. Mit einer Abmessung von etwa 250 x 170 x 200 mm ist dieser extrem klein gebaut und damit gut geeignet für eine Integration in eine Fassade. Der Kompressor ist drehzahlregelbar mit einer elektrischen Leistungsaufnahme von bis zu 450 W. Das elektronische Expansionsventil, mit dem der Kältekreis reguliert wird, weist eine elektrischen Leistungsbezug von ca. 4 W auf. Über den im Luftkanal integrierten Lamellenwärmetauscher wird, mit Hilfe eines Radiallüfters (mit einer elektrischen Maximalleistung von 140 W) Luft von außen angesaugt um damit Kältemittel entweder zu verdampfen (Heizbetrieb) oder zu kondensieren (Kühlbetrieb).

Dadurch kann ein Luftvolumenstrom von bis zu 360 m³/h erreicht werden und dies ermöglicht eine Verdampfungsleistung von bis zu 1,2 kW. Alternativ dazu kann der Luftkanal im Betrieb durch ein Fan Coil Außengerät ersetzt werden, mit dem ein Luftdurchsatz von bis zu 470 m³/h (bei einer aufgewendeten elektrischen Leistung von ca. 65 W) realisierbar ist und eine Leistung bis zu 2,1 kW ermöglicht wird. Auf der Innenseite stehen zwei Systeme zur thermischen Konditionierung des Raums zur Verfügung. Das erste ist ein System, das aus einem Fan Coil Innengerät besteht, mit dem die Raumluft angesaugt, über einen Wärmetauscher mit einer maximalen Verdampfungsleistung von bis zu 1,7 kW (elektrischer Leistungsaufwand ca. 17 W) entsprechend konditioniert und dann wieder in den Raum geblasen wird. In einer zweiten Variante wird der Wärmepumpenkreislauf über einen Plattenwärmetauscher mit einem Wasserkreislauf in der Betondecke verbunden, der zum Heizen oder Kühlen verwendet werden kann. Die wichtigsten Komponenten im Wasserkreis sind neben dem Plattenwärmetauscher ein Mischventil mit einem Stellantrieb (4,5 W elektrische Leistung) zur Regulierung der Vorlauftemperatur und einer Umwälzpumpe die ca. 10 W an elektrischer Leistung benötigt. Die letzte Bauteilgruppe der Konditionierungseinheit setzt sich aus den Komponenten zur Stromumwandlung und –Speicherung zusammen.

Die Konditionierungseinheit wurde in eine Aluminium-Rahmenkonstruktion (2,97 x 0,89 x 0,36 m) eingebaut. Die Lage der einzelnen Komponenten wurde derart gewählt, dass ausreichend Zugänglichkeit für Wartung und Umbau gegeben ist. Zudem musste genügend Raum für die umfangreiche messtechnische Ausrüstung vorgesehen werden. Der gesamte Aufbau richtet sich nach den Notwendigkeiten eines Forschungsprojektes und ist bzgl. der Auswahl der Einzelkomponenten, deren Anordnung und dem Gesamt-Platzbedarf nicht auf den Einsatz in realen Fassadensystemen konfiguriert. Mit dem Thema der Implementierung in reale Fassadensysteme beschäftigt sich das Kapitel 5. Abbildung 21 zeigt den Einbau der elektrischen Komponenten im Labor.



Abbildung 21: Einbau der elektrischen Komponenten in die Konditionierungseinheit im Labor des Institutes für Wärmetechnik

2.7 Mess- und Regelungskonzept der Konditionierungseinheit

Dieses Kapitel verschafft einen Überblick über die eingebaute Messtechnik und Sensorik, die im Labor des IWT vor dem Einbau in das Versuchsobjekt kalibriert und ausgiebig getestet wurde. Das Messschema der Konditionierungseinheit ist in Abbildung 22 und Abbildung 23 dargestellt. Gemessen werden zunächst alle zur Leistungsermittlung notwendigen Fluidtemperaturen vor und nach den Wärmetauschern. Für den Luftkanal und den Wasserkreislauf werden auch die Massen- bzw. Volumenströme mitgemessen um die Kühl/Heizleistung berechnen zu können, bei den Fan Coils wurden Herstellerdaten verwendet. Zusätzliche Temperatursensoren wurden installiert, um die thermodynamischen Zustände des Kältemittels an alle relevanten Punkten erfassen zu können. Außerdem werden zu diesem Zweck auch die Absolutdrücke auf der Hoch- und der Niederdruckseite sowie der Differenzdruck über den Verdampfer und Kondensator gemessen.

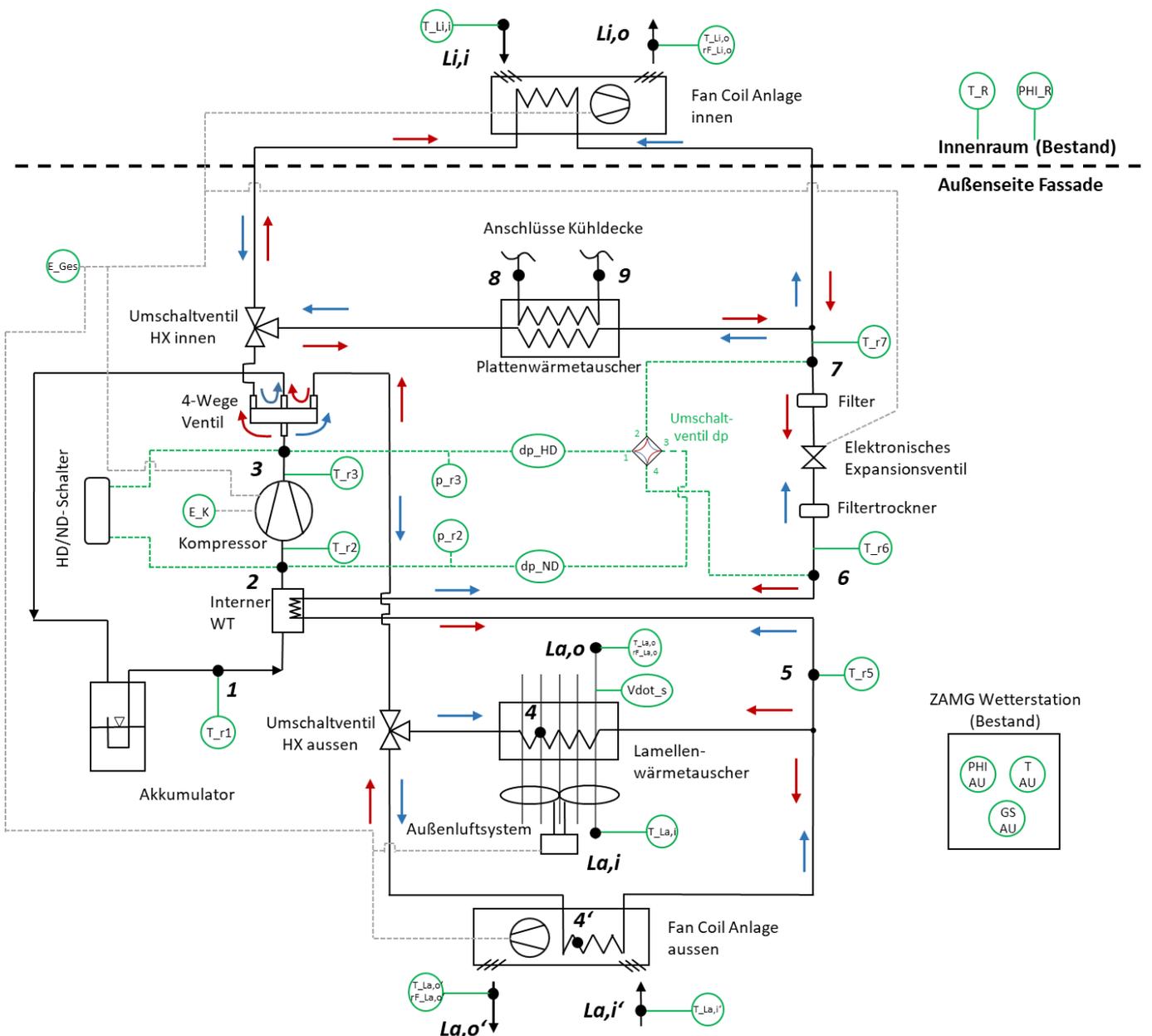


Abbildung 22: Messschema der Konditionierungseinheit [Schmiedbauer, 2018]

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

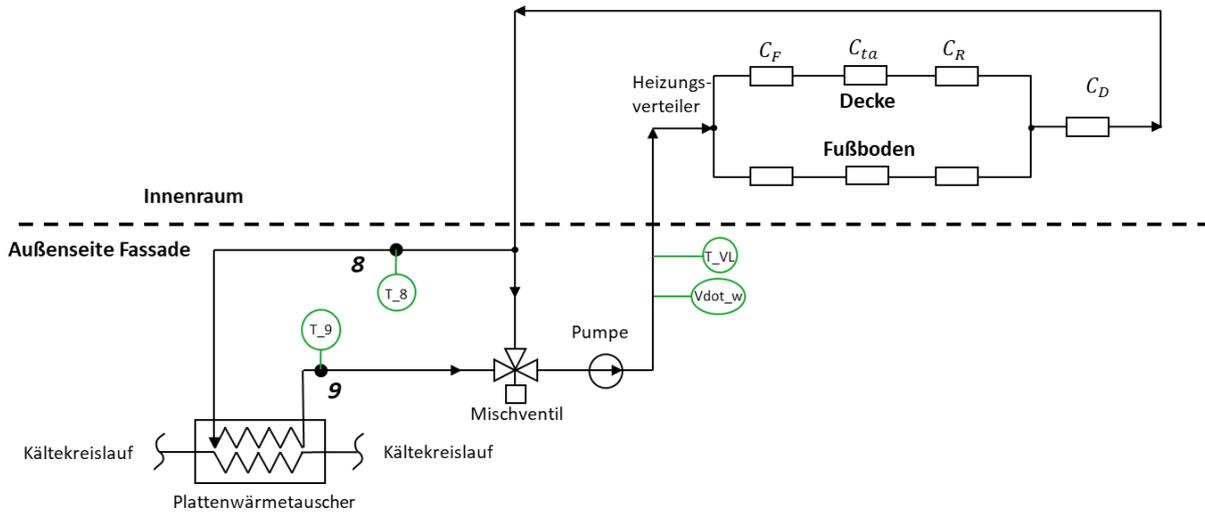


Abbildung 23: Messschema des Wasserkreises zur thermischen Bauteilaktivierung [Schmiedbauer, 2018]

Für die Differenzdruckmessung ist ein Umschaltventil für die Messung im Heiz- und im Kühlbetrieb vorgesehen. In den von Luft durchströmten Kanälen ist zusätzlich auch die Messung der Luftfeuchte notwendig, um den Zustand der Luft genau bestimmen zu können. Eine tabellarische Zusammenfassung der Messstellen ist in Tabelle 3 enthalten.

Tabelle 3: Zusammenfassung der Messstellen

Messstellen-Bez.	Messgröße	Medium	Messprinzip	Anzahl	Beschreibung
T_r1..3	Temperatur	Kältemittel	TET 0.5 mm Mantel	3	Kältemittelkreis
T_r5..7	Temperatur	Kältemittel	TET 0.5 mm Mantel	3	Kältemittelkreis
T_L1..10	Temperatur	Luft	TET Schweißpunkt	10	für Messgitter
T_La,i	Temperatur	Luft	TET 3 mm Mantel	1	Eintritt Luft aussen 1
T_La,o	Temperatur	Luft	kombinierter T/rF Sensor	1	Austritt Luft aussen 1
rF_La,o	rel. Luftfeuchte	Luft	kombinierter T/rF Sensor	1	Austritt Luft aussen 1
T_La,i'	Temperatur	Luft	TET 3 mm Mantel	1	Eintritt Luft aussen 2
T_La,o'	Temperatur	Luft	kombinierter T/rF Sensor	1	Austritt Luft aussen 2
rF_La,o'	rel. Luftfeuchte	Luft	kombinierter T/rF Sensor	1	Austritt Luft aussen 2
T_Li,i	Temperatur	Luft	TET 3 mm Mantel	1	Eintritt Luft innen
T_Li,o	Temperatur	Luft	kombinierter T/rF Sensor	1	Austritt Luft innen
rF_Li,o	rel. Luftfeuchte	Luft	kombinierter T/rF Sensor	1	Austritt Luft innen
T_VL	Temperatur	Wasser	Pt100 3 mm Mantel	1	Vorlauftemp. Kühldecke
T_8	Temperatur	Wasser	Pt100 3 mm	1	Rücklauf HX wasserseitig
T_9	Temperatur	Wasser	Pt100 3 mm	1	Vorlauf HX wasserseitig
Vdot_w	Durchfluss	Wasser	magnetisch induktiv	1	Volumenstrom Wasser
Vdot_s	Durchfluss	Luft	Staugitter bzw. über Dp	1	Volumenstrom Luft im Kanal
p_r2..3	Druck	Kältemittel	Absolutdrucksensor	2	Hoch- und Niederdruck KM-Kreis
dp_HD, dp_ND	Druckdifferenz	Kältemittel	Differenzdrucksensor	2	Druckabfall Hochdruckseite
E_K	Stromzähler Kompressor	Strom	Energiezähler	1	Druckabfall Niederdruckseite
E_Ges	Stromzähler Gesamt	Strom	Energiezähler	1	Druckabfall Niederdruckseite

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Die Regelung der Konditionierungseinheit wurde mit Hilfe der Software Labview realisiert. Die Variation in der Heiz-/Kühlleistung der Wärmepumpe wurde über einen PID-Regler umgesetzt, der über die Drehzahl des Kompressors (2000 – 4500 1/min) die Raumtemperatur auf einen vorgegebenen Sollwert regelt. Die durchgeführten Messungen haben aber gezeigt, dass der Kompressor aufgrund der (Über-)Dimensionierung bei der vorliegenden Last meist mit der Mindestdrehzahl betrieben wurde. Über vorgegebene Ein- und Ausschalt-Grenztemperaturen wird entschieden, ob der Kompressor ein- oder ausgeschaltet werden soll. In Abbildung 24 ist als Beispiel die Regelung des Kompressors für den Kühlbetrieb schematisch dargestellt.

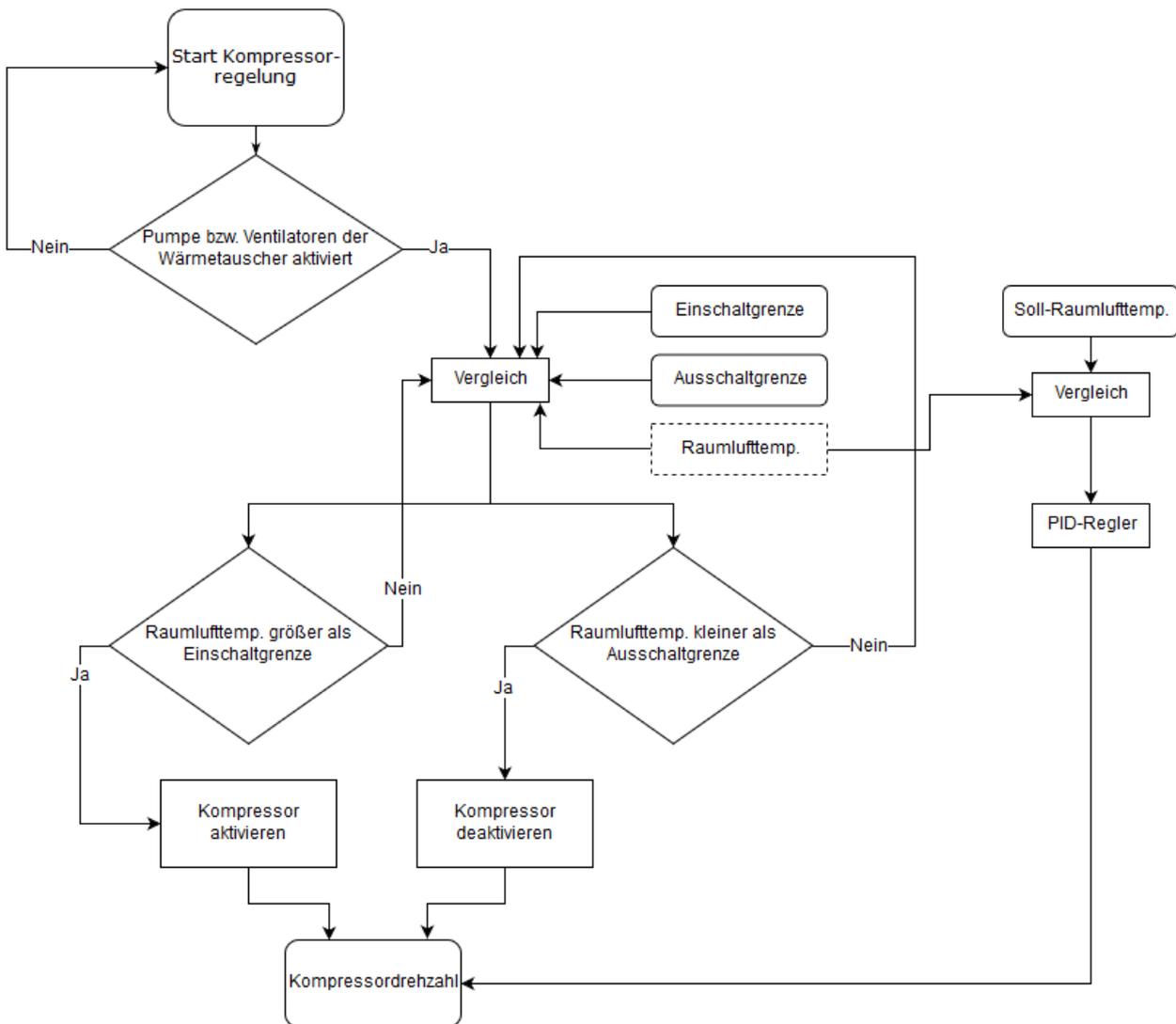


Abbildung 24: Schematische Darstellung der Regelung des Kompressors im Heiz- und im Kühlbetrieb [Zimmerberger, 2019]

3 Experimenteller Einsatz im Feldtest

Nachdem die entwickelte Konditionierungseinheit im Labor des Institutes für Wärmetechnik assembliert und getestet war, konnte der Feldversuch in Angriff genommen werden. Dazu wurde die Konditionierungseinheit in das Versuchsobjekt am Campus der TU Graz eingebaut und mit den getesteten PV-Fassadenpaneelen (Abbildung 14) und den elektrischen Komponenten (Abbildung 15) zu einem Gesamtsystem verbunden. Ziel des Feldversuches war, das Gesamtsystem unter realen klimatischen Bedingungen zu betreiben, die Funktionalität unterschiedlicher Betriebsweisen zu testen und die Auswirkungen der über die Konditionierungseinheit bereitgestellten Kühl- bzw. Heizleistung auf einen Büroraum detailliert messtechnisch zu erfassen und zu analysieren.

3.1 Versuchsaufbau und Messkonzept

Aus einem früheren Forschungsprojekt standen am Campus der TU Graz zwei identische Versuchsobjekte zur Verfügung, für die bereits detailliert nachgewiesen war, dass sie sich thermisch nahezu identisch verhalten. Ein Versuchsobjekt (Abbildung 25, links) wurde mit hellgrauen Photovoltaikmodulen (Typ 1) und ein Versuchsobjekt (Abbildung 25, rechts) mit den mittels Siebdruck schwarz emaillierten Photovoltaikmodulen (Typ 2) ausgestattet (vgl. Abbildung 14). Die Konditionierungseinheit wurde somit im Versuchsobjekt mit den schwarzen Photovoltaikmodulen implementiert. Um auch in Bezug auf die bauphysikalischen Aufbauten der beiden Versuchsobjekte Ähnlichkeit zu erlangen, wurde das andere Versuchsobjekt mit einem entsprechenden Dummy ausgestattet. Somit waren die Voraussetzungen gegeben, neben der Analyse des konditionierten Versuchsobjektes, auch den Unterschied zu einem gleichartigen, unkonditionierten Versuchsobjekt untersuchen zu können. Durch den Vergleich der beiden Modultypen sollte zudem gezeigt werden, in wie weit der Energiebedarf der Kältemaschine auch mit helleren und weniger effizienten PV-Modulen gedeckt werden kann.



Abbildung 25: Versuchsobjekte aus südlicher Richtung, links unkonditioniert, rechts konditioniert

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Die Nutzfläche je Versuchsobjekt beträgt 13,49 m², die beiden Objekte bestehen aus Stahlbeton mit einem eingesetzten Fensterrahmenprofil, geteilt in drei Fenster auf der Südseite und einer Porenbetonmauer mit Tür auf der Nordseite. Die Versuchsobjekte sind seitlich mit einer 200 mm dicken Wärmedämmung aus expandiertem Polystyrol (EPS) ausgestattet und das Dach wurde mit einer 250 mm dicken Mineralwolle-dämmung und einem Trapezblech ausgeführt. Hinter den Versuchsobjekten befindet sich ein Versorgungscontainer, der die gesamte Infrastruktur zum Betrieb der Objekte sowie zur Messdatenaufzeichnung beinhaltet. In Abbildung 26 ist ein dreidimensionales CAD-Modell der Objekte dargestellt, links daneben ist ein Foto von der Wetterstation abgebildet, die in ca. 20 m Entfernung (süd-westlich) von den Versuchsobjekten aufgestellt wurde. Die **Wetterstation** wurde von der ZAMG (Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik) installiert und gewartet. Die Messwerte (insbesondere die Außentemperatur und Strahlung) waren sowohl für die Regelung der Kälte- bzw. Wärmeversorgung als auch für die anschließenden Analysen in Bezug auf die Effektivität des Systems von großer Bedeutung.

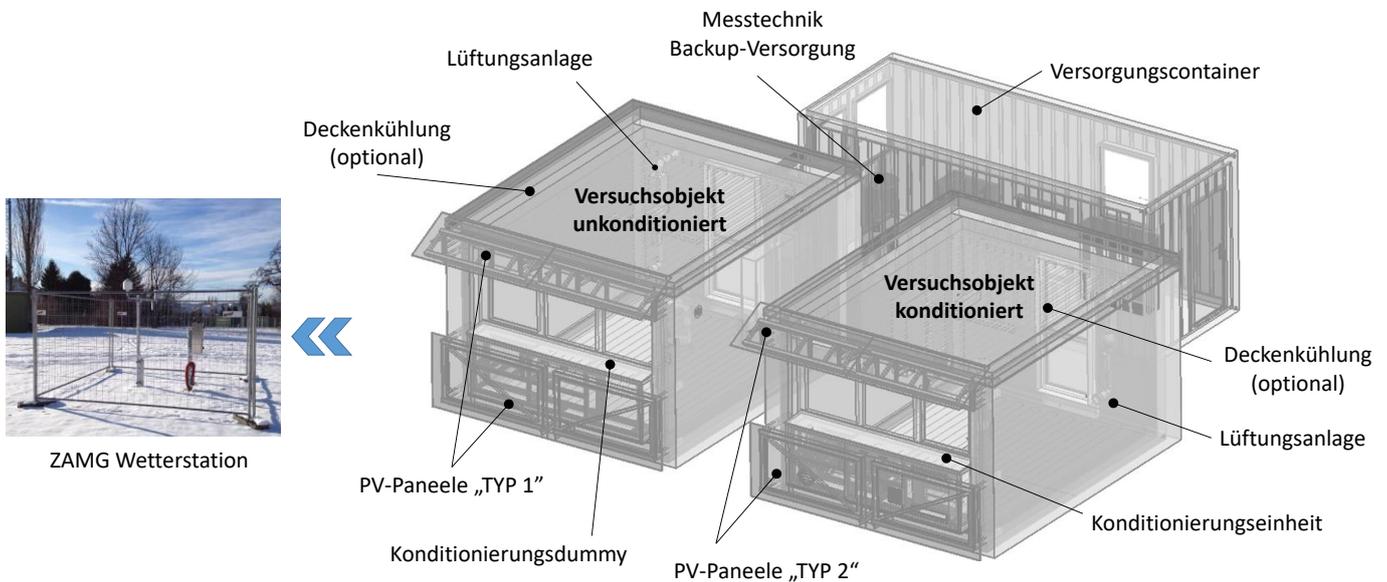


Abbildung 26: CAD-Modell der Versuchsobjekte und des Versorgungscontainers mit ZAMG Wetterstation

Eine zu lösende Frage betraf den Umgang mit den unterschiedlichen Wärmeausdehnungs-Koeffizienten der Materialien ($\alpha = 23 \times 10^{-6}$, $\alpha = \text{Stahl } 11,9 \times 10^{-6}$, $\alpha = \text{Glas } 8 \times 10^{-6}$) der Unterkonstruktion zur Befestigung der PV-Paneele. Um sicherzugehen, dass sich die temperaturbedingten Spannungen ausgleichen können, wurde eine Schienenkonstruktion entwickelt, die Ausgleichsbewegungen ermöglicht. Die Unterkonstruktion wurde aus Aluminium-Rohrprofilen aufgebaut, wobei im Besonderen darauf geachtet wurde, an Stellen maximaler Biegung besonders biegesteife Profile zu verwenden. Zuerst wurde ein Aluminium-Rahmen geschweißt auf welchem die PV-Module aufgeklebt wurden. Die Beweglichkeit wurde mit Anschraubbändern aus rostfreiem Stahl realisiert. Die Module über den Fenstern lassen sich anstellen (d.h. kippen) um den Fall eines Dachüberstands einstellen zu können (Abbildung 27, links). Die Unterkonstruktionen sind zudem im Bereich der Brüstung mit Scharnieren ausgestattet und können wie eine Tür geöffnet werden, um die Zugänglichkeit zu den energietechnischen Einrichtungen von außen zu ermöglichen (Abbildung 27, rechts).

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG



Abbildung 27: links ausgestellte obere PV-Paneele und rechts aufklappbare untere PV-Paneele

Die **Konditionierungseinheit** wurde, außerhalb der Rahmenkonstruktion (vgl. Abbildung 21), mit einem Dämmpaneel eingehaust und im Parapet des „Versuchsobjekt konditioniert“ eingebaut. Parallel wurde eine zweite, geometrisch idente Rahmenkonstruktion gefertigt, die mit einem identen Dämmpaneel eingehaust wurde. Dieser Dummy wurde im „Versuchsobjekt unkonditioniert“ eingebaut um eine bauphysikalisch zumindest sehr äquivalente Fassadenkonstruktion zu erhalten. Abbildung 28 zeigt ein Foto der eingebauten Konditionierungseinheit vom Innenraum aus. Links auf dem Foto ist das Fan Coil Innengerät zu sehen, über die Öffnung oben wird die konditionierte Luft im Fan Coil Betrieb in den Raum befördert, über die Öffnung unten wird die Luft zur Konditionierung angesaugt. Rechts sind die Akkus und die Komponenten zur Stromumwandlung sowie zur Regelung der Stromspeicherung zu sehen. In der Mitte befindet sich der Wärmepumpenkreislauf und darunter ist der Luftkanal mit dem integrierten Wärmetauscher zu sehen. Im Betrieb sind die innenraumseitigen Öffnungen mit Abdeckungen verschlossen.



Abbildung 28: Konditionierungseinheit im Versuchsobjekt konditioniert von innen

Die **internen Wärmelasten** in den beiden Versuchsobjekten werden von Montag bis Freitag von 08:00 bis 16:00 Uhr aktiviert. Die Last von jeweils 300 W pro Versuchsobjekt repräsentiert die Wärmeentwicklung von zwei, in dem Raum arbeitenden Personen mitsamt Büroequipment. Um während des Zeitraums, in dem die internen Lasten aktiv sind, den für den Bürobetrieb vorgeschriebenen Luftwechsel (von 30 m³/h pro Person) zu gewährleisten, wird die Raumlüftung synchron zu den internen Wärmelasten mit einem Volumenstrom von 60 m³/h betrieben. Das **Datenerfassungssystem** im Versorgungscontainer zeichnet alle Messwerte auf und speichert diese in den Messdatenfiles. Diese beinhalten die inneren Oberflächen-temperaturen der Wände, die Bauteiltemperaturen im Fußboden und der Decke sowie die Feuchte und Temperatur der Raumluft, jeweils für beide Versuchsobjekte. Zusätzlich sind in diesem File auch noch die internen Wärmelasten enthalten. Die Messstellen sind mit einer Kurzbeschreibung in Tabelle 4 dargestellt.

