



Bundesinstitut
für Bau-, Stadt- und
Raumforschung

im Bundesamt für Bauwesen
und Raumordnung



BBSR-
Online-Publikation
01/2025

ComfortLab

genau richtig

Martina Musterfrau WS 2024

von

Andre Beblek
Prof. Dr. Viktor Grinewitschus
Dr. Carolin Baedeker
Julius Piwowar
Philipp Themann
Pauline Overath

ComfortLab

Umsetzung und Evaluation einer Strategie zur Unterstützung des
Energieeinsparverhaltens von Nutzerinnen und Nutzern in Büro- und
Verwaltungsgebäuden

Das Projekt des Forschungsprogramms "Zukunft Bau" wurde vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Auftrag des Bundesministeriums für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB) durchgeführt.

IMPRESSUM

Herausgeber

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR)
im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR)
Deichmanns Aue 31–37
53179 Bonn

Wissenschaftliche Begleitung

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung
Referat WB 7 „Energieoptimiertes Bauen“
Dr. Jörg Lammers
joerg.lammers@bbr.bund.de

Autorinnen und Autoren

EBZ Business School GmbH, Bochum
Andre Beblek
a.beblek@ebz-bs.de
Prof. Dr.-Ing. Viktor Grinewitschus
v.grinewitschus@ebz-bs.de

Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie, Wuppertal
Dr. Carolin Baedeker
carolin.baedeker@wupperinst.org
Julius Piwowar
Philipp Themann
Pauline Overath

Stand

Juni 2024

Gestaltung

Andre Beblek
a.beblek@ebz-bs.de

Bildnachweis

Titelbild: Designagentur inbestergesellschaft, Köln

Vervielfältigung

Alle Rechte vorbehalten

Der Herausgeber übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie für die Beachtung privater Rechte Dritter. Die geäußerten Ansichten und Meinungen müssen nicht mit denen des Herausgebers übereinstimmen.

Zitierweise

Beblek, A.; Grinewitschus, V.; Baedeker, C.; Piwowar, J.; Themann, P.; Overath, P., 2025: ComfortLab: Umsetzung und Evaluation einer Strategie zur Unterstützung des Energieeinsparverhaltens von Nutzerinnen und Nutzern in Büro- und Verwaltungsgebäuden. BBSR-Online-Publikation 01/2025, Bonn. <https://doi.org/10.58007/s933-f941>

DOI 10.58007/s933-f941

ISSN 1868-0097

Bonn 2025

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	5
Abstract	6
Einleitung	7
Ziel des Projekts	7
Projekthintergrund und Herausforderungen	8
Grundlagenermittlung für Bonn und Berlin	9
Untersuchungsgegenstand	11
Technische Infrastruktur in Berlin und Bonn	11
Behaglichkeitsmonitoring zur Bewertung der raumklimatischen Ausgangssituation	14
Interview-Ergebnisse zum Raumklima	17
Ergebnisse der Interviews und Fokusgruppenworkshops	19
Ergebnisse zur nutzerzentrierten Betriebsführung	21
ComfortLab-Plattform: Ziel und Funktionsweise	21
Ergebnisse zur ComfortLab-Plattform	25
Zusammenfassung zum Einsatz der ComfortLab-Plattform	37
Ergebnisse zum Assistenzsystem Piaf	37
Bestimmung und Auswertung der physikalischen Optima	42
Hintergrund des physikalischen Optimums und der VDI 4663	42
Entwurf für die Kennzahlen	44
Evaluation der Pilottests Berlin mittels VDI-Richtlinie 4663	48
Ergebnisse zum Elektroenergieverbrauch in Berlin	52
Grundvoraussetzungen und Empfehlungen für die Nutzung von ComfortLab	54
Grundvoraussetzungen für den Einsatz von ComfortLab in öffentlichen Gebäuden	57
Empfehlungen zur Förderung einer Weiterentwicklung von ComfortLab	58
Ausblick	60
Abbildungsverzeichnis	62
Tabellenverzeichnis	64
Anlagen	65

Kurzfassung

In vielen öffentlichen Liegenschaften und Bürogebäuden besteht ein Überangebot an Heizenergie. In erster Linie liegt dies an der fehlenden Möglichkeit einer individualisierten, nutzerorientierten Regelung und Anpassung der Wärmeversorgung an den tatsächlichen Bedarf. Studien zeigen, dass ein Einsparpotenzial von bis zu 30 % der Wärmeenergie möglich ist, indem unter anderem eine optimierte Nacht- und Wochenendabsenkung sowie Anpassungen im Regelbetrieb vorgenommen werden, wie zum Beispiel bei leerstehenden Büros (vgl. Wille 2024). Um dieses Potenzial auszuschöpfen, wurde im ComfortLab-Projekt eine digitale Plattform prototypisch entwickelt und getestet, die die Kommunikation zwischen der Haustechnik und den Büronutzerinnen und Büronutzern ermöglicht. Ziel war es, den Energieverbrauch so weit wie möglich zu reduzieren, ohne dabei das Wohlbefinden der Büronutzerinnen und Büronutzer negativ zu beeinflussen.

Die Plattformlösung als niedrig-investive Maßnahme ermöglicht es, die Wärmeversorgung an den tatsächlichen Bedarf anzupassen, indem sie tägliche, persönliche Abstimmungen zum Wärme- bzw. Kälteempfinden im Büro visualisiert und mit dem Facility Management teilt. Entsprechend können Absenkstrategien mit dem Komfortempfinden der Büronutzerinnen und Büronutzer abgeglichen werden. Angelehnt an die Visualisierung der Erderwärmung durch Klimastreifen, mit denen der Klimaforscher Ed Hawkins die Folgen des Klimawandels einfach und intuitiv erfahrbar macht, wurden die sogenannten ComfortStripes entwickelt. Das Facility Management kann so erfahren, ob die Heizungsanlage „zu warm“ eingestellt ist und der Wärmeenergieverbrauch unter anderem durch eine Absenkung der Vorlauftemperatur in den Heizkreisen reduziert werden sollte.

Der Plattform-Prototyp ist in der Testphase auf breite Akzeptanz bei den beteiligten Büromitarbeiterinnen und Büromitarbeitern gestoßen und eine zukünftige Nutzung ist gewünscht. Die Ergebnisse des Projekts haben zudem gezeigt, dass durch den Einsatz der ComfortLab-Plattform im fortdauernden Gebäudebetrieb öffentlicher Verwaltungsgebäude bis 30 % des derzeitigen Wärmeenergieverbrauchs langfristig verringert werden können. Mit dem Einsatz der ComfortLab-Plattform als interaktive und nutzerzentrierte Betriebsführung könnten öffentliche Liegenschaften so eine Vorbildfunktion übernehmen und einen wesentlichen Beitrag zum Erreichen des Ziels eines klimaneutralen Gebäudebestands leisten.

Abstract

There is an oversupply of heating energy in many public office buildings. This is primarily due to the lack of individualized, user-oriented control and adaptation of the heat supply to actual demand. Studies show that a savings potential of up to 30 % of heating energy is possible by e.g., optimizing night and weekend reduction and making adjustments during regular operation, e.g., in vacant offices (see Wille 2024). In order to utilize this potential, a digital platform was developed and tested as a prototype in the ComfortLab project, which enables communication between the facility management and office users. The aim was to reduce energy consumption as much as possible without negatively impacting the well-being of office users.

As a low-investment measure, the digital platform solution makes it possible to adapt the heat supply to the actual demand by a feedback-system named "ComfortStripes". This includes a daily survey for office users to share and visualize the personal temperature perception to the facility management. Accordingly, the configuration of the central heating system can be harmonized with the office users' perception of comfort. This function was developed based on the visualization of global warming stripes, which climate researcher Ed Hawkins uses to make the consequences of climate change simple and intuitive. Facility management can thus find out whether the heating system is set "too warm" and whether the heat energy consumption should be reduced by e.g., lowering the flow temperature in the heating circuits.

As a result of the project, the platform prototype met with broad acceptance among the office users and future use is desired. In addition, the project has shown that up to 30 % of the current heat energy consumption can be reduced in the long term in the continued operation of public administration buildings. By using the ComfortLab platform as an interactive and user-centered management system, public buildings thus can take a role model and make a significant contribution to achieving the goal of a climate-neutral buildings.

Einleitung

Ziel des Projekts

Um die Energieeffizienz in Büro- und Verwaltungsgebäuden zu verbessern, werden viele technische Lösungen entwickelt und angewendet. Die tatsächliche Wirksamkeit und Nachhaltigkeit dieser Lösungen entsprechen allerdings häufig nicht den Erwartungen. Das liegt vor allem an der Tatsache, dass die Nutzerinnen und Nutzer den Gebäudebetrieb erheblich mit beeinflussen. Alltägliche Verhaltensmuster und Routinen führen vielfach zu (negativen) Rebound-Effekten, die Ressourcen verbrauchen und Kosten verursachen. Die Stellschrauben sind vielfältig: Alltäglich wiederholte Routinen (z. B. Lüften, Heizen), die technische Betriebsführung und Einstellung der Anlagentechnik sowie die Kommunikationswege zwischen den Büronutzerinnen und Büronutzern und dem Facility Management. Heutige Energieeffizienzstrategien fokussieren zumeist nur auf eine der genannten Stellschrauben, so dass diese in der Regel nicht in ihrer gemeinsamen Dynamik betrachtet werden können.

Das vorangegangene Projekt „Entwicklung einer Strategie zur Unterstützung des Energieeinsparverhaltens von Nutzerinnen und Nutzern in Büro- und Verwaltungsgebäuden“ im Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) in Berlin zielte darauf ab, anhand ausgewählter Gebäude des BMUV mögliche Strategien zur Unterstützung des Energieeinsparverhaltens zu eruieren. Der Fokus lag dabei auf der Entwicklung von Energieeinsparstrategien, die den Energie- und Ressourcenverbrauch des Gebäudebetriebs des BMUV maßgeblich verringern. Die im Rahmen des Projekts prototypisch umgesetzten Maßnahmen haben gezeigt, dass ein energieeinsparendes Nutzerverhalten in Kombination mit einer nutzerzentrierten Betriebsführung der Anlagentechnik den Wärmeenergieverbrauch im BMUV um bis zu 30 % senken kann.

Ziel des aktuellen Projekts war es, diese systemische und interaktive Gestaltungsperspektive aufzugreifen, um Ansätze einer nutzerzentrierten Betriebsführung prototypisch weiterzuentwickeln und am Standort BMUV Stresemannstraße, Berlin sowie in der Liegenschaft am Robert-Schuman-Platz in Bonn zu testen und zu evaluieren.

Konkret lag das Ziel der Pilottests in den Heizperioden 2020 bis 2023 somit in der Umsetzung und Evaluation der im Vorgängerprojekt entwickelten Strategie zur Unterstützung des Energieeinsparverhaltens von Nutzerinnen und Nutzern in Büro- und Verwaltungsgebäuden an den Standorten des BMUV in Berlin und Bonn. Die erarbeiteten Strategien aus dem Vorgängerprojekt wurden um das Konzept einer „nutzerzentrierten Betriebsführung“ ergänzt, in der die unterschiedlichen Nutzerinnen und Nutzer des Gebäudes gleichermaßen in ihren Rollen betrachtet werden und eine Interaktion durch unterschiedliche Kommunikations-Feedbacksysteme ermöglicht werden konnte.

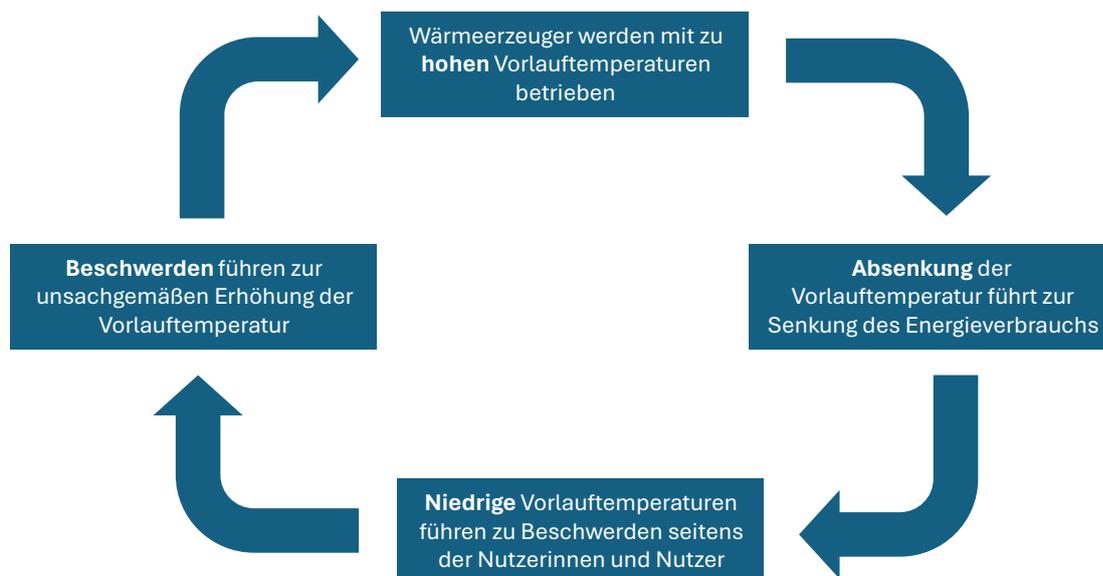
Die Publikation fasst die Ergebnisse zusammen und zeigt eine Priorisierung zukünftiger Umsetzungs- und Vermittlungsmöglichkeiten potenzieller Maßnahmen und Strategien. Sie soll eine Grundlage für die Konzeption von Liegenschaften darstellen, die im Rahmen der Weiterentwicklung des BMUV als evaluierter Maßnahmenkatalog auch zur klimaneutralen Bundesverwaltung in anderen Ressorts bzw. Bundesliegenschaften beitragen kann.

Projekthintergrund und Herausforderungen

Öffentliche Gebäude bieten ein großes Potenzial, um Energieverbräuche (hier im Fokus: Der Wärmeenergieverbrauch) zu reduzieren. Zentrale Herausforderungen lassen sich auf verschiedene Bereiche zurückführen, die in ihrem Zusammenspiel zu hohen Energieverbräuchen und damit Energiekosten führen.

Während auf Seiten des Facility Managements Herausforderungen wie beispielsweise ein Überangebot an Heizenergie oder die fehlende Möglichkeit einer flexiblen zentralen Regelung der einzelnen Heizstränge im Gebäude bestehen, liegen bei den Büronutzerinnen und Büronutzern vor allem Defizite und fehlendes Wissen über mögliche energiesparende Verhaltensweisen vor. Die Hürden im Beschwerdemanagement in öffentlichen Gebäuden werden in Abbildung 1 unter dem so genannten „Regelkreis der Energieverschwendung“ zusammengefasst. Wenn Büronutzerinnen und Büronutzer das Raumklima als zu kalt empfinden, informieren sie das Facility Management, welches, um Konflikte zu vermeiden, häufig die Vorlauftemperatur zentral erhöht. Auch die Lage des entsprechenden Büros kann einen immensen Einfluss auf die Raumtemperatur und dahingehend auf ein Überangebot an Heizenergie ausüben, insbesondere wenn Büros am selben Heizstrang unterschiedliche Raumtemperaturen aufgrund ihrer Lage (zum Beispiel Nord-, Süd-Ausrichtung, Innenhof, Außenwand) aufweisen und sich die Vorlauftemperatur an dem kältesten Büro orientiert.

Abbildung 1
Regelkreis der Energieverschwendung



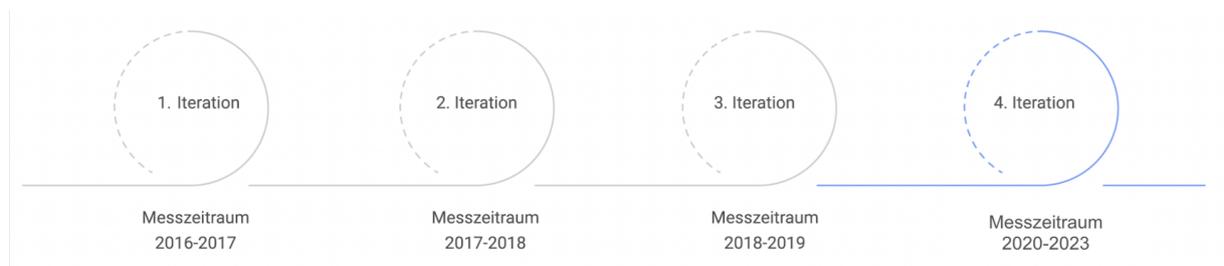
Quelle: EBZ Business School GmbH

Auch die COVID-19-Pandemie hat gezeigt, dass sich bei den teils über Wochen und Monaten unbesetzten Büros in öffentlichen Verwaltungsgebäuden kaum Änderungen in der Betriebsführung und daraus resultierend in den Wärmeenergieverbräuchen gezeigt haben. Dieses hohe Potenzial der Einsparmaßnahmen in Abwesenheitszeiten wird noch deutlicher vor dem Hintergrund, dass Verwaltungsgebäude bei einer täglichen Nutzung von 7:00 Uhr bis 18:00 Uhr an fünf Tagen in der Woche betriebsdienliche Raumtemperaturen benötigen, womit die Betriebszeit eines solchen Gebäudes lediglich 33 % der Gesamtzeit ausmacht. Trotz der hohen Abwesenheitszeiten (67 %) besitzen viele dieser Gebäude weder eine gut funktionierende Nacht- noch Wochenendabsenkung. Auch eine fehlerhafte, witterungsgeführte Vorlauftemperaturregelung kann zu einem (deutlichen) Überangebot an Heizenergie führen. Mit der im Winter 2022/2023 aufkommenden Energiekrise in Deutschland haben Energiesparmaßnahmen insbesondere auch in öffentlichen Gebäuden eine neue Dringlichkeit erfahren. Eine der kurzfristigen Maßnahmen lag darin, die durch die Heizungsanlage bereitgestellte Raumtemperatur in öffentlichen Gebäuden auf maximal 19 °C zu begrenzen (vgl. Bundesregierung 2022).

Grundlagenermittlung für Bonn und Berlin

Im Folgenden werden die zentralen Ergebnisse aus Berlin und Bonn beschrieben. Aufgrund der COVID-19-Pandemie kam es zu Verschiebungen bzw. Veränderungen im geplanten Projektablauf. Insgesamt betrug die Projektlaufzeit vier Jahre (2019 bis 2023). Abbildung 2 fasst die wesentlichen Aktivitäten in Berlin und Bonn zur Grundlagenermittlung und über die vier Heizperioden (2019 bis 2023) zusammen. Ebenfalls zeigt die Abbildung einen Überblick über die Aktivitäten der gesamten Historie inklusive der Tätigkeiten der vorangegangenen Projektphasen von 2016 bis 2023.

Abbildung 2
Aktivitäten innerhalb der vier Iterationsschritte



Heizperiode 2017/2018

- Literaturrecherche mit 26 Studien, 8 Forschungsprojekte
- Monitoring im Februar bis März 2018 für 3 Bürogebäude, 12 Büros
- Co-Creation Workshop in Bochum, 12 TN
- Umfrage im September 2018 für Bonn, 26 TN

Heizperiode 2018/2019

- Testphase Piaf im Dezember 2018 bis April 2019 in Berlin (27 Büros Piaf, 12 Büros ohne)
- Testphase „ComfortCheck“ im März-April 2018 in Bonn, 24 TN
- Interviews in Berlin, 21 TN
- Workshop in Berlin, 26 TN
- Umfrage Januar bis März 2019 in Berlin, 18 TN

Heizperiode 2020/2021

- Testphase ComfortStripes als technischer Testlauf in Berlin, 11 TN
- Grundlagenermittlung u.a. mit Interviews in Berlin und Bonn
- Co-Creation Workshop im April 2021 für Berlin und Bonn, 9 TN
- Auftakt im Digitaler Espresso im Oktober 2021, 40 TN
- Online-Infoveranstaltung im Januar 2022 für Berlin und Bonn, 30 TN
- Testphase Piaf in Berlin, 15 TN

Heizperiode 2021/2022

- Testphase ComfortStripes in Berlin, 9 TN und Bonn, 14 TN
- Umfrage im April 2022, 13 TN
- Feedback-Workshop im Mai 2022, 16 TN
- Testphase Piaf in Berlin, 14 TN und Bonn, 14 TN

Heizperiode 2022/2023

- Testphase ComfortStripes in Berlin, 84 TN und Bonn, 103 TN
- Auftakt Digitaler Espresso im Dezember 2022
- Umfrage im Mai 2023, 110 TN

Quelle: Wuppertal Institut

Das Projekt baut in seiner inhaltlichen Ausrichtung auf den Ergebnissen seiner Vorgängerprojekte „EE-Office-CO₂-Einsparungen durch nutzerzentrierte Energieeffizienzlösungen in Bürogebäuden“ und „EnSpar-Entwicklung einer Strategie zur Unterstützung des Energiesparverhaltens von Nutzerinnen und Nutzern in Büro- und Verwaltungsgebäuden“ auf. In den Projekten wurde basierend auf der Annahme, dass Büronutzerinnen und Büronutzer durch energieintensive Verhaltensmuster und Routinen den Gebäudebetrieb und damit den Wärmeenergieverbrauch erheblich mit beeinflussen, von 2016 bis 2019 eine Strategie zur Unterstützung des Energieeinsparverhaltens im Büro entwickelt. Dafür wurde gemeinsam mit der Twistid GmbH & Co. KG prototypisch das Assistenzsystem „Piaf“ entwickelt und getestet (vgl. Zimmer 2024). Piaf ist als physisches Objekt in Form eines Vogels gestaltet, der zum Beispiel auf dem Monitor sitzen kann. Im Körper des Vogels sind Sensoren, unter anderem zur Messung der CO₂-Konzentration integriert, um so Büronutzerinnen und Büronutzern durch visuelle und auditive Signale zum Öffnen bzw. Schließen des Fensters zu bewegen und so Veränderungen im Lüftungsverhalten zu initiieren. Darüber hinaus nimmt Piaf ein Monitoring des Raumklimas vor (unter anderem Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit, CO₂-Gehalt). Diese Messdaten bilden die Grundlage, um den Nutzerinnen und Nutzern über eine individuelle Web-Plattform Auswertungen zum Raumklima in Echtzeit anzuzeigen. Insgesamt wurde das Assistenzsystem im Rahmen der Vorgängerprojekte in öffentlichen Liegenschaften in Berlin und Bonn mit über 30 Personen getestet. Das Feedback der Büronutzerinnen und Büronutzer war während und nach der Testphase sehr positiv („Piaf ist wie ein Haustier“).

Die Ziele, das Vorgehen und die Ergebnisse des Vorgängerprojekts „Entwicklung einer Strategie zur Unterstützung des Energieeinsparverhaltens von Nutzerinnen und Nutzern in Büro- und Verwaltungsgebäuden“ werden an dieser Stelle nicht weiter ausgeführt und sind dem entsprechenden Endbericht zu entnehmen.

Tabelle 1
Übersicht der wesentlichen Aktivitäten zur Grundlagenermittlung

	Heizperiode 2019/2020	Heizperiode 2020/2021 (COVID-19- Pandemie ab März 2020)	Heizperiode 2021/2022	Heizperiode 2022/2023
Interviews (AS 1.3)	11 Interviews (Dez 20-Jan 21)			
Bestandsaufnahme (Bonn AS 1.1)	Einmalige Erfassung Infrastruktur, Messung Signalstärke zu Beginn des Projekts			
Ergänzung von Messpunkten (Bonn AS 1.3)	Vorbereitung	Implementierung 1. Version der Datenerfassung (OPC UA)	Implementierung 2. Version der Datenerfassung (BACnet/IP)	Auswertung
Behaglichkeitsmonitoring (Bonn AS 2.2)	Behaglichkeitsmessungen in 2 Phasen (Heizperiode 2020/2021)			
Erfassen von Energieverbräuchen (Bonn AS 2.3, Berlin)	Berlin: Zugriff auf historische Daten	Berlin: Zugriff auf historische und Live-Daten; Bonn: Aufnahme erster Daten aus der GLT mittels OPC UA-Zugriff	Berlin: Zugriff auf historische und Live-Daten; Bonn: Umstellung der Datenerfassung auf BACnet/IP	Berlin: Zugriff auf historische und Live-Daten; Bonn: Datenzugriff mittels BACnet/IP

Quelle: Wuppertal Institut/EBZ Business School GmbH

Untersuchungsgegenstand

Das Projekt wurde in den beiden Liegenschaften des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) in Berlin (Stresemannstraße 130, 10117 Berlin) und Bonn (Robert-Schuman-Platz 3, 53175 Bonn) durchgeführt. Wesentliche Parameter der beiden Liegenschaften sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Tabelle 2
Wesentliche Parameter der BMUV-Liegenschaften Berlin und Bonn

	BMUV Berlin	BMUV Bonn
Gebäude(teile)	Neubau, Veranstaltungshof, Altbau Vorderhaus, Altbau Hinterhaus	Gebäudeteile A, B, C
Flächenangaben	Bruttogrundfläche: 21.127 m ² Nettogrundfläche: 16.928 m ²	Bruttogrundfläche: 83.400 m ² Nettogrundfläche: 51.300 m ²
Heizstränge	Passivhaus, Altbau Vorderhaus, Altbau Hinterhaus	Diverse Heizstränge (NW, NO, SW, SO) in den drei Gebäudeteilen
Technische Ausstattung	Wärme- und Kälteversorgung über Fernwärme/-kälte, zusätzliche Wärmebereitstellung im Passivhausbereich mittels zweier Abwasser-Wärmepumpen, Photovoltaik-Anlage, RLT-Anlagen (teilweise mit WRG und Kühlung)	Wärmeversorgung über Fernwärme, Photovoltaik-Anlage, RLT-Anlagen (teilweise mit WRG und Kühlung)
Datenzugriff	Abfrage historischer und aktueller Daten über die Datenbank der GLT (MSSQL) und TLS-gesicherter Transfer an einen MQTT-Broker	Abfrage von Live-Daten der GLT (BACnet-Protokoll) und TLS-gesicherter Transfer über eine REST-Schnittstelle

Quelle: EBZ Business School GmbH

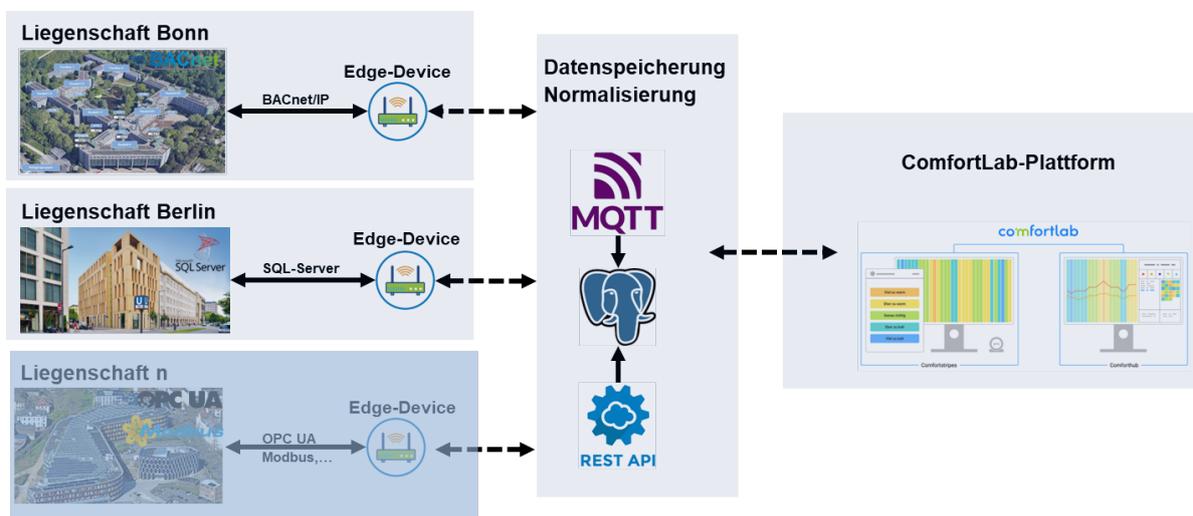
Technische Infrastruktur in Berlin und Bonn

Im Rahmen der Grundlagenermittlung fanden eine Bestandsaufnahme der Bonner Liegenschaft des BMUV und der verbauten Technik, die Ergänzung von Messpunkten, das Behaglichkeitsmonitoring sowie die Erfassung der Energieverbräuche und deren Auswertung statt. Hierüber wurden der Ist-Zustand hinsichtlich Energieverbrauch und Raumklima erhoben sowie die grundlegenden Anforderungen an das Forschungsdesign evaluiert. Ebenfalls erfolgte eine erste empirische Erhebung unter den Akteuren. Im Folgenden erfolgen die Beschreibung der technischen Infrastruktur, die Ergebnisse des Behaglichkeitsmonitorings sowie die Interviewergebnisse zum Raumklima. Soweit zutreffend, werden auch die technischen Parameter der Berliner Liegenschaft beschrieben. Da diese bereits Untersuchungsgegenstand des Vorgängerprojekts war, wurde für die Grundlagenermittlung kein separates Arbeitspaket beauftragt.

Zur Beurteilung der energetischen Ausgangssituation wurden zu Projektbeginn Anforderungen an die Datenerfassung definiert und umgesetzt. Hierzu wurde die Gebäude- und Messtechnik in den beiden Liegenschaften untersucht und entsprechend eine Datenschnittstelle auf dem EBZ-Server implementiert. Ziel war die Erfassung von Messdaten aus der Gebäudeleittechnik (Vor-/Rücklauftemperaturen, Energieverbräuche, Raumtemperaturen), der Transfer sowie die Normalisierung und Bereitstellung für das ComfortLab. Da im Rahmen des Projektes prototypische Kennzahlen in Anlehnung an das physikalische Optimum für die technische Gebäudeausrüstung für die Liegenschaft in Berlin ermittelt wurden, wurde hier eine deutlich umfassendere Datenerhebung realisiert, da auch Messdaten aus beispielsweise Wärmepumpen und Lüftungsanlagen einbezogen wurden, soweit diese vorhanden und valide waren.

In Abbildung 3 ist die technische Infrastruktur projektumfassend zu sehen. Die Edge-Devices übernehmen die Aufgabe der lokalen Datenabfrage und den Transfer zum EBZ-Server mittels standardisierter, verschlüsselter Schnittstellen und Protokolle. Auf dem Server erfolgt die Speicherung der Daten sowie die Datenaggregation (bspw. Generierung von Durchschnittswerten, Stunden- und Tagesverbräuchen) und die Datenbereitstellung für die ComfortLab-Plattform.

Abbildung 3
Datenfluss- und Infrastrukturschema projektübergreifend



Quelle: EBZ Business School GmbH

Bei der Entwicklung der Schnittstelle wurde Wert auf eine Skalierbarkeit einerseits und auf die Möglichkeit der Integration weiterer Datenquellen (bspw. anderweitiger Protokolle der Gebäudeautomation) andererseits gelegt. So lassen sich perspektivisch weitere Liegenschaften mit wenig Aufwand an die Plattform anbinden.

Infobox 1: Dateninfrastruktur Berlin

Für die Erhebung der relevanten Daten aus der Gebäudeleittechnik (GLT) wurde seitens des BBSR im BMUV in Berlin der Fernzugang zu einem Gateway-PC gestellt, über den sich die Daten zum EBZ-Server übermitteln lassen. Die Daten werden von der GLT in einer Microsoft-SQL Datenbank gespeichert. Zum Datentransfer wurde auf dem Gateway-PC ein Skript aufgesetzt, das die Daten von der Microsoft-SQL Datenbank periodisch abfragt und über das MQTT-Protokoll TLS-gesichert an den EBZ-Server transferiert. Anschließend findet eine persistente Speicherung der Daten in einer PostgreSQL-Datenbank statt. Aus dieser wurden im Rahmen des Projektes Auswertungen generiert sowie Daten für die ComfortLab-Plattform zur Verfügung gestellt.

Es ergaben sich sowohl in den Heizperioden als auch im Frühjahr und Sommer immer wieder Schwierigkeiten mit dem Datentransfer, weil der Gateway-PC teilweise nicht erreichbar war oder der Arbeitsspeicher des GLT-Rechners voll war und keine weiteren Datenabfragen zuließ, so dass teilweise Datenpunkte unvollständig geloggt und übertragen wurden. Zur Problembehebung war ein manueller Eingriff (Prüfung des Gateway-PCs oder GLT-Rechners vor-Ort) des Facility Managements notwendig.