Tabelle 4: Für die Feldtests relevanten Messstellen der Versuchsobjekte

Sensorbezeichnung	Abkürzung	Messgröße	Details	Beschreibung
+S02=R001-B221	Tsurf_i_O_Wand	Temperatur	Temperaturfühler/Oberfläche -35/+100°C	Versuchsobjekt unkontrolliert, Innenwand Ost
+S02=R001-B222	Tsurf_i_W_Wand	Temperatur	Temperaturfühler/Oberfläche -35/+100°C	Versuchsobjekt unkontrolliert, Innenwand West
+S02=R001-B223	Tsurf_i_S_Portal	Temperatur	Temperaturfühler/Oberfläche -35/+100°C	Versuchsobjekt unkontrolliert, Innenwand Süd
+S02=R001-B224	Tsurf_i_N_Wand	Temperatur	Temperaturfühler/Oberfläche -35/+100°C	Versuchsobjekt unkontrolliert, Innenwand Nord
+S02=R001-B225	Tsurf_i_Decke	Temperatur	Temperaturfühler/Oberfläche -35/+100°C	Versuchsobjekt unkontrolliert, Innenwand Decke
+S02=R001-B226	Tsurf_i_Boden	Temperatur	Temperaturfühler/Oberfläche -35/+100°C	Versuchsobjekt unkontrolliert, Innenwand Boden
+S02=R001-B311	TBet_Decke_BTA10	Temperatur	Temperaturfühler- 35/+100°C IP67	Versuchsobjekt unkontrolliert, Decke 10 cm tief
+S02=R001-B312	TBet_Decke_BTA5	Temperatur	Temperaturfühler- 35/+100°C IP67	Versuchsobjekt unkontrolliert, Decke 5 cm tief
+S02=R001-B313	TBet_Boden_FBH10	Temperatur	Temperaturfühler- 35/+100°C IP67	Versuchsobjekt unkontrolliert, Boden 10 cm tief
+S02=R001-B326	T_Bet_Boden_FBH5	Temperatur	Temperaturfühler- 35/+100°C IP67	Versuchsobjekt unkontrolliert, Boden 5 cm tief
+S02=R001-B501	T_ZULUFT	Temperatur	Stabtemperaturfühler/Montageflansch -35/+90°C	Versuchsobjekt unkontrolliert, Einlass Lüftung
+S02=R001-B281	Tglob_N_Tuer	Temperatur	Pendelfühler -35/70°C	Versuchsobjekt unkontrolliert, Raumluft
+S02=R001-B291	Tair_Pendel_N_Tuer	Temperatur	Pendelfühler -35/100°C	Versuchsobjekt unkontrolliert, Raumluft
+S02=R001-301	RH_Pendel_N_Tuer	Luftfeuchtigkeit	Pendelfühler 5/95%Rel Feuchte	Versuchsobjekt unkontrolliert, Raumluft
+S02=R001-B282	Tglob_S_Fenster	Temperatur	Pendelfühler -35/70°C	Versuchsobjekt unkontrolliert, Raumluft
+S02=R001-B292	Tair_Pendel_S_Fenster	Temperatur	Pendelfühler -35/100°C	Versuchsobjekt unkontrolliert, Raumluft
+S02=R001-302	RH_Pendel_S_Fenster	Luftfeuchtigkeit	Pendelfühler 5/95%Rel Feuchte	Versuchsobjekt unkontrolliert, Raumluft
+S03=R002-B221	Tsurf_i_W_Wand	Temperatur	Temperaturfühler/Oberfläche -35/+100°C	Versuchsobjekt kontrolliert, Innenwand Ost
+S03=R002-B222	Tsurf_i_O_Wand	Temperatur	Temperaturfühler/Oberfläche -35/+100°C	Versuchsobjekt kontrolliert, Innenwand West
+S03=R002-B223	Tsurf_i_S_Portal	Temperatur	Temperaturfühler/Oberfläche -35/+100°C	Versuchsobjekt kontrolliert, Innenwand Süd
+S03=R002-B224	Tsurf_i_N_Wand	Temperatur	Temperaturfühler/Oberfläche -35/+100°C	Versuchsobjekt kontrolliert, Innenwand Nord
+S03=R002-B225	Tsurf_i_Decke	Temperatur	Temperaturfühler/Oberfläche -35/+100°C	Versuchsobjekt kontrolliert, Innenwand Decke
+S03=R002-B226	Tsurf_i_Boden	Temperatur	Temperaturfühler/Oberfläche -35/+100°C	Versuchsobjekt kontrolliert, Innenwand Boden
+S03=R002-B311	TBet_Decke_BTA10	Temperatur	Temperaturfühler- 35/+100°C IP67	Versuchsobjekt kontrolliert, Decke 10 cm tief
+S03=R002-B312	TBet_Decke_BTA5	Temperatur	Temperaturfühler- 35/+100°C IP67	Versuchsobjekt kontrolliert, Decke 5 cm tief
+S03=R002-B313	TBet_Boden_FBH10	Temperatur	Temperaturfühler- 35/+100°C IP67	Versuchsobjekt kontrolliert, Boden 10 cm tief
+S03=R002-B326	T_Bet_Boden_FBH5	Temperatur	Temperaturfühler- 35/+100°C IP67	Versuchsobjekt kontrolliert, Boden 5 cm tief
+S03=R002-B501	T_ZULUFT	Temperatur	Stabtemperaturfühler/Montageflansch -35/+90°C	Versuchsobjekt kontrolliert, Einlass Lüftung
+S03=R002-B281	Tglob_N_Tuer	Temperatur	Pendelfühler -35/70°C	Versuchsobjekt kontrolliert, Raumluft
+S03=R002-B291	Tair_Pendel_N_Tuer	Temperatur	Pendelfühler -35/100°C	Versuchsobjekt kontrolliert, Raumluft
+S03=R002-301	RH_Pendel_N_Tuer	Luftfeuchtigkeit	Pendelfühler 5/95%Rel Feuchte	Versuchsobjekt kontrolliert, Raumluft
+S03=R002-B282	Tglob_S_Fenster	Temperatur	Pendelfühler -35/70°C	Versuchsobjekt kontrolliert, Raumluft
+S03=R002-B292	Tair_Pendel_S_Fenster	Temperatur	Pendelfühler -35/100°C	Versuchsobjekt kontrolliert, Raumluft
+S03=R002-302	RH_Pendel_S_Fenster	Luftfeuchtigkeit	Pendelfühler 5/95%Rel Feuchte	Versuchsobjekt kontrolliert, Raumluft

3.2 Übersicht über den Versuchszeitraum

Im Dezember 2017 wurde die Konditionierungseinheit in die Versuchsobjekte eingebaut und im Jänner 2018 in Betrieb genommen. Abbildung 29 zeigt eine Übersicht über den Versuchszeitraum und die einzelnen Messzeiträume. Der blaue Verlauf zeigt die von der Wetterstation aufgezeichnete Außenlufttemperatur, rot die gemessene operative Raumtemperatur im kontrollierten Versuchsobjekt und grün die gemessene operative Raumtemperatur im unkontrollierten Versuchsobjekt.

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Die entsprechenden Sensoren befinden sich in beiden Objekten jeweils 1,5 m über Fußbodenhöhe und 1,5 m von der Eingangstür entfernt. Sie berücksichtigen neben der lokal gemessenen Raumlufttemperatur zusätzlich den Strahlungsaustausch zwischen den Umschließungsflächen. In den Auswertungen der Messergebnisse wird dieser Sensor zur Darstellung des Unterschieds zwischen dem konditionierten und dem unkonditionierten Versuchsobjekt herangezogen. Ab Februar 2018 wurden erste Tests durchgeführt. Da es zu diesem Zeitpunkt noch keinen Kühlbedarf gab, wurde die Konditionierungseinheit vorerst im Heizmodus betrieben, für den sie sekundär ausgelegt worden war. Die Wärmeabgabe an den Innenraum wurde über den inneren Fan Coil (Fi) geführt, wobei entweder das Fan Coil Außengerät (Fa) oder der Wärmetauscher im Luftkanal (La) zur Wärmeaufnahme der Außenluft verwendet wurden. Im Zeitraum von Anfang April bis Ende Juni 2018 gab es diverse Umbauphasen zur Systemverbesserung der Konditionierungseinheit (KE), sowie die Ausarbeitung und Umsetzung verschiedener Regelstrategien mit samt Einbau weiterer Messsensoren, gefolgt von kurzen Phasen zur Durchführung von Funktionstests. Die Feldtests hinsichtlich Kühlen wurden erstmals im Jahr 2018 von Anfang Juli bis Mitte September durchgeführt. In dieser Messperiode wurden unterschiedliche Systemkonfigurationen der Konditionierungseinheit getestet. Danach gab es eine Zwischenevaluierung aus den Auswertungen der bis dahin durchgeführten Versuche, wodurch weitere Vorschläge zur Verbesserung des Betriebs ausgearbeitet werden konnten. Die Änderungen, die sich in den weiteren Messungen im Projektjahr 2019 tatsächlich als Verbesserungen erwiesen, wurden bis zum Ende des Jahres 2018 baulich umgesetzt.

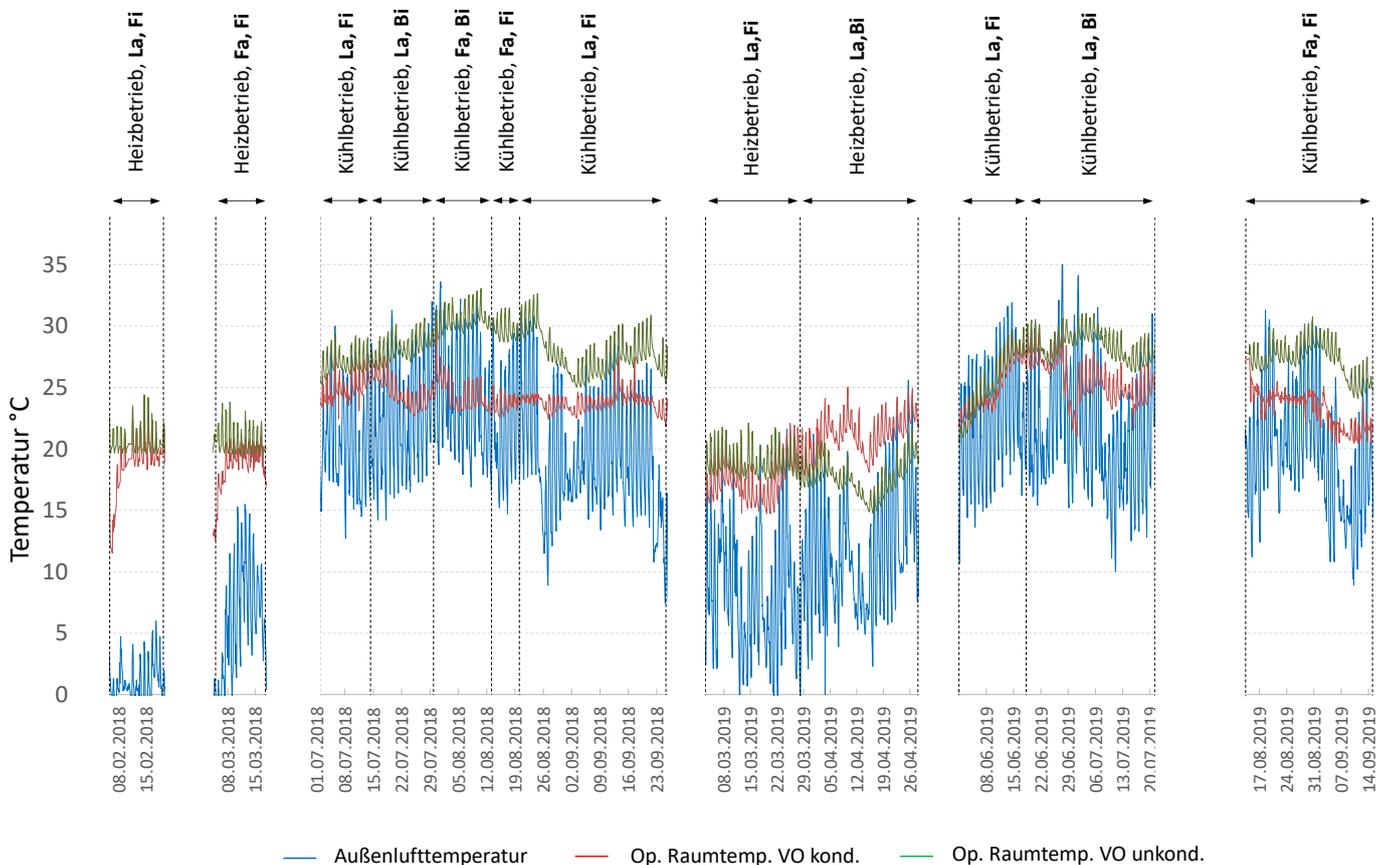


Abbildung 29: Überblick über den Versuchszeitraum, sowie Messzeiträume und deren zugehörige Betriebsarten (Fa ...Fan Coil außen, Fi ... Fan Coil innen, La ... Luftkanal außen, Bi ... Betonkernaktivierung)

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Im Jahr 2019 wurden weitere Feldtests durchgeführt, von Anfang März bis Ende April im Heizbetrieb und ab Anfang Juni bis zum Projektende wiederum im Kühlbetrieb. Die Bezeichnungen bzw. Abkürzungen aller in den folgenden Auswertungen verwendeten Sensoren und Systemkomponenten sind mitsamt Kurzbeschreibung (Sensorart und Position, etc.) in Tabelle 5 zusammengefasst.

Tabelle 5: Abkürzungs- und Bezeichnungsbeschreibung

Abkürzung	Beschreibung	Einheit
VO	Versuchsobjekte für die Feldtests	
Kond.	Das Versuchsobjekt wird über die Konditionierungseinheit beheizt oder gekühlt	
Unkond.	Das Versuchsobjekt wird nicht gekühlt und zum Frostschutz über das Backupsystem beheizt	
La	Luftkanal mit integriertem Lamellenwärmetauscher	
Fa	Fan Coil Außengerät	
Fi	Fan Coil Innengerät	
Bi	Betonkernaktivierung über die Decke des Versuchsobjekts	
KE	Konditionierungseinheit	
op. Temp. VO Kond.	Operative Raumtemperatur gemessen im konditionierten Versuchsobjekt, 1,5 m über Fußboden und 1,5 m von der Tür entfernt	°C
op. Temp. VO Unkond.	Operative Raumtemperatur gemessen im unkonditionierten Versuchsobjekt, 1,5 m über Fußboden und 1,5 m von der Tür entfernt	°C
Temp. Fi aus	Temperatur der Luft die vom Fan Coil Innen in den Innenraum strömt (Position Li,o im Messschema in Abbildung 22)	°C
Temp. Fi ein	Temperatur der Raumluft, die vom Fan Coil zum Konditionieren angesaugt wird (Position Li,i im Messschema in Abbildung 22)	°C
Temp. Fa aus	Temperatur der Luft die vom Fan Coil Außen nach außen strömt (Position La,o' im Messschema in Abbildung 22)	°C
Temp. Fa ein	Temperatur der Luft, die vom Fan Coil Außen angesaugt wird (Position La,i' im Messschema in Abbildung 22)	°C
Temp. La aus	Temperatur am Eintritt in den Wärmetauscher am Luftkanal außen (Position La,o im Messschema in Abbildung 22)	°C
Temp. La ein	Temperatur am Austritt in den Wärmetauscher am Luftkanal außen (Position La,o im Messschema in Abbildung 22)	°C
Außenlufttemperatur	Temperatur der Umgebung, von der ZAMG Wetterstation neben den Versuchsobjekten gemessen	°C
el. Leistung Komp.	Elektrische Leistung, die der Kompressor für den Betrieb benötigt	W
el. Leistung Anlage	Elektrische Leistung, die die gesamte Konditionierungseinheit für den Betrieb benötigt (Kompressor, Radialventilator im Luftkanal, Fan Coil Innengerät, Fan Coil Außengerät, Mischventil mit Stellantrieb, Umwälzpumpe für den Wasserkreislauf)	W
Heizleistung/Kühlleistung	Die aus den Messdaten berechnete Heizleistung/Kühlleistung der Konditionierungseinheit	W
PV-Ertrag	Summe aller gemessenen Erträge der Photovoltaik Paneele, die im Versuchsobjekt konditioniert integriert sind	W
Globalstrahlung	Summe aus direkter und diffuser Strahlung der Sonne auf die Horizontale, von der ZAMG Wetterstation neben den Versuchsobjekten gemessen	W/m ²
Batterie Spannung	Spannung der Akkus der Konditionierungseinheit, repräsentiert den Ladezustand des Stromspeichers	V
Temp. Innen	Sensor zur Regelung der Raumtemperatur, mittig im Raum, 1,5 m über Fußbodenhöhe und 1,5 m vom Fenster entfernt	°C
Temp. Decke VO Kond.	Oberflächentemperatur der Betondecke im Versuchsobjekt konditioniert, mittig gemessen	°C
Temp. Decke VO Unkond.	Oberflächentemperatur der Betondecke im Versuchsobjekt unkonditioniert, mittig gemessen	°C
p-Verd.	Verdampfungsdruck im Wärmepumpenkreislauf	
p-Kond.	Kondensationsdruck im Wärmepumpenkreislauf	
T-Verd.	Verdampfungstemperatur im Wärmepumpenkreislauf	
T-Kond.	Kondensationstemperatur im Wärmepumpenkreislauf	
COP-Komp.	Effizienz des Kompressors im Wärmepumpenkreislauf	

3.3 Auswertung der einzelnen Systemkonfigurationen bzw. Messzeiträume

Der Fokus der Analyse des Betriebsverhaltens der Versuchsobjekte liegt primär auf der Funktion des Kühlens (vgl. Kapitel 1.4). Da aber auch ein Ganzjahresbetrieb, inklusive der Heizsaison denkbar ist, und es im Versuchszeitraum auch Heizphasen gegeben hat, wurde auch dieser betrachtet.

3.3.1 Versuchsobjekt im Heizbetrieb

Im ersten Teil der Auswertung wird auf die Messzeiträume eingegangen, in denen die Konditionierungseinheit (KE) im Heizbetrieb war. Repräsentativ dafür werden drei Zeitausschnitte betrachtet. Da das unkonditionierte Versuchsobjekt (VO Unkond.) während der Heizperiode ebenfalls aus Gründen der Frost-freihaltung beheizt werden musste, erfolgt im Heizbetrieb kein Vergleich zwischen dem konditionierten und dem unkonditioniertem Versuchsobjekt. Im Kühlmodus hingegen werden entsprechende vergleichende Analysen angestellt (siehe Kapitel 3.3.3). In Abbildung 30 sind die Messergebnisse der wichtigsten Sensoren zur Beschreibung der Charakteristik der Konditionierungseinheit (KE) im Heizbetrieb vom 15. bis 16. Februar 2018 dargestellt. Im oberen Diagramm sind die Temperaturen enthalten, wobei die Daten der Messstellen, die sich in den Versuchsobjekten befinden, auf der linken Achse und jene der Außenlufttemperatur auf der rechten Achse aufgetragen sind. Zusätzlich sind die für die Regelung des Heizbetriebs verwendeten Temperaturgrenzen eingezeichnet (schwarz strichliert). Im Diagramm darunter sind die elektrische Leistung zum Betrieb des Kompressors, die Heizleistung der KE, der Ertrag der Photovoltaik, die Globalstrahlung (auf die Horizontale) auf der linken Achse, und der Verlauf der Spannung der Batterie auf der rechten Achse aufgetragen.

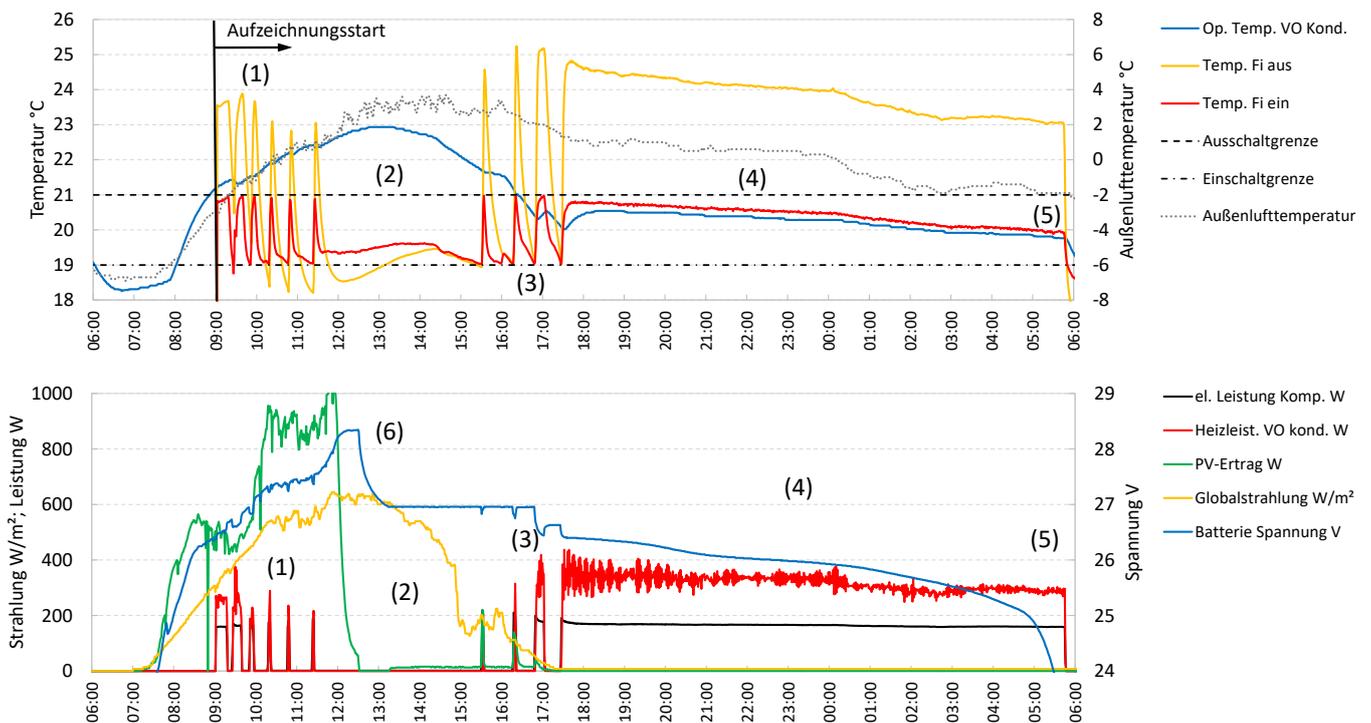


Abbildung 30: Messdaten der KE im Heizbetrieb (La, Fi) von 15.-16.02.2018

Die Übertragung bzw. Bereitstellung der Heizwärme wurde in diesem Fall über das raumseitige „Fan Coil Innengerät“ (Fi) geführt und der Wärmeentzug aus der Außenluft wurde über den Wärmetauscher im „Luftkanal außen“ (La) bewerkstelligt. Die gemessene Außenlufttemperatur liegt in dem betrachteten Zeitraum zwischen -7 und 4 °C, die maximal gemessene Globalstrahlung (bei einer Sonnenscheindauer von 07:00 bis 17:00 Uhr) bei ca. 600 W/m². Von 08:00 bis 16:00 waren die internen Wärmelasten, sowie die Raumlüftung, in beiden Versuchsobjekten aktiv, was generell für den gesamten Versuchszeitraum bzw. alle hier diskutierten Zeiträume gilt. Etwa um 09:00 Uhr startete der Betrieb der KE.

(1) Im Zeitraum zwischen 09:00 und 11:30 Uhr war eine alternierende Betriebscharakteristik zu beobachten, d.h. es stellte sich ein Ein/Aus-Betrieb ein. Das Ein- und Ausschalten der KE wird über den Sensor „Temp. Fi ein“ geregelt. Die Dauer bis zum Einschalten der KE verlängerte sich dabei zunehmend, die Betriebsdauer verkürzte sich. **(2)** Von 11:30 bis 15:30 Uhr war die KE nicht in Betrieb, da „Temp. Fi ein“, die Temperatureinschaltgrenze (untere Grenze von 19°C), nicht erreicht bzw. unterschritten wurde. **(6)** Nachdem der PV-Ertrag auf null gesunken war, fiel die Spannung in der Batterie auf ca. 27 V und blieb von da an konstant bis wieder Strom von der KE benötigt wurde. **(3)** Von 15:30 bis 17:30 Uhr ging die KE wieder in einen alternierenden Betrieb über, die Temperatur pendelte zwischen Ein- und Ausschaltgrenze hin und her. **(4)** Ab 17:30 war die KE bei sinkender Außentemperatur dann kontinuierlich in Betrieb, da die Ausschaltgrenze (gerade) nicht mehr erreicht wurde. Über Nacht nahmen die Temperaturen dann stetig ab. **(5)** Am nächsten Tag, kurz vor 06:00 Uhr, schaltete die KE ab, da die Spannung in der Batterie nicht mehr ausreichend hoch für den Betrieb war. Am (blau dargestellten) Verlauf der Spannung und dem in grün dargestellten PV-Ertrag ist zu erkennen, dass die Batterie bis ca. 12:30 Uhr wieder vollständig geladen wurde.

Die erbrachte Heizleistung, über die Messstellen am raumseitigen „Fan Coil Innengerät“ (Fi) berechnet, lag in dem betrachteten Zeitraum zwischen 200 und 430 W (311 W im Mittel). Der Kompressor benötigte dazu eine Leistung im Bereich zwischen 150 und 200 W (164 W im Mittel). Die Leistungszahl der Wärmepumpe (WP) war in diesem Zeitraum, der kurz nach der Inbetriebnahme des Systems liegt, relativ niedrig. Das liegt daran, dass die Kältemittelfüllmenge noch nicht optimiert bzw. zu niedrig war, was eine zu niedrige Verdampfungstemperatur zur Folge hatte.

Im nächsten betrachteten Messzeitraum vom 09. bis 12. März 2018 wurde zuvor wärmequellenseitig vom Luftkanal mit integriertem Lamellenwärmetauscher (La) auf das Fan Coil Außengerät (Fa) umgestellt. Raumseitig wurde die Wärme nach wie vor über das „Fan Coil Innengerät“ (Fi) eingebracht. Die Messergebnisse über die drei Tage sind in Abbildung 31 dargestellt. Die Außenlufttemperatur lag in diesem Zeitraum mit 0 bis 16 °C im Schnitt etwas höher als zuvor, die Globalstrahlung erreichte Spitzenwerte bis beinahe 1000 W/m². Die Einschaltgrenze zum Heizen war in diesem Zeitraum auf 18 °C gesetzt, die Ausschaltgrenze lag bei 21 °C. Der Betrieb startete am 09.03. um 13:00 Uhr. **(1)** von 13:00 bis ca. 18:00 Uhr trat zunächst wieder eine Ein-/Aus Betriebscharakteristik auf, gefolgt vom kontinuierliche Betrieb über Nacht. **(2)** Anders als im Februar reichte die in der Batterie gespeicherte Energie jedoch aus, um das System bis zum nächsten Tag um 10:00 Uhr durchlaufen zu lassen. Die Konditionierungseinheit (KE) wurde zu diesem Zeitpunkt aufgrund des Erreichens der Ausschaltgrenze ausgeschaltet. Von da an war die KE nicht in Betrieb, bis die Temperatur um 19:00 Uhr die Einschaltgrenze unterschritten hat.

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Dieses Verhalten wiederholte sich am nächsten Tag. Am letzten Tag (12.03.) des betrachteten Zeitraums sank die Außentemperatur in der Nacht nicht so stark ab wie zuvor, sodass die Ausschaltgrenze der Regelung erreicht wurde und sich der Ein-/aus Betriebszustand eingestellt hat, der zuvor im betrachteten Zeitraum nur tagsüber aufgetreten ist **(3)**.

Die operative Raumtemperatur im konditionierten Versuchsobjekt (op. Temp. VO Kond.) lag während des gesamten Zeitraums zwischen 18 und 21 °C. Im Vergleich zu Abbildung 30 war die Heizleistung, mit im Mittel 831 W, bei ca. gleicher Kompressorleistung höher, wodurch auch der COP höher war. Dies liegt an der höheren Außentemperatur aber auch an Optimierungen des Kältemittelkreislaufs. Grundsätzlich ergibt sich aber eine ähnliche Betriebscharakteristik mit niedriger Heizleistung bzw. Ein-/Aus-Betrieb am Tag bei hoher Außenlufttemperatur und hohen internen und externen Wärmegewinnen und kontinuierlichem Betrieb bei niedrigen Außentemperaturen während der Nacht.

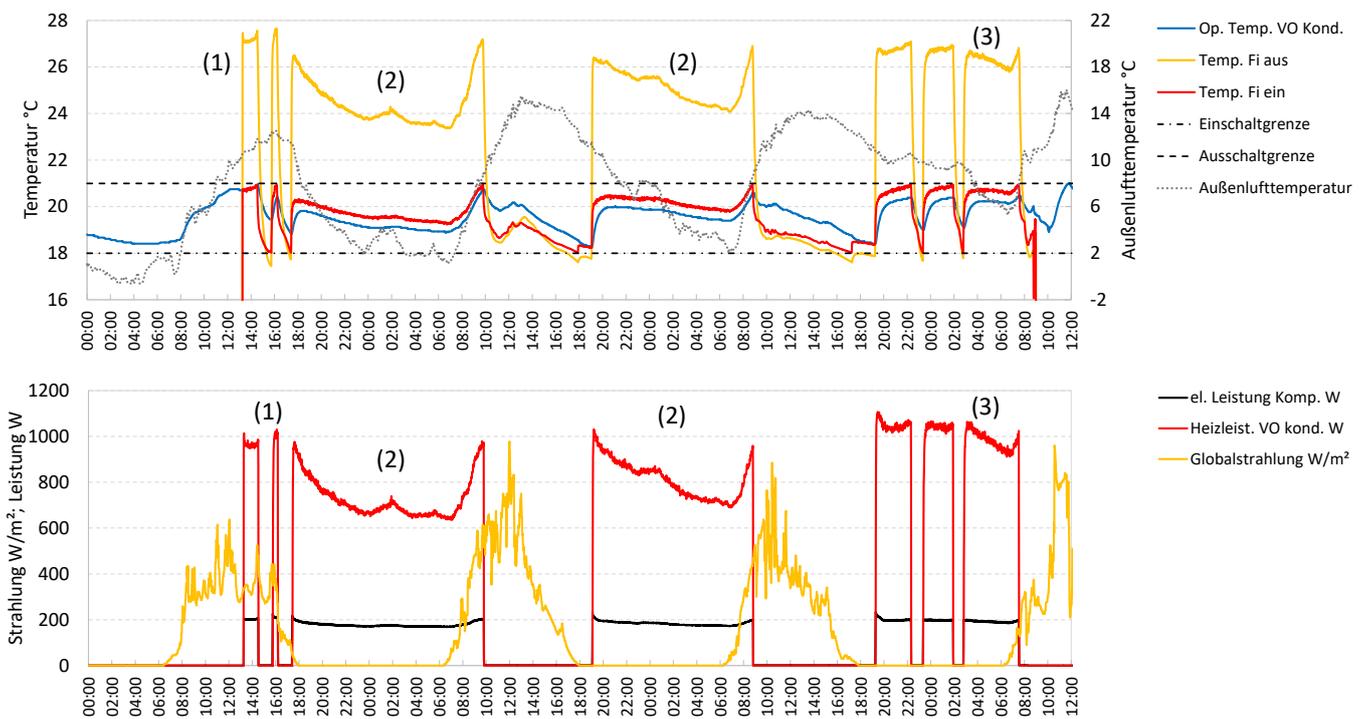


Abbildung 31: Messdaten der KE im Heizbetrieb (Fa, Fi) von 09.-12.03.2018

Auch im Jahr 2019 gab es Messzeiträume im Heizbetrieb (La, Fi), wie beispielsweise der Zeitraum vom 21. bis zum 23.03.2019. Die Heizung wurde in diesem Zeitraum (wie auch im Kühlbetrieb später) anders als zuvor mittels des zusätzlich installierten Temperatursensors „Temp. Innen“ (siehe Tabelle 5) geregelt (anstatt über den Sensor „Temp. Fi ein“). Dieser Sensor befindet sich in Raummitte 1,5 m über dem Boden und 1,5 m von der Fensterfront entfernt. Die Ausschaltgrenze lag am 21.03. bei 20 °C, an den restlichen Tagen bei 21 °C, während die Einschaltgrenze bei 17 °C und dann bei 18 °C lag (Abbildung 32).

Zusätzlich wird der Verlauf der elektrischen Leistung dargestellt, die von der Konditionierungseinheit für den Betrieb benötigt wurde (el. Leistung Anlage). Alle Komponenten der Konditionierungseinheit, die über die Batterie mit Strom versorgt werden, sind in Tabelle 5 aufgezählt. Je nach Betriebsart ändert sich dadurch, dass jeweils andere Komponenten (z.B. Ventilatoren) in Betrieb sind, entsprechend die elektrische Leistung, die die Anlage zum Betrieb benötigt.

Die Außenlufttemperatur bewegte sich zwischen -1 und 20 °C, wobei pro Tag ein Anstieg der mittleren Außenlufttemperatur von ungefähr 2 K zu beobachten ist. Die Globalstrahlung, der PV-Ertrag und auch die Batterie-Spannung verhielten sich an allen drei Tagen sehr ähnlich. Zu Beginn des betrachteten Zeitraums lag die operative Raumtemperatur (op. Temp. im VO Kond.) im konditionierten Versuchsobjekt bei niedrigen ca. 17 °C. Da das System versuchte, den Raum auf die Solltemperatur zu heizen, ergab sich hier eine Betriebscharakteristik mit fast durchgängigem Betrieb während des Tages. In den Nachtstunden war aufgrund der schon tagsüber entleerten Batterie kein Betrieb mehr möglich.

(1) Anders als in den zuvor gezeigten Auswertungen war die Batterie zu Beginn des Tages entladen, mit Einsetzen der Sonnenstrahlung wurde zunächst die Konditionierungseinheit (KE) aktiviert und mit dem anfallenden Überschussstrom parallel die Batterie aufgeladen. Die Ausschaltgrenze wurde in dem betrachteten Zeitraum nie überschritten, deswegen blieb die KE solange aktiviert, bis keine Solarstrahlung mehr auftrat und der Speicher wieder komplett entladen war (an den betrachteten Tagen immer zwischen 22:30 und 23:00 Uhr). **(2)** Über Nacht konnte dementsprechend nicht geheizt werden, erst am nächsten Tag kurz nach dem Einsetzen der Sonnenstrahlung war wieder Energie verfügbar, mit der die KE betrieben werden konnte. Die Batterie konnte täglich bis ca. 14:00 wieder aufgeladen werden.

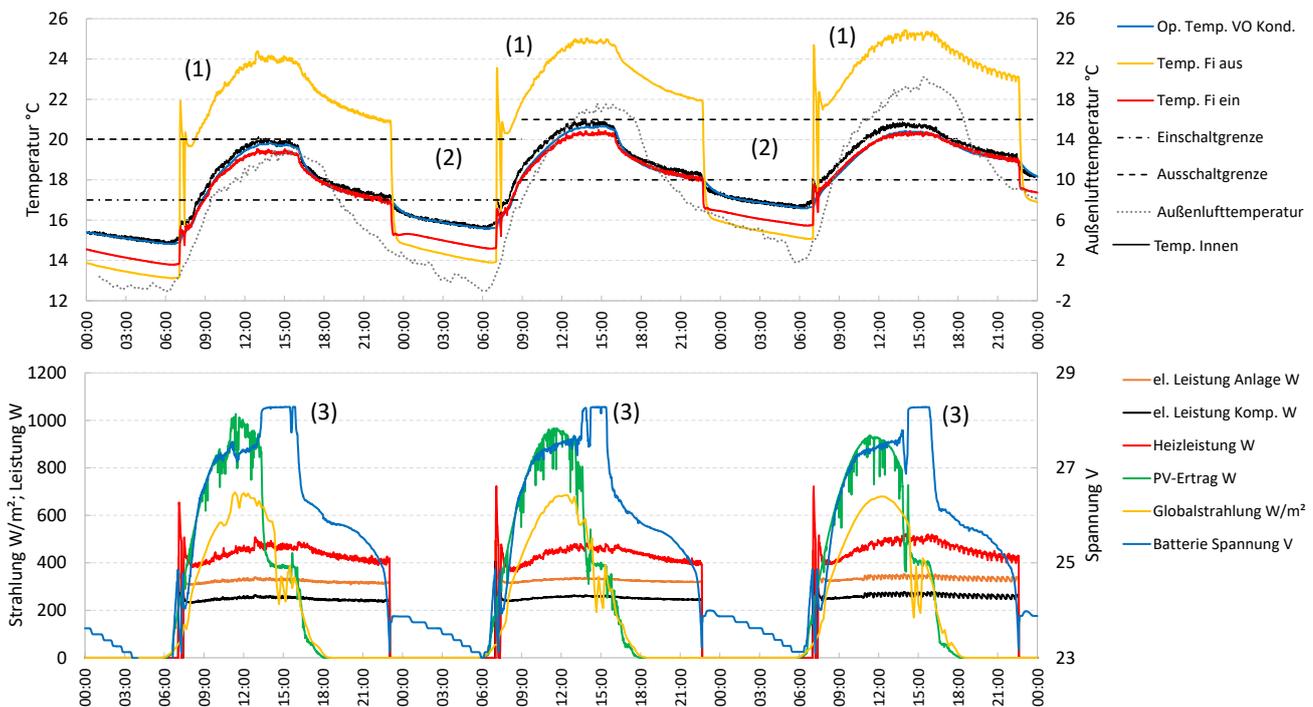


Abbildung 32: Auswertung der Messdaten der KE im Heizbetrieb (La, Fi) von 21.-23.03.2019

Der Kompressor benötigte im Betrieb durchschnittlich eine Leistung von 254 W, die gesamte Konditionierungseinheit (KE) 328 W, die Heizleistung lag im Schnitt bei einem Wert von 443 W. Obwohl die Außenlufttemperatur in einem ähnlichen Bereich wie in Abbildung 31 lag, war die Leistungszahl der Wärmepumpe wesentlich niedriger. Dies ist auf eine für diese Betriebsart nicht optimale Kältemittel-Füllmenge und einen relativ niedrigen Luft-Volumenstrom über den im Luftkanal integrierten Verdampfer zurückzuführen.

3.3.2 Kühlen in unterschiedlichen Betriebsweisen im Jahr 2018

Der Versuchsaufbau wurde derart konzipiert, dass der Kühlbetrieb in unterschiedlichen Betriebsweisen ermöglicht wurde. Außenseitig standen das „Fan Coil Außengerät“ (Fa) und der Luftkanal mit integriertem Lamellenwärmetauscher (La) zur Verfügung. Raumseitig konnte zur Kälteabgabe zwischen dem raumseitigen „Fan Coil Innengerät“ (Fi) und der Betonkernaktivierung (Bi) gewählt werden. Die daraus möglichen Kombinationen werden in diesem Kapitel betrachtet. Die Auswertung erfolgt, wie im Kapitel zuvor, anhand von Messergebnissen, wobei jeweils drei Messtage in Folge betrachtet werden.

Im Zeitraum vom 02. bis 04.08.2018 (Abbildung 33) lag der Unterschied zwischen der operativen Raumtemperatur im konditionierten Versuchsobjekt (op. Temp. VO Kond.) und der operativen Raumtemperatur im unkonditionierten Versuchsobjekt (op. Temp. VO Unkond.) bei ca. 5 K. Die Außenlufttemperatur bewegte sich im Bereich von knapp unter 20 bis mehr als 30 °C. Die Sonnenstrahlung war an den ersten beiden Tagen wechselhaft, am dritten Tag schien die Sonne hingegen fast durchgehend.

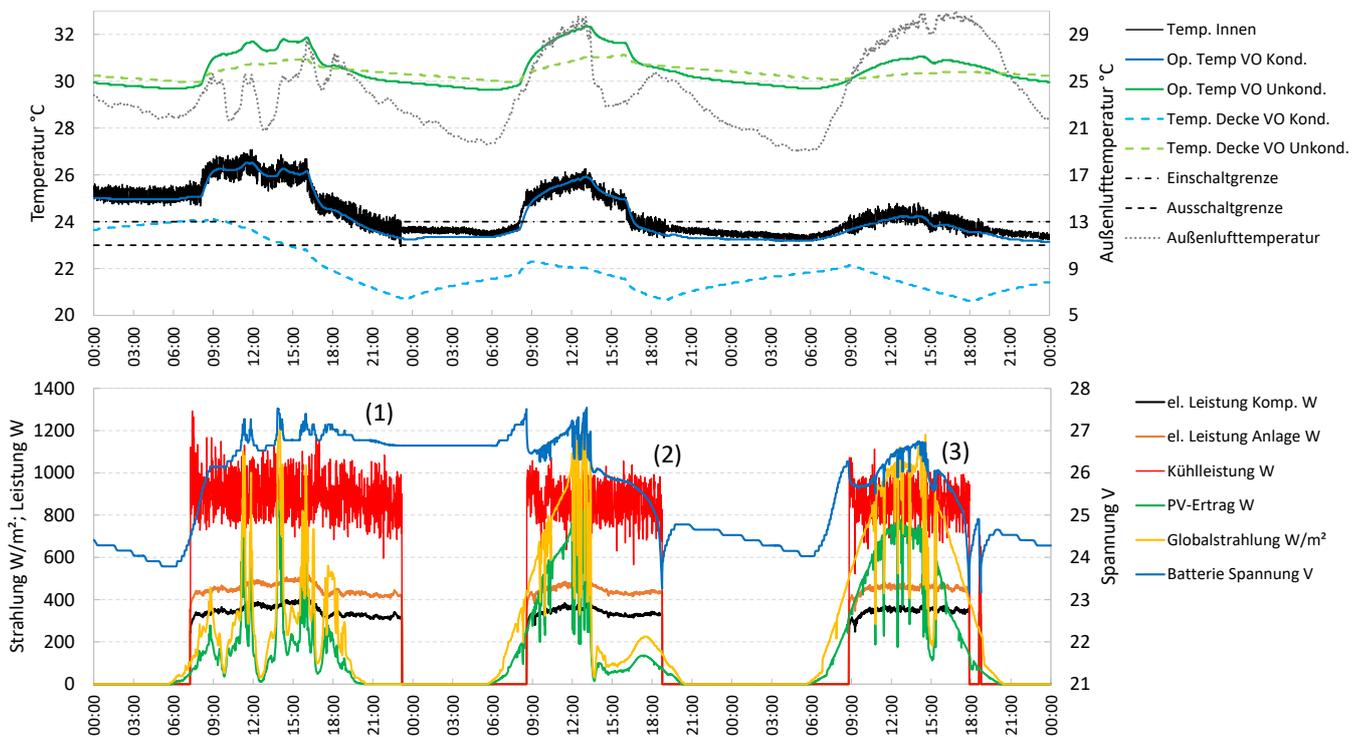


Abbildung 33: Auswertung der Messdaten der KE im Kühlbetrieb (Fa, Bi) von 02.-04.08.2018

(1) Die Konditionierungseinheit (KE) wurde am 02.08. teilweise über das Stromnetz mit Energie versorgt, um den durch den Umbau verursachten Stillstand der Tage zuvor etwas zu kompensieren (das gilt für den Zeitbereich, nachdem die Sonne bereits untergegangen war). Die KE wurde um kurz nach 23:00 Uhr, nach Erreichen der Ausschaltgrenze, abgeschaltet. Die Temperatur der Betondecke (Temp. Decke VO Kond.) sank im konditionierten Versuchsobjekt in diesem Zeitraum von 23,7 auf 20,7 °C, die operative Raumtemperatur um etwa 1,8 K °C. Im unkonditionierten Versuchsobjekt hingegen ist über den gesamten betrachteten Zeitraum keine Verringerung der Temperaturen zu erkennen, wenn man jeweils die Werte am Ende jedes Tages miteinander vergleicht.

(2) Am Anfang des 03.08. war die Batterie vollständig geladen, kurz vor 09:00 Uhr wurde die Einschaltgrenztemperatur überschritten und die Konditionierungseinheit (KE) aktiviert. Diese war bis kurz nach 18:00 durchgehend aktiviert und kühlte die Betondecke im konditionierten Versuchsobjekt. In der Batterie war ein Anstieg der Spannung bis 13:00 Uhr zu erkennen. Da es am restlichen Tag sehr stark bewölkt war, wurde die Batterie entladen, wodurch die KE abgeschaltet wurde, obwohl die Ausschaltgrenze nicht erreicht war. Die Temperatur der Decke betrug am Ende des Tages 21,3 °C, obwohl sie zuvor um 19:00 Uhr bereits auf 20,7 °C gesunken war.

(3) Am 04.08. war es über den Tag nur kurzzeitig bewölkt und die Batterie konnte wieder parallel zum Kühlbetrieb, der ab 09:00 Uhr gestartet wurde, geladen werden. An diesem Tag reichte der PV-Ertrag aus um die Decke von 09:00 bis 18:00 Uhr durchgehend mit Kühlenergie zu versorgen. Die Deckentemperatur (Temp. Decke VO Kond.) betrug zu diesem Zeitpunkt wieder 20,7 °C und stieg bis um 00:00 Uhr auf 21,4 °C an. Der Unterschied zur operativen Raumtemperatur im unkonditionierten Versuchsobjekt betrug am Ende des Zeitraums 7,8 °C: die Differenz der Deckentemperaturen lag bei 8,8 °C. Die mittlere Kühlleistung in diesem Zeitraum betrug 874 W, im Betrieb benötigte die Konditionierungseinheit eine mittlere Leistung von 449 W, wovon der Kompressor 345 W brauchte.

Im nächsten Betrachtungszeitraum vom 16.-18.08.2018 (Abbildung 34) war die Konditionierungseinheit auf den Betrieb über den außenliegenden „Fan Coil Außengerät“ und den innenliegenden Fan Coil „Fan Coil Innengerät“ konfiguriert. Zur Regelung des Betriebs wurde der Wert des Sensors „Temp. Innen“ herangezogen. Die Außenlufttemperatur lag zwischen 15 und 30 °C, die Globalstrahlung betrug bis zu 1100 W/m², wobei an diesen Tagen kaum Bewölkung zu verzeichnen war. Im Vergleich zum Kühlbetrieb über die Betondecke, der durch lange Laufzeiten der KE aufgrund der hohen Speichermasse der Decke gekennzeichnet ist (Abbildung 33), ergeben sich hier längere Phasen mit Ein-/Aus-Betrieb.

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

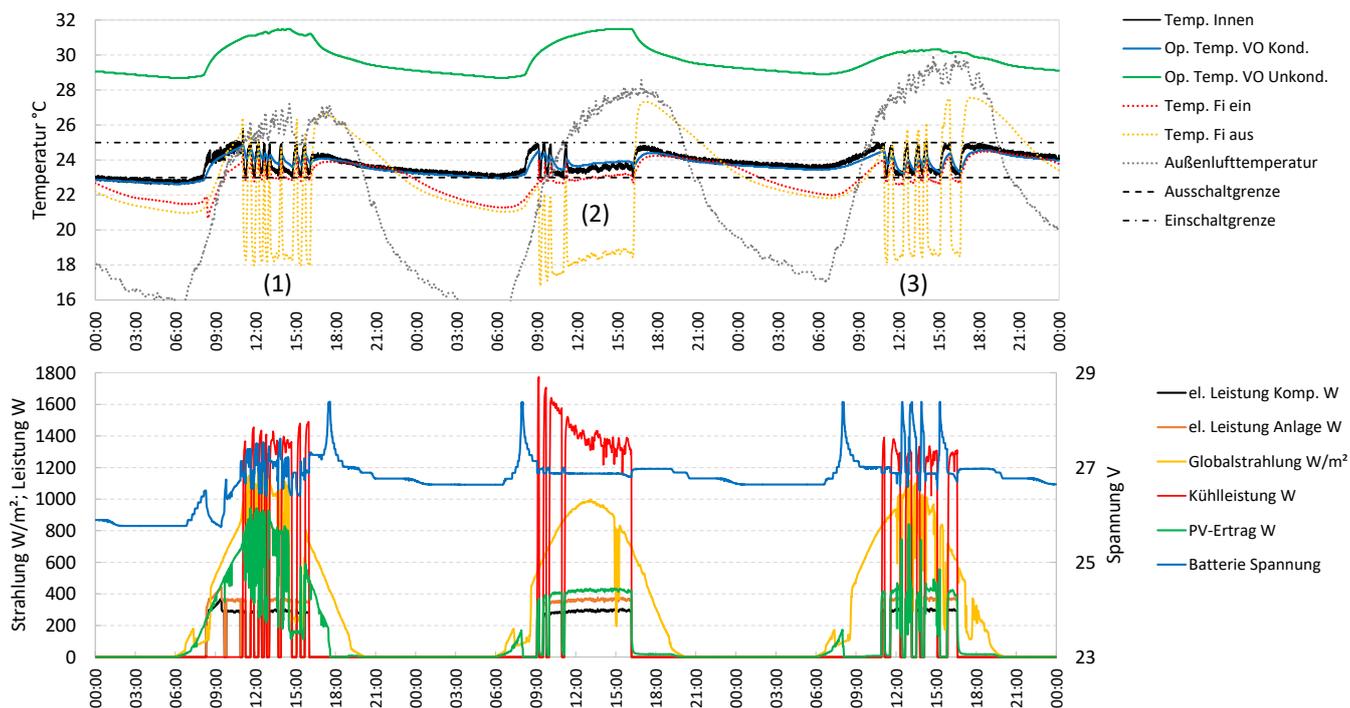


Abbildung 34: Auswertung der Messdaten der KE im Kühlbetrieb (Fa, Fi) von 16.-18.08.2018

Am 16.08. wurde die Einschaltgrenze zum Kühlen erst um ca. 11:00 Uhr erreicht **(1)**. Die KE arbeitete bis 16:00 Uhr in der Ein-/Aus Betriebscharakteristik, wie sie bereits zuvor im Kühlbetrieb zu beobachten war. Anschließend wurde die Einschaltgrenze nicht mehr erreicht und das System blieb bis zum nächsten Tag inaktiv. Am nächsten Tag **(2)** begann die KE wieder im Ein-/Ausbetriebsmodus bis sie ab 11:00 kontinuierlich betrieben und die Ausschaltgrenztemperatur bis kurz nach 16:00 Uhr nicht mehr erreicht wurde. Danach blieb die KE bis zum nächsten Tag inaktiv. Am letzten Tag **(3)** war der Betrieb jenem am 16.08. sehr ähnlich, die KE wurde um kurz nach 11:00 Uhr aktiviert und bis kurz nach 16:00 im Ein-/Ausbetriebsmodus betrieben. Die Batterie wurde in diesem Zeitraum nie vollständig entladen, das heißt, man könnte mit der vorhandenen Auslegung im Bürotrieb PV-Strom auch für andere Zwecke wie z.B. die Beleuchtung mitnutzen (was im Laufe der Feldtests aber noch nicht umgesetzt wurde). Dies wird auch durch die Simulationsergebnisse mit ähnlichen Randbedingungen in Abschnitt 2.3.3 bestätigt.

Während die operative Raumtemperatur im unconditionierten Versuchsobjekt (op. Temp. VO Unkond.) während des gesamten Zeitraums nicht unter 28 °C sank, lag diese im konditionierten Versuchsobjekt stets innerhalb der festgelegten Grenztemperaturen für die Regelung von 23 und 25 °C. Im Betrieb der KE wurde die Raumluft über den „Fan Coil Innengerät“ auf eine Temperatur zwischen 18 und 19 °C abgekühlt und wieder an den Raum abgegeben. Die KE bezog in diesem Betriebsmodus (Fa, Fi) durchschnittlich 362 W an Leistung (davon 293 W der Kompressor) und erreichte dabei im Mittel eine Kühlleistung von 1313 W.

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Die Charakteristik des Betriebs in der vierten und letzten möglichen Systemkonfiguration der Konditionierungseinheit (La, Fi) wird anhand der Messergebnisse aus dem Feldversuch vom 21.-23.08.2018 in Abbildung 35 beschrieben. Die Außenlufttemperatur war mit einem Minimum von 17,3 und einem Maximum von 31,5 °C an diesen Tagen noch etwas höher als in den zuvor betrachteten Zeiträumen, die Strahlungsmessung ergab Werte bis zu 1000 W/m².

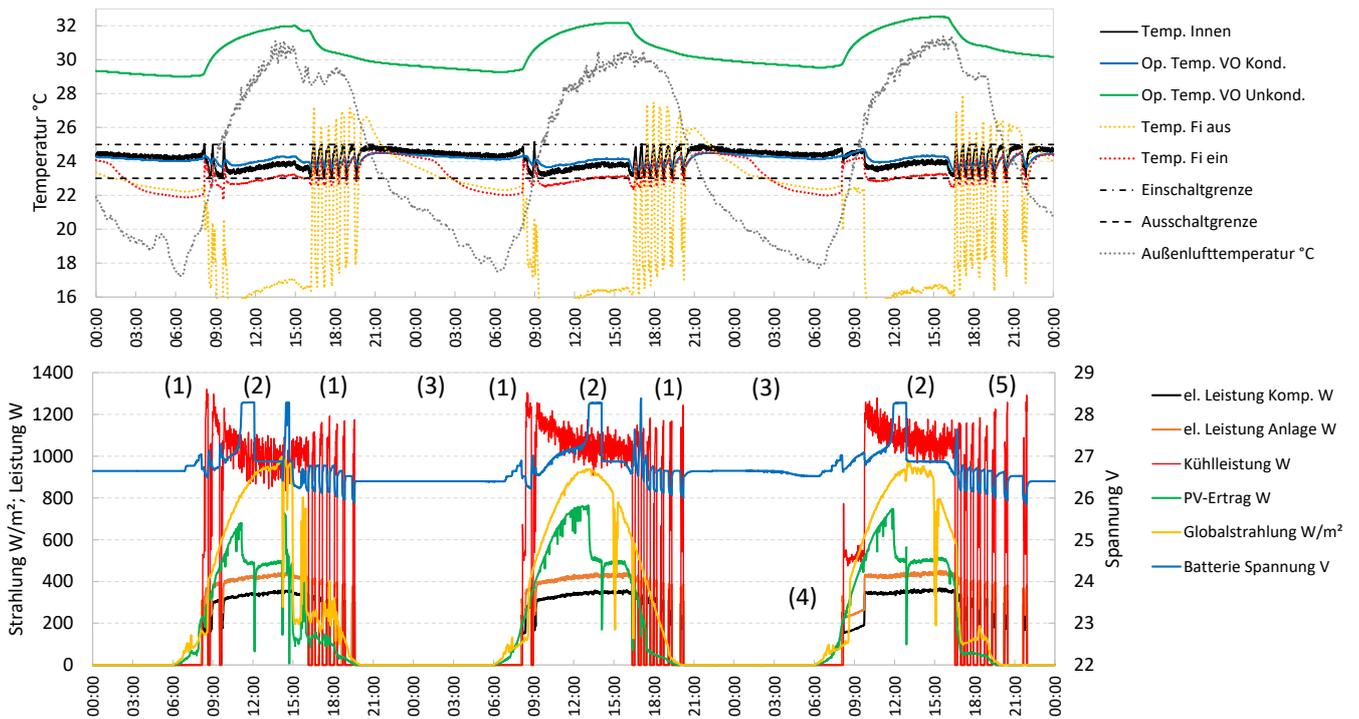


Abbildung 35: Auswertung der Messdaten der KE im Kühlbetrieb (La, Fi) von 21.-23.08.2018

Im Wesentlichen traten auch in diesem Zeitraum die drei bisher beobachteten Betriebscharakteristika auf. Der Ein-/Ausbetrieb **(1)** trat in diesem Zeitraum immer von ca. 08:00 bis 10:00 Uhr und von 16:00 bis 20:00 Uhr auf. Am Anfang vom 23.08. wurde der Ventilator des „Fan Coil Innengerät“ (Fi) auf eine niedrigere Drehzahl (= niedrigerer Luftvolumenstrom zur Raumkühlung) eingestellt **(4)**, am Ende des Tages dauerte der Ein-/Ausbetriebsmodus bis ca. 22:00 Uhr **(5)**. Zwischen 10:00 und 12:00 Uhr wurde an allen Tagen dieses Betrachtungszeitraums durchgehend gekühlt, keine der beiden Grenztemperaturen wurde erreicht. Wie zuvor in Abbildung 34 bewegte sich auch hier die operative Raumtemperatur im konditionierten Versuchsobjekt (op. Temp. VO Kond.) immer zwischen 23 und 25 °C, hingegen lag die operative Raumtemperatur im unkonditionierten Versuchsobjekt (op. Temp. VO Unkond.) zwischen 29 und 32,5 °C. Auch in diesem Zeitraum blieb am Ende des Tages jeweils noch Energie in der Batterie übrig, die während des Bürobetriebs für andere Zwecke nutzbar gewesen wäre. Die durchschnittliche Kühlleistung lag in diesem Zeitraum bei 1014 W, die KE benötigte dafür im Schnitt eine Leistung von 397 W, wovon der Kompressor 317 W beanspruchte.