Infobox 2: Dateninfrastruktur Bonn

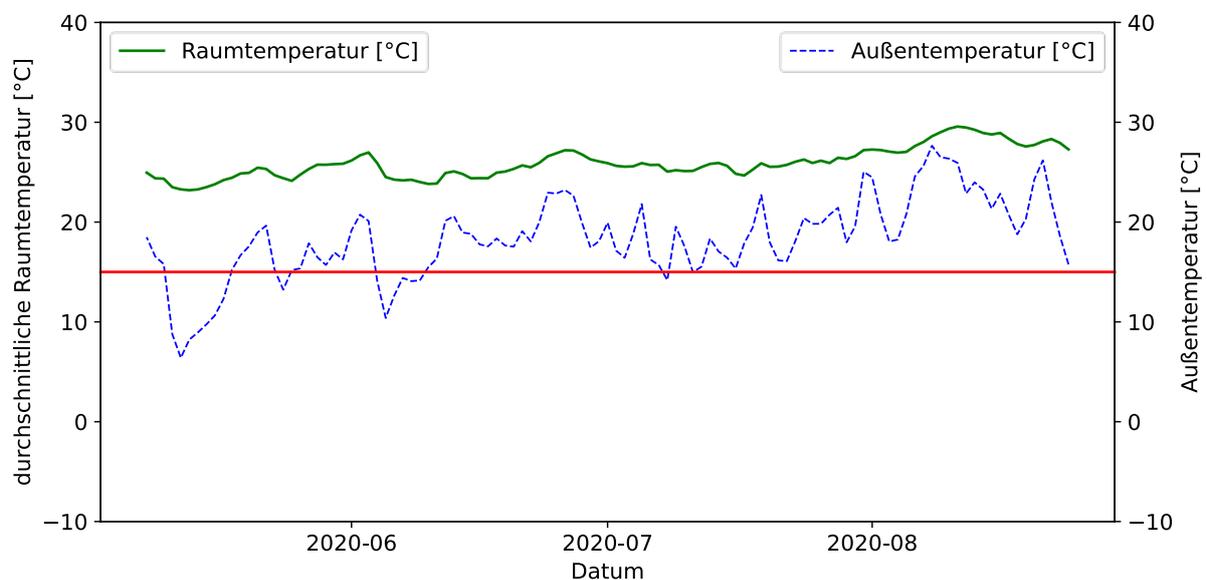
In Bonn befand sich zu Projektbeginn keine Möglichkeit, automatisiert historische oder aktuelle Daten aus der Gebäudeleittechnik zu extrahieren. In Abstimmung mit dem Ansprechpartner des Herstellers Sauter Controls, deren Technologie auf der Automations- und Managementebene der GLT die Regelung und Visualisierung der Anlagentechnik übernimmt, wurde diskutiert, welche Möglichkeiten zum Datenzugriff möglich sind. Als Ergebnis wurde ein Datenzugriff mittels des Kommunikationsprotokolls OPC UA realisiert. Dieses bietet einen standardisierten Datenzugriff auf Objekte und Daten der einzelnen Automationsstationen. Über einen Gateway-PC, der EBZ-seitig in der Liegenschaft installiert wurde, konnten die Daten abgefragt werden. Während der Inbetriebnahmephase wurden wesentliche Umbaumaßnahmen an der Automatisierungstechnik in der Liegenschaft durchgeführt. Im Zuge dessen wurde auch die Kommunikationstechnik zwischen den verteilten Automationsstationen und der Leittechnik von OPC UA auf BACnet/IP umgestellt. Als Konsequenz dessen musste die Software auf dem Gateway-PC vollständig umprogrammiert werden, so dass die BACnet-Kompatibilität sichergestellt werden konnte.

Behaglichkeitsmonitoring zur Bewertung der raumklimatischen Ausgangssituation

Im Rahmen des Behaglichkeitsmonitorings wurden in der Liegenschaft in Bonn in zwei Phasen (Phase 1, Extech-Messungen: Mai-August 2020; Phase 2, BAPPU-Messungen: Dezember 2020 bis März 2021) Messungen in Büros und Besprechungsräumen durchgeführt. Hierüber sollte die Ist-Situation der raumklimatischen Bedingungen einerseits sowie Möglichkeiten zur energetischen Einsparung andererseits abgeschätzt werden.

Hierzu wurden im ersten Schritt in fünf Büros Messungen der Raumluftparameter (CO₂-Gehalt, Lufttemperatur, relative Luftfeuchtigkeit) durchgeführt. Die Daten wurden durch das Facility Management ausgelesen und an das EBZ übersandt. EBZ-seitig wurden die Daten auf dem Server eingelesen und grafisch aufbereitet. Dabei konnte festgestellt werden, dass vier von fünf vermessenen Büros in der Zeit nicht benutzt wurden, zu erkennen an der CO₂-Konzentration, die sich nahezu konstant auf dem Niveau der Außenluft befindet. Da die Messungen im Frühling und Sommer durchgeführt wurden, sind Aussagen zu Raumtemperaturen im Zusammenhang mit der Wärmeenergieversorgung in den Zeiträumen mit Außentemperaturen unter 15 °C zu berücksichtigen. In Abbildung 4 ist in Grün die durchschnittliche Tagesraumtemperatur auf der linken y-Achse sowie in Blau die durchschnittliche Tagesaußentemperatur blau-gestrichelt auf der rechten y-Achse aufgetragen. Die 15 °C-Grenze ist als horizontale rote Linie eingetragen. Auch in den Tagen mit Temperaturen unter 15 °C ist eine Abnahme der Raumtemperaturen, auch an Wochenenden, nicht zu erkennen. Dies deutete auf vorhandenes Potenzial für weitere Einstellungen im Rahmen der beiden Pilotversuche in AP3 und AP4. Die Ergebnisse decken sich mit den Erkenntnissen aus dem Vorgängerprojekt, bei denen ähnliche Messungen in der Berliner Liegenschaft (siehe Kapitel des entsprechenden Abschlussberichtes) erhoben und ausgewertet wurden.

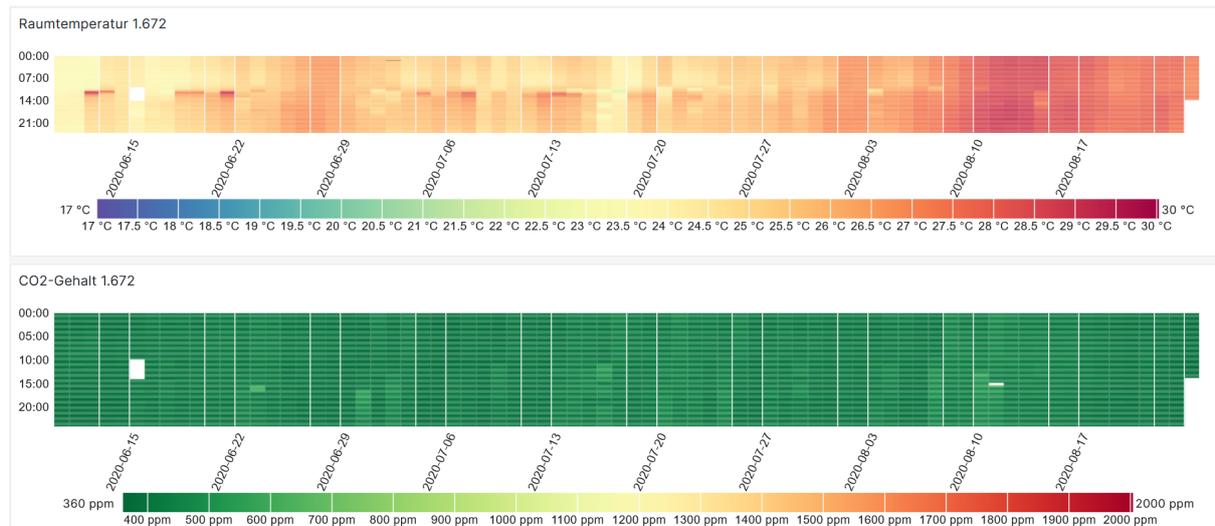
Abbildung 4
Raum- und Außentemperaturen im Frühjahr/Sommer 2020 in Bonn



Quelle: EBZ Business School GmbH

Damit der Dialog mit der Haustechnik für die kommenden Pilottests datengetrieben unterstützt werden konnte, wurden eine serverseitige Plattform aufgesetzt, auf der die Daten plattform- und endgeräteunabhängig eingesehen werden konnten (siehe Abbildung 5, adaptive Darstellung auf dem Tablet). Diese wurde für die Validierung und Empfehlung von Einstellungen in den beiden Pilottests weiter ausgebaut.

Abbildung 5
Beispieldarstellung der serverseitigen Plattform



Quelle: EBZ Business School GmbH

Neben der Untersuchung der Temperatur und Raumluftqualität wurden in den Weihnachtsferien 2020 sowie im Februar und März 2021 vertiefte Messungen mit Messgeräten zur Beurteilung der Behaglichkeit an Arbeitsplätzen durchgeführt. Beauftragt wurde das Monitoring von 20 Büroräumen entsprechend der zu erwartenden Anzahl an teilnehmenden Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern. Aufgrund der während der Projektlaufzeit anhaltenden COVID-19-Pandemie war die Vermessung von überwiegend oder vollständig belegten Büros nicht möglich. Alternativ wurden in Abstimmung mit dem Auftraggeber und dem Facility Management eine Auswahl von Besprechungsräumen und Büros gewählt, in denen repräsentative Messungen durchgeführt wurden. Insgesamt wurden 36 Messreihen mit den Messgeräten aufgenommen, deutlich mehr als ursprünglich anvisiert. Die erfassten Parameter enthalten:

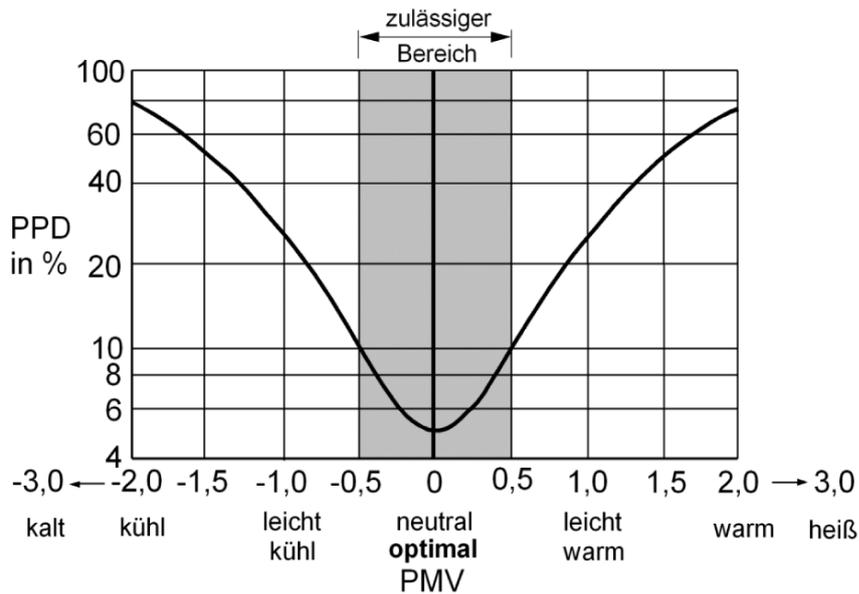
- Raumlufttemperatur (inkl. Maximal- und Minimalwert im Messintervall)
- Relative Luftfeuchtigkeit (inkl. Maximal- und Minimalwert im Messintervall)
- Lärmpegel (inkl. Maximal- und Minimalwert im Messintervall)
- Beleuchtungsstärke (inkl. Maximal- und Minimalwert im Messintervall)
- Luftgeschwindigkeit (inkl. Maximal- und Minimalwert im Messintervall)
- Globe-Temperatur (inkl. Maximal- und Minimalwert im Messintervall)
- CO₂-Gehalt (inkl. Maximal- und Minimalwert im Messintervall)
- Total Volatile Organic Compounds (inkl. Max. und Minimalwert im Messintervall)
- Berechneter PMV-Wert

Das Mess- und Speicherintervall wurde auf fünf Minuten gesetzt. Dadurch konnte ein guter Kompromiss zwischen Messauflösung und verfügbarem Speicherplatz erreicht werden.

Die Anforderungen an die Behaglichkeit sind in der DIN EN ISO 7730 genormt. Dabei wird ein Verfahren beschrieben, mit dem sich das subjektive Empfinden der optimalen Raumtemperatur in Abhängigkeit von Aktivität und Bekleidung für einen möglichst großen Anteil der Nutzerinnen und Nutzer berechnen lässt. Neben der Lufttemperatur gehen dabei auch die Luftgeschwindigkeit und die Strahlungstemperatur ein. Abbildung 6 zeigt den Zusammenhang zwischen der berechneten Erwartung der thermischen Behaglichkeit (PMV), die sich durch die Erfassung der relevanten Parameter ergibt, und dem erwarteten Prozentsatz der mit dem aktuellen Raumklima unzufriedenen Personen (PPD). Ein PMV von 0 (thermisch neutral) entspricht dabei dem Optimum, bei dem aber dennoch aufgrund der subjektiv unterschiedlichen Empfindung ein gewisser Prozentsatz (etwa 5 %) an Personen mit dem Raumklima unzufrieden ist.

Mit steigendem Anteil der erwarteten Bewertung in die beiden Richtungen „zu kalt“ und „zu warm“ steigt der entsprechende Anteil der mit dem Raumklima Unzufriedenen.

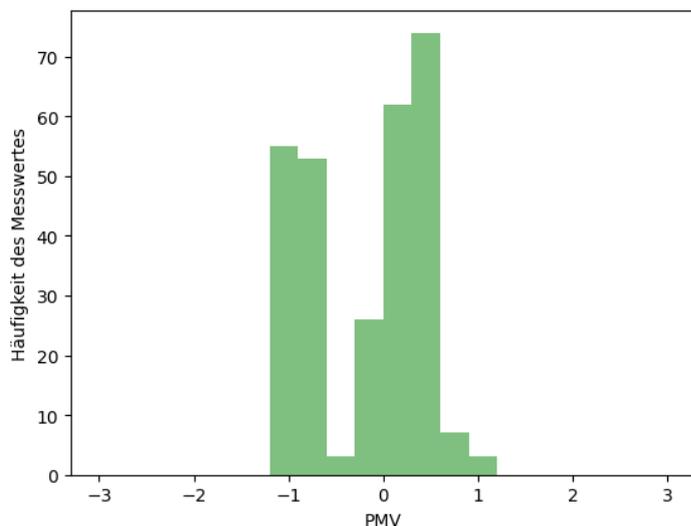
Abbildung 6
Zusammenhang zwischen PMV und PPD



Quelle: e-genius – Initiative offene Bildung in Technik und Naturwissenschaften

Für die Auswertung wurden ein Bekleidungsindex von 0,9 sowie eine Stoffwechselrate von 1,3 definiert, dies entspricht Werten klassischer Bürotätigkeit. Abbildung 7 zeigt die Häufigkeitsverteilung des durch die Messdaten berechneten PMV in den Arbeitszeiten (definiert von Montag-Freitag, 7 bis 17 Uhr) und bei Außentemperaturen unter 15 °C, wobei nahezu alle Büros während der Messungen unbesetzt waren. Zu erkennen ist, dass sich dieser zwischen -1 und 1 bewegt, der Großteil der Messwerte jedoch > 0 liegt. Die Werte mit geringen PMV-Werten sind verbunden mit eher geringen gemessenen Strahlungstemperaturen, die mit einer geringen empfundenen Temperatur verbunden sind.

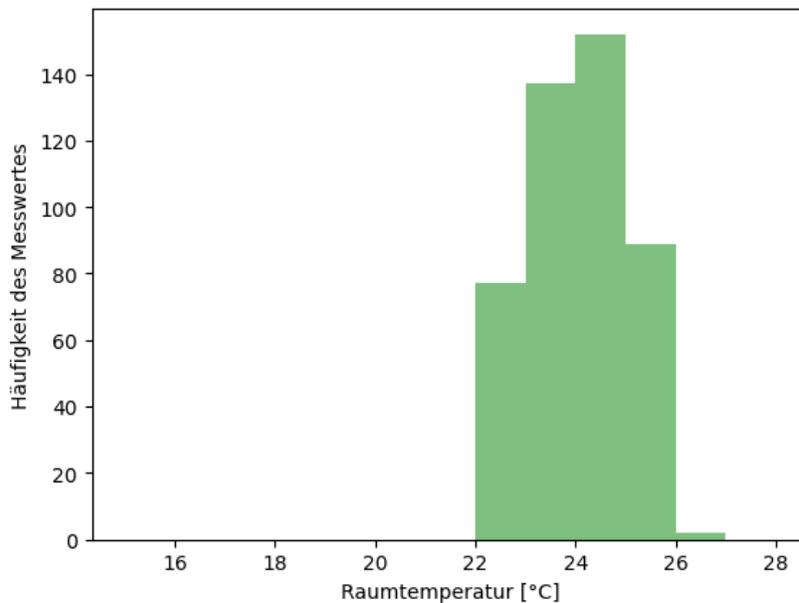
Abbildung 7
Behaglichkeitsmessung in Bonn, PMV während der Arbeitszeit und Homeoffice Tätigkeit



Quelle: EBZ Business School GmbH

Für die Untersuchung der Optimierungsmöglichkeiten sind ebenfalls Zeitpunkte außerhalb der Arbeitszeit interessant. zeigt den Verlauf der durchschnittlichen Raumtemperatur außerhalb der Arbeitszeiten. Dabei sind nur Zeitpunkte, an denen die Außentemperatur kleiner als 15 °C und somit unterhalb der regulären Heizgrenze ist, berücksichtigt. Zu erkennen ist, dass bei dem Status-quo-Anlagenbetrieb außerhalb der Arbeitszeit hohe Raumtemperaturen, im Wesentlichen im Bereich zwischen 23 °C und 25 °C, vorliegen.

Abbildung 8
Durchschnittliche Raumtemperatur der BAPPU-Messungen außerhalb der Arbeitszeiten



Quelle: EBZ Business School GmbH

Ebenfalls wurden die erfassten Daten zur Luftgeschwindigkeit ausgewertet. Probleme mit Zugluft ließen sich im Rahmen der Messungen nicht erkennen, nur etwa 0,1 % der Messwerte liegen im Bereich von mehr als 0,2 m/s, welcher als maximal zulässiger Grenzwert beispielsweise nach DGUV empfohlen wird (vgl. DGUV 2016).