3.3.3 Kühlen in unterschiedlichen Betriebsweisen im Jahr 2019

Im Jahr 2019 wurde der Testbetrieb fortgesetzt und weitere Messzeiträume ausgewertet. In Abbildung 36 sind die Messdaten zur Beschreibung des Kühlverhaltens der Konditionierungseinheit (KE) in der Betriebsweise mit im außenseitigen Luftkanal integriertem Lamellenwärmetauscher (La) und dem „Fan Coil Innengerät“ (Fi) vom 08.-10.06.2019 dargestellt. Die Außenlufttemperatur lag im Bereich zwischen 15 und 30 °C, für die Globalstrahlung wurden Werte bis zu 1200 W/m² gemessen.

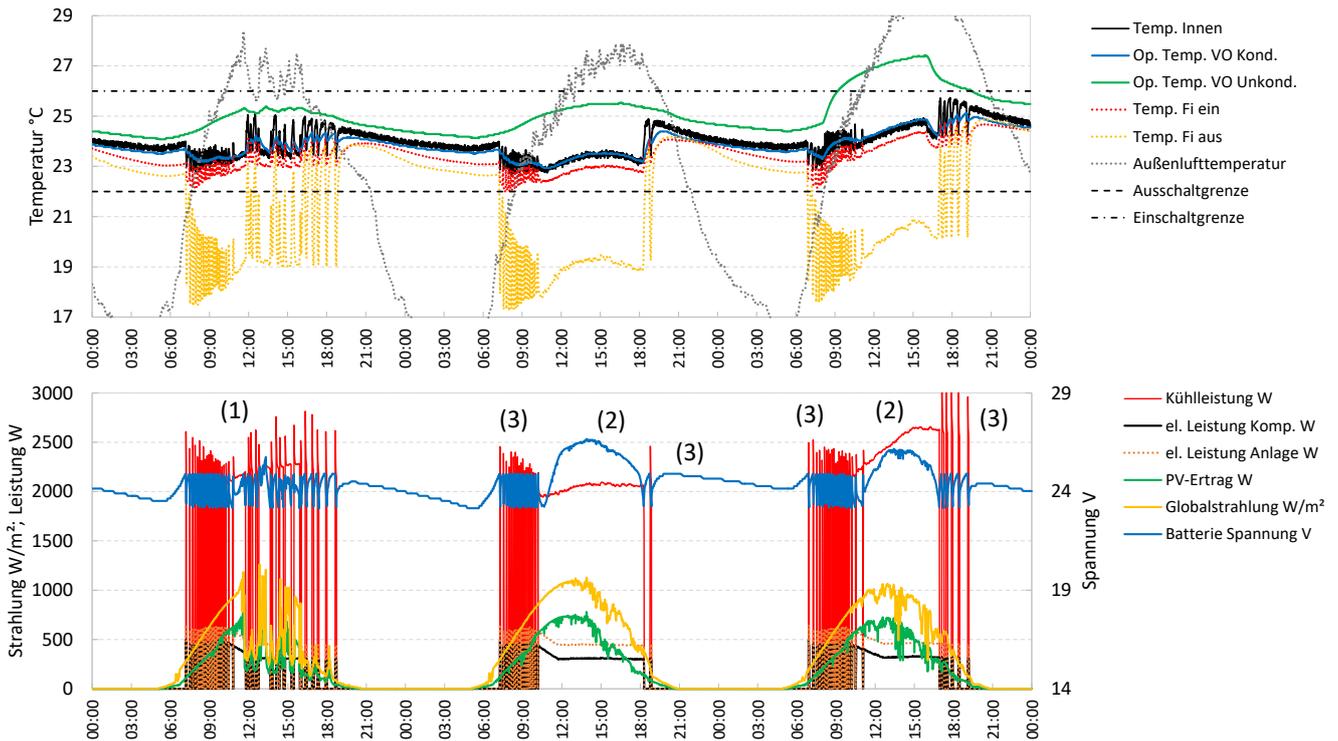


Abbildung 36: Auswertung der Messdaten der KE im Kühlbetrieb (La, Fi) von 08.-10.06.2019

Die KE wurde am 08.06. ausgehend von einer entladenen Batterie um kurz nach 07:00 Uhr aktiviert, sobald der Ertrag der PV hoch genug für einen Betrieb war. **(1)** Die dazu notwendige Leistung war allerdings höher als der PV-Ertrag und es stellte sich eine Ein-/Aus-Betriebscharakteristik ein (siehe vergrößerte Darstellung in Abbildung 37), wobei diese hier durch die Be- und Entladung der Batterie bzw. die eingestellten Spannungsgrenzen (siehe „Batterie Start-Stopp Verhalten“ in Kapitel 0) zustande kam und nicht durch die Raumtemperaturregelung. Dies liegt auch daran, dass die Ein- und Ausschalt-Temperaturgrenze um 1 °C höher bzw. niedriger eingestellt war als im in Abbildung 35 betrachteten Zeitraum. Dies betrifft vor allem den ersten der betrachteten Tage, da es hier teilweise bewölkt war. **(2)** Am 09. und 10.06. wurde die KE kontinuierlich betrieben, mit der Ausnahme von ein paar Stunden vor- und nachmittags, an denen der PV-Ertrag abermals für einen durchgehenden Betrieb nicht ausgereicht hat **(3)**. Sowohl die Temperatur des Sensors „Temp. Innen“ als auch die operative Raumtemperatur im konditionierten Versuchsobjekt (op. Temp VO Kond.) lag durchgehend im Bereich zwischen den Grenztemperaturen der Regelung.

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Die operative Raumtemperatur im unkonditionierten Versuchsobjekt (op. Temp. VO Unkond.) bewegte sich in Abhängigkeit der auftretenden solaren Strahlung und der Außenlufttemperaturen im Bereich zwischen 24 und 27,5 °C. Die benötigte durchschnittliche Kompressorleistung lag bei 348 W, die Anlage benötigte im Schnitt 487 W um eine durchschnittliche Kühlleistung in der Höhe von 2220 W bereitzustellen.

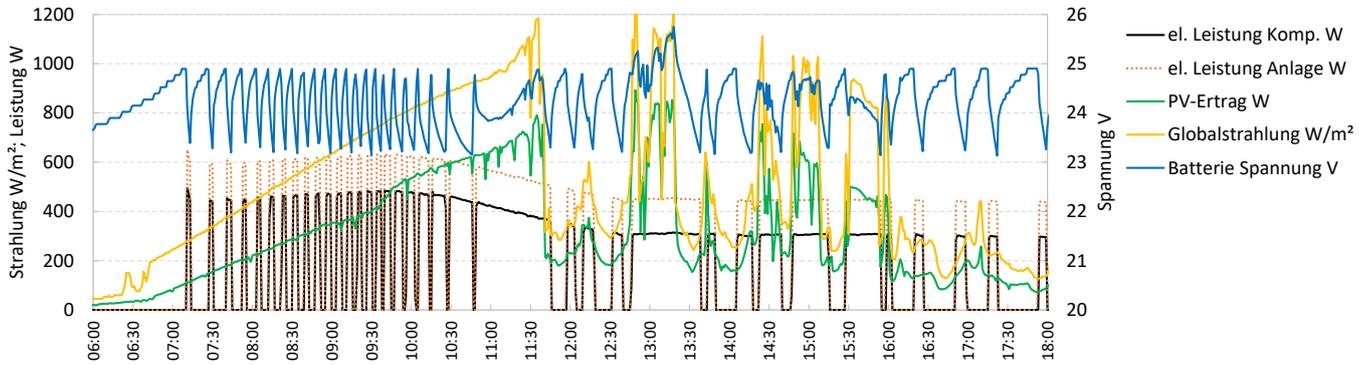


Abbildung 37: Detaillauswertung der Messdaten der KE im Kühlbetrieb (La, Fi) am 08.06.2019

In Abbildung 38 ist das Verhalten im Messzeitraum vom 04.-06.07.2019 dargestellt. Die Konditionierungseinheit war auf die Betriebsweise mit außenseitigem, im Luftkanal integrierten Lamellenwärmetauscher (La) und Betonkernaktivierung (Bi) eingestellt. Die Außenlufttemperatur lag im Bereich zwischen 15 und 31 °C, die Globalstrahlung erreichte Werte bis zu 1000 W/m².

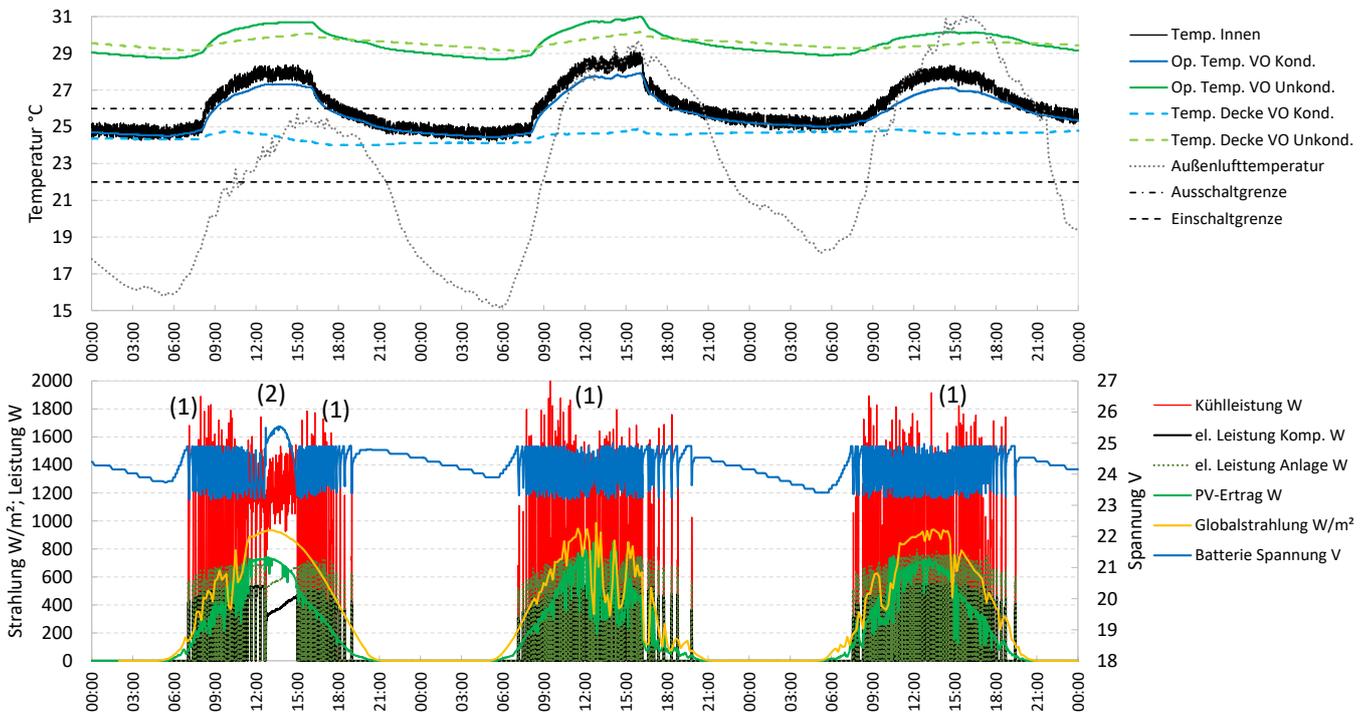


Abbildung 38: Auswertung der Messdaten der KE im Kühlbetrieb (La, Bi) von 04.-06.07.2019

Im betrachteten Zeitraum ist ein ähnliches Verhalten wie vom 08. bis 10.06.2019 zu beobachten (siehe Abbildung 36), nur dass die Konditionierungseinheit (KE) fast ausschließlich im Ein-/Aus Modus betrieben wurde (Abbildung 39), da der PV-Ertrag für einen kontinuierlichen Betrieb nicht ausreichend war **(1)**, wobei das Ein-Aus-Takten wieder durch die Be-/Entladung der Batterie (Spannungsgrenzen) und nicht durch die Raumtemperaturregelung zustande kam. Lediglich am 06.07.2019 ist über Mittag eine kurze Periode zu beobachten, in der die KE kontinuierlich im Betrieb war **(2)**. Die Temperatur der Betondecke (Temp. Decke VO Kond.) lag im konditioniertem Versuchsobjekt immer im Bereich zwischen 24 und 25 °C. Die operative Raumtemperatur (op. Temp. VO Kond.) erreichte Werte bis knapp unter 28 °C, bei einem Minimalwert von 24,5 °C. Im Vergleich dazu lagen die operativen Raumtemperaturen im unkonditioniertem Versuchsobjekt (op. Temp. VO Unkond.) zwischen 28,5 und 31 °C. Im betrachteten Zeitraum konnte die Ausschalt-Temperaturgrenze, die mit 22 °C sehr niedrig eingestellt war, nie erreicht werden, was unter anderem auch an der großen Speichermasse der Betondecke lag. In dieser Konfiguration ergab sich im Mittel eine Kühlleistung in der Höhe von 1099 W, die vom Kompressor benötigte durchschnittliche Leistung lag bei 438 W, die Anlage benötigte im Mittelwert 617 W.

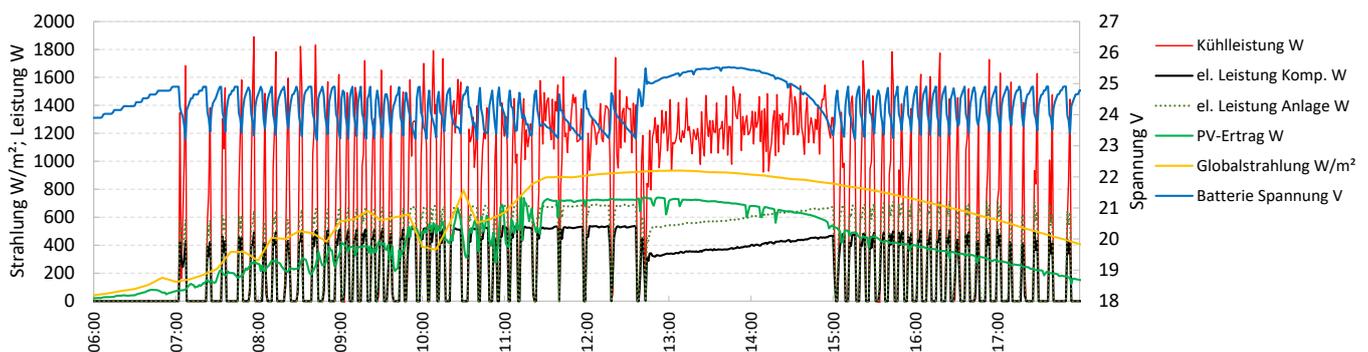


Abbildung 39: Messdaten der KE im Kühlbetrieb (**La, Bi**) am 04.07.2019

Im Zeitraum zwischen 04. und 06.08.2019 lag die elektrische Leistungsaufnahme des Kompressors bei 365 W und für die gesamte Konditionierungseinheit bei 432 W. Im Mittel konnte in diesem Tag eine mittlere Kühlleistung von 1818 W erzielt werden.

Ein weiterer Ausschnitt gegen Ende des Feldtests (22. bis 24.08.2019) ist in Abbildung 40 dargestellt. Die Konditionierungseinheit wurde wieder über die beiden Fan Coils (Fa, Fi) betrieben. Bei Außenlufttemperaturen zwischen 15 und 28 °C und einer Globalstrahlung von bis 750 W/m² konnte die operative Raumtemperatur im konditionierten Versuchsobjekt (op. Temp. VO Kond.) stets unterhalb von 25 °C gehalten werden. Die am Sensor „Temp. Innen“ gemessene Temperatur stieg im gesamten betrachteten Zeitraum nur für ein paar Minuten über die Einschaltgrenze. Am 23.08.2019 war der Kompressor zwischen 14:00 und 16:00 Uhr durchgehend in Betrieb, nachdem er zuvor zwischen 08:00 und 14:00 Uhr immer wieder aufgrund zu niedriger Batteriespannung ausgeschaltet wurde. In den restlichen Kühlphasen war ein, durch das Erreichen der gesetzten Grenztemperaturen in der Regelung bedingter, Ein- und Ausschaltbetriebszustand zu beobachten. Es ist aufgrund der im Vergleich zu Abbildung 36 und Abbildung 38 enger gesetzten Ein- und Ausschaltgrenze zu beobachten, dass die Anlage hier eher aufgrund der Raumtemperatur-Regelung ein- und ausgeschaltet wurde, als aufgrund fehlender Batterieladung.

Die gemessene mittlere elektrische Leistungsaufnahme des Kompressors lag in diesem Zeitraum bei 232 W und die der gesamten Konditionierungseinheit bei 297 W, dabei erreichte die Kühlleistung einen Mittelwert von 1358 W.

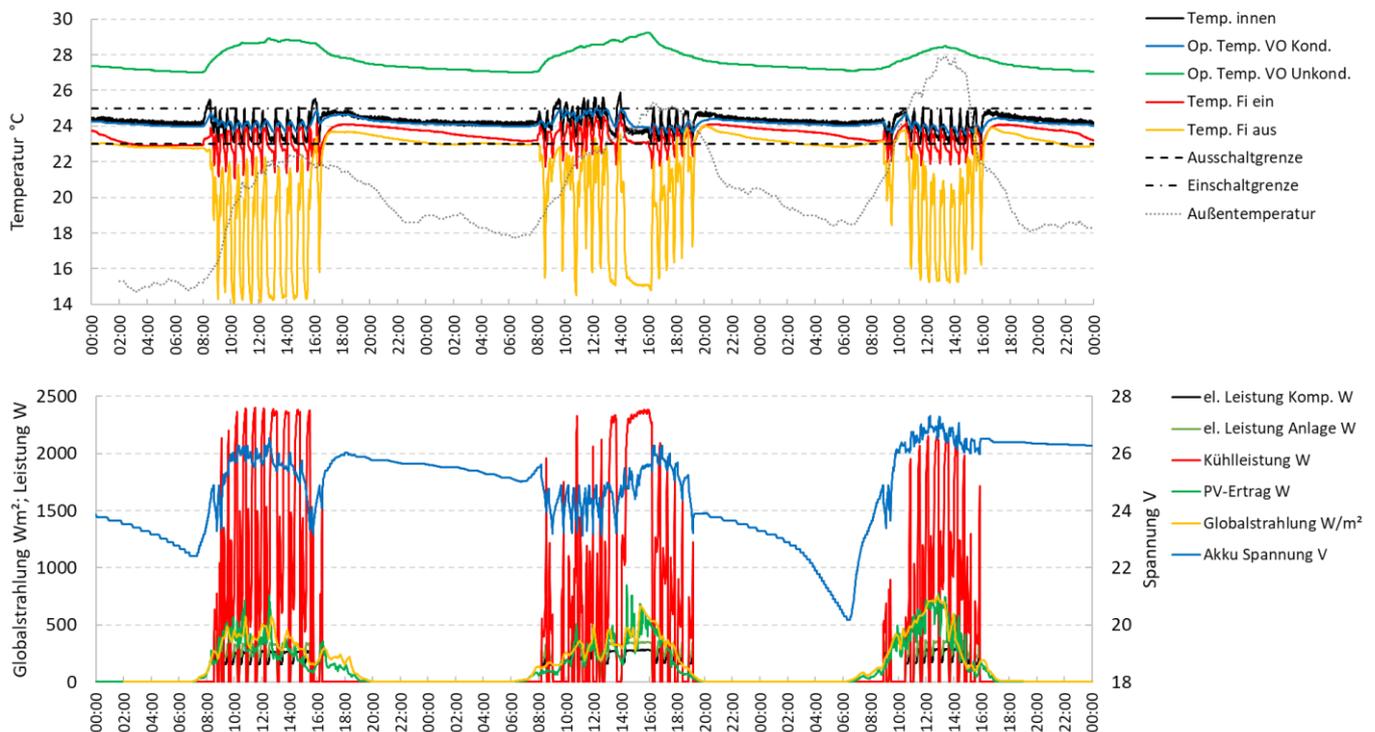


Abbildung 40: Auswertung der Messdaten der KE im Kühlbetrieb (Fa, Fi) von 22.-24.08.2019

3.4 Operative Raumtemperaturen beim und energetische Analyse

Abschließend in der Auswertung der Messdaten aus dem Feldversuch, wird die Temperatur in den Versuchsobjekten mit dem Kriterium der thermischen Behaglichkeit in Zusammenhang gebracht. Dazu dienen die folgenden beiden Abbildungen (Abbildung 41 und Abbildung 42), in denen die operative Raumtemperatur in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur dargestellt ist. In den Diagrammen sind in Anlehnung an die DIN EN ISO 7730 (2005) drei Kategorien eingezeichnet, in denen ein bestimmter Prozentsatz an Personen (bei alltäglichen Büroaktivitäten) prognostiziert wird, die sich aus thermischer Sicht im Raum unwohl fühlen. Für Büroräume liegt der Prozentsatz an Unzufriedenen in der Kategorie A bei <6%, in Kategorie B bei <10% und <15% im Bereich der Kategorie C (Recknagel, 2009).

In Abbildung 41 ist für alle Messzeiträume (2018 und 2019), in denen die Konditionierungseinheit (KE) im Heizbetrieb war (siehe Abbildung 29), die operative Raumtemperatur (op. Temp. VO Kond.) in Abhängigkeit von der Außenlufttemperatur dargestellt. Im Laufe der Messungen im Heizbetrieb wurden insgesamt 1128 Werte für die operative Raumtemperatur (op. Temp. VO Kond.) aufgezeichnet, davon lagen 731 unterhalb der Kategorie A, 503 unterhalb der Kategorie B und 326 unter Kategorie C.

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Die Ergebnisse zeigen, dass das System wie erwartet nicht in der Lage ist über die gesamte Heizsaison behagliche Temperaturen aufrecht zu erhalten. Besonders in Perioden mit niedriger Außenlufttemperatur und gleichzeitig niedriger solarer Strahlung war dies nicht möglich. Jedoch lässt sich aus den Messergebnissen schlussfolgern, dass in der Übergangszeit weitgehend eine ausreichende thermische Behaglichkeit für den Bürobetrieb gewährleistet werden konnte. Dies wird auch durch die Simulationsergebnisse in Kapitel 2.3.3 bestätigt.

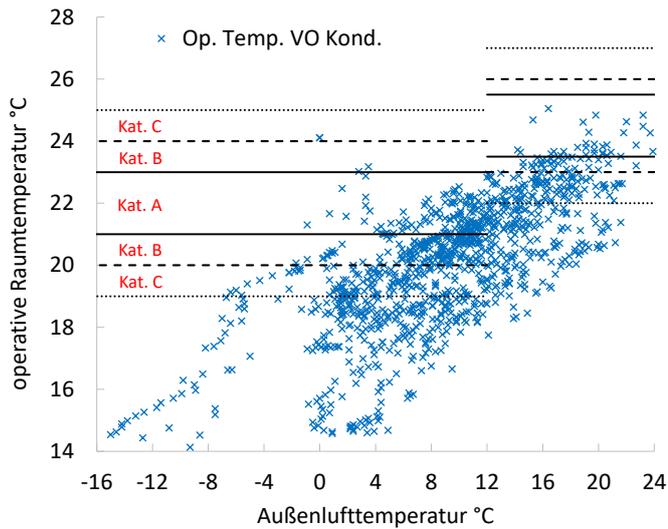


Abbildung 41: Vergleich der operativen Raumtemperaturen in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur im Jahr 2018 und 2019

Wie für den Heizbetrieb, erfolgte auch für den Kühlbetrieb eine Gegenüberstellung der operativen Raumtemperaturen im konditionierten Versuchsobjekt (op. Temp. VO Kond.) und der Außenlufttemperaturen im Behaglichkeits-Diagramm nach DIN EN ISO 7730 (Abbildung 42). Vergleichend dazu werden auch die operativen Raumtemperaturen im unkonditionierten Versuchsobjekt dargestellt (op. Temp. VO Unkond.). Aus dem Diagramm geht hervor, dass durch den Kühlbetrieb die operativen Raumtemperaturen zumeist innerhalb der drei Kategorien A, B und C gehalten werden konnten, während diese ohne Kühlung meist weit oberhalb eines behaglichen Zustands lagen.

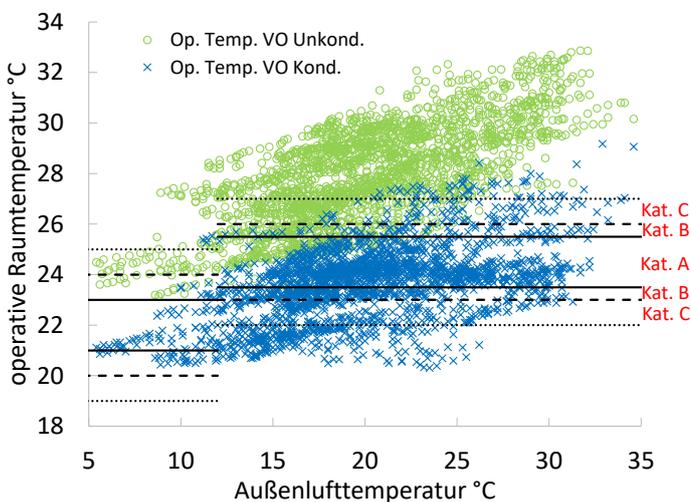


Abbildung 42: Vergleich der operativen Raumtemperaturen in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur im Jahr 2018 und 2019

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

In den folgenden Tabellen (Tabelle 6, Tabelle 7) sind die über die in der Messperiode relevanten Zeiträume (im Kühlbetrieb) aufsummierte Kühlenergie, el. Energieverbrauch des Kompressors (W_{Komp}) bzw. der Anlage (W_{Anlage}), sowie der Energieertrag der PV Anlage (W_{PV}) für die Jahre 2018 und 2019 dargestellt. Außerdem ist auch die vom Stromnetz bezogene Energiemenge (W_{Netz}) angeführt, da ein solcher Betrieb teilweise für in den jeweiligen betrachteten Zeiträumen stattgefunden hat. Zusätzlich wurde auch für jeden dieser Zeiträume die Arbeitszahl des Systems (Performance Faktor PF), sprich die Effizienz der Anlage ermittelt, die sich aus dem Quotienten aus der aufsummierten Kühlleistung und der dafür benötigten el. Energie W_{Anlage} berechnet.

Tabelle 6: Energetische Auswertung Kühlbetrieb für das Jahr 2018

Zeitraum	Syst.	$W_{\text{Kühl}}$	W_{Anlage}	W_{Komp}	PF	W_{PV}	W_{Netz}
		[kWh]	[kWh]	[kWh]	[-]	[kWh]	[kWh]
15.-17.07.2018	La-Bi	7,10	5,86	3,44	1,21	4,90	2,07
01.-09.08.2018	Fa-Bi	75,89	40,96	31,31	1,85	37,33	8,86
16.-18.08.2018	Fa-Fi	16,64	5,64	4,56	2,95	8,98	-
20.08.-09.09.2018	La-Fi	76,25	29,51	23,98	2,58	37,35	-
Summe		175,88	81,97	63,27	2,15	88,56	10,93

Tabelle 7: Energetische Auswertung Kühlbetrieb für das Jahr 2019

Zeitraum	Syst.	$W_{\text{Kühl}}$	W_{Anlage}	W_{Komp}	PF	W_{PV}	W_{Netz}
		[kWh]	[kWh]	[kWh]	[-]	[kWh]	[kWh]
02.-11.06.2019	La-Fi	168,75	37,55	26,45	4,49	44,39	-
11.-24.06.2019	La-Bi	37,14	27,90	20,03	1,33	35,21	-
01.-09.07.2019	La-Bi	86,41	18,76	12,41	4,61	33,49	-
25.07.-07.08.2019	Fa-Fi	146,57	30,93	26,15	4,74	45,71	-
19.-29.08.2019	Fa-Fi	132,17	24,46	19,50	5,40	36,98	-
Summe		571,04	139,59	104,55	4,09	164,53	-

Aus den beiden Tabellen geht hervor, dass die Performance im ersten Jahr (2018) des Feldversuchs mit im Schnitt 2,15 wesentlich niedriger war als im Jahr 2019, in dem im Kühlbetrieb eine Arbeitszahl von im Schnitt 4,09 erzielt wurde. Dies ist auf diverse Umbaumaßnahmen zurückzuführen, sowie auf die Optimierung der Kältemittelmenge im Wärmepumpenkreislauf.

3.5 Elektrotechnische Bewertung der Systemperformance

Gleichlaufend zur Analyse der allgemeinen bzw. thermischen Parameter der Systemperformance wurden auch spezifisch elektrotechnische Analysen zur Systemperformance durchgeführt. In der Folge werden einzelne diesbezügliche Aspekte bzw. Fallstudien dargestellt.

Beispiel der Clear-Sky System-Performance

In der Fallstudie wurde exemplarisch die Leistung des COOLSKIN-Systems während eines klaren Tages (clear-sky) untersucht. Um die Systemleistung bei klarem Himmel zu bewerten, wurde eine eingehende Untersuchung der Batteriezustände durchgeführt. Abbildung 43 zeigt die Ladevorgänge der Batterie für den angegebenen Tag sowie den Tagesverlauf der wesentlichen Parameter. Am frühen Morgen wurde die Batterie geladen und bei Überschreiten der Schwelltemperatur des Testraumes wurde der Kompressor regelmäßig gepulst zugeschaltet. Trotz einer leichten Absenkung der Batteriespannung konnte die Versorgung den ganzen Tag aufrechterhalten werden, da genügend Ertrag zur Verfügung stand. In diesem Zeitraum von 24 Stunden Clear-Sky Bedingungen wurde die Temperatur zwischen den Schwellenwerten in 98,47% der Fälle eingehalten.

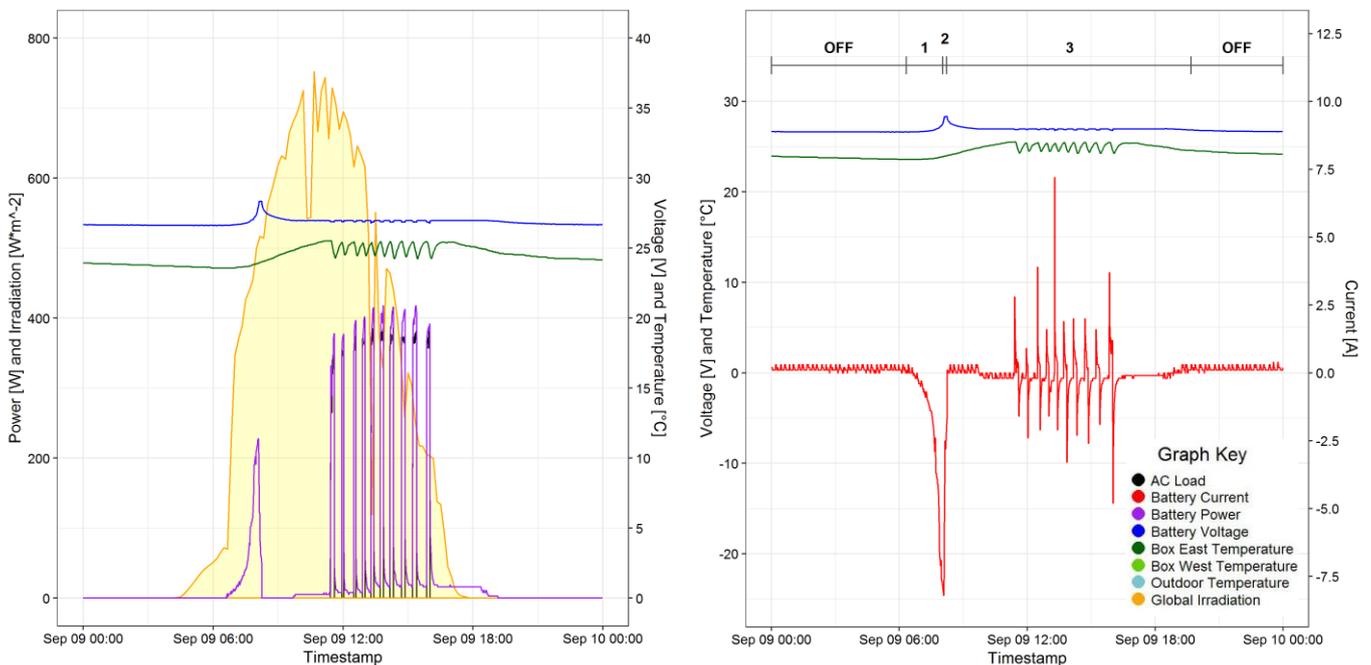


Abbildung 43: Links: Batterieparameter, Wechselstromverbrauch, Bestrahlung und Innentemperatur für einen repräsentativen Tag bei klarem Himmel. Rechts: Batteriespannung, -strom, -innentemperatur und -temperatur. Ladephasen für einen repräsentativen Tag bei klarem Himmel.

Beispiel System-Performance an einem bewölkten Tag

Ein wesentliches Merkmal bewölkter Himmelsbedingungen ist der stark schwankende Solarertrag, wobei dieser in Summe im Vergleich zu klaren Tagen stark reduziert ist.

Auch korreliert der Ertrag nicht immer mit der Kühllastbereitstellung; die Batterie wird dann entleert und die Batteriespannung fällt ab. In Folge kam es zu starken Schwankungen von Lade- und Entladeströmen, sowie einer Absenkung der Batteriespannung gegen Abend (Abbildung 44). Es ist auch zu beachten, dass wechselnde solare Einstrahlung durch die thermische Masse des Raumes bedingt, zeitversetzt zum elektrischen Ertrag zu einer Kühlanforderung führt. In diesem Zeitraum von 24 Stunden bewölkter Bedingungen wurde die Temperatur zwischen den Schwellenwerten in 71,74% der Fälle eingehalten.

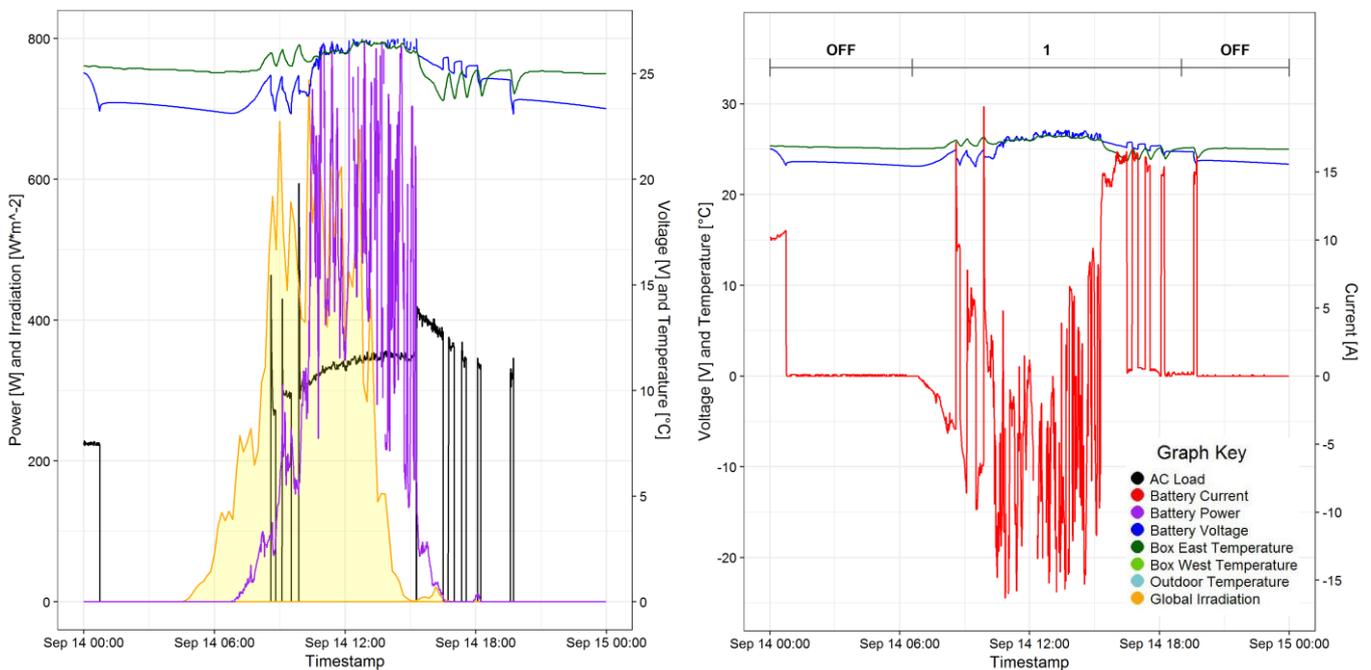


Abbildung 44: Links: Batterieparameter, Wechselstromverbrauch, Bestrahlung und Innentemperatur für einen repräsentativen Tag bei wechselnd bewölktem Himmel. Rechts: Batteriespannung, -strom, -innentemperatur und -temperatur. Ladephasen für einen repräsentativen Tag bei wechselnd bewölktem Himmel.

Batterie Start-Stopp Verhalten (Flackern)

Beim COOLSKIN-System wurde regelmäßig ein typisches Start-Stopp Verhalten (Flackern) der Batteriespannung gefunden, wie es für viele PV-Inselsysteme auftreten kann (Abbildung 45). In bestimmten Fällen ist der Ertrag zu niedrig, um den Akku bei gleichzeitiger Lastanforderung vollständig aufzuladen, aber reicht aus, den Akkuladestand leicht anzuheben. Die Batteriespannung steigt dann bis zum Sicherheits-schwellenwert von 25 V, wodurch vom Regler die Last wieder angeschlossen wird; der Akku entlädt sich sofort wieder. Dadurch wird die Batterie kontinuierlich zwischen der Lasttrenn- und Wiedereinschaltspannung betrieben. Diese Art von Phänomen tritt meist bei Bewölkung auf, oder während kälterer Monate, wenn das System im Heizmodus ist. Dieses Verhalten wurde bereits in den durchgeführten Laboruntersuchungen gezeigt und wurde im Feldtest wieder festgestellt. Kritisch ist, dass es die Lebensdauer von Batterie und Kompressor stark verkürzen kann. Zu vermeiden wäre dieses Verhalten durch eine Änderung der Einstellung der Schwellenwerte und der Systemauslegung.

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

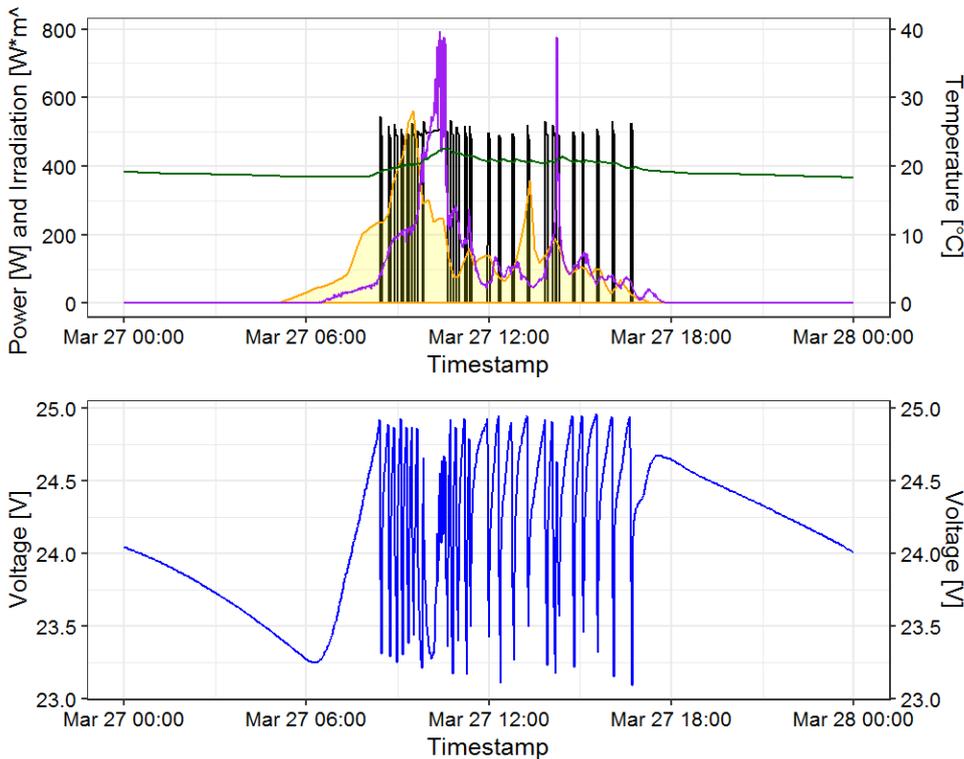


Abbildung 45: Batteriespannung schwingt zwischen den Schwellenwerten von 23V und 25V

Leistungspotential der PV-Paneele

Um den maximal möglichen Energieertrag der PV-Paneele des Feldversuches zu bewerten, wurde eine elektrische Referenzsimulation mit der Software PV*SOL durchgeführt. Die Simulation wurde mit den realen Komponentenparametern, gemessenen AC-Lastdaten für den Jahresverbrauch, aber unter der Annahme des Vorhandenseins eines Netzanschlusses gemacht. Der theoretisch ins Netz eingespeiste Strom entspricht dabei dem Wert des PV-Ertrags, der im realen Feldtest durch Abregelung bei voller Batterie verloren gegangen ist. Die gemessenen und simulierten Ergebnisse stimmen überein, wenn dieser Umstand bei der Interpretation der Ergebnisse aus der PV-Sol Simulation in Betracht gezogen wird. Eine weitere Simulation wurde mit dem Tool PVGIS durchgeführt. Das Ergebnis zeigt, dass wie auch im Feldtest gemessen, in wärmeren Monaten weniger als die Hälfte des verfügbaren Potenzials genutzt werden konnte.

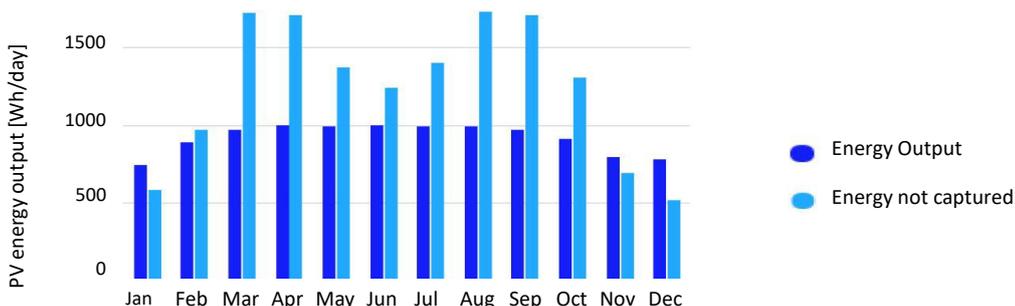


Abbildung 46: Ergebnisdiagramm der Software PVGIS, das den Energieertrag und die nicht verbrauchbare Energie bewertet

Systemeffizienz

Die Wirkungsgrade in Abbildung 47 beschreiben zwei Teileffizienzen (i) die Systemeffizienz von den photovoltaischen Modulen bis zur Batterie (91,61%) und (ii) von der Batterie bis zum Kompressor (62,68%). Die Effizienzen einzelner Komponenten, wie Batterie, Wechselrichter, etc. konnten auf Grund der verfügbaren Messgrößen im Monitoring und der Systemtopologie nicht getrennt bestimmt werden. Im Monitoring wurden PV-Ertrag, Batterieladeleistung bzw. Batterieausgangsleistung und AC-Leistung erfasst. Die Systemtopologie war so, dass es nicht möglich war, die Last von der PV zu versorgen, ohne bei der Batterie Ladung und Entladung zu erzeugen (also kein Bypass der Batterie). Der Wert von 62,68% erscheint auf den ersten Blick sehr niedrig. Die Systemeffizienz auf der Lastseite (Batterie bis Last) beinhaltet aber auch die Verluste, wenn bei voller Batterie und hoher PV-Produktion die PV abgeregelt wurde. Weiter beinhaltet der Wirkungsgrad der Lastseite (Batterie bis Last) Verluste durch den Wechselrichter, der oft in einem Teillastbereich weit weg von seinem optimalen Leistungsbereich betrieben wurde, sowie die Verluste der Ladung/Entladung der Batterie. Dort konnten aber nicht immer identische Komponenten verwendet werden, sowie kein vollständiges Inselfsystem errichtet werden, was die Abweichungen erklärt.

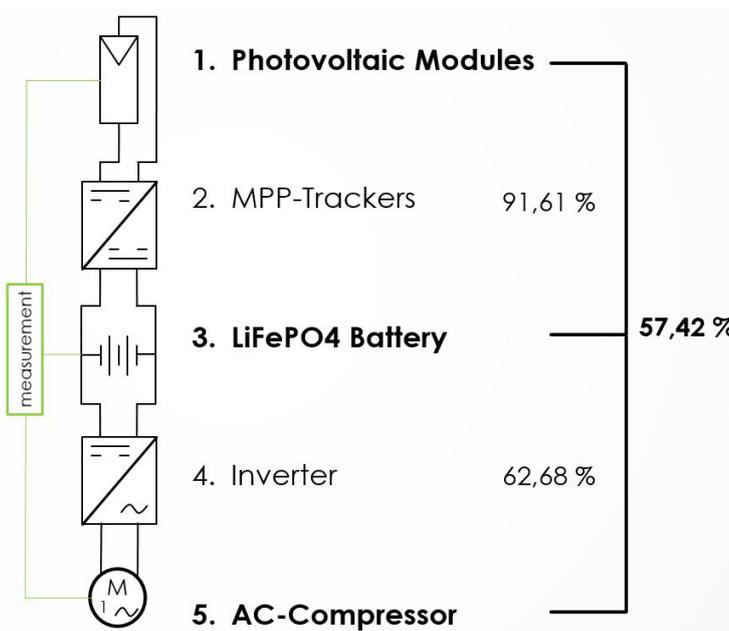


Abbildung 47: Schematische Darstellung des elektrischen Stromkreises und der entsprechenden Schaltung und gemessene Umwandlungswirkungsgrade der eingebauten Komponenten.

4 Numerische Behaglichkeitsanalyse

Die numerische Analyse der thermischen Behaglichkeit bietet die Möglichkeit den thermischen Komfort von Personen schon in der Planung von Räumen und Kühlungskonzepten zu bewerten. Dadurch können schon frühzeitig unterschiedliche architektonische oder gebäudetechnische Konzepte evaluiert und ggfs. optimiert werden. Dafür benötigt es aber valide Simulationstools.

Im Rahmen des vorliegenden Projektes wurde ein Schritt dazu beigetragen, und numerische Simulationen des thermischen Komforts potentieller Bewohner für die beiden Innenräume der Versuchsobjekte (siehe Abbildung 25) mit unterschiedlichen Konditionierungskonzepten durchgeführt und anschließend mit den Messdaten zur Validierung verglichen. Als Simulationstool für die 3D CFD Strömungssimulationen diente das Softwarepaket Star CCM+. Die erzielten Ergebnisse der Strahlung, Konvektion und Luftfeuchte wurden mittels eines thermischen Komfortmodells bewertet. Dabei ist es wichtig, einerseits die Oberflächentemperaturen der umgebenden Hüllflächen exakt zu ermitteln, um die Wärmestrahlung korrekt abzubilden und andererseits auch lokale Strömungssituationen detailliert wiederzugeben, um die Konvektion korrekt zu erfassen. Basis für die Validierung des Kühlfalles waren Messungen an zwei Sommertagen, jeweils von 08:00 bis 16:00. Im Zuge der numerischen Untersuchungen wurden zwei unterschiedliche Kühlstrategien analysiert, die jeweils miteinander und auch mit den unconditionierten Fällen verglichen wurden. Das Komfortempfinden wurde für zwei im Raum befindliche Personen, die beide einer sitzenden Tätigkeit nachgehen, ausgewertet.

4.1 Untersuchungsansatz

Der Untersuchungsansatz besteht darin, den Testaufbau mittels 3-dimensionaler Strömungssimulation abzubilden, ebenso wird der Wärmeeintrag entsprechend abgebildet. Die verschiedenen Konzepte der Raumklimatisierung werden simuliert und der Einfluss auf zwei im Raum befindliche Personen mittels einer Komfortbewertung analysiert. Die Simulation basiert auf den Messdaten der Versuche, die vom Institut für Wärmetechnik an der TU Graz durchgeführt wurden.

4.1.1 Beschreibung Messaufbau / Messungen

Die Messdaten bestehen aus Ergebnissen der simultanen Messung der zwei nebeneinanderstehenden Container. Ein Container wurde dabei konditioniert der zweite nicht. Die folgenden zwei Kühlkonzepte wurden an zwei verschiedenen Tagen gemessen:

- Konzept „Decke“: Die Decke des Raums wurden auf eine Oberflächentemperatur von 22°C gekühlt.
- Konzept „Fan Coil“: Der Raum wurde mittels einer konventionellen Klimaanlage (HVAC) gekühlt.

In den Versuchsobjekten wurde jeweils ein geregelter Heizer aufgestellt, um eine Abwärme von 300 W, entsprechend zwei arbeitenden Personen inkl. PC und Bildschirm, zu emittieren. Luft und Wandtemperaturen wurden mehrere Tage lang gemessen.

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Zwei unterschiedliche Tage (Messung „Decke“ vom 06.08.2018 und Messung „Fan Coil“ vom 04.07.2018) wurden für den Abgleich der Simulation mit dem Versuch verwendet. In Abbildung 48 sind die Umgebungstemperaturen in °C und die solare Einstrahlung in W/m² an den zwei Tagen, über den Tagesverlauf, dargestellt.

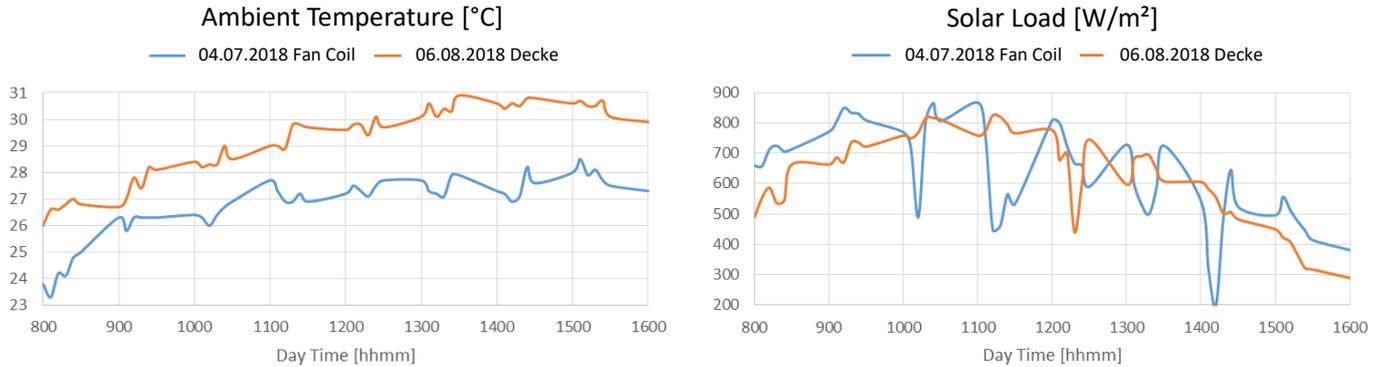


Abbildung 48: Verlauf der Umgebungstemperatur und Verlauf der Sonneneinstrahlung an den zwei relevanten Testtagen

4.1.2 Aufbau und Bedeutung des Simulationsmodells

Das Simulationsmodell wurde in Star-CCM+ erstellt, es handelt sich um ein s.g. „conjugated heat transfer“ (CHT) 3D CFD Modell, das die Strömung und Temperatur der Raumluft basierend auf Wärmestrahlung, Konvektion und Konduktion abbildet. Geometrisch entspricht es dem realen Versuchsaufbau. Die Wände wurden nicht als Festkörper modelliert, stattdessen wurden die Wandtemperaturen aus der Messung als Randbedingung vorgegeben. Die Tische wurden als Festkörper (mit den Materialeigenschaften von Holz) modelliert. Im Inneren wurden Dummies (entsprechend zwei Personen) jeweils an einen Schreibtisch inkl. PC und Bildschirm gesetzt, diese emittierten eine Abwärme von 300 W. Die Abbildung 49 zeigt zudem die Anordnung der zwei Testcontainer nach der Himmelsrichtung.

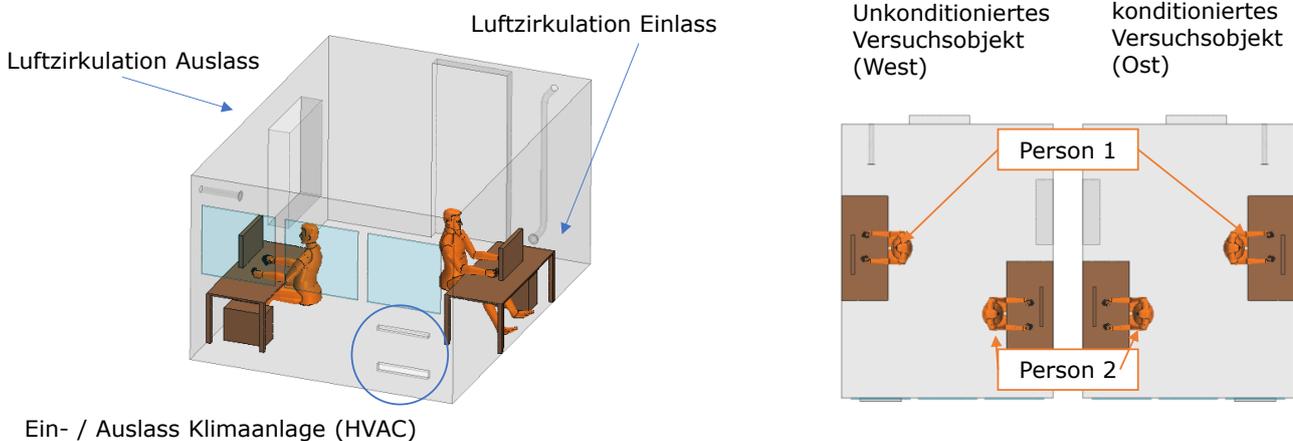


Abbildung 49: Simulationsmodell der Versuchsobjekte inkl. Personen und Einrichtung und örtliche Anordnung (rechts)

Die zeitlich veränderliche solare Einstrahlung wurde, wie sie an den Messtagen aufgezeichnet wurde, simuliert. Durch die Vorgabe der Wandtemperaturen auf Boden und Seitenwände wurde der solare Wärmeeintrag nicht direkt simuliert, aber trotzdem berücksichtigt. Keine der Personen wurde direkt von der Sonne angestrahlt. Die Randbedingungen wurden in den Simulationen folgendermaßen definiert:

- Wand- und Lufttemperaturen wurden entsprechend den Werten aus der Messung vorgegeben.
- Veränderliche solare Einstrahlung wurden entsprechend den Werten aus der Messung vorgegeben
- Beim Konzept „Decke“ wurde die Decke des Raums mit 22°C konditioniert
- Beim Konzept „Fan Coil“ wurde Luftmassenstrom und -temperatur wie in der Messung vorgegeben.
- Wie Wärmequelle von 300 W wurde auf Personen, PCs und Monitore verteilt

4.1.3 Beschreibung Behaglichkeits- / Komfortbewertung

Die thermische Komfortbewertung basiert auf einem 1-dimensionalen Berechnungsmodell für jede Person, basierend auf deren einzelnen Körperregionen. Es sind pro Person 14 Körperteile / -bereiche definiert (Kopf, Torso, Hände, usw.). Jedes Körperteil wird mittels 5 Schichten (Knochen, Muskel, Fett, Haut, Bekleidung) abgebildet. Die Wärmeproduktion sowie der Wärmetransport zwischen den jeweiligen Teilen wird modelliert. Der Aktivitätslevel, hier Büroarbeit, und die Kleidung (Clo: 0,96) wurden vorgegeben. Aktive menschliche Thermoregulationsvorgänge und Blutzirkulation können ebenfalls erfasst werden, wie z.B. in Abbildung 50 dargestellt. Die Bewertung wurde mit dem 3D CFD Model gekoppelt.