Mittels der Ergebnisse der Messungen mit den BAPPU-Geräten lassen sich die Eindrücke der Extech-Messungen, die auf ein vorhandenes Potenzial zu Optimierungen der Betriebszeiten und Versorgungstemperaturen hingedeutet haben, noch einmal bekräftigen.

Interview-Ergebnisse zum Raumklima

Für die Interviews (Dezember 2020 bis Juli 2021) wurde die qualitative Methode der offenen und problembezogenen Leitfadeninterviews ausgewählt, die sich an den für das Projekt relevanten Themenblöcken und der Abstimmung mit dem Auftraggeber orientieren. Die Themenblöcke wurden darüber hinaus an den INKA-Leitfaden (Wagner/Schakib-Ekbatan 2010) für quantitative Erhebungen zu den Komfortbedingungen am Arbeitsplatz angelehnt. Insgesamt konnten so elf Interviews in Bonn und Berlin geführt werden.

Da zum Zeitpunkt der Interviews weitreichende Kontaktbeschränkungen aufgrund der COVID-19-Pandemie bestanden und die Interviewteilnehmenden vermehrt im Homeoffice gearbeitet haben, ist die Aussagekraft der hier vorgestellten Ergebnisse begrenzt. Gleichwohl konnten einige grundlegende Erkenntnisse abgeleitet werden, die einen ersten Überblick über die allgemeine Situation vor Ort liefern. Die zentralen Ergebnisse der Leitfadeninterviews werden im Folgenden kurz zusammengefasst und mit kurzen paraphrasierten Interviewauszügen (siehe Infobox 3) dargestellt.

Infobox 3: Auszüge aus den Leitfaden-Interviews mit Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des BMUV in Bonn und Berlin**Zitat 1:**

„Ich bin eigentlich sehr zufrieden mit dem Raumklima, wenn man das Fenster aufmacht, hört man die Autobahn, aber daran habe ich mich gewöhnt. Allerdings gibt es auch Zeiten, an denen die Heizleistung nicht optimal ist (...), dann lasse ich den Regler manchmal an. Die maximale Heizleistung ist hier sehr früh am Morgen, von 8-10 Uhr, aber ich bin erst ab 10 Uhr im Büro und deswegen lasse ich den Regler dann nachts manchmal an, beispielsweise von Montagabend auf Dienstagmorgen.“ (Interview 1)

Zitat 2:

„Manchmal, wenn ich ins Büro komme, ist die Heizung voll aufgedreht, aber ich weiß nicht, wer das macht, (...) deswegen reiße ich morgens oft das Fenster auf. Ja, der Thermostat wird manuell aufgedreht, aber es ist sehr schwer die Heizung wieder runter zu regeln, weil da ein Tisch steht mit einem Drucker darauf und dann kommt man sehr schwer ans Thermostat ran um es wieder runter zu regeln.“ (Interview 2).

Zitat 3:

„Durch die klimaneutrale Landesregierung sind wir ja gehalten, hier nicht unnötig Strom zu verbrauchen. Aber das ist mir auch ein persönliches Anliegen. (...) Zu sowas gibt es aber eher kein Feedback mit den Kollegen (...). Ein bisschen Aufklärung wäre vielleicht nicht schlecht. Weil überraschend viele Leute hier das Licht anlassen oder die Geräte laufen lassen. Manchmal ist es auch Gedankenlosigkeit.“ (Interview 3)

Zitat 4:

„Was ich bei Feedback nicht gut fände, wären so Appelle im Intranet, das wirkt nicht. Aber wenn man im Büro laufend auf seinen Verbrauch hingewiesen würde, könnte ich mir vorstellen, dass das gut funktioniert bei einigen.“ (Interview 5)

Zitat 5:

„Bei mir persönlich ist wahrscheinlich auch sehr viel Einsparpotenzial vorhanden. Es gibt beispielsweise ein extra Schild über unserer Steckdose, aber das wird trotzdem oft vergessen, (...) ein Gamification-Ansatz wäre wahrscheinlich sehr interessant.“ (Interview 1)

Das Raumklima (Luftqualität, Temperatur) wird von den Interviewten größtenteils als angenehm empfunden. Allerdings bestehen in einigen Büros Schwierigkeiten in der Feinabstimmung der individuellen Wohlfühltemperatur oder der erwünschten Luftqualität. Dabei werden die begrenzten Möglichkeiten in der Feinabstimmung der Heizkörper (z. B. Funktionalität, Erreichbarkeit) gelegentlich mit einem voll aufgedrehten Heizkörperthermostat und geöffneten Fenstern kompensiert (gelegentlich auch über Nacht), wie die Zitate 1 und 2 zeigen (siehe Infobox 3).

Die Kommunikation mit dem Facility Management wird von den Büronutzerinnen und Büronutzern größtenteils als angenehm und lösungsorientiert empfunden. Obwohl kein allgemeiner Austausch zu energieeffizientem Verhalten am Arbeitsplatz stattfindet, sind die Interviewteilnehmenden sehr daran interessiert, mehr über ihren individuellen Energieverbrauch zu erfahren und haben im Gesprächsverlauf immer wieder proaktive Vorschläge zu möglichen Energieeffizienzstrategien angeregt, wie beispielhaft anhand der Zitate 3 bis 5 aufgezeigt (siehe Infobox 3).

Im Verlauf der Interviews wurde auf Nachfrage häufig darüber diskutiert, welche elektronischen Geräte im BMUV am meisten Strom verbrauchen. Aufgrund der Vielzahl an verschiedenen Mutmaßungen, die darüber angestellt wurden, könnte eine individuelle Verbrauchsübersicht weitere Energieeffizienzpotenziale sichtbar werden lassen.

Ergebnisse der Interviews und Fokusgruppenworkshops

Die Interviews mit Technikerinnen und Technikern des Facility Managements behandelten insbesondere die Themenfelder der individuellen Aufgabenbereiche und der Kommunikation mit den Büronutzerinnen und Büronutzern, die Funktionsfähigkeit und Energieeffizienz der Anlagentechnik sowie potenzielle Energieeffizienzstrategien und Verbesserungsvorschläge. Dabei wurden vor allem Aspekte der Leistungsfähigkeit, der Anlagentechnik und das Wohlbefinden der Büronutzerinnen und Büronutzer diskutiert.

Die Auswertung der Interviews zeigt, dass ein häufiger Kritikpunkt darin lag, dass aufgrund des Modernisierungsstands der Anlagentechnik wenig Handlungsspielraum für individuelle Temperaturregelungen oder ein angepasstes Energiemanagement besteht (bspw. keine individuelle Steuerung im Büro oder auf Etagen möglich) (siehe Zitate 1 und 2 in der Infobox 4).

Infobox 4: Auszüge aus den Interviews mit Technikerinnen und Technikern des Facility Managements

Zitat 1:

„Ein besseres Energiemanagement wäre ziemlich wünschenswert, das heißt mehr Datenpunkte für einzelne Heizungsstränge. Wir haben natürlich auch das Problem, dass man tatsächlich nur die Stränge regeln kann und nicht zum Beispiel einzelne Etagen oder sogar einzelne Büros. Gerade in Zeiten von Corona rächt sich das, denn wir haben jetzt zum Beispiel einen Leerstand von ca. 20 % des Personals, was in der Liegenschaft tätig ist. Aber wir heizen das ganze Gebäude, da wir nicht wissen, wer in welchem Büro sitzt. Da wäre Einsparpotenzial drin, dass man das feiner abstimmen kann. Das gleiche gilt natürlich auch für die Klimatisierung.“ (Interview 8).

Zitat 2:

„Wir versuchen das zu mischen. Zuerst schauen wir auf Energieeffizienz. Das sind ja auch unsere Vorgaben vom BMU/ EMAS Zertifizierung. Wir dürfen aber nicht aus dem Auge verlieren, dass wir hier Mitarbeiter haben, die verschieden reagieren. Jeder Mitarbeiter empfindet ja Wärme und Kälte anders. Und danach müssen wir uns auch richten, aufgrund des Arbeits- und Gesundheitsschutzes. Es hilft uns nichts, wenn wir die Heizung auf Grund von Energieeinsparung runterfahren. Der Arbeitsschutz steht der Energieeinsparung gegenüber.“ (Interview 9).

Zitat 3:

„Für mich als Techniker wäre eine Rückmeldung zum Wohlbefinden gerade für das Thema Energieeffizienz gut.“ (Interview 6).

Zitat 4:

„Wenn es [Rückmeldung zum Wohlbefinden] flächendeckend wäre, ja. [...] das wäre auf jeden Fall interessant, wie das jeder sieht.“ (Interview 8).

Neben den technischen Gegebenheiten vor Ort wurde auch immer wieder die Kommunikation mit den Büronutzerinnen und Büronutzern angesprochen. In den Gesprächen zeigte sich, dass eine regelmäßige Rückmeldung zum Wohlbefinden der Büronutzerinnen und Büronutzer als guter Ansatzpunkt interpretiert wurde, um etwaige Änderungen in dem Betrieb der Anlagentechnik vorzunehmen. Dies wurde insbesondere vor dem Hintergrund diskutiert, dass keine positiven Rückmeldungen an das Facility Management übermittelt werden. Die Kommunikation zwischen den Büronutzerinnen und Büronutzern und dem technischen Personal erfolgt demnach erst, wenn es zu entsprechenden Funktionsstörungen der Heizkörper kommt und die Raumtemperatur als zu kalt empfunden wird. Ein regelmäßiges Feedback, bei dem sowohl positive als auch negative Rückmeldungen gegeben werden (bspw. zu warm, zu kalt, genau richtig), stellt damit eine grundlegende Voraussetzung dar, um neue Energieeffizienzstrategien zu erproben, wie die Zitate 3 und 4 in der Infobox 4 zeigen.

Im Rahmen des Fokusgruppenworkshops (Techniker-Workshop) am 27. April 2021 (vgl. Kapitel Ergebnisse der Interviews und Fokusgruppenworkshops) wurden diese Erkenntnisse noch einmal aufgegriffen, um dem technischen Personal verschiedene Lösungsstrategien vorzustellen. Dabei wurde beispielsweise die Möglichkeit diskutiert, mit Hilfe einer plattformgestützten Abfrage das individuelle Wohlbefinden der Büronutzerinnen und Büronutzer zu erfassen (die sogenannten ComfortStripes, s. u.). Die Reaktion des technischen Personals war dabei sehr aufgeschlossen. So wurden beispielsweise verschiedene Visualisierungsmöglichkeiten diskutiert und abgestimmt, welche technische Daten benötigt werden, um entsprechende Einsparpotenziale auch konkret im Anlagenbetrieb zu erproben (bspw. durch die Gruppierung von Büros und entsprechender Heizkreise im Gebäude).

Ergebnisse zur nutzerzentrierten Betriebsführung

Im Folgenden werden die Ergebnisse für Bonn und Berlin zu den umgesetzten Strategien im Bereich des Heiz- und Kühlenergieverbrauchs vorgestellt: Ergebnisse zur ComfortLab-Plattform und zum technischen Assistenzsystem Piaf. Die Ergebnisse werden nach den jeweiligen Heizperioden gegliedert beschrieben (siehe Tabelle 3).

Tabelle 3
Übersicht der Anzahl der Teilnehmerinnen und Teilnehmer in den jeweiligen Heizperioden

	Heizperiode 2020/2021 <i>(COVID-19-Pandemie ab März 2020)</i>	Heizperiode 2021/2022	Heizperiode 2022/2023
Testphase: ComfortStripes	Technischer Testlauf Berlin: 11 TN (Dez 2020)	Berlin: 9 TN Bonn: 14 TN (Dez. 21-Apr. 22)	Berlin: 84 TN Bonn: 103 TN (Nov. 22-Apr. 23)
Testphase: Piaf	Berlin: 15 TN (Jun 20-Jul 21)	Berlin: 14 TN Bonn: 14 TN (Dez. 21-Apr. 22)	Nicht aktiv, vorhandene PIAF-Daten wurden dennoch ausgewertet

Quelle: Wuppertal Institut/EBZ Business School GmbH

ComfortLab-Plattform: Ziel und Funktionsweise

Die ComfortLab-Plattform wurde im Rahmen des Projekts in insgesamt drei Heizperioden getestet: 2020/2021, 2021/2022 sowie 2022/2023.

Plattform Ziel

Das Ziel der Plattform ist es, dem Facility Management eine tagesaktuelle Auswertung des Wohlbefindens aller teilnehmenden Büronutzerinnen und Büronutzer zur Verfügung zu stellen, die es ihnen ermöglicht, die Vorlauftemperaturen einzelner Heizstränge bedarfsgerecht zu steuern und iterativ zu optimieren.

Das Facility Management soll den Wärmeenergieverbrauch/-einsatz dadurch so weit wie möglich reduzieren können, ohne dabei das durchschnittliche Wohlbefinden der Büronutzerinnen und Büronutzer negativ zu beeinflussen. Das gilt gleichermaßen für bestimmte Absenkstrategien für das Wochenende, die Nacht oder durch flexible Arbeitszeitmodelle. Der Leitsatz ist: Je niedriger die Vorlauftemperaturen, desto geringer die Energiekosten und CO₂-Emissionen.

Die ComfortLab Lösung bietet einen Ansatz, die geforderte Absenkstrategie gemeinsam mit den Büronutzerinnen und Büronutzern und dem Facility Management zu kommunizieren und durchzuführen. Ziel ist es, Akzeptanz und Bereitschaft, auch bei möglicherweise auftretenden Problemen während der Implementierungsphase, zu fördern. Von Beginn werden alle Beteiligten adressiert und die jeweiligen Meinungen und Vorstellungen können eingebracht werden. Dies ermöglicht eine vereinte Perspektive von Komfortorientierung und Energieeffizienz.

Funktionsweise

Die ComfortLab-Plattform besteht aus den zwei Komponenten: ComfortStripes und ComfortHub, siehe Abbildung 9). Die ComfortStripes (links in Abbildung 9) sind die Schnittstelle zu den Büronutzerinnen und Büronutzern. Diese erheben über tägliche E-Mail-Abfragen (jeweils Vor- und Nachmittags) das Wohlbefinden der Büronutzerinnen und Büronutzer und liefern diesen eine Auswertung der vergangenen Raumklimadaten und Abstimmungen.

Die Nutzerinnen und Nutzer haben dadurch einen direkten Kommunikationskanal zum Facility Management.

Abbildung 9
Darstellung verschiedener Komponenten der ComfortLab-Plattform



Quelle: inbestergesellschaft

Das ComfortHub (rechts in Abbildung 9) ist die Schnittstelle zu dem Facility Management. Dieses visualisiert eine Auswertung des Wohlbefindens entlang der Heizstränge im Abgleich mit den Messdaten der Büroräume sowie relevanten Daten der Heizungsanlage (insbesondere der Vorlauftemperaturen, der Außentemperatur sowie den Energieverbräuchen).

Den nicht-sichtbaren Kern der Plattform bildet der ComfortLab Server. Hier werden alle Daten (Feedback der Nutzerinnen und Nutzer, Messdaten zum Raumklima, relevante Daten der Heizungsanlage, Wetterdaten) zusammengeführt, ausgewertet und über die entwickelte REST-API an die entsprechenden Teilsysteme übermittelt.

Was sind die ComfortStripes?

Über eine digitale Plattform können die Büronutzerinnen und Büronutzer mit dem Facility Management über Anwesenheit und das individuelle Raumklima kommunizieren. Für das Feedback werden sogenannte ComfortStripes genutzt. Jeder Streifen steht für die tägliche, persönliche Abstimmung zum Wärme- bzw. Kälteempfinden im Büro.

Was ist der ComfortHub?

ComfortHub visualisiert das Feedback der Büronutzerinnen und Büronutzer und unterstützt so das Facility Management bei der Absenk-Strategie: Es kann identifiziert werden, ob die Anlage „zu warm“ eingestellt ist und der Wärmeenergieverbrauch durch eine Absenkung der Vorlauftemperatur reduziert werden kann. Die Heizungsanlage kann so angepasst und effizienter gesteuert werden.