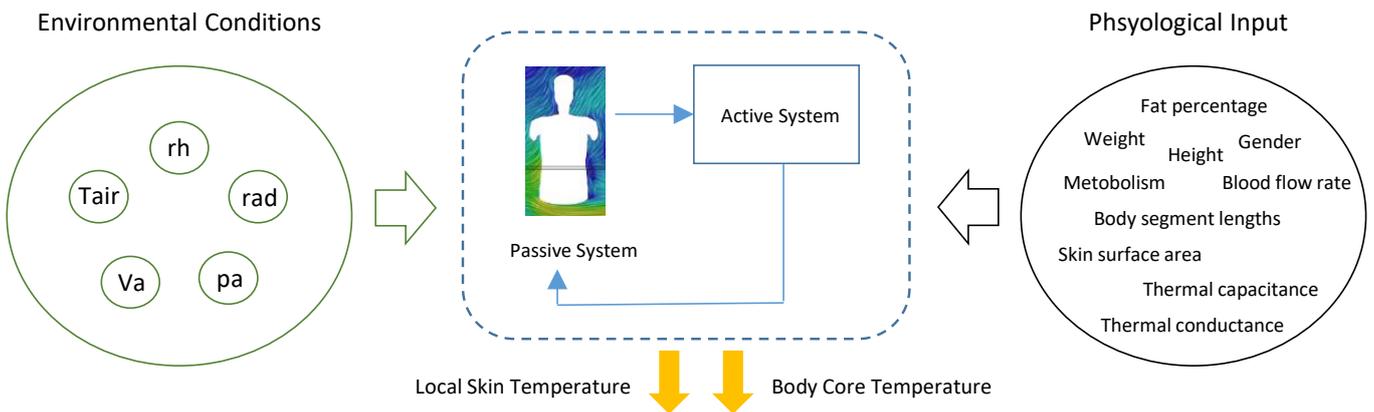


Abbildung 50: Schema der Inputs/Outputs zu Bewertung des thermischen Komforts [nach Katic et. al, 2016]

Für die Komfortbewertung wird für jedes Körperteil/-bereich eine sogen. „äquivalente Temperatur“ (T_{eq}) berechnet. Diese ist definiert als „die Temperatur eines imaginären Raums mit einer mittleren Temperatur gleich der Lufttemperatur bei stillstehender Luft, in welchem eine Person durch Konvektion und Strahlung denselben Wärmeaustausch erfährt als unter den realen Bedingungen (Abbildung 51, rechts).

Lokale äquivalente Temperaturen für die einzelnen Körperbereiche werden mittels einer Gewichtung zur Bewertung des Komfort-Befindens herangezogen. Diese Definition basiert auf einer statistischen Analyse von [Håkan O Nilsson, 2004] zur Komfortbewertung einer Probandenreihe bei verschiedenen klimatischen Bedingungen. Als Ergebnis können die berechneten äquivalenten Temperaturen für jeden Körperbereich in das Diagramm in Abbildung 51 (links) eingetragen werden. In dem angeführten Beispiel fühlt sich die Person warm aber noch nicht unangenehm heiß.

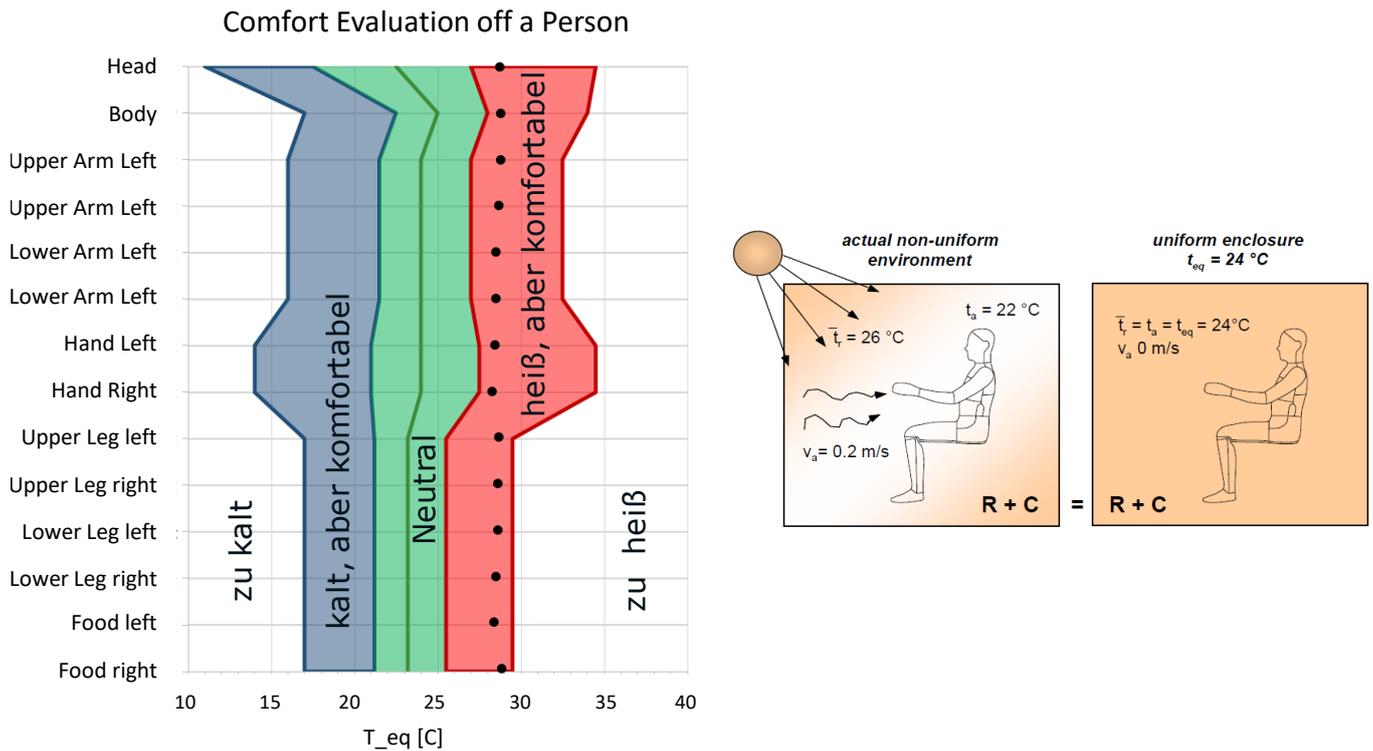


Abbildung 51: Imaginärer und realer Raum zur Definition der äquivalenten Temperatur T_{eq} (rechts) und beispielhafte Darstellung zur Komfortbewertung für einzelne Körperteile/-bereiche mittels der äquivalenten Temperatur (links)

4.1.4 Validierung der Simulationsmodelle

Zur Validierung der Simulationsergebnisse wurden gemessene und berechnete Temperaturwerte, über den Tagesverlauf, miteinander verglichen. Dazu wurden für die Messung in jeden Versuchsraum zwei Thermometer „pendelartig“ von der Decke des Raums gehängt. Eines befand sich in der Nähe des Fensters, das andere in der Nähe der Türe. Beide Pendelthermometer waren auf halber Raumhöhe, der Abstand zu den Wänden betrug ca. 1 m. Im Zuge der Validierung wurden Messung und Simulation jeweils für den unconditionierten Versuchsraum (keine Raumkühlung aktiv) und den konditionierten Versuchsraum (Raumkühlung aktiv) verglichen.

In Abbildung 52 (oben) ist der Vergleich zw. Messung und Berechnung für das Konzept „Decke“ dargestellt. Es zeigt sich ein unterschiedlicher Temperaturanstieg von 08:00 bis 09:00. Um 09:00 besteht zwischen Messung und Berechnung eine Abweichung von ca. 1 K, danach laufen die zwei Kurven parallel.

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Die Ursache für diese Abweichung liegt in der Vorgabe der Wandtemperaturen in der Simulation, dadurch wird der Strahlungseintrag etwas unterschätzt. Speziell in den Morgenstunden ist dieser Effekt ausgeprägt. Es zeigt sich aber trotzdem, dass grundsätzlich eine gute Vergleichbarkeit von Messung und Berechnung gegeben ist, besonders wenn die Messunsicherheit auch mitberücksichtigt wird. Abbildung 52 (unten) zeigt den Vergleich zwischen Messung und Berechnung für das Konzept „Klima“. Im un-konditionierten Versuchsraum zeigt sich wieder derselbe Effekt wie beim Konzept „Fan Coil“. Es ergibt sich ein unterschiedlicher Temperaturanstieg von 08:00 bis 09:00. Um 09:00 besteht zwischen Messung und Berechnung eine Abweichung von ca. 1 K, danach laufen die zwei Kurven parallel. Die Ursache für diese Abweichung liegt in der Vorgabe der Wandtemperaturen in der Simulation, dadurch wird der Strahlungseintrag etwas unterschätzt. Speziell in den Morgenstunden ist dieser Effekt ausgeprägt. Im konditionierten Versuchsraum zeigt sich zwischen Messung und Berechnung ein unterschiedlicher Trend. Als Ursache sind die Person zu sehen, die in der Simulation im Luftstrom aus der Klimalüftung (HVAC) positioniert wurde. In der Messung war diese Person nicht im Versuchsraum vorhanden. Alle anderen in der Simulation verwendeten Randbedingungen, und damit der Energieaustausch im Raum, wurden wie in den Messungen definiert und vorgegeben. Damit ergibt sich trotz der Abweichung an den Pendelthermometern eine globale Vergleichbarkeit von Simulation und Messung. Es sind daher auch die Simulationsergebnisse für das Konzept „Klima“ als valide anzusehen und können für Vergleiche herangezogen werden.

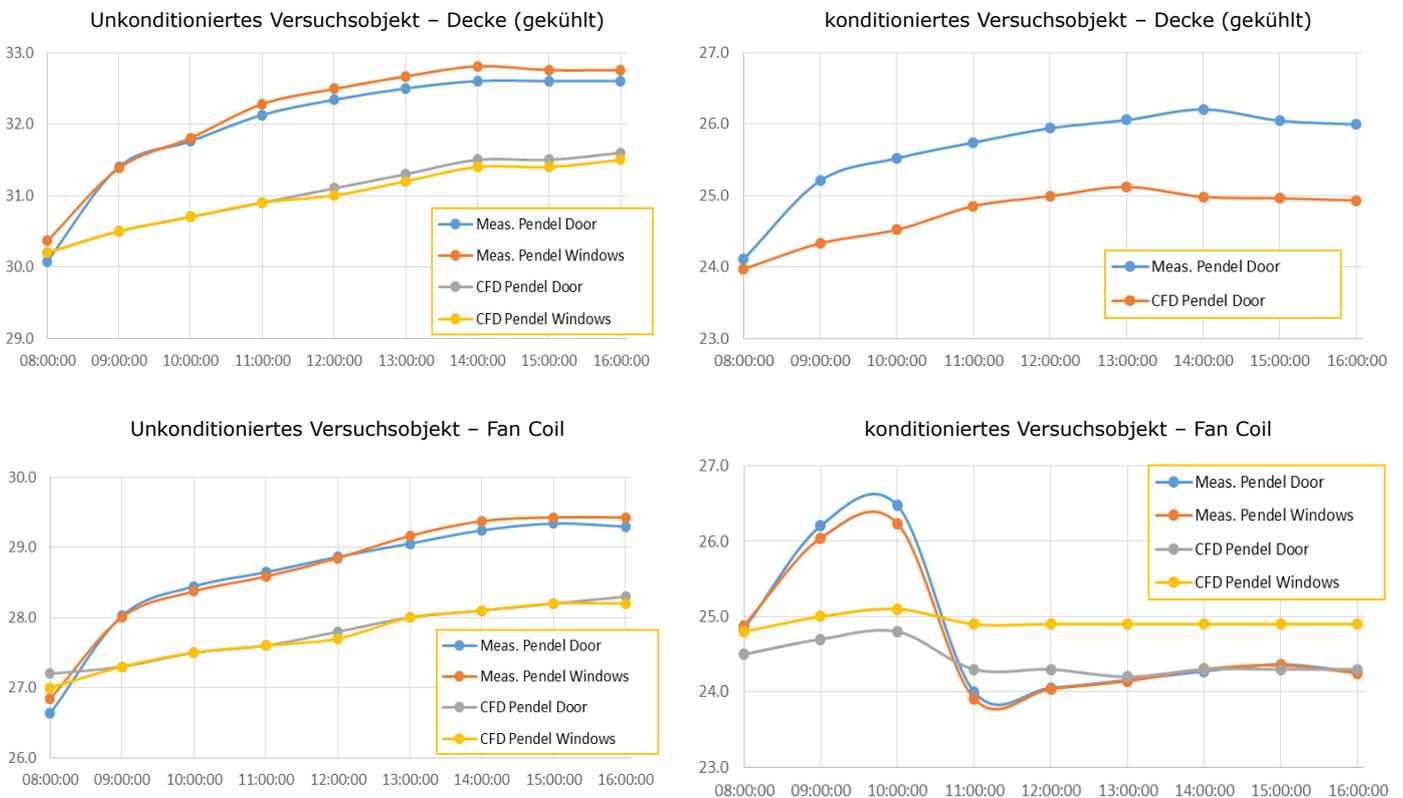


Abbildung 52: Konzept „Decke“ (Messung vom 06.08.2018) - Gemessene und berechnete, zeitlich veränderliche Temperaturen (oben) und Konzept „Fan Coil“ (Messung vom 04.07.2018) - Gemessene und berechnete, zeitlich veränderliche Temperaturwerte in den Versuchsräumen

4.2 Strömungs- / Geschwindigkeitsverteilungen der Luftströmung

In diesem Kapitel werden die unterschiedlichen Strömungsverhältnisse in den Versuchsräumen und die Auswirkungen auf den Komfort analysiert, wozu im ersten Schritt die Verteilung der Luftgeschwindigkeiten in den Versuchsgebäuden mittels Simulation untersucht wird. Obwohl sich die Lufttemperatur über den Messtag leicht erhöht, kann davon ausgegangen werden, dass sich diese Verteilungen über den ganzen Tag nicht massiv ändern. Daher wurden die Auswertungen auf einen Zeitpunkt beschränkt und als repräsentativer Zeitpunkt 14:00 Uhr gewählt. Die Erklärung der Simulationsergebnisse ist Abbildung 53 und Abbildung 54 zu entnehmen.

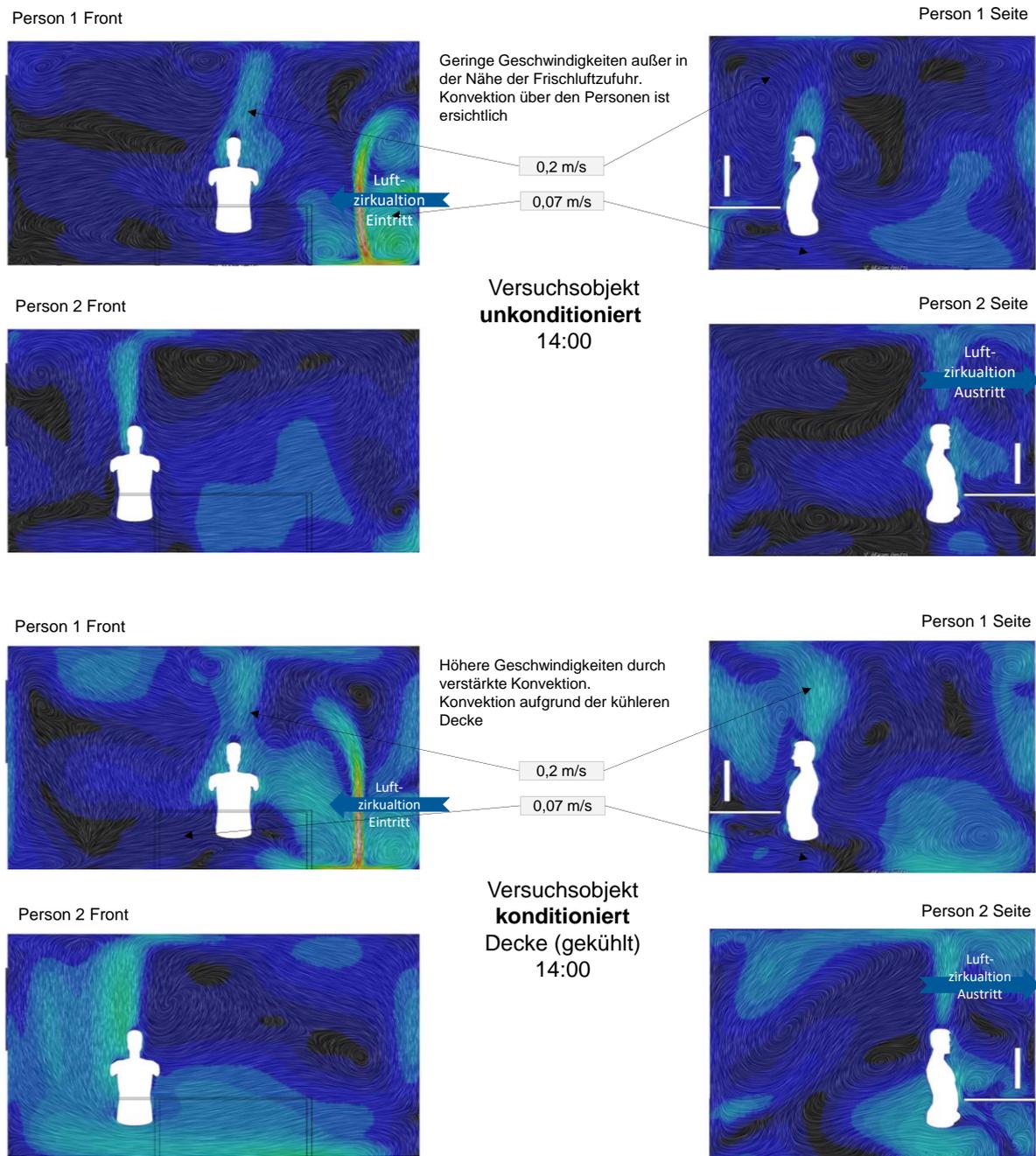


Abbildung 53: Konzept „Decke“ (Messung vom 06.08.2018), Verteilung der Luftgeschwindigkeit im **unkonditionierten Versuchsraum** (oben) und im **konditionierten Versuchsraum** (unten), Auswertung der Simulation für Zeitpunkt 14:00

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

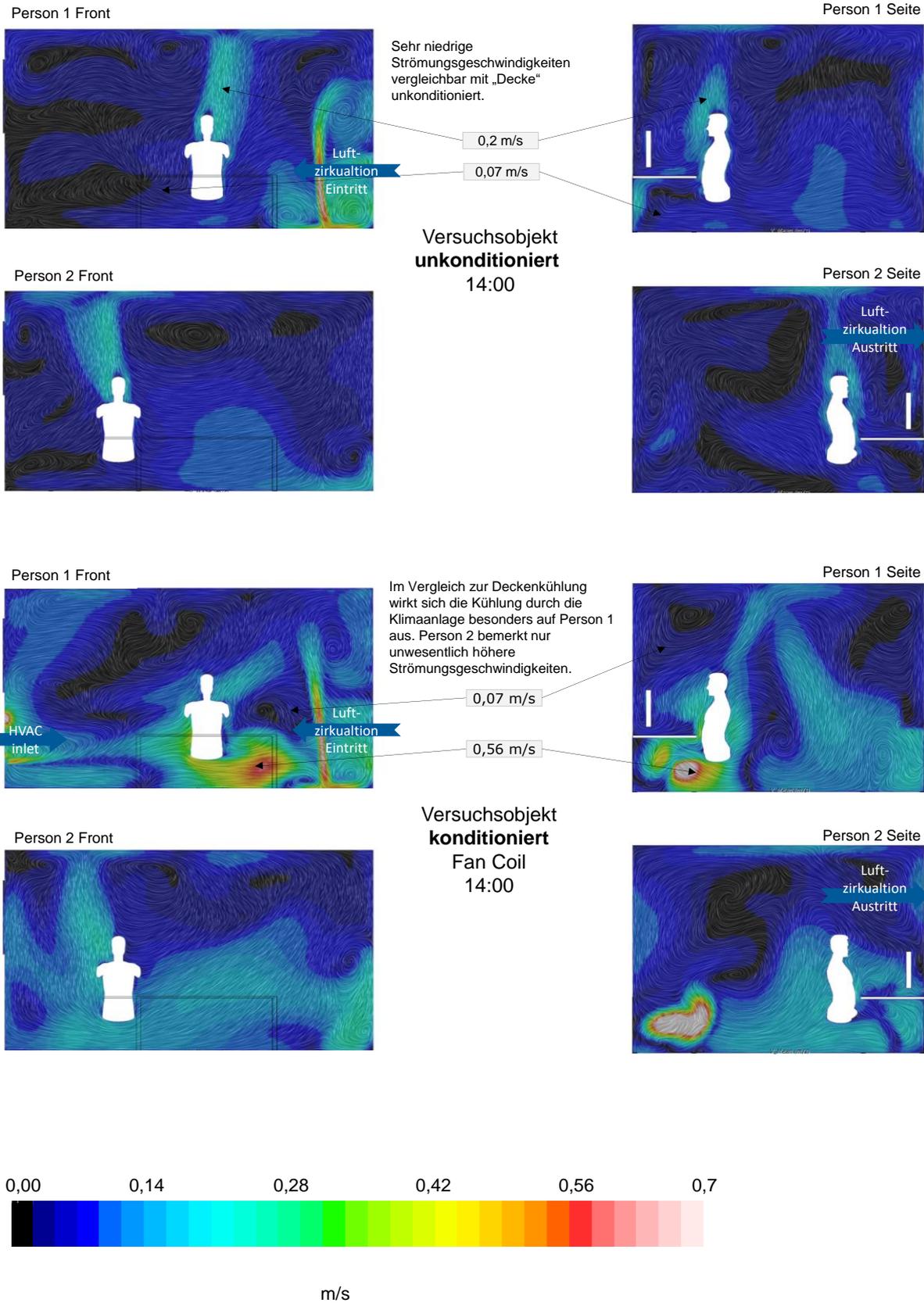


Abbildung 54: Konzept „Fan Coil“ (Messung vom 04.07.2018), Verteilung der Luftgeschwindigkeit im **unconditionierten Versuchsraum** (oben) und im **konditionierten Versuchsraum** (unten), Auswertung der Simulation für Zeitpunkt 14:00

4.3 Temperaturverteilung in den Versuchsräumen

Wie bereits bei den Luftgeschwindigkeiten, wurde die Verteilung der Lufttemperatur im Container ausgewertet. Auch hier kann davon ausgegangen werden, dass sich diese Verteilungen in ihrer Struktur über den ganzen Tag nicht massiv ändern, es kommt nur zu Änderungen der Absolutwerte. Daher wurden auch diese Auswertungen der Simulation auf einen Zeitpunkt beschränkt. Als repräsentativer Zeitpunkt wurde hier ebenfalls 14:00 gewählt. Die Simulationsergebnisse sind in Abbildung 55 und in Abbildung 56 dargestellt. Die Beschreibung der Ergebnisse ist den jeweiligen Diagrammen zu entnehmen.

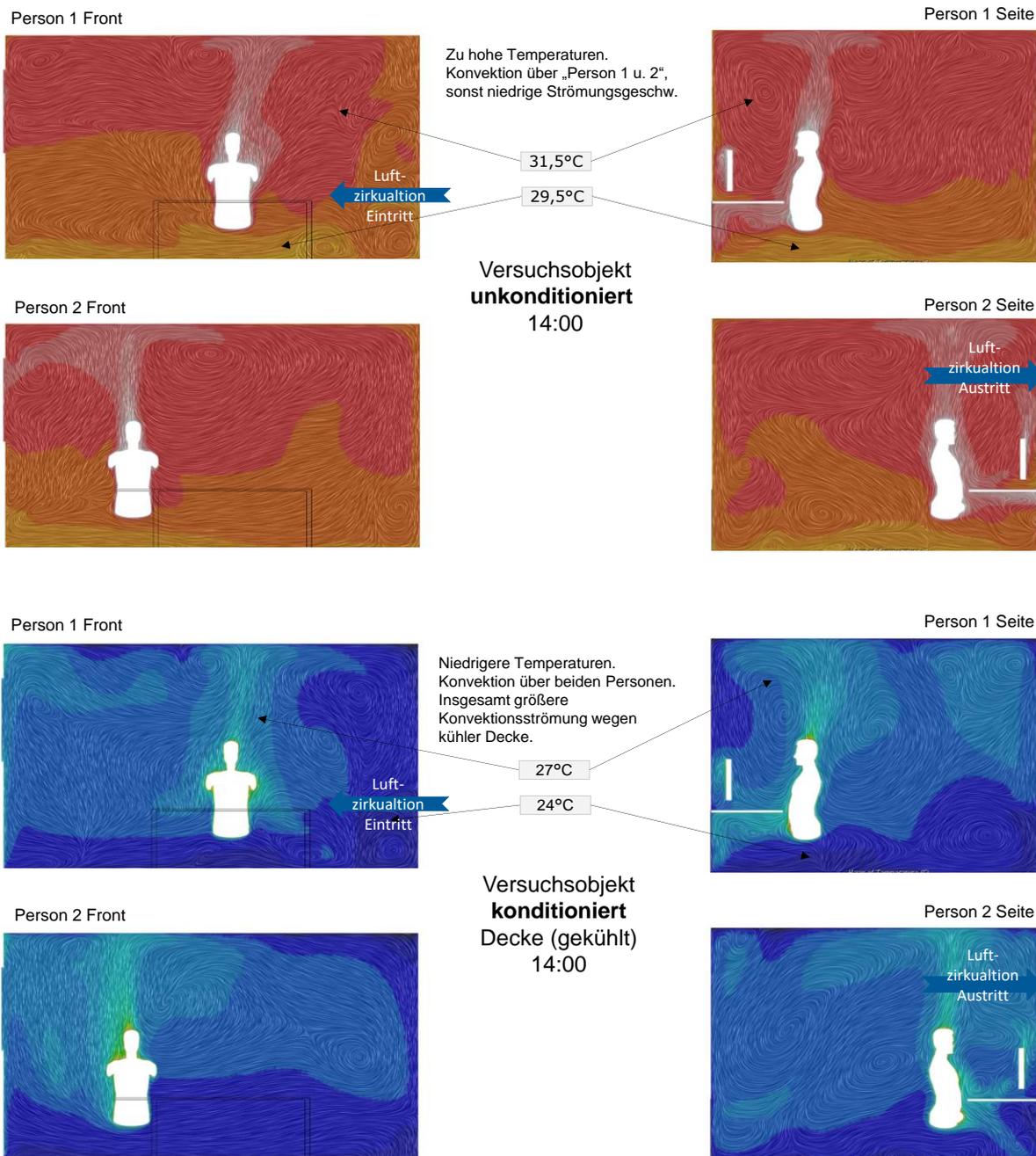


Abbildung 55: Konzept „Fan Coil“ (Messung vom 06.08.2018), Verteilung der Lufttemperatur im **unkonditionierten** Versuchssubjekt (oben) und Verteilung der Lufttemperatur im **konditionierten** Versuchssubjekt (unten), Auswertung der Simulation für Zeitpunkt 14:00

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

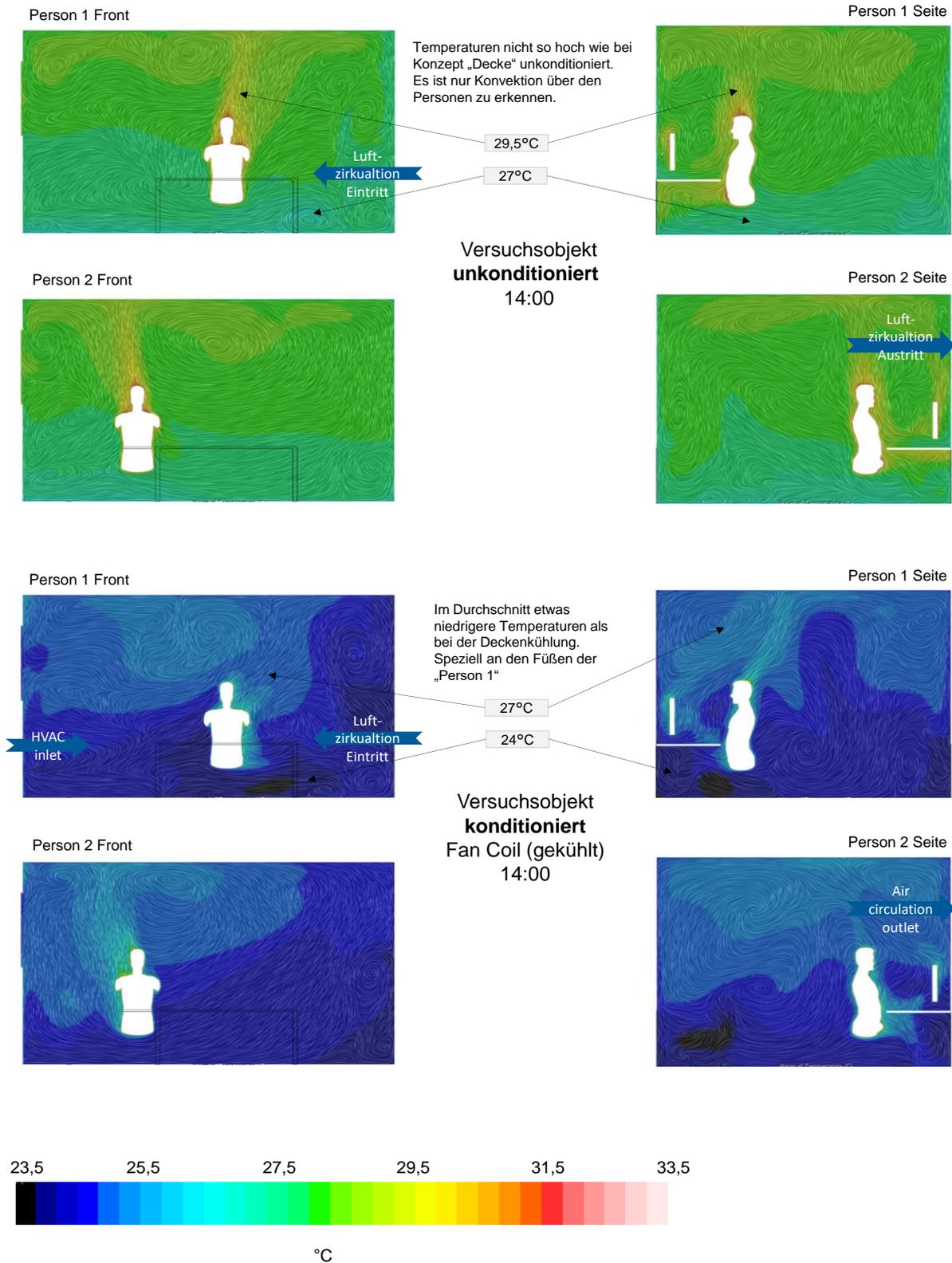


Abbildung 56: Konzept „Fan Coil“ (Messung vom 04.07.2018), Verteilung der Lufttemperatur im **unkonditionierten** Versuchsobjekt (oben) und Verteilung der Lufttemperatur im **konditionierten** Versuchsobjekt (unten), Auswertung der Simulation für Zeitpunkt 14:00

4.4 Verlauf der Temperaturen über den ganzen Tag

Die Auswertung der Berechnungsergebnisse erfolgte, parallel zu den Komfortbewertungen, in verschiedenen Bereichen der Versuchsobjekte. Dazu wurden 12 Zonen definiert, in denen die mittlere Temperatur und die mittlere Luftgeschwindigkeit über den Messtag ausgewertet wurde (siehe Abbildung 57).

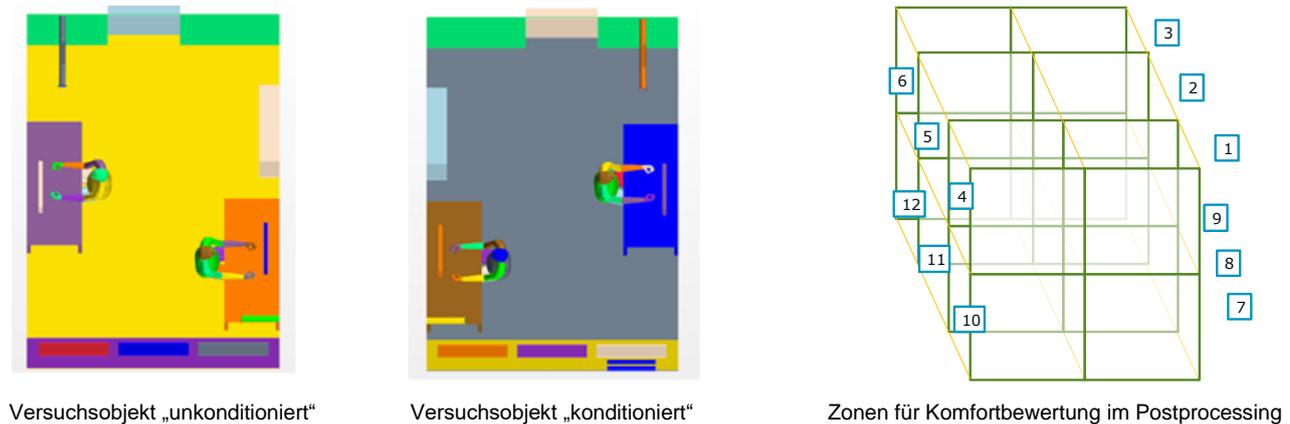


Abbildung 57: Zonen für die Auswertung der Temperatur in den Versuchsobjekten

Ebenso wurden die mittleren Oberflächentemperaturen für die einzelnen Körperteile der Personen in den Versuchsobjekten ausgewertet und dargestellt. Da die Messungen an unterschiedlichen Tagen stattfanden, wurden diese Auswertungen für das Konzept „Decke“ und das Konzept „Fan Coil“ für das konditionierte und das konditionierte Versuchsobjekt durchgeführt. In Abbildung 58 bis Abbildung 61 sind diese Ergebnisse dargestellt. Die Erklärungen bzw. Beschreibungen der Ergebnisse sind den jeweiligen Diagrammen zu entnehmen und in der Folge kurz zusammengefasst.

Zusammenfassung der Berechnungsergebnisse

- Die Komfortsituation in den **unkonditionierten** Versuchsobjekten reicht von **heiß, aber noch akzeptabel bis zu unzulässig heiß** (aufgrund der an einem Tag um 4°C höheren Umgebungstemperaturen).
- Beide Kühlkonzepte bringen die Temperaturen wieder in einen **neutralen, wenn auch leicht warmen Zustand**.
- Mit dem **Konzept „Decke“** sind die Bedingungen im gesamten Raum einheitlich.
- Mit dem **Konzept „Fan Coil“** sind die Bedingungen in der Nähe der Klimaanlage kälter und können unangenehm werden.
- Beide Kühlkonzepte zeigen eine höhere Luftzirkulation als ohne Konditionierung. Die Luftgeschwindigkeiten sind jedoch überall recht niedrig (außer in der Nähe des HVAC), sodass ein Luftzugwahrscheinlich nicht zu spüren ist.
- Bei der Kühlung über die Klimaanlage kürzt die Strömung nicht in der Nähe des Einlasses und des Auslasses ab, sondern setzt die Luft des gesamten Raums wie gewünscht in Bewegung.

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

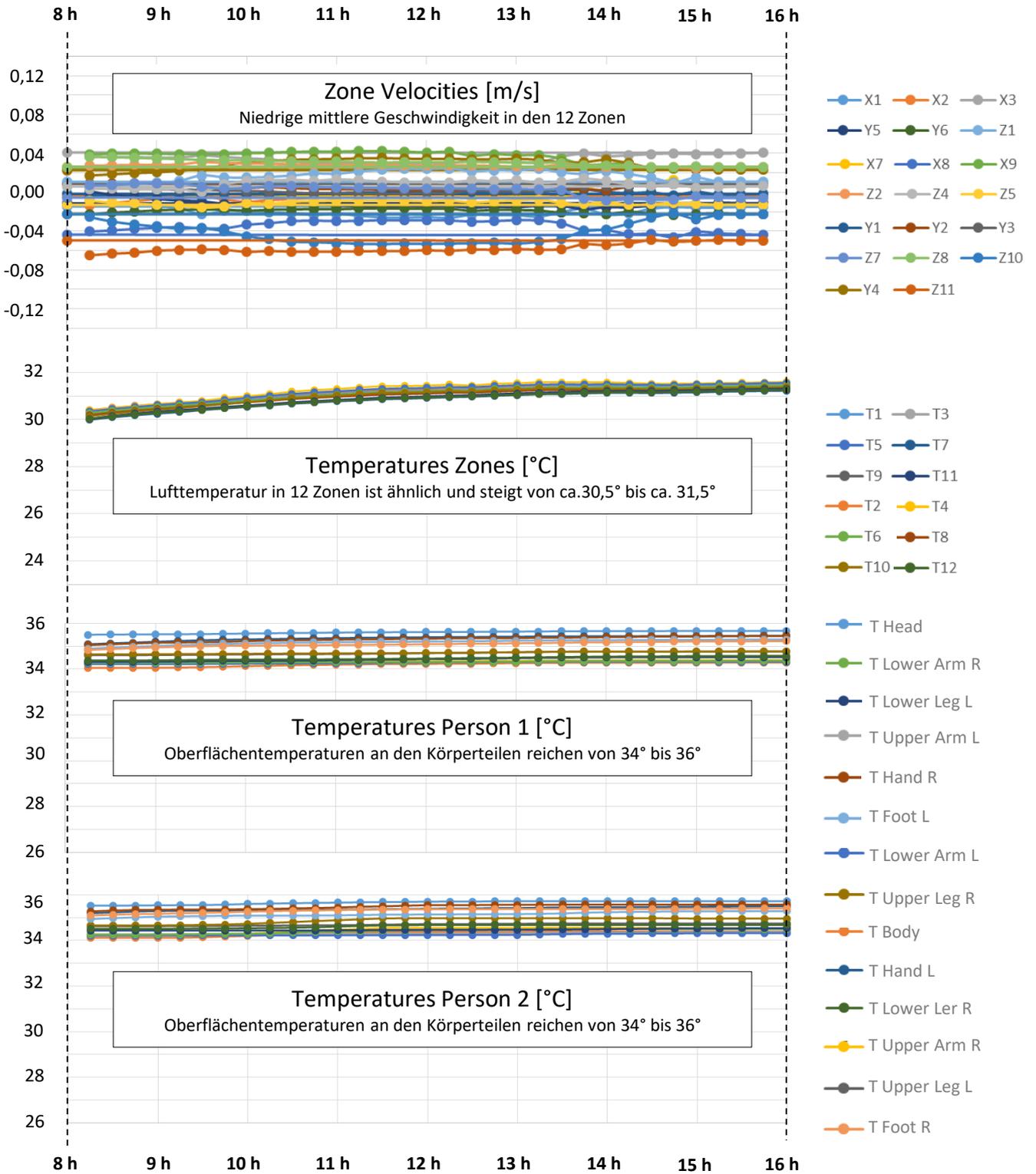


Abbildung 58: Konzept „Decke“ (Messung vom 06.08.2018), **unkonditioniertes** Versuchsobjekt - zeitlicher Verlauf der Temperatur aus der Simulation in den Zonen des Containers und an den Körperteilen der Personen

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

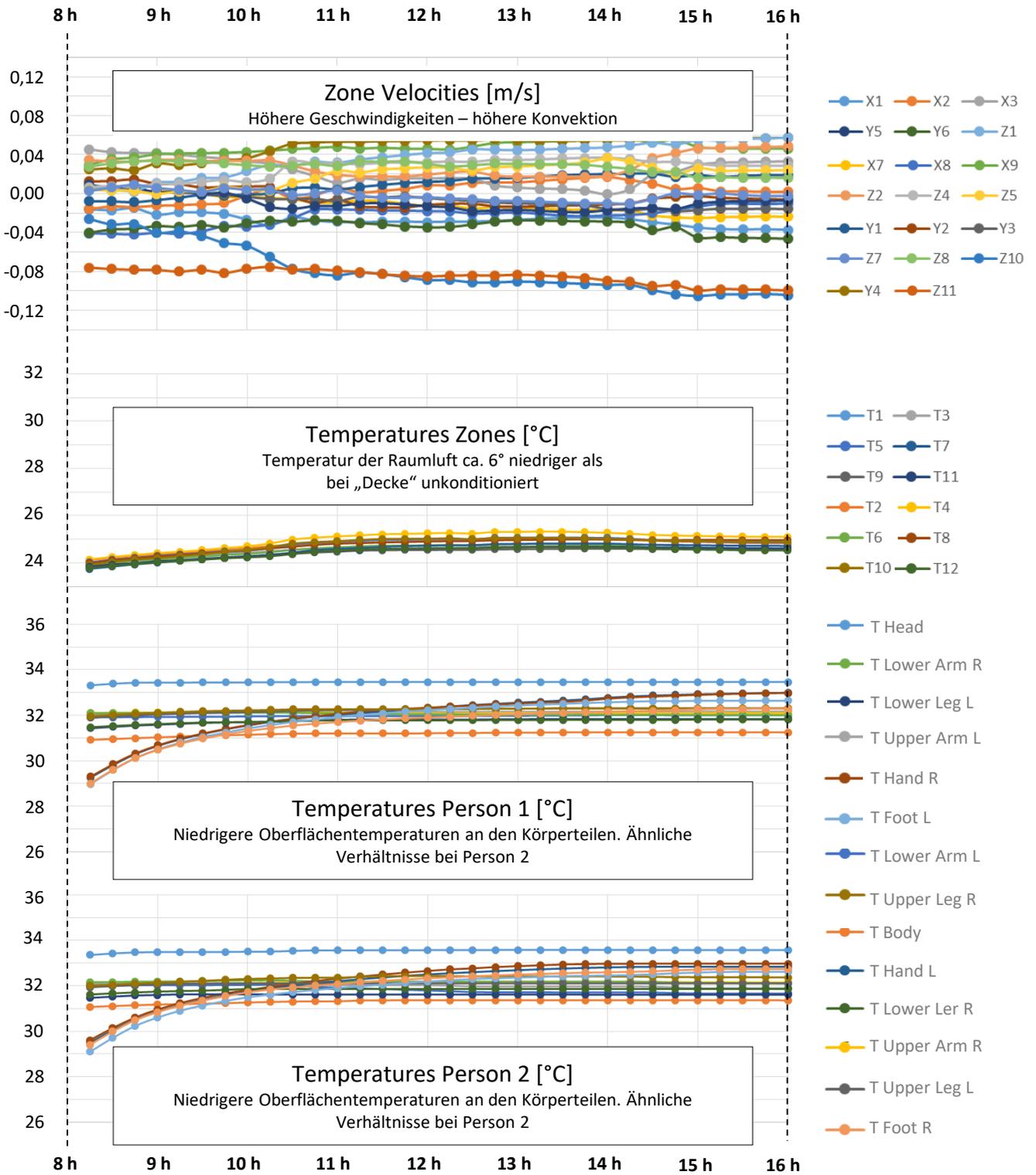


Abbildung 59: Konzept „Decke“ (Messung vom 06.08.2018), **konditioniertes** Versuchsobjekt - zeitlicher Verlauf der Temperatur aus der Simulation in den Zonen und an den Körperteilen der Personen

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

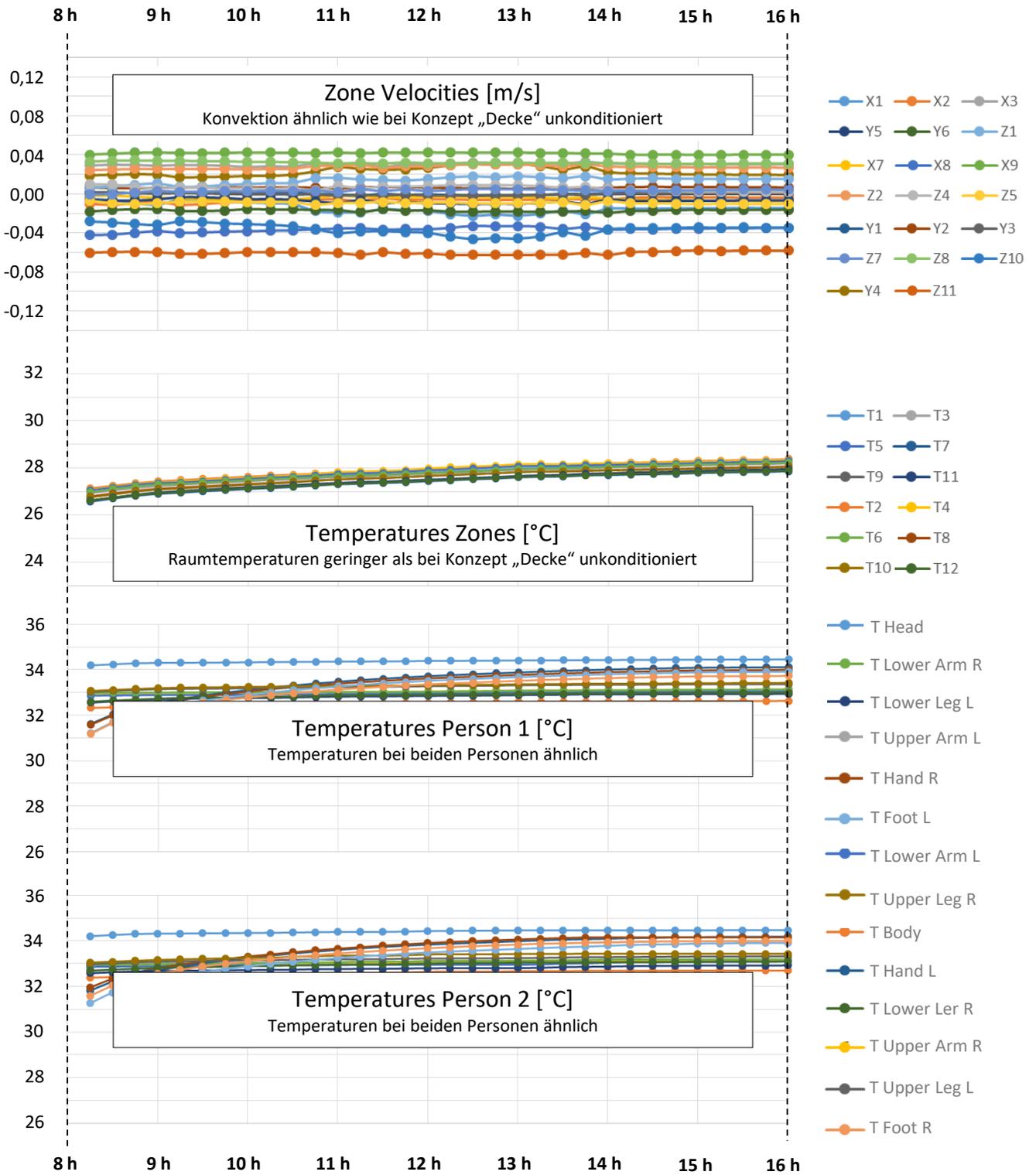


Abbildung 60: Konzept „Fan Coil“ (Messung vom 04.07.2018), **unkonditioniertes** Versuchsobjekt - zeitlicher Verlauf der Temperatur aus der Simulation in den Zonen und an den Körperteilen der Personen

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

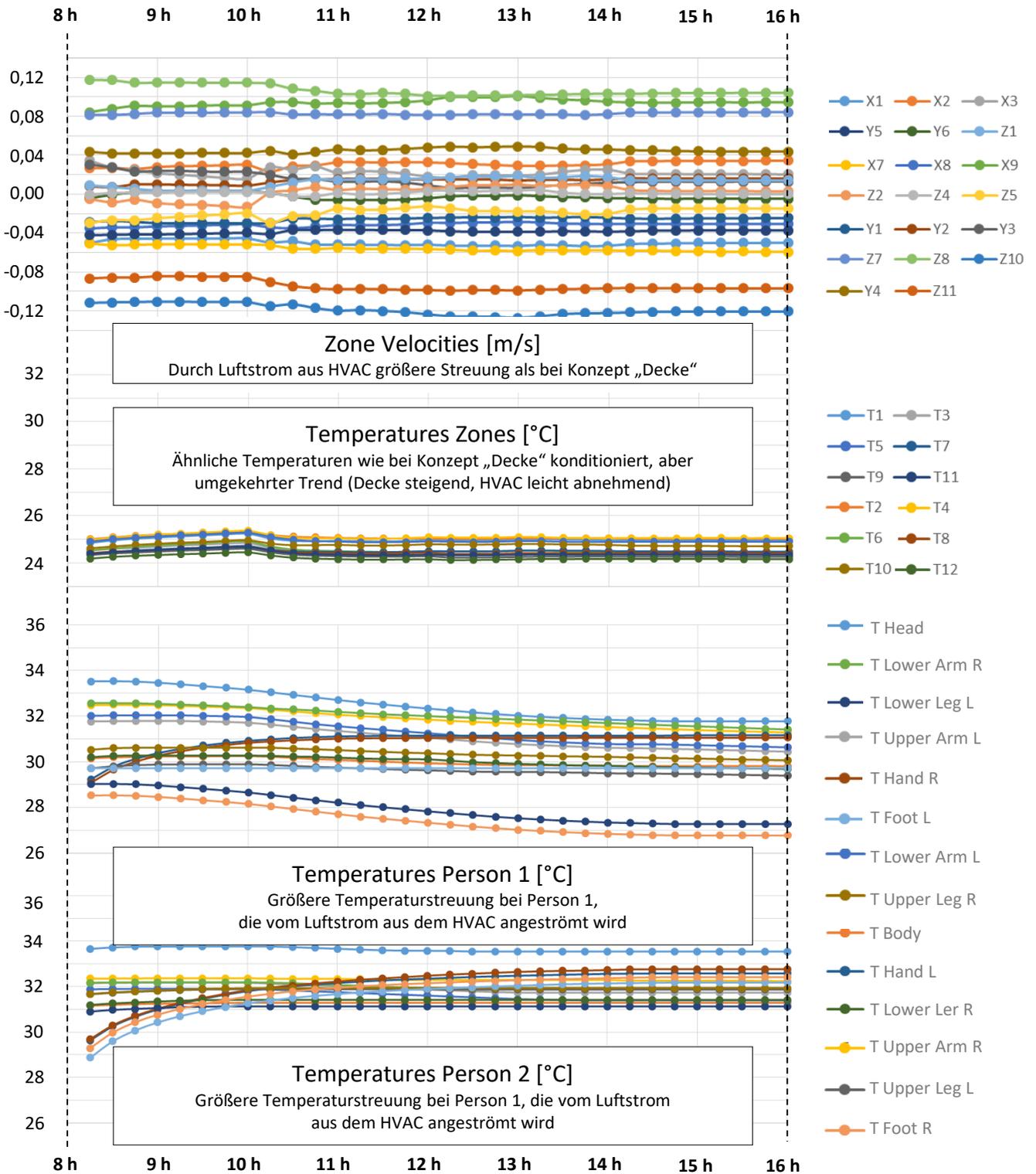


Abbildung 61: Konzept „Fan Coil“ (Messung vom 04.07.2018), **konditioniertes** Versuchsobjekt - zeitlicher Verlauf der Temperatur aus der Simulation in den Zonen und an den Körperteilen der Personen

4.5 Komfortbewertungen (Person 1 und Person 2)

Die Komfortbewertungen wurden für beide Personen, entsprechend der Beschreibung in 4.1.3, durchgeführt. Da sich die Temperaturen im Container über den Messtag ändern, wurde diese Auswertung im Abstand von jeweils 2h vorgenommen und ist in Abbildung 62 bis Abbildung 65 dargestellt. Die Erklärung / Beschreibung der Ergebnisse ist den jeweiligen Diagrammen zu entnehmen.

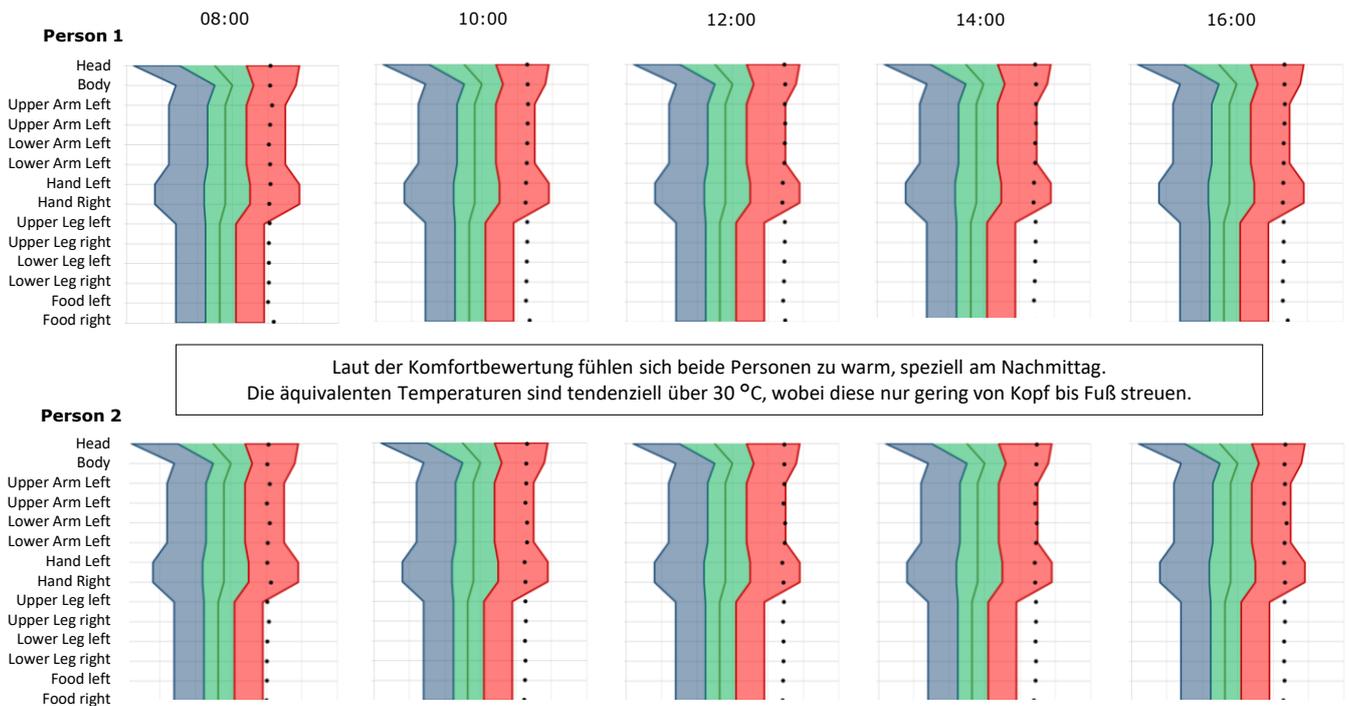


Abbildung 62: Konzept „Decke“ (Messung vom 06.08.2018), **unkontingiertes** Versuchssubjekt – Komfortbewertung an den Körperteilen beider Personen aus der Simulation

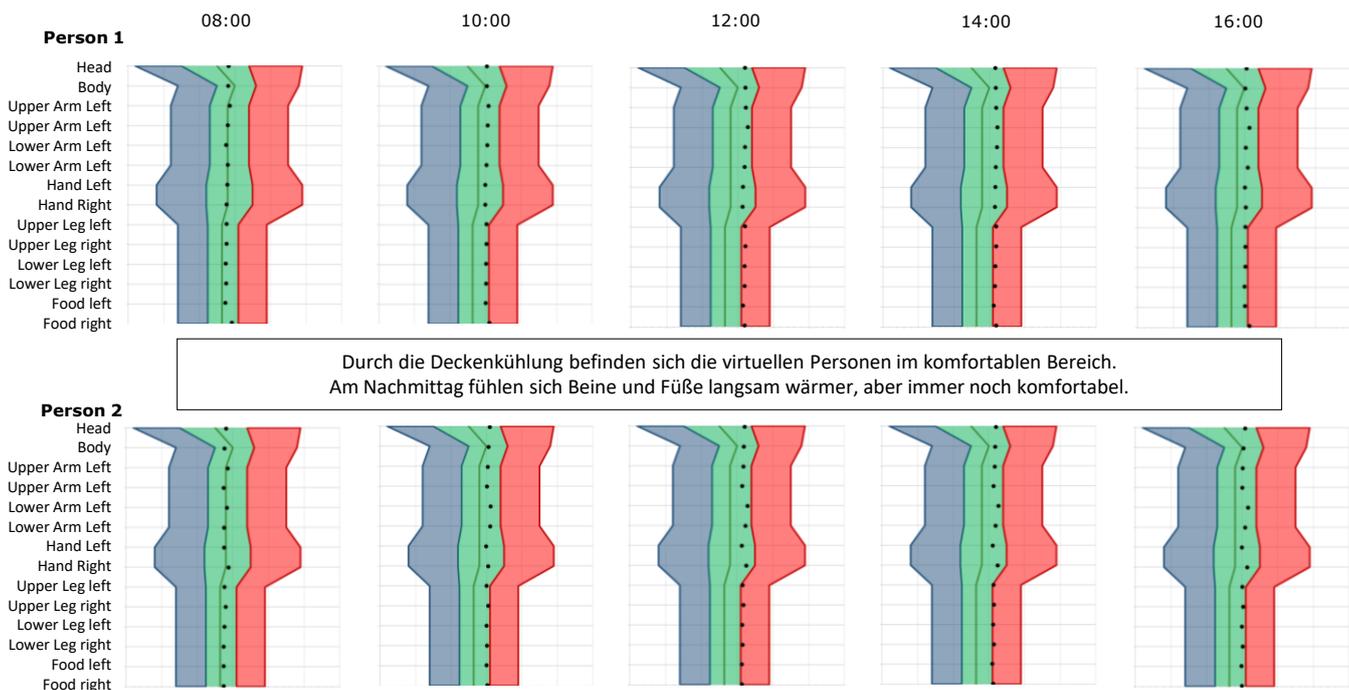


Abbildung 63: Konzept „Decke“ (Messung vom 06.08.2018), **konditioniertes** Versuchssubjekt - Komfortbewertung an den Körperteilen beider Personen aus der Simulation