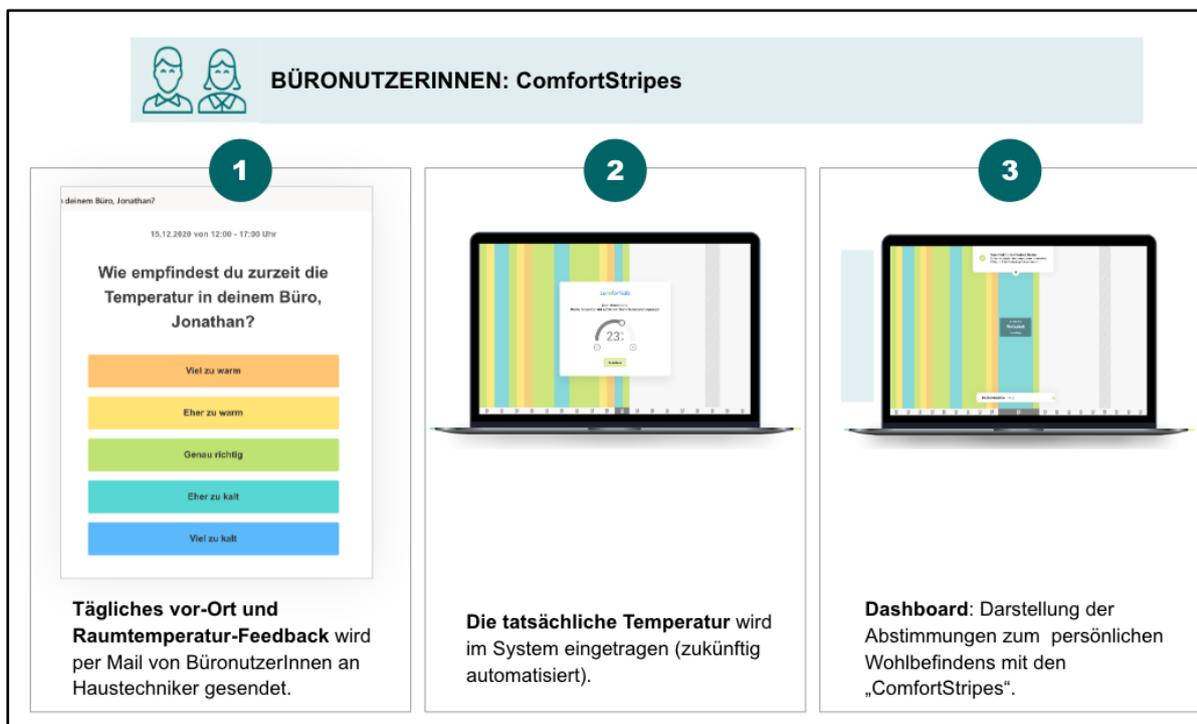
Abbildung 10
Funktionsweise der ComfortLab-Plattform



Quelle: Wuppertal Institut/inbestergesellschaft

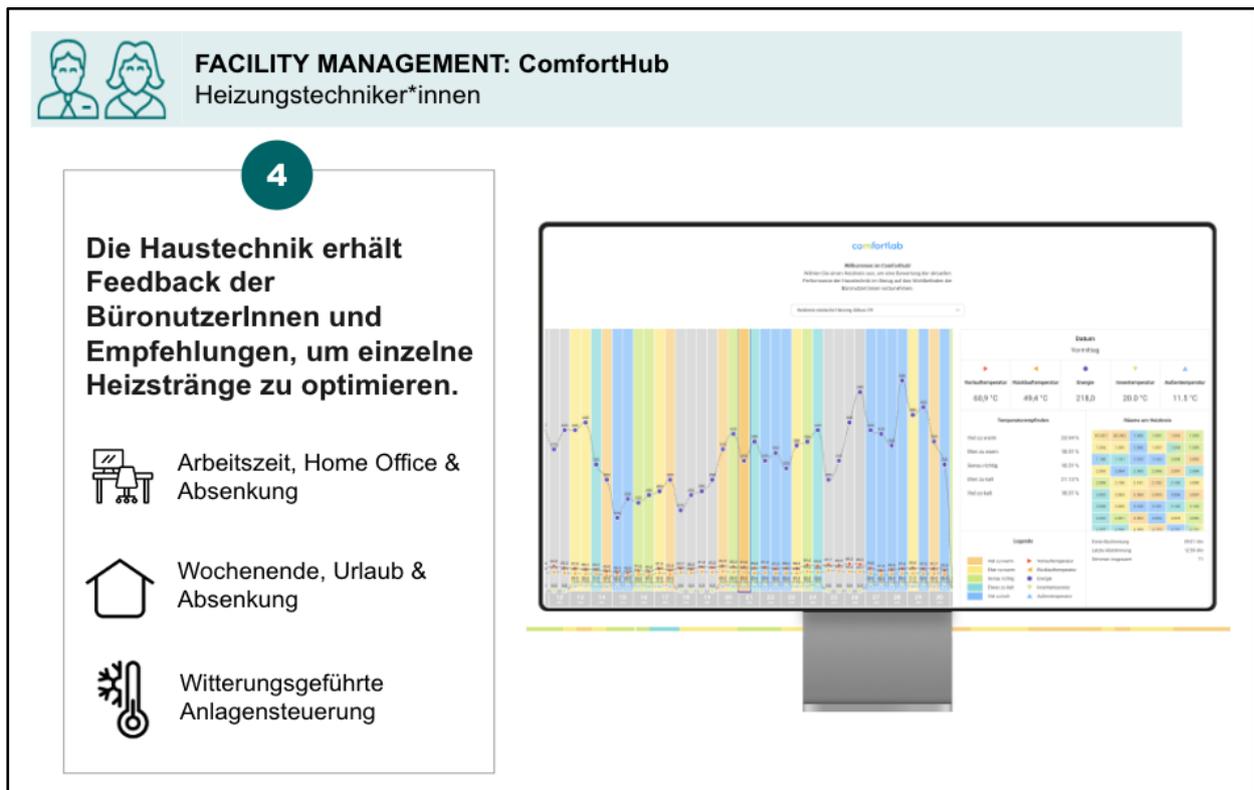
Die folgenden beiden Abbildungen zeigen die Nutzung der ComfortLab Lösung, erklärt anhand von vier Schritten.

Abbildung 11
Nutzung der ComfortLab-Plattform, Schritte 1 bis 3



Quelle: inbestergesellschaft

Abbildung 12
Nutzung der ComfortLab-Plattform, Schritt 4



Quelle: inbestergesellschaft

Entwicklungsansatz und Prozess (1. Entwurf)

Die ComfortLab-Plattform ist in Zusammenarbeit und kollaborativ mit dem Forschungsteam des Wuppertal Instituts und der EBZ Business School, den Nutzerinnen und Nutzern und dem Facility Management sowie mit der Designagentur inbestergesellschaft entwickelt worden. Auf Basis des Living Lab- Ansatzes (Baedeker et al. 2020) wurden wesentliche Schritte in drei Phasen (2020-2023) durchgeführt:

2020 bis 2021: Grundlagenentwicklung, Co-Entwicklung und Testphase 1

- Grundlagenermittlung (Bonn, AP1, AP2): unter anderem Interviews, Bestandsaufnahme, Behaglichkeitsmonitoring
- Testphase 1 im Dezember 2020, um die technische Machbarkeit und Datenverfügbarkeit zu prüfen sowie eventuelle Mängel aufzudecken (11 TN).
- Co-Creation Workshop (Bonn und Berlin; 27. April 2021) mit Technikerinnen und Technikern des Facility Managements zur (Weiter-)Entwicklung der Plattform (9 TN; Online)
- Nutzerinnen- und Nutzer-Akquise: „Digitaler Espresso“ (21. Oktober 2021; 40 TN; Online) und Online-Infoveranstaltung (11. Januar 2022; 30 TN nur Bonn), um Nutzerinnen und Nutzer über die ComfortLab-Plattform und ComfortStripes zu informieren und offene Fragen zu klären.

2021 bis 2022: Co-Entwicklung und Testphase 2

Basierend auf dem ersten Testlauf in der Heizperiode 2020/2021 im BMUV Stresemannstraße wurde die ComfortLab-Plattform in Zusammenarbeit mit der Designagentur inbestergesellschaft weiterentwickelt. Zudem wurde die Plattform in einem Kreis von Expertinnen und Experten auf dem „projektübergreifenden Austausch Zukunft Bau und BMUV“ am 07.06.2021 vorgestellt und weiteres Feedback eingeholt. Die Expertinnen und Experten sowie die Forscherinnen und Forscher stammten aus dem Themenfeld „nutzerzentrierte Betriebsführung“ und „Lowtech“. Zur Weiterentwicklung wurde die Plattform außerdem den Vertreterinnen und Vertretern des BMUV Berlin und Bonn auf dem projektinternen Workshop am 31.08.2021 in Berlin vorgestellt und Feedback dazu eingeholt. Es war geplant, dass an der Interaktion ComfortLab im Winter 2021/2022 insgesamt ca. 50 Personen teilnehmen. Für die Erhebung der relevanten Daten aus der Gebäudeleittechnik (GLT) wurde seitens des BBSR im BMUV der Fernzugang zu einem Gateway-PC gestellt, über den sich die Daten zum EBZ-Server übermitteln lassen. Hierzu hat die EBZ die Datenbankstruktur der GLT analysiert.

- Testphase 2 (Bonn und Berlin; Dezember 2021 bis April 2022; 23TN) zur Erprobung und Evaluation der erarbeiteten Strategien für die Bereiche Heiz- und ggf. Kühlenergie hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit und Wirksamkeit.
- Umfrage (April 2022; 13 TN; Online): zehnmündige anonymisierte Nutzerumfrage zur Handhabung der ComfortStripes Lösung (Umfrage siehe Anlage).
- Feedback-Workshop (24. Mai 2022; Bonn und Berlin 16 TN; Online) um Feedback zur Handhabung von ComfortHub (Facility Management) sowie zur Handhabung der ComfortStripes und Piaf (Büronutzerinnen und Büronutzer) zu erhalten.

2022 bis 2023: Co-Entwicklung und Testphase 3

- Nutzerinnen und Nutzer-Akquise: Zweiter „Digitaler Espresso“ (15. Dezember 2022).
- Testphase 3 (Bonn und Berlin; Oktober 2022 bis April 2023; 184 TN) zur Erprobung und Evaluation der erarbeiteten Strategien für die Bereiche Heiz- und ggf. Kühlenergie hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit und Wirksamkeit.
- zehnmündige Umfrage 5. bis 17. Mai 2023 (Bonn und Berlin; 110 TN) zur Handhabung mit der ComfortStripes Lösung (Umfrage siehe Anlage).

Ergebnisse zur ComfortLab-Plattform

Die Ergebnisse zur ComfortLab-Plattform werden in vier Bereichen vorgestellt: Allgemeine Ergebnisse zum Energieverbrauch sowie Ergebnisse je Heizperiode im Zeitraum 2020 bis 2023.

Im Folgenden werden allgemeine Ergebnisse zum Energieverbrauch der beiden Liegenschaften Bonn sowie Berlin im Zeitraum 2020 bis 2023 beschrieben. Fokus ist die Analyse und Bewertung der Heizenergieverbräuche unter Beachtung unterschiedlicher Effekte, die eine Veränderung bewirkt haben.

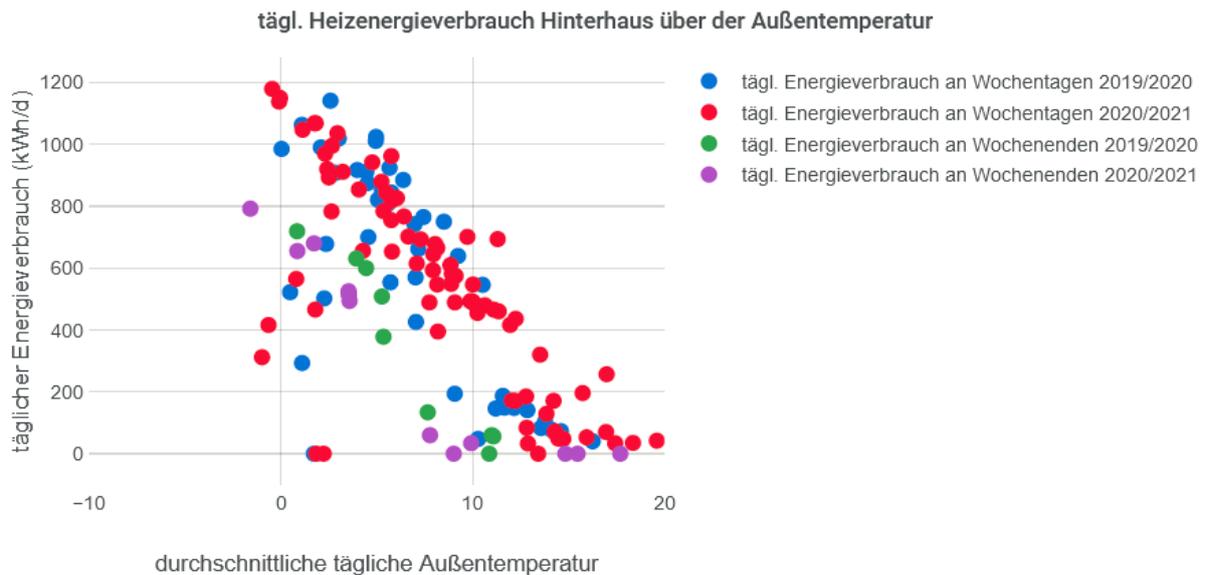
Entwicklung des witterungsbereinigten Heizenergieverbrauchs in den Heizperioden 2020 bis 2023

Zu Beginn der Untersuchungen wurde eine Abschätzung getroffen, welchen Effekt die nahezu vollständige Homeoffice-Tätigkeit der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter im Zuge der COVID-19-Pandemie auf den Energieverbrauch ausübt und ob die vorhandenen Potenziale gehoben wurden. Hierzu wurden nach dem ersten Winter unter der COVID-19-Pandemie die Wärmeenergie-Verbrauchsdaten für die Berliner Liegenschaft ausgewertet. Abbildung 13 zeigt exemplarisch den täglichen Heizenergieverbrauch über der durchschnittlichen täglichen Außentemperatur für den Heizkreis „Altbau-Hinterhaus“. Unterteilt sind die Verbräuche in die Heizperiode vor der Pandemie (2019/2020) und den ersten Winter mit den entsprechenden Schutzmaßnahmen und der überwiegenden Tätigkeit im Homeoffice (2020/2021). Weiterhin sind die Verbräuche in Wochentage und Wochenenden unterteilt. Beim Blick auf die Verbräuche fallen zwei Effekte auf:

- Es gibt eine rudimentäre Wochenendabsenkung, zu erkennen an den niedrigeren Verbräuchen an Samstag und Sonntag bei gleichen Außentemperaturen.
- Nicht zu erkennen ist eine Unterscheidung der Verbräuche vor und während der COVID-19-Pandemie. Die blauen Punkte (2019/2020) und die roten Punkte (2020/2021) als Heizenergieverbräuche an Wochentagen liegen übereinander, es ist also keine Reduzierung des Temperaturniveaus und damit der Verbräuche analog zu der deutlich reduzierten Belegung des Gebäudes erfolgt.

Abbildung 13

Täglicher Heizenergieverbrauch über der durchschnittlichen täglichen Außentemperatur



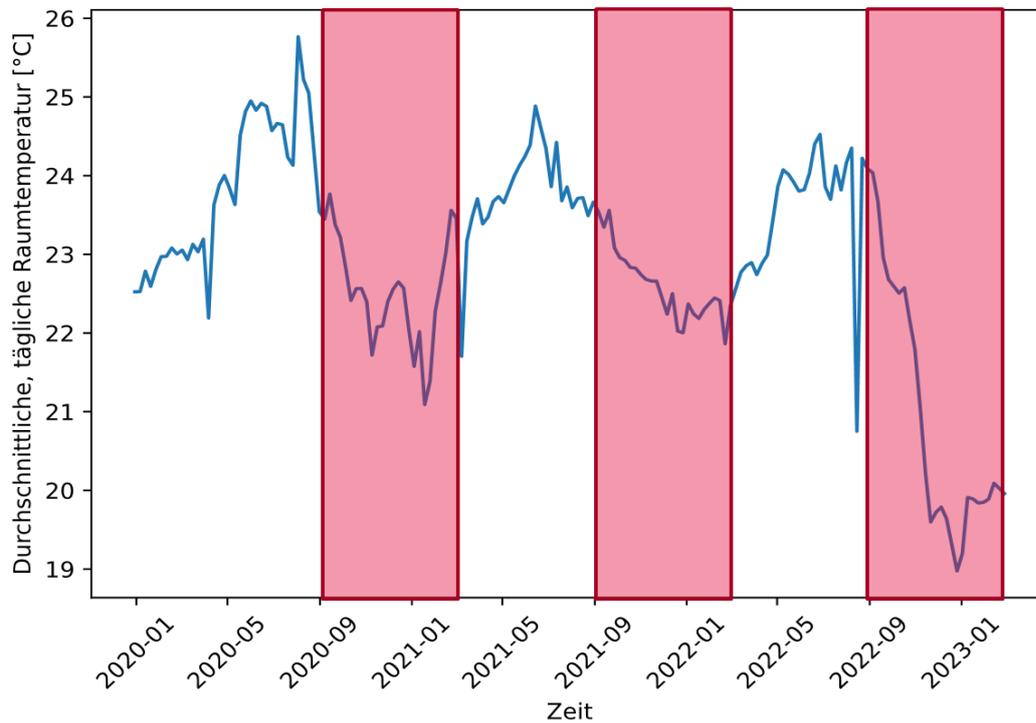
Quelle: EBZ Business School GmbH

Im weiteren Projektverlauf wurden die eingestellten Temperaturen in der Anlagentechnik und die daraus resultierenden Verbräuche weiter untersucht. Interessant war dabei vor allen Dingen die Auswirkung während der 19 °C-Vorgabe (vgl. Bundesregierung 2022).

Entwicklung der exemplarischen Raumlufttemperaturen in den Heizperioden 2020 bis 2023

Da aus datenschutzrechtlichen Gründen keine flächendeckende Installation von kommunizierenden Temperatursensoren möglich war, wurden zur Evaluation die Daten der auf die GLT aufgeschalteten Raumtemperatursensoren aus dem Passivhausbereich in Berlin verwendet. Abbildung 14 zeigt die durchschnittlichen Tagestemperaturen der letzten Jahre, die roten Balken symbolisieren dabei die Heizperioden. Zu erkennen ist ein starker Abfall der Raumtemperaturen in der Heizperiode 2022/2023, so dass die Umsetzung der 19 °C-Vorgabe Wirkung zeigt.

Abbildung 14
Durchschnittliche Temperaturen im Passivhausbereich Berlin

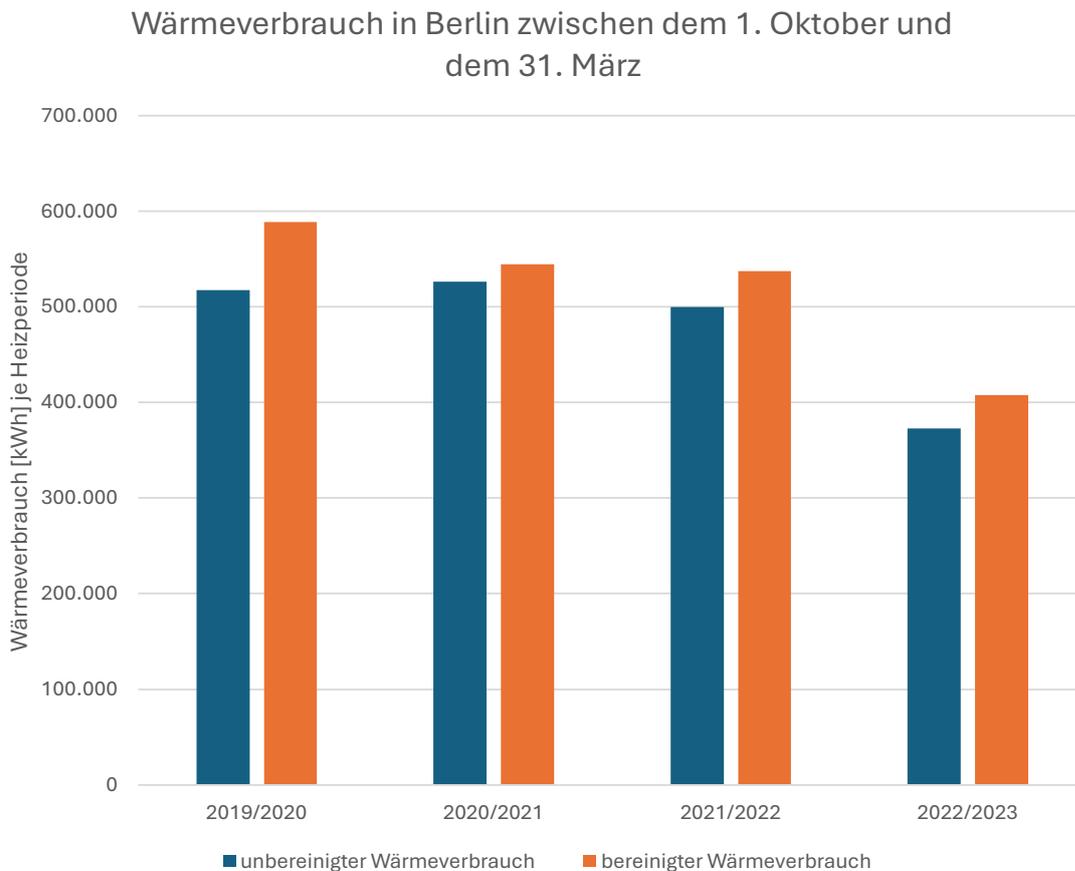


Quelle: EBZ Business School GmbH

Energetische Gesamtevaluierung der Heizperioden 2020 bis 2023

Nach der Heizperiode 2022/2023 wurden die Gesamtheizenergieverbräuche der beiden Liegenschaften bilanziert. Abbildung 14 zeigt den witterungsbereinigten Heizenergieverbrauch in Berlin, jeweils für die vier vergangenen Heizperioden für die Zeit vom 1. Oktober bis zum 31. März, auf. Dies umfasst den Fernwärmebezug sowie die Wärmeproduktion der beiden Wärmepumpen im Neubaubereich. Der linke Balken (blau) zeigt dabei jeweils den unbereinigten Verbrauch, der rechte Balken (orange) den Verbrauch um die Summe an Gradtagszahlen für die sechs Monate bereinigt. Zu erkennen ist, dass die vergangenen vier Heizperioden milder waren als der langjährige Durchschnitt.

Abbildung 15
Wärmeverbrauch in Berlin im zeitlichen Verlauf

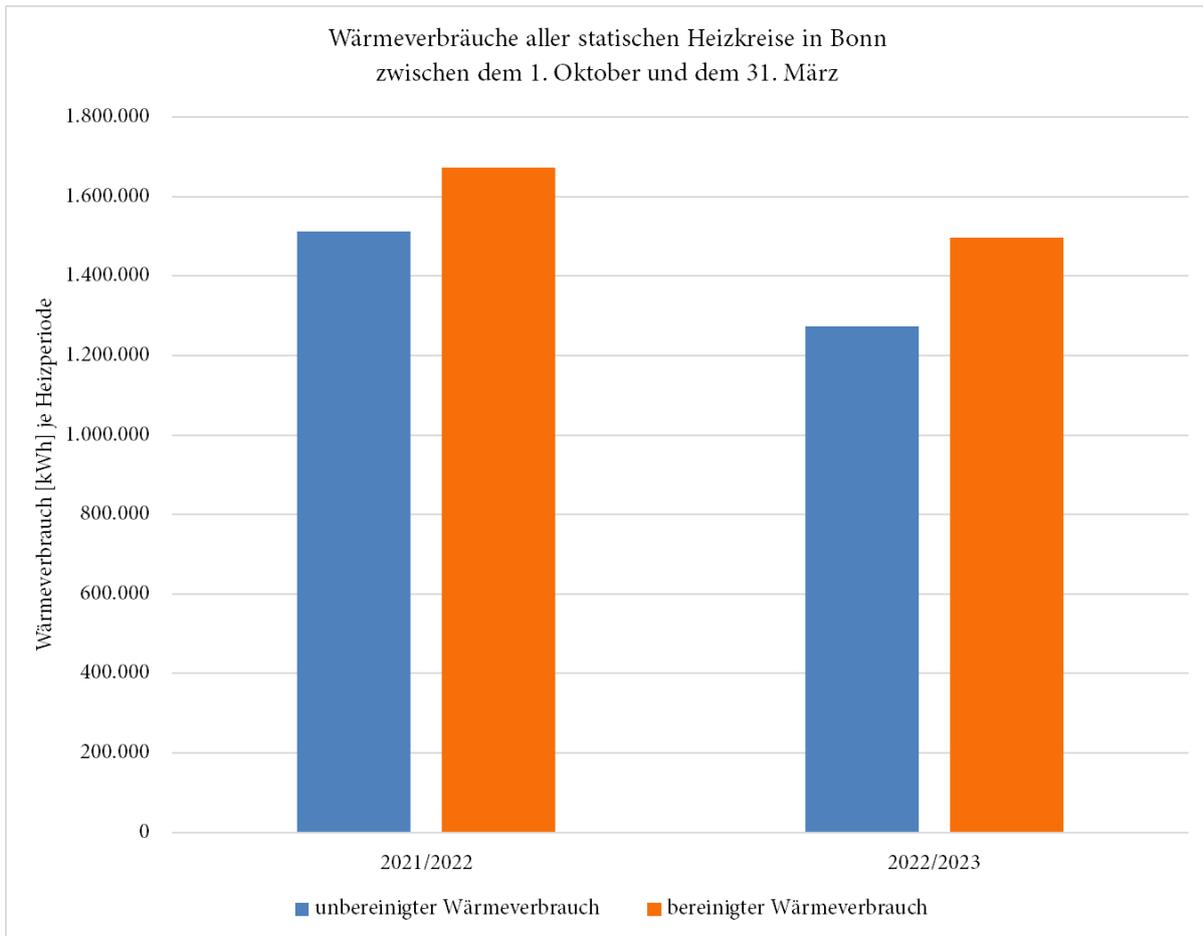


Quelle: EBZ Business School GmbH

Der witterungsbereinigte Wärmeverbrauch in der Heizperiode 2022/2023 als Summe des Fernwärmebezugs sowie der Wärmepumpenproduktion ist in Berlin deutlich zurückgegangen, dieser beträgt etwa 30 % im Vergleich zum Durchschnitt der vorangegangenen drei Jahre. In Summe beträgt dieser Rückgang etwa 150.000 kWh für den Untersuchungszeitraum. Bei einem Emissionsfaktor von 55,6 g CO₂e/kWh sind dies etwa 8,3 t CO₂. Mit Wärmekosten von 9,5 Cent/kWh entspricht dies etwa 14.200 € Kosteneinsparung pro Jahr (Quellen: Gradtagszahlen vom Deutschen Wetterdienst, Emissionsfaktor der Fernwärme von der Vattenfall Wärme Berlin, Wärmepreis als Mittelwert mit Deckelung durch die Energiepreisbremse).

Für Bonn liegt kein auslesbarer zentraler Wärmemengenzähler vor, stattdessen wurden Wärmeverbräuche der einzelnen Heizkreise aggregiert. Der witterungsbereinigte Wärmeverbrauch in Bonn ist ebenfalls zurückgegangen, der Rückgang beträgt für die Heizperiode 2022/2023 etwa 15 % im Vergleich zum Zeitraum 2021/2022 (siehe Abbildung 16). In Summe sind dies etwa 176.000 kWh für die Heizperiode 2022/2023. Die Fernwärme in Bonn ist durch den Einsatz von KWK und Hausmüll rechnerisch klimaneutral. Mit Wärmekosten von 9,5 Cent/kWh entspricht dies etwa 16.700 € Kosteneinsparung pro Jahr (Quellen: Gradtagszahlen vom Deutschen Wetterdienst, Emissionsfaktor der Fernwärme nach Bewertung nach FW 309, Wärmepreis als Mittelwert mit Deckelung durch die Energiepreisbremse).

Abbildung 16
Wärmeverbrauch in Bonn im zeitlichen Verlauf



Quelle: EBZ Business School GmbH

Testphase 1: Pretest – Technische Machbarkeit (Dezember 2020)

Ziel der ersten Testphase (10.12.2020 bis 17.12.2020) war es, technische Mängel aufzudecken. Alle technischen Mängel konnten behoben werden, um somit in den Testlauf für die Heizperiode 2021/2022 zu starten. Der erste Testlauf hatte 11 Teilnehmerinnen und Teilnehmer. Während des Testlaufs erhielten die Teilnehmerinnen und Teilnehmer zweimal täglich eine E-Mail, in der sie gefragt wurden „Wie empfindest du zurzeit die Temperatur in deinem Büro?“ Da zu dieser Zeit viele Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter im Homeoffice waren, konnten auch die eigenen Abwesenheitszeiten eingetragen werden. Mit Abfrage des „Comfort“ bildet sich pro Abstimmung ein ComfortStripe, aus dem sich eine visuelle Darstellung des Wärme- und Kältebefindens für den Abfragezeitraum ergibt, die sich schnell erfassen lässt.

Testphase 2: Heizperiode 2021/2022

Tabelle 4 fasst die Testphase in Bonn und Berlin zusammen und zeigt, dass im Zeitraum von Dezember 2021 bis April 2022 neun Testpersonen im BMUV Berlin und 14 Testpersonen im BMUV Bonn an der Testphase zum ComfortLab teilgenommen haben.

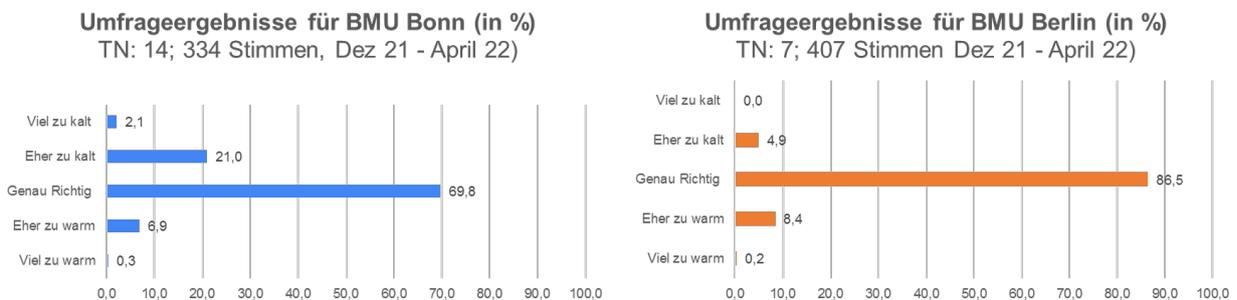
Tabelle 4
Übersicht relevanter Daten zur Testphase in der Heizperiode 2021/2022

	BMUV Bonn	BMUV Berlin
Zeitraum des Tests	Dez. 2021 bis April 2022	Dez. 2021 bis April 2022
Teilnehmer und Teilnehmerinnen	14	9
Umfragen beantwortet	334 Umfragen (Stimmen)	407 Umfragen (Stimmen)
Umfrageergebnis (in %)	Eher zu „kalt“ und „viel zu kalt“ (23,1 %), 70 % „genau richtig“	Eher zu „kalt“ und „viel zu kalt“ (4,9 %), 87 % „genau richtig“

Quelle: Wuppertal Institut

Dabei wurden in Berlin 407 Umfragen (Stimmen) und in Bonn 334 Umfragen (Stimmen) beantwortet. Die Umfrageergebnisse der Testphase in Berlin zeigen, dass die Büronutzerinnen und Büronutzer bei 4,9 % ihrer Antworten angegeben haben, dass ihnen „eher zu kalt“ und „viel zu kalt“ ist, während diese Antworten in Bonn bei 23,1 % der Umfragen gegeben wurden. Demgegenüber stehen im BMUV in Berlin knapp 86,5 % der Stimmen, nach denen die aktuelle Temperatur „genau richtig“ ist (Bonn: 70 %) und ca. 8,6 Prozent der Stimmen, die die Temperatur als „eher zu warm“ oder „viel zu warm“ empfinden (Bonn: 7 %), siehe Tabelle 4 und Abbildung 17.

Abbildung 17
Umfrageergebnisse zur Wohlfühltemperatur im Büro (Berlin und Bonn)



Quelle: Wuppertal Institut

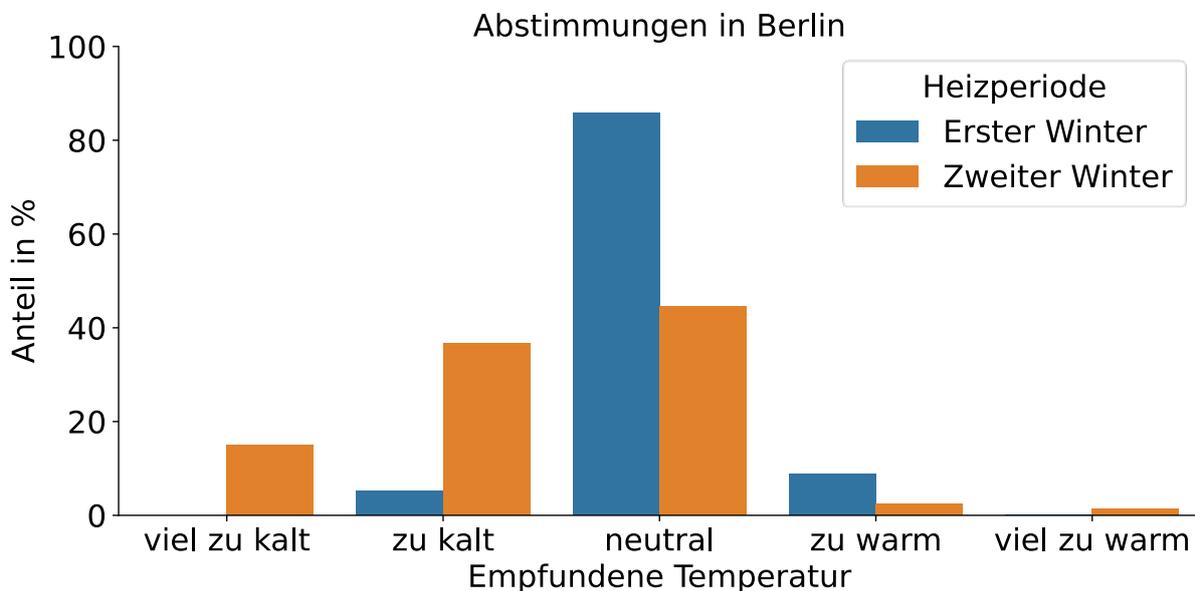
Testphase 3: Heizperiode 2022/2023

Die Energiekrise in Deutschland veranlasste öffentliche Gebäude zu einer neuen Heizstrategie: Die maximale Büroraumtemperatur sollte auf 19 °C begrenzt bzw. die Thermostate auf maximal 2,5 eingestellt werden. Dies birgt komfort- und technische Herausforderungen, kann aber bis zu 20 % Energie einsparen und die zu erwartenden hohen Betriebskosten reduzieren. Basierend auf den gesammelten Erkenntnissen aus den vorherigen Heizperioden wurde die ComfortLab-Plattform weiterentwickelt und für eine dritte Phase (22. November 2022 bis 31. März 2023) in Bonn und Berlin getestet.

Insgesamt haben 187 Teilnehmerinnen und Teilnehmer (102 in Bonn, 79 in Berlin) die Plattform getestet, dabei wurden in Summe 5.751 Abstimmungen (2.401 in Berlin, 3.350 in Bonn) abgegeben. Von der Gesamtzahl der Teilnehmerinnen und Teilnehmer haben 39 mindestens 50 Abstimmungen und 91 mindestens 20 Abstimmungen während der Laufzeit abgegeben. Für die Gesamtauswertung der Daten wurden nur Teilnehmerinnen und Teilnehmer mit mindestens 20 Abstimmungen berücksichtigt. Die folgenden beiden Abbildungen zeigen die Veränderung der Abstimmungen in den beiden Testwintern.

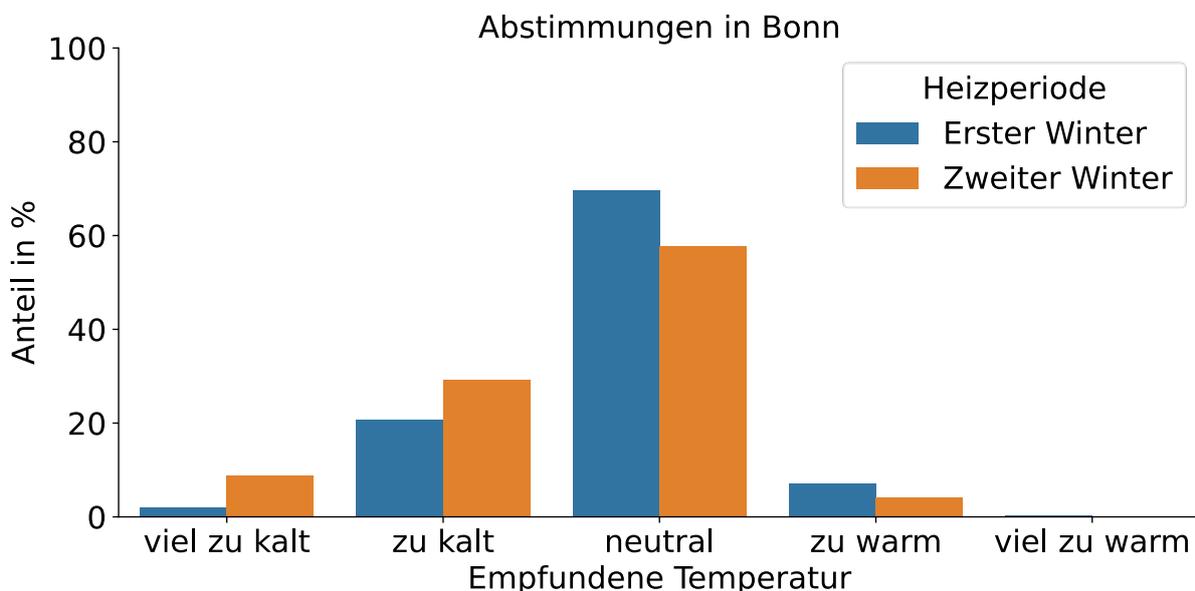
Im Winter 2021/22 war das Votum in Berlin und Bonn überwiegend neutral bei relativ hohen Raumtemperaturen (22 °C aus den Abstimmungen, 22 bis 23 °C aus den Raumtemperatursensoren im Neubaubereich in Berlin), dies hat sich tendenziell nach links zum kalten Bereich verschoben, siehe Abbildung 18 und Abbildung 19.

Abbildung 18
Aggregierte Abstimmungsergebnisse in Berlin



Quelle: EBZ Business School GmbH

Abbildung 19
Aggregierte Abstimmungsergebnisse in Bonn



Quelle: EBZ Business School GmbH

Abschlussumfrage Ergebnisse (Mai 2023)

Im Anschluss an die Testphase von November 2022 bis März 2023 in Bonn und Berlin wurden die Teilnehmerinnen und Teilnehmer per Mail zu einer zehnminütigen Online-Umfrage eingeladen, um dem Projektteam ihre Erfahrungen und Herausforderungen mit den ComfortStripes mitzuteilen. Die Umfrage war vom 5. bis 17. Mai 2023 aktiv und es haben 110 Personen (davon 61 % Bonn; 39 % Berlin) daran teilgenommen. Die Ergebnisse der Umfrage wurden einem Vertreter des BBSR im Rahmen einer Online-Präsentation am 17. Juni 2023 vorgestellt und Feedback dazu eingeholt.

Um die Ergebnisse der täglichen Interaktion mit den ComfortStripes in der Heizperiode 2022/2023 besser einordnen zu können, wurde einen Monat nach Beendigung der Datenerhebung an alle der 184 registrierten ComfortLab-Teilnehmerinnen und Teilnehmer eine Mail mit dem Link zu einer anonymisierten Abschluss-Umfrage gesendet. Die ca. fünfminütige Umfrage war vom 5. bis 17. Mai aktiv und umfasste 23 Fragen zur persönlichen Einstellung im Kontext der Notwendigkeit der 19 °C-Vorgabe und Vorbildfunktion öffentlicher Gebäude, zur wahrgenommenen Raumtemperatur in dieser Heizperiode und diesbezüglichen Herausforderungen sowie Verhaltensänderungen und -anpassungen. Zudem wurden der Standort des Büros und soziodemographische Daten wie das Alter und Geschlecht erhoben. Zuletzt konnten die Teilnehmerinnen und Teilnehmer ihre Erfahrung mit der ComfortLab-Lösung bewerten und Verbesserungsvorschläge äußern.

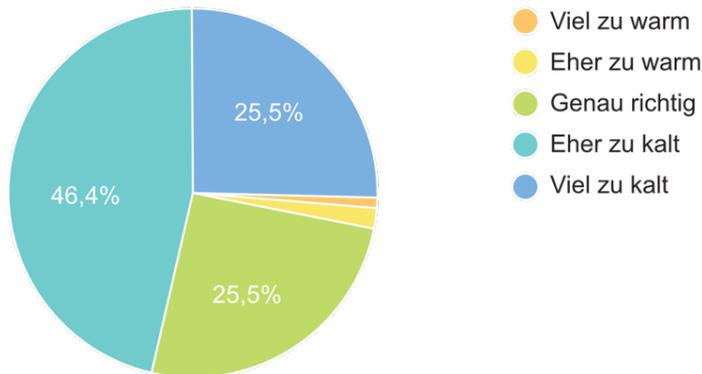
Die Auswertung hat gezeigt, dass 110 Büronutzerinnen und Büronutzer an der Umfrage teilgenommen haben, davon knapp 61 % aus dem Bonner Büro und 39 % aus dem Standort Berlin. Diese als recht hoch einzuschätzende Beteiligung kann bereits die erste Schlussfolgerung zulassen, dass das Thema der Energieeinsparung und des gleichzeitigen Wohlbefindens für viele der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter von hoher Bedeutung ist. Denn die Ergebnisse zum wahrgenommenen Raumklima, auch mit Blick auf die 19 °C-Vorgabe, zeigen, dass insgesamt 71,9 % der Befragten die Raumtemperatur in ihrem Büro im vergangenen Winter die meiste Zeit über als (viel) zu kalt empfunden haben, während lediglich ein Viertel (25,5 %) die Temperatur als genau richtig empfand (siehe Abbildung 20; n=110). Die realen Abstimmungen (siehe vorheriges Kapitel) zeigen ein positiveres Bild (Berlin: 45 % bzw. Bonn: 55 % im Bereich „neutral“), so dass die nachträgliche Betrachtung ggfs. etwas negativer empfunden wird. Zudem haben nicht alle der 187 Testpersonen an der nachgelagerten Umfrage (n= 110) teilgenommen, womit es zu Verzerrungen bzw. Diskrepanzen zwischen den realen Abstimmungen und der Nacherhebung kommen kann, da gegeben falls eher Testpersonen an der nachgelagerten Umfrage teilgenommen haben, die unzufrieden mit der Raumtemperatur oder Testphase waren.

Fast 40 % (39,7 %) der befragten Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter gaben an, dass sich ihre Arbeitsleistung bzw. Produktivität eingeschränkt hatte, wenn ihnen zu kalt war und 55,1 % haben angegeben, dass sich die wahrgenommene Kälte negativ auf ihre Stimmung ausgewirkt hat. Etwas mehr als ein Drittel (39,7 %) gab an, deswegen häufiger im Homeoffice gearbeitet zu haben.

Abbildung 20
Umfrageergebnisse individuelles Temperaturempfinden (Heizperiode 2022/23)

Rückblickend auf den letzten Winter, wie haben Sie das Raumklima/die Raumtemperatur in Ihrem Büro die meiste Zeit über empfunden?

110 Antworten



Quelle: Wuppertal Institut

Auch trotz diverser Maßnahmen wie wärmerer Kleidung, Tee oder Bewegung hat die Mehrheit der Befragten (59,2 %; n=76) weiterhin im Büro gefroren, während bei 44,9 % wärmere Kleidung dazu geführt hat, dass sie nicht mehr gefroren haben, wenngleich hier nicht spezifiziert werden konnte, ob diese Kleidung auch (wetterfeste) Jacken und Mäntel beinhaltete.

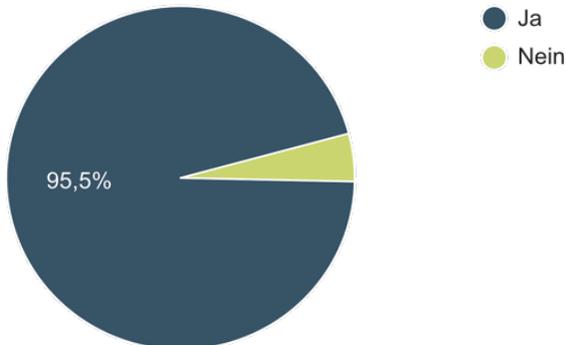
Als weitere Vorkehrungen bei zu kalten Bürotemperaturen haben sich 16,7 % der Befragten bei Vorgesetzten oder dem Facility Management gemeldet, 26,9 % haben die Heizung weiter als üblich aufgedreht und 20,5 % der Befragten haben sich bewegt, damit ihnen wieder warm wurde.

Die Auswertung der individuellen Antwortmöglichkeiten zu dieser Frage hat gezeigt, dass einzelne Personen zudem angaben, sich „in einem schlecht gedämmten Gebäude mit massiven Renovierungsrückständen etwas veralbert gefühlt“ zu haben, dass sie kein Thermometer erhalten hätten, die Temperatur von 19 °C wurde nicht eingehalten wurde und dass sich gesundheitliche Probleme verschlimmert hätten. Eine Person schrieb zu ihrer Situation: „Ich saß mit einer Decke und zwei Wärmflaschen und Handschuhen im Büro, die ich bei jedem Aufstehen zur Seite legen musste. Die Wärmflaschen sind auch nur begrenzte Zeit warm. Ich war ungerne im Büro, hatte aber nicht die Möglichkeit, nur von zuhause aus zu arbeiten.“

Abbildung 21
Umfrageergebnisse Vorbildfunktion öffentlicher Gebäude

Finden Sie, dass öffentliche Gebäude eine Vorbildfunktion für Energieeffizienz einnehmen sollten?

110 Antworten



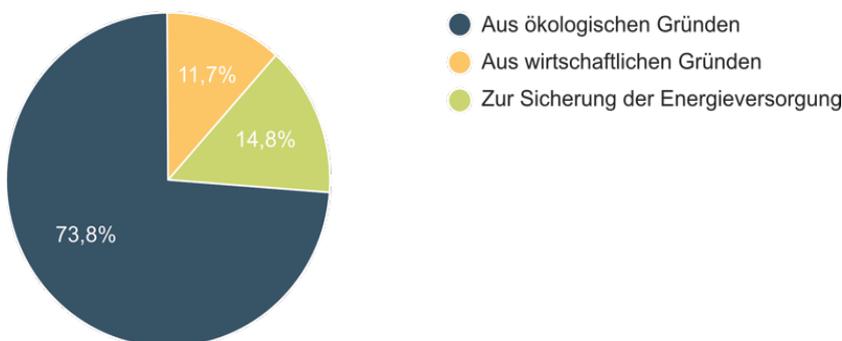
Quelle: Wuppertal Institut

Abgesehen von der eigenen Bürosituation gab die absolute Mehrheit an, dass öffentliche Gebäude ihrer Meinung nach eine Vorbildfunktion für Energieeffizienz einnehmen sollten (95,5 % mit „Ja“; n=110; siehe Abbildung 21). Als Hauptgründe wurden zu 73,8 % ökologische Gründe, zu 11,7 % wirtschaftliche und zu 14,6 % Gründe der Versorgungssicherheit angeführt (n=103, siehe Abbildung 22). Allgemein finden immerhin mit 56,9 % etwas mehr als die Hälfte der Befragten die 19 °C-Vorgabe eine sinnvolle Maßnahme zur Sicherung der Energieversorgung (n=109). Zudem hat die Mehrheit der Befragten (53,3 %) angegeben, dass für sie, mit Blick auf den nächsten Winter, ähnliche Raumtemperaturen um 19 °C (eher) akzeptabel wären, wenn dadurch der Energieverbrauch erheblich gesenkt werden kann. Allerdings ist hier auch festzuhalten, dass 32,7 % der Befragten angegeben haben, dass sie dieser Aussage (eher) nicht zustimmen würden.

Abbildung 22
Auswertung der Antworten zur Vorbildfunktion öffentlicher Gebäude

Aus welchen Gründen sollten öffentliche Gebäude Ihrer Meinung nach eine Vorbildfunktion einnehmen?

103 Antworten



Quelle: Wuppertal Institut

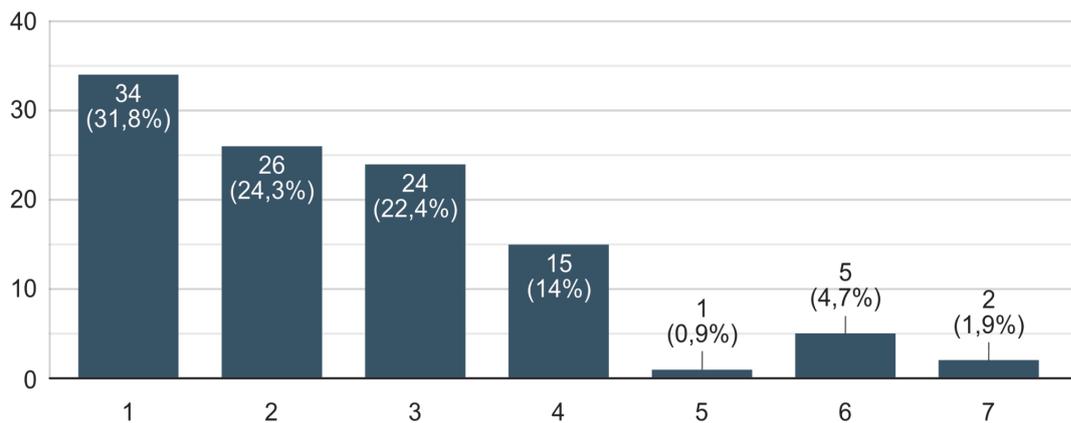
Die Auswertung zum Umgang und Nutzen der ComfortStripes hat zuallererst gezeigt, dass es mit knapp 80 % der absoluten Mehrheit der Befragten eher bis sehr wichtig ist (sehr wichtig/1: 31,8 %; n=34; wichtig/2: 24,3 %; n=26 und eher wichtig/3: 22,4 %; n=24), dass ihr Feedback zum Raumklima (Wohlbefinden) von der Haustechnik wahrgenommen wird (siehe Abbildung 23). Dies unterstreicht nochmal die Bedeutung einer Plattform wie der ComfortLab-Plattform zur Erfassung des Wohlbefindens. Fast 60 % der Befragten haben

angegeben, dass sie regelmäßig und rund 32 % hin und wieder an der E-Mail-Umfrage des ComfortLab Projekts teilgenommen haben (n=107), was die erhöhte Bereitschaft der Büronutzerinnen und Büronutzer verdeutlicht, sich mit der Plattform über einen längeren Zeitraum hinweg auseinanderzusetzen. Auch die Rückmeldungen dazu, wie gut den Nutzern und Nutzerinnen die tägliche Umfrage gefallen hat, ist durchaus positiv einzuschätzen (sehr gut = 24,3 %; gut = 34,6 %).

Abbildung 23
Umfrageergebnisse Feedback Haustechnik (1= sehr wichtig, 7= überhaupt nicht wichtig)

Wie wichtig ist es Ihnen, dass Ihr Feedback zum Raumklima (Wohlbefinden) von der Haustechnik wahrgenommen wird?

107 Antworten



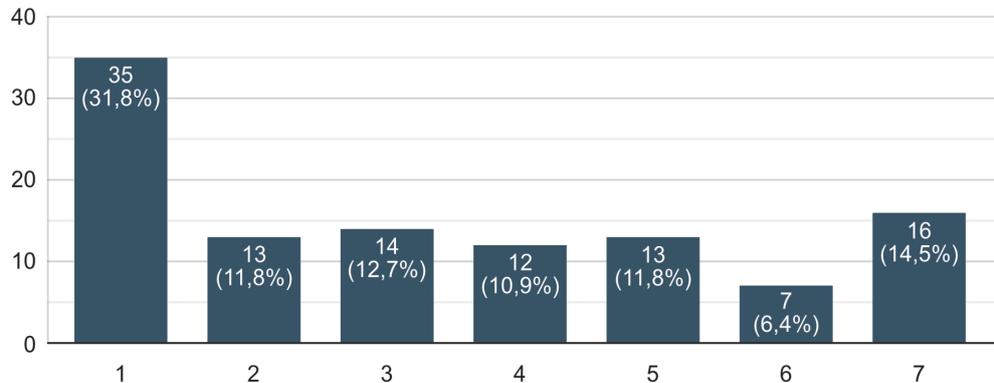
Quelle: Wuppertal Institut

Auch die zweimal täglichen E-Mail-Abfragen wurden von dem Großteil der Befragten als wenig bis gar nicht störend empfunden (gar nicht störend = 32,4 %; nicht störend = 24,1 %; weniger störend = 8,3 %), wobei jedoch auch 9,3 % die E-Mails als eher störend empfanden und 21,3 % unsicher in ihrer Entscheidung waren. Als erfreulich anzusehen ist jedoch, dass sich über 72 % der Befragten (sehr gut = 17,9 %; gut = 35,8 %; eher gut = 18,9 %; n=106) vorstellen können, die ComfortLab-Plattform auch in Zukunft regelmäßig zu nutzen. Als am häufigsten ausgewählte Maßnahmen, die die Motivation erhöht hätten, weiter an der Umfrage teilzunehmen, wurden mit absteigender Nennung die zeitnahe Anpassung der Temperatur, wenn oft die Angabe "zu kalt" angegeben wurde, genannt (29,8 % der Befragten), ein Dashboard, das zum Beispiel aktuelle Energie-/CO₂-Einsparungen anzeigt (24 %), mehr Informationen darüber, was mit den Daten passiert (11,5 %) und regelmäßige Updates zu den Ergebnissen, zum Beispiel über einen Newsletter. Lediglich 16,3 % der Befragten gaben hier an, nichts davon zu benötigen, um motiviert zu bleiben.

Abbildung 24
Umfrageergebnisse 19 Grad im nächsten Winter (1= stimme zu, 7= stimme nicht zu)

Mit Blick auf den nächsten Winter, wären für Sie ähnliche Raumtemperaturen um 19°C akzeptabel, wenn dadurch der Energieverbrauch erheblich gesenkt werden kann?

110 Antworten



Quelle: Wuppertal Institut

Zudem hatten die Teilnehmerinnen und Teilnehmer die Möglichkeit, am Ende der Abschlussumfrage anzugeben, ob und warum ihre Motivation oder ihr Interesse, am ComfortLab teilzunehmen, mit der Zeit abgefallen ist. Hier haben 31 Personen die Möglichkeit genutzt, eine Antwort zu verfassen und die Auswertung der Angaben zeigt, dass die Hauptgründe vor allem darin lagen, dass die Person entweder recht selten vor Ort im Büro war (n=5), im Arbeitsalltag (teils) die Zeit fehlte, die Umfrage wahrzunehmen (n=4), die Abfrage als zu häufig wahrgenommen wurde (n= 5) oder der Sinn dahinter (irgendwann) nicht mehr gesehen wurde (n= 6). Drei Personen haben (zusätzlich) angegeben, dass ihre Motivation abgefallen ist, weil es trotz der mehrfachen Angabe, dass die Temperatur als zu kalt empfunden wurde, zu keinen Änderungen kam und zwei der Befragten hätten sich Informationen darüber gewünscht, ob die Daten Änderungen herbeiführen beziehungsweise welchen Nutzen die Datenerhebung hat.

Weiterhin haben 14 Befragte die Möglichkeit genutzt, Verbesserungsvorschläge für die ComfortLab-Plattform bzw. Feedback zu äußern. Eine Person würde sich ein Dashboard wünschen, das zum Beispiel aktuelle Energie-/CO₂-Einsparungen anzeigt, eine der befragten Personen gab an, dass sie gerne klare Ansagen hätte, welche Einsparungen erzeugt werden, und eine Person wünschte sich mehr aktives Feedback zu den gesammelten Ergebnissen/Einsparungen. Auch das Thema des Datenschutzes bzw. der Wunsch nach klaren Angaben, was mit den Daten passiert, wurden angesprochen. Zudem hat sich eine der befragten Personen gewünscht, dass die Nutzerinnen und Nutzer stärker in den Prozess eingebunden werden bzw. eine Kommunikation zwischen den Abteilungsleitungen und den Forscherinnen und Forschern geschaffen wird. Eine Person hat als Verbesserungsvorschlag die Kopplung der Daten mit dem Heizverhalten/ Temperaturerfassung im Homeoffice angegeben, da die Bekämpfung der Klimakrise eine ganzheitliche Aufgabe sei. Die gesammelten Ergebnisse zu den Bedürfnissen und Anforderungen der Büronutzerinnen und Büronutzer an die ComfortLab-Plattform wurden zudem mit der Entwicklung dreier Personas (die Kompromissbereite; die Kälteempfindliche; die Vermeiderin) weiter aufbereitet. Die Steckbriefe zu den drei Personas sind dem Anhang zu entnehmen und könnten bei der Weiterentwicklung der Plattform dabei helfen, die Büronutzerinnen und Büronutzer nicht als eine homogene Personengruppe zu betrachten, sondern Vorschläge zur zukünftigen Implementierung auf Basis verschiedener Arbeitssituationen, Bedürfnisse und Probleme zu entwickeln.

Zusammenfassung zum Einsatz der ComfortLab-Plattform

Durch die Testphasen 2020/2021, 2021/2022, 2022/2023 konnte gezeigt werden, dass eine Plattform wie ComfortLab die notwendige Kommunikationslücke zwischen den Büronutzerinnen und Büronutzern und dem Facility Management schließen kann. Bisher war es gängige Praxis, bei individuellen Beschwerden zu den Raumtemperaturen komplette Heizstränge oder das Gesamtgebäude mit höheren Vorlauftemperaturen zu versorgen – weil eine entsprechende Auswertung des kollektiven Empfindens organisatorisch nicht möglich war. Durch die Plattform findet die Zusammenführung der tagesaktuellen Analysen zum durchschnittlichen und individuellen Wohlbefinden aller teilnehmenden Büronutzerinnen und Büronutzer (ComfortStripes) und den technischen Parametern und Messdaten des Heizsystems (Vorlauftemperaturen entlang der Heizstränge, Außentemperaturen, Raumklimadaten) statt. Damit ist das Facility Management in der Lage, sich ein umfassenderes Bild über das Wohlbefinden zu machen und ein Absenken der Vorlauftemperaturen im Abgleich einrichten zu können. Ziel ist es, eine entsprechende Balance zwischen möglichst niedriger Vorlauftemperatur und allgemeinem Wohlbefinden herzustellen.

Die Herangehensweise und der Projektansatz zur ComfortLab-Plattform wurden als angemessen empfunden, insbesondere vor dem Hintergrund, sich zunächst vor Ort im Gebäude einen Überblick über die individuellen Gegebenheiten zu verschaffen und die technische Infrastruktur danach entsprechend bereitzustellen. Für eine reibungslose, zukünftige Implementierung der Plattform braucht es eine ausreichend große Anzahl an Teilnehmerinnen und Teilnehmern, um valide Aussagen zum Wohlbefinden im Gebäude treffen zu können.

Ergebnisse zum Assistenzsystem Piaf

Im Folgenden werden die zentralen Ergebnisse zum Einsatz des technischen Assistenzsystems in den jeweiligen Heizperioden näher beschrieben.

Überblick Piaf: Ziel und Funktion

Das technische Assistenzsystem PIAF weist die Nutzerinnen und Nutzer durch visuelle und auditive Signale auf kritische Zustände des Raumklimas hin und kann damit kurz- und langfristige Verhaltensänderungen initiieren. Darüber hinaus nimmt PIAF ein Monitoring des Raumklimas vor (Temperatur, Luftfeuchte, CO₂-Gehalt). Diese Messdaten bilden die Grundlage, um den Nutzerinnen und Nutzern über eine individuelle Web-Plattform Auswertungen zum Raumklima in Echtzeit anzuzeigen. PIAF wurde gemeinsam mit der Twistid GmbH & Co. KG (vgl. Zimmer 2024) iterativ entwickelt und getestet (siehe Abbildung 25).

Abbildung 25
Übersicht zu den drei verschiedenen Prototypen



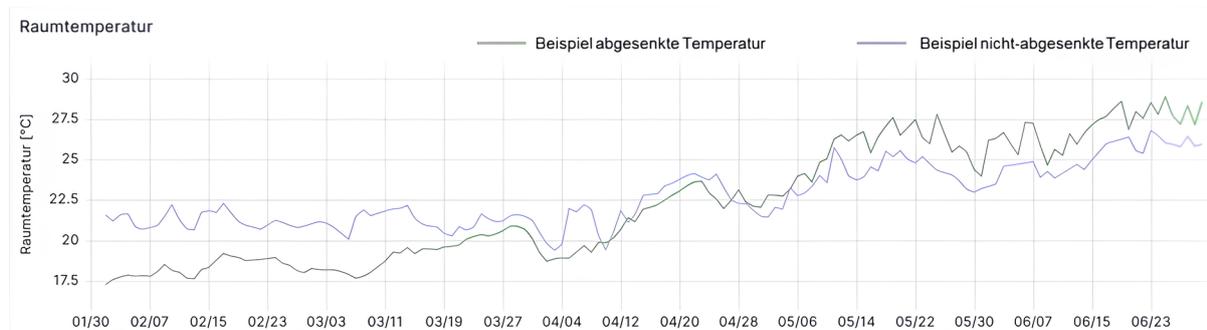
Quelle: Dr. Christina Zimmer

Testphase 1 - Heizperiode 2020/2021

Im Rahmen der ersten Testphase wurde das Technische Assistenzsystem PIAF bei den vorgesehenen 15 Büros installiert, wobei davon nur 14 Büros besetzt waren und entsprechend Daten von 14 Teilnehmerinnen und Teilnehmern seit Juni 2020 erhoben wurden. Zur Kontrolle des Empfangs wurde ein Monitoring aufgesetzt, in dem der Empfang, der Status und die aktuelle IP-Adresse seitens der EBZ eingesehen werden konnten und so bei Störungen zeitnah reagiert werden konnte. Seit Juli 2021 konnten aufgrund technischer Schwierigkeiten durch Abschaltung des WLAN-Netzwerks seitens des BMUV die Daten in Berlin nicht mehr dauerhaft übermittelt werden. Die vorhandenen Daten wurden ausgewertet und analysiert. Die Büros waren, wie bereits in den vorherigen Kapiteln erwähnt, aufgrund der anhaltenden COVID19-Pandemie überwiegend unbesetzt.

Neben den Erkenntnissen aus den Behaglichkeitsmessungen konnten auch die Daten aus den per Bluetooth mit dem PIAF verbundenen Temperatursensoren ausgewertet werden. Diese bekräftigen die bisherigen Erkenntnisse zu Raumtemperaturen und dem Anlagenbetrieb. Abgesenkte Raumtemperaturen (in der Grafik in Abbildung 26 beispielhaft der grüne Verlauf) im Winter bilden eher die Ausnahme und die Regel sind Raumtemperaturen über 20 °C (in der Grafik beispielhaft als grauer Verlauf zu sehen).

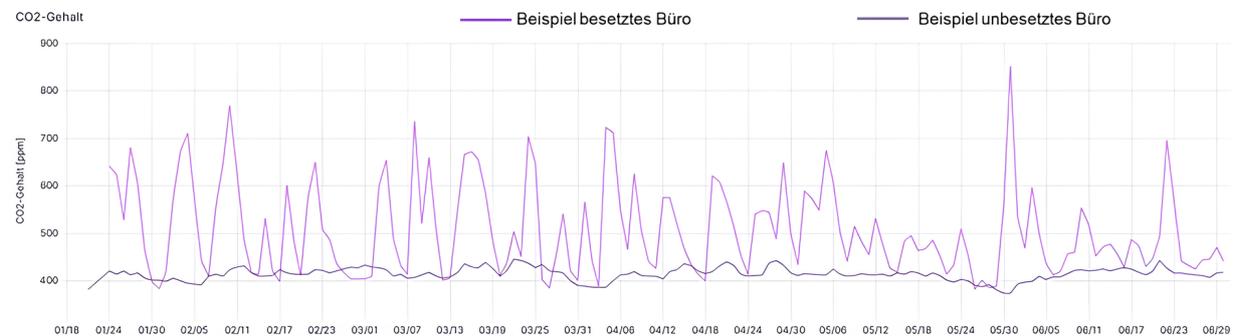
Abbildung 26
Raumtemperaturmessung zwischen Januar und Juni 2022



Quelle: EBZ Business School GmbH

Die Auswertung der CO₂-Gehalte hat gezeigt, dass viele Büros unbesetzt waren und Anwesenheit die Ausnahme war, exemplarisch in Abbildung 27 dargestellt. Die Kurve, die nahezu konstant dem CO₂-Gehalt der Außenluft entspricht, wurde in ähnlicher Ausprägung in den meisten Büros aufgenommen.

Abbildung 27
CO₂-Messung zwischen Januar und Juni 2022



Quelle: EBZ Business School GmbH

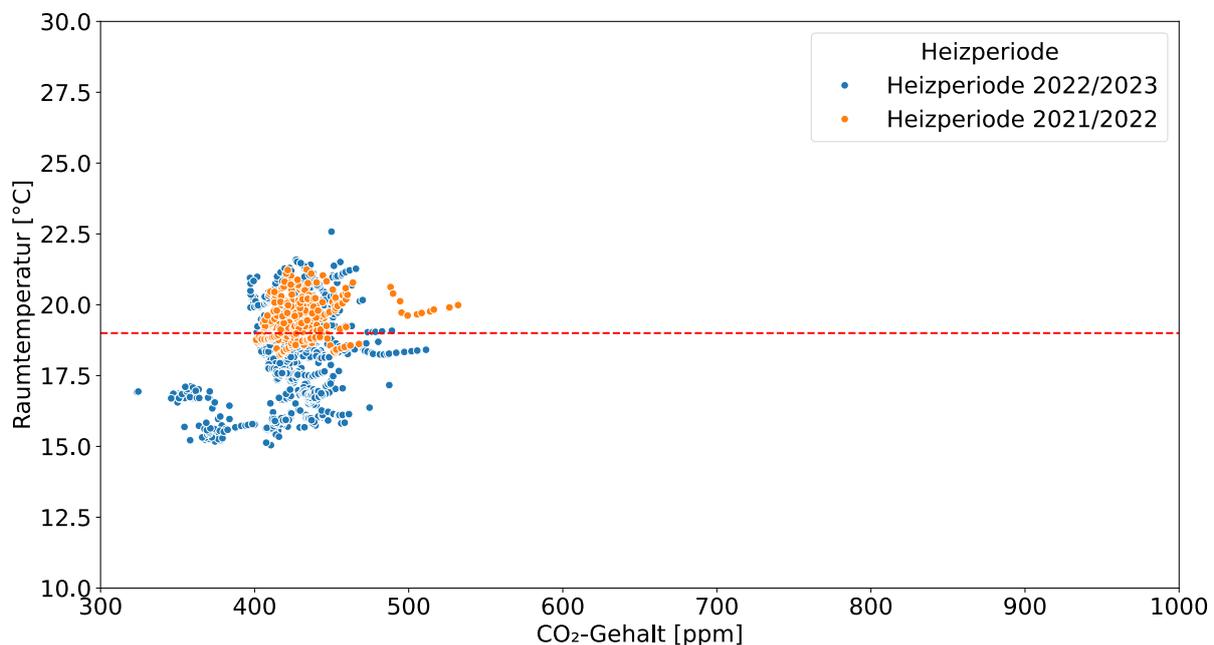
Piaf Testphase 2 - Heizperiode 2021/2022 und Heizperiode 2022/2023

In den Heizperioden 2021/2022 (Dezember 2021 bis April 2022) sowie 2022/2023 wurden in der BMUV-Liegenschaft in Bonn 14 Piafs getestet.

Bei den teilnehmenden Büros hat sich ein diversifiziertes Bild hinsichtlich der CO₂-Gehalte und Raumtemperaturen ergeben. Die Mehrheit der Büros war während des Untersuchungszeitraums weiterhin nicht oder nicht kontinuierlich besetzt. Dies zeigt sich an den CO₂-Konzentrationen, die auch während der Arbeitszeiten