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

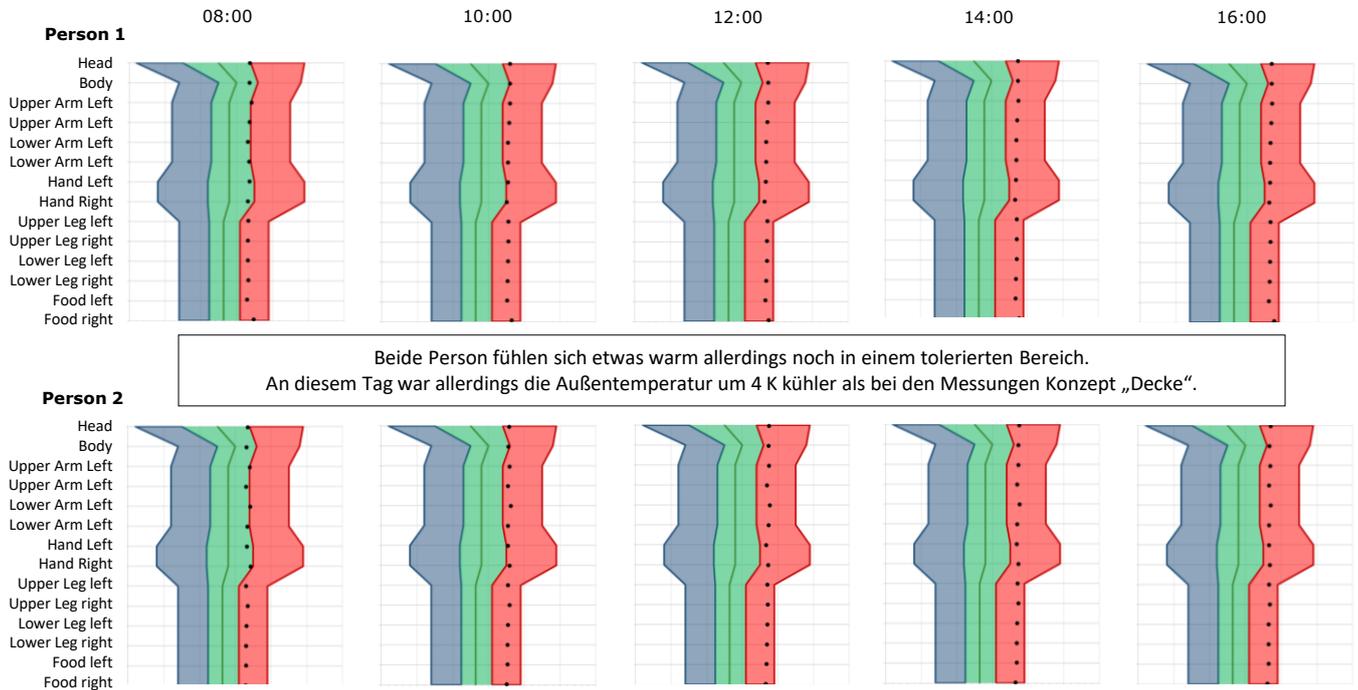


Abbildung 64: Konzept „Fan Coil“ (Messung vom 04.07.2018), **unkonditioniertes** Versuchsobjekt - Komfortbewertung an den Körperteilen beider Personen aus der Simulation

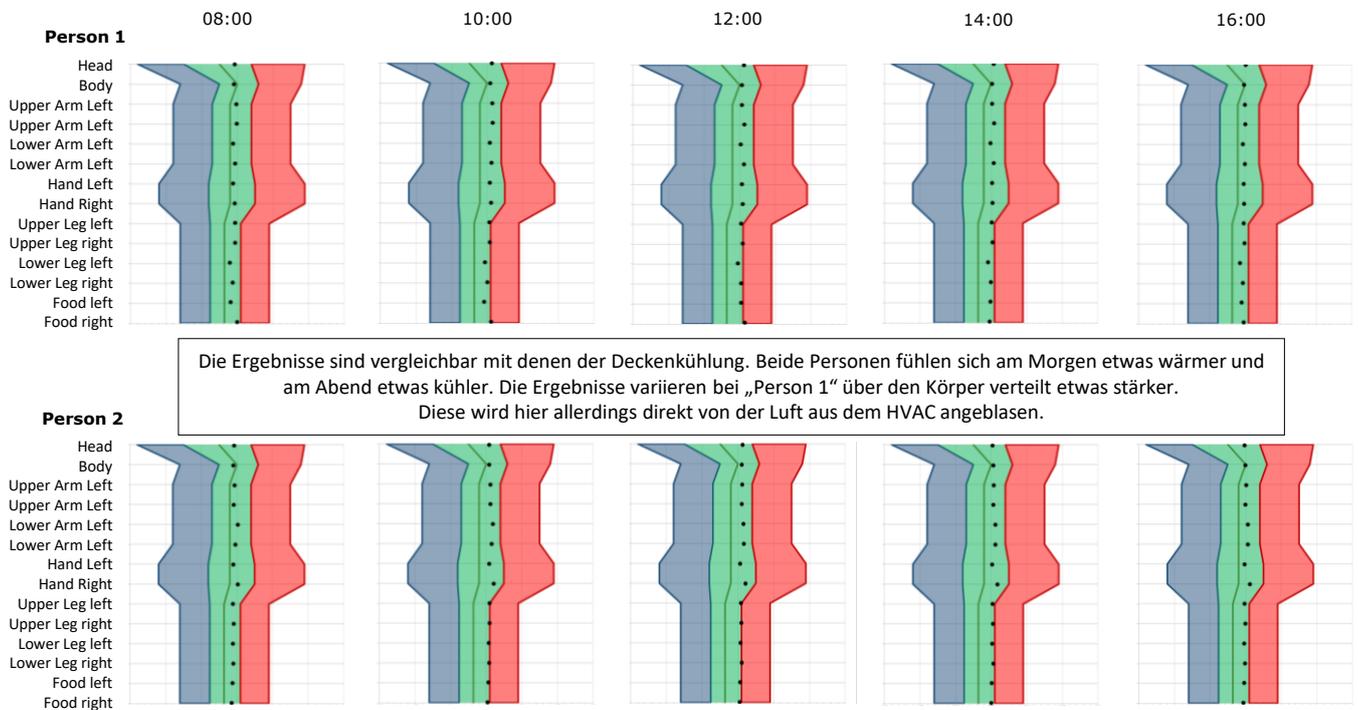


Abbildung 65: Konzept „Fan Coil“ (Messung vom 04.07.2018), **konditioniertes** Versuchsobjekt - Komfortbewertung an den Körperteilen beider Personen aus der Simulation

5 Zusammenfassung, Schlussfolgerungen und Ausblick

Im Projekt COOLSKIN wurden Simulationen zum thermischen und zum elektrotechnischen Verhalten dezentraler autarker Konditionierungseinheiten durchgeführt. Darauf folgend wurde ein konkretes System technisch durchgeplant und im Rahmen eines Feldversuches, unter unterschiedlichsten klimatischen Bedingungen, in Bezug auf Kühlen (und auch Heizen) getestet. Ergänzende Komfortsimulationen gaben zudem Auskunft über die zu erzielende Behaglichkeit unterschiedlicher Betriebsmodi.

Für unterschiedliche System- und Betriebskonstellationen von fassadenintegrierten, dezentralen Kühl- (und Heiz)-Systemen wurden im Projekt detaillierte **Simulationen** für einen typischen Büroraum unter definierten Randbedingungen durchgeführt. Dabei wurden sowohl netzunabhängige als auch netzgekoppelte Systeme und solche mit und ohne Batteriespeicher betrachtet, und der Selbstversorgungsgrad (engl. Self Sufficiency Ratio) SSR, abhängig von der in der Fassade installierten PV-Fläche, bewertet.

Die Ergebnisse zeigen, dass die betrachteten netzunabhängigen Systeme in der Lage sind, den angenommenen Büroraum ausreichend zu kühlen, auch wenn keine Batterie installiert ist und ≥ 6 m² PV-Fläche an der Fassade vorhanden ist. Im Heizbetrieb zeigen sich ohne Netzkopplung deutliche Vorteile durch den Einsatz einer Batterie, da im Heizbetrieb wesentlich höhere Raumtemperaturen gehalten werden können, als dies ohne Batterie möglich ist. Auch bei den netzgekoppelten Systemen führt der Einsatz einer Batterie zu einer deutlichen Verbesserung des Selbstversorgungsgrades SSR, sowohl im Kühl- als auch im Heizbetrieb. Eine Abhängigkeit der Ergebnisse von der Batteriekapazität zeigte sich dabei im betrachteten Bereich (500 bis 2000 Wh) vor allem im Heizbetrieb.

Zur Steigerung des Selbstversorgungsgrads bzw. Reduktion des Strombezugs aus dem Netz wurde eine angepasste Regelungsstrategie untersucht, bei der abhängig von der Verfügbarkeit von PV-Ertrag die Soll-Raumlufttemperatur variiert wird. Dies führt sowohl beim System mit als auch ohne Batterie zu einer deutlichen Erhöhung des PV-Stromanteils. SSR kann für den Kühlbetrieb beim System ohne Batterie mit 6 m² PV von 69 auf 94% und beim Heizen von 15 auf 36 % erhöht werden. Beim System mit Batterie (2000 Wh) und gleicher PV-Fläche ergibt sich eine Steigerung von 97 auf 100% und beim Heizen von 54 auf 64%. Hinsichtlich der thermischen Behaglichkeit ergeben sich durch diese Regelungsstrategie zwar kleine Nachteile, insgesamt bleiben die Raumtemperaturen aber in einem annehmbaren Bereich.

Der **Feldversuch in den Versuchsobjekten** an der TU Graz, der mit der im Projekt entwickelten Konditionierungseinheit durchgeführt wurde hat gezeigt, dass mit diesem System ein energieautarker und dezentraler Betrieb im Kühlmodus möglich ist. Mit den eingesetzten PV-Modulen mit einer Gesamtfläche von ca. 8.3 m² und einer Leistung von 1.17 kWp konnte der Kühlbetrieb an heißen Sommertagen gewährleistet werden, wobei oft noch überschüssige Energie vorhanden war, die z.B. für die zusätzliche Abdeckung des Strombedarfs des Büroraums für Geräte und Beleuchtung zur Verfügung stehen würde. Dies deckt sich auch mit den Ergebnissen der in Abschnitt 2.3 beschriebenen Systemsimulationen, die mit ähnlichen Randbedingungen durchgeführt wurden.

Im Heizbetrieb hat sich erwartungsgemäß gezeigt, dass ein rein photovoltaisch versorgter Betrieb während der gesamten Heizperiode nicht möglich ist. Trotzdem ist ein Ganzjahresbetrieb sinnvoll, wenn die Anlage an das Netz gekoppelt ist und diese somit auch betrieben werden kann, wenn nicht ausreichend Sonnenenergie zur Verfügung steht.

Der Einsatz einer Batterie hat sich besonders im Heizbetrieb als vorteilhaft erwiesen, da hier naturgemäß die Heizlast und der Solarertrag zeitlich nicht gut zusammenfallen. Die vorhin erwähnten und im Abschnitt 2.3 beschriebenen Systemsimulationen haben überdies gezeigt, dass das System auch ohne den Einsatz einer Batterie gut funktionieren könnte. Dies ist insbesondere darum von Interesse, da sich eine Batterie bei den durch diese erzielbaren energetischen Einsparungen und den aktuellen Investitionskosten (ca. 1000 €/kWh) und Strompreisen wirtschaftlich nicht rechnet. Auch der Platzbedarf für eine Batterie in der Fassade und sicherheitstechnische Aspekte sprechen gegen die Integration eines elektrischen Speichers.

Die **Strömungs- und Komfortanalysen** in Kapitel 4 zeigen, dass sowohl die Kühlung über Fan Coil, als auch die Kühlung über die Betondecke grundsätzlich zu brauchbaren thermischen Komfortbedingungen führen können, sofern die Positionierung der Lufteinlässe entsprechend durchgeführt wird. Es zeigt sich aber auch, dass im direkten Vergleich zwischen Fan Coil und Betonkernkühlung eindeutig die Kühlung über die Betondecke höhere sommerliche Behaglichkeitswerte ermöglicht. Die Analysen verdeutlichen auch, dass die **numerische Komfortbewertung** ein hilfreiches Werkzeug darstellt, um die thermische Behaglichkeit von unterschiedlichen Gebäude- und/oder Kühlkonzepten schon in der Konzeptphase evaluieren zu können. Dadurch können bereits in der Planungsphase unterschiedliche architektonische oder gebäudetechnische Varianten optimiert werden, was zu einer signifikanten Kosteneinsparung und/oder Erhöhung des Komforts führen kann. Neuerdings spielt dabei auch das s.g. „User-Centric-Design“ eine wichtige Rolle, bei der die numerische Simulation genutzt wird, um thermische Komfortempfindungen, in Bezug auf Alter und Geschlecht, unterschiedlicher Personengruppen für die Gebäudekonzeptionierung gezielt berücksichtigen zu können und Gebäude „maßgeschneidert“ für die Benutzer planen zu können.

Die im Projekt COOLSKIN durchgeführten Arbeiten zielen darauf ab die Leistungsfähigkeit dezentraler, mittels Photovoltaik versorgter Kühleinheiten zu untersuchen. Die im Projekt entwickelte, gebaute und vermessene Konditionierungseinheit war für den Einsatz in einem Forschungsprojekt gestaltet. Gute Zugänglichkeit zu den einzelnen Komponenten für den Fall der Reparatur bzw. des Austauschs waren dabei wichtige Grundsätze. Auch die Implementierung der Komponenten zur Ermöglichung unterschiedlicher Betriebsmodi (z.B. Kühlung über Fan Coil und über Betonkernaktivierung) sowie die Integration umfangreicher messtechnischer Einrichtungen waren dabei bestimmende Designkriterien. Im Falle einer Weiterführung der Entwicklungen in Richtung Integration in ein Demonstrationsvorhaben und späterer Produktentwicklung würden andere Kriterien an Bedeutung gewinnen. Abmessungen der Konditionierungseinheit, Gewicht und in der Folge die ökonomischen Kennwerte würden massiv an Bedeutung gewinnen. Um einen ersten Schritt in diese Entwicklung zu gehen, wurden die Komponenten der Konditionierungseinheit umgruppiert und in eine Pfosten-Riegel Fassadenkonstruktion planerisch implementiert, um **Platzbedarf und konstruktive Integrationsfähigkeit** zu testen.

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Die Frage ob das Platzangebot einer Fassadenkonstruktion zur Implementierung einer Konditionierungseinheit ausreichend ist, wurde anhand des kleinsten zu erwartenden Innenraums untersucht. Bei einer Raumhöhe von 2,5 m ist ein Fassadenpaneel mit einer Breite von 2,70 m zu erwarten. Unter Berücksichtigung entsprechender Dämmmaßnahmen ist mit einer Fassadentiefe von 35 cm, ausreichend Platz zur Implementierung vorhanden. Die zugehörigen PV- Paneele ober- und unterhalb des Fensters kommen dabei in Summe auf eine Fläche von 4,21 m² (Abbildung 66). Dies kann bewerkstelligt werden, obwohl ausschließlich Komponenten verwendet wurden, die im experimentellen Feldversuch eingesetzt wurden. Es ist davon auszugehen, dass im Falle einer grundsätzlichen Überarbeitung der Komponentenauswahl bzw. Gestaltung deutliche Volumen- und Gewichtsreduktionen erzielt werden können.

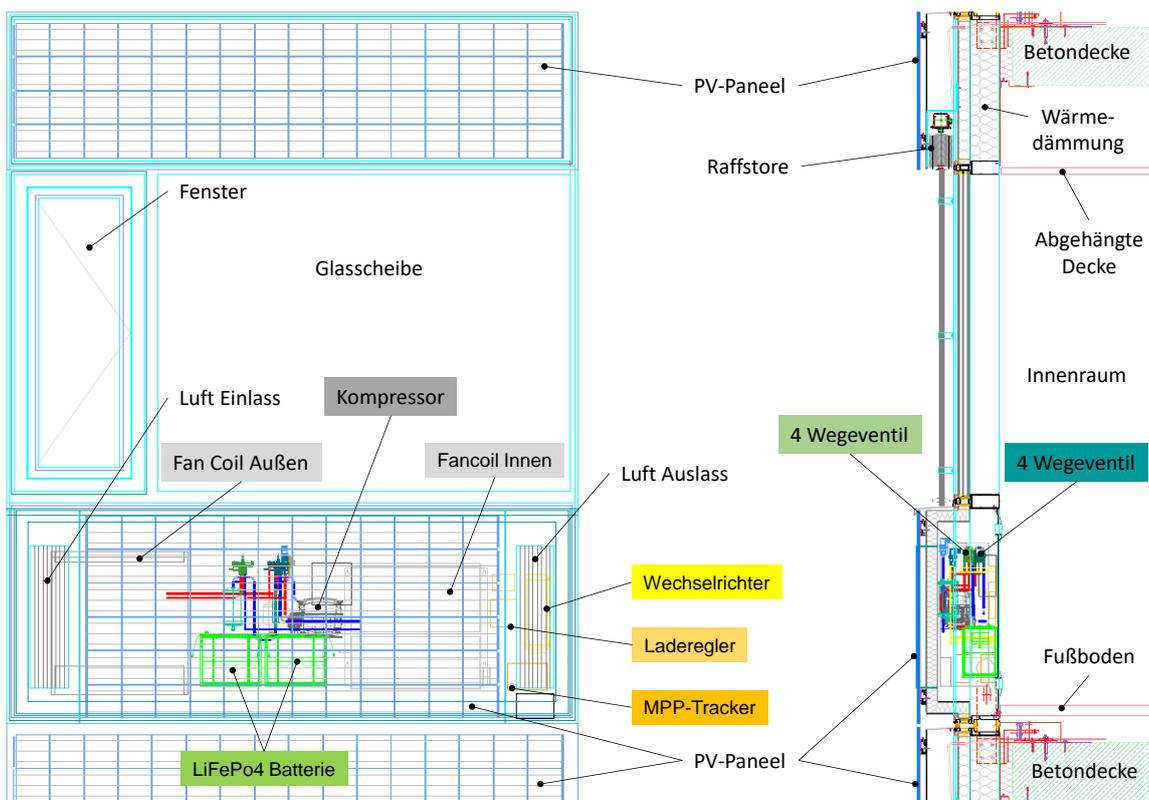


Abbildung 66: Pfosten-Riegel Fassadenkonstruktion mit integrierter Konditionierungseinheit

Einen wesentlicher Faktor in Bezug auf Kosten und Gewicht sind die **elektrischen Speichereinheiten**. Diese aufgrund des gewählten Forschungsansatzes ebenfalls in die Fassade integrierten Komponenten sind im Falle einer Weiterentwicklung zu hinterfragen. Die Simulationen zeigen, ebenso wie der Feldtest, dass die vollständig autarke Betriebsweise erwartungsgemäß auch deutliche Nachteile im Betrieb mit sich bringt. Einerseits musste in Zeiten hoher solarer Einstrahlung oftmals das System abgeregelt werden und potentieller Solarstrom blieb ungenutzt. Andererseits fehlten in strahlungsarmen Perioden oftmals nur geringe elektrische Mengen an Energie, um die Behaglichkeit im Versuchsraum aufrechtzuerhalten zu können, die auch vom Netz bezogen hätten werden können.

Energieforschungsprogramm - 1. Ausschreibung

Klima- und Energiefonds des Bundes – Abwicklung durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft FFG

Zwischen der untersuchten konsequent autarken und der vollständig netzgekoppelten Betriebsweise ist noch das Konzept des gebäudezentralen elektrischen Energiespeichers denkbar. In diesem Fall würde die Notwendigkeit der Integration in die Fassadenkonstruktion entfallen und der Lastausgleich zwischen den einzelnen Konditionierungseinheiten eines Gebäudes, die unterschiedlichen Ausrichtungen, Einstrahlungsverhältnissen und Nutzungsbedingungen unterworfen sind, könnte gebäudezentral erfolgen.

Eine Fragestellung für zukünftige Untersuchungen ergibt sich aus der Kombination der einzelnen Einheiten zu ganzen Gebäudefassaden. Dabei muss die **Positionierung der Ansaug- und Abluftöffnungen** gefunden werden, bei der die geringsten negativen Effekte durch Kurzschlussströme, zu erwarten sind. Kurzschlussströme entstehen, wenn Teile der Abluft einer Einheit auf kurzem Weg, vom Fan Coil der Nachbareinheit angesaugt werden.

6 Quellennachweise

Austrian Standards Institute, 2006. ÖNORM EN ISO 7730:2005.

Y. **Abawi**, M. Rennhofer, A. Allmer, K. Berger, H. Wascher, M. Aichinger, ELEKTRISCH AUTARKE VERSORGUNG ÜBER FASSADENINTEGRIERTE PV, Proceedings zum 6. Forum Bauwerkintegrierte Photovoltaik, 11.03.2014, Bad Staffelstein, Deutschland, S 124-130 (2014)

M. **Bhamjee**, A. Nurick, D.M. Madyira, "An experimentally validated mathematical and CFD model of a supply air window: Forced and natural flow", Energy and Buildings 57 (2013) 289–301

B. J. **Brinkworth**, R. H. Marshall and Z. Ibarahim," A validated model of naturally ventilated PV cladding", Solar Energy Vol. 69, No. 1, (2000) pp. 67–81

Dott, R., Afjei, T., Genkinger, A., Dalibard, A., Carbonell, D., Consul, R., Heinz, A., Haller, M., Witzig, A., Facão, J., 2013. Models of sub-components and validation for the IEA SHC Task 44/HPP Annex 38 Part C: heat pump models. International Energy Agency, A technical report of subtask C Deliverable C 2.

Florian **Eckschlager**, Konzeptionierung eines Prüfstandes zur Untersuchung aktivierter Fassadensysteme, Masterarbeit, F 066 482 Masterstudium; Wirtschaftsingenieurwesen-Maschinenbau, Betreuung: Ao. Univ-Prof. Dr. Rene Rieberer, Dr. Andreas Heinz, Dr. Thomas Mach, TU Graz 2017

Guohui **Gan**," Numerical determination of adequate air gaps for building-integrated photovoltaics", Solar Energy 83 (2009) 1253–1273

S. **Gosztonyi**, M. Rennhofer, Ch. Zauner, B. Windholz, ARCHITECTURAL BENEFITS OF VIRTUAL AND EXPERIMENTAL ASSESSMENTS OF ACTIVE COMPONENTS IN MULTIFUNCTIONAL FAÇADES, Proceedings to the Energy Forum on Advanced Building Skins, 05-06 November, 2013 Bressanone, Italy, p 29-33 (2013)

Jun **Han**, Lin Lu, Hongxing Yang, "Numerical evaluation of the mixed convective heat transfer in a double-pane window integrated with see-through a-Si PV cells with low-e coatings", Applied Energy 87 (2010) 3431–3437

Jun **Han**, Lin Lu, Jinqing Peng, Hongxing Yang," Performance of ventilated double-sided PV facade compared with conventional clear glass façade", Energy and Buildings 56 (2013) 204–209

Hengel, F., Heinz, A., Rieberer, R., 2014. ANALYSIS OF AN AIR SOURCE HEAT PUMP SYSTEM WITH SPEED CONTROLLED COMPRESSOR AND VAPOR INJECTION, in: 11th IEA Heat Pump Conference. pp. 1–15.

Katic, K., Li, R. and Zeiler, W., "Thermophysiological models and their applications: A review," Building and Environment, vol. 106, pp. 286-300, **2016**.

G.E. **Lau**, E. Sanvicente, G.H. Yeoh, V. Timchenko, M. Fossa, C. Ménézo, S. Giroux-Julien," Modelling of natural convection in vertical and tilted photovoltaic applications", Energy and Buildings 55 (**2012**) 810–822

Meteotest, Meteororm 6.1.0.9, Global Meteorological Database for Engineers, Planner and Educations (**2009**). Bern, Switzerland.

Håkan O Nilsson, "Comfort Climate Evaluation with Thermal Manikin Methods and Computer Simulation Models", Royal Institute of Technology, Sweden, 2004

Oliver **Schmiedbauer**, O., Aufbau und Inbetriebnahme eines Versuchsstandes für autarkes Kühlen über die Gebäudehülle, Masterarbeit, UF 066 482 Masterstudium; Wirtschaftsingenieurwesen-Maschinenbau, Betreuung: Dr. Andreas Heinz, Ao. Univ-Prof. Dr. Rene Rieberer, TU Graz **2018**

Selke, T., Schlager, T., Rennhofer, M., Heinz, A., Brandl, D., Mach, T., Multifunctional Facade with PV for Solar Autonomous Cooling Applications, Proceeding: ISES Solar World Congress 2017, IEA SHC International Conference on Solar Heating and Cooling for Buildings and Industry, Abu Dhabi, United Arab Emirates, 12 Seiten, 29 Oct – 1 Nov **2017**

SIA 2024:2015, Raumnutzungsdaten für Energie- und Gebäudetechnik, Swiss Society of Engineers and Architects (**2015**)

R. **Parameshwaran**, S. Kalaiselvam, S. Harikrishnan, A. Elayaperumal,"Sustainable thermal energy storage technologies for buildings: A review", Renewable and Sustainable Energy Reviews 16 (**2012**) 2394– 2433

Guillermo **Quesada**, Daniel Rouse, Yvan Dutil, Messaoud Badache, Stéphane Hallé,"A comprehensive review of solar facades. Opaque solar facades", Renewable and Sustainable Energy Reviews 16 (**2012**) 2820– 2832

M. **Rennhofer**, A. Allmer, K. Berger, H. Wascher, und M. Aichinger, DC-ENERGIEVERSORGUNG DIREKT AUS FASSADEN-INTEGRIERTER PV, Proceedings zum 4. Anwenderforum Bauwerksintegrierte Photovoltaik; 28.2.2012, Kloster Banz, Bad Staffelstein, Deutschland, p 82-86 (**2012**)

Dirk **Saelens**, Staf Roels, Hugo Hens, "The inlet temperature as a boundary condition for multiple-skin facade modeling", Energy and Buildings 36 (**2004**) 825–835

TRNSYS 17, 2014. TRNSYS 17: a Transient System Simulation Program, Volume 4: Mathematical Reference. Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison.

Geun Young **Yun**, Mike McEvoy, Koen Steemers, "Design and overall energy performance of a ventilated photovoltaic facade", Solar Energy 81 (2010) 383–394

Fabio **Zanghirella**, Marco Perino, Valentina Serra, "A numerical model to evaluate the thermal behaviour of active transparent facades", Energy and Buildings 43 (2011) 1123–1138

Simon **Zimmerberger**, Messdatenanalyse und Optimierung eines Versuchsstandes für autarkes Kühlen über die Gebäudehülle, Masterarbeit, UF 066 445 Masterstudium; Maschinenbau, Betreuung: Ao. Univ-Prof. Dr. Rene Rieberer, Dr. Daniel Brandl, TU Graz 2019

Olympia **Zogou**, Herricos Stapountzis, "Energy analysis of an improved concept of integrated PV panels in an office building in central Greece", Applied Energy 88 (2011) 853–866

Olympia **Zogou**, Herricos Stapountzis, "Experimental validation of an improved concept of building integrated photovoltaic panels", Renewable Energy 36 (2011) 3488-3498

7 Kontaktdaten

Projektleitung

Dr. Thomas Mach

thomas.mach@tugraz.at

Dr. Andreas Heinz

andreas.heinz@tugraz.at

Institut für Wärmetechnik

Technische Universität Graz

www.iwt.tugraz.at

Projektpartner

AIT Austrian Institute of Technology GmbH

Dr. Marcus Rennhofer

marcus.rennhofer@ait.ac.at

<http://www.ait.ac.at>

SFL-Engineering

Dr. Mario Müller

SFL Engineering

mueller.mario@sfl-engineering.com

<http://www.sfl-engineering.com>

Architekturbüro Reinberg

Architekt DI Georg W. Reinberg

architekt@reinberg.net

<http://www.reinberg.net>

AVL List GmbH

DI (FH) Harald GRANTNER, MSc

harald.grantner@avl.com

www.avl.com

Projektinformation

<https://www.energieforschung.at/projekte/834/autarkes-kuehlen-ueber-gebaeudehuelen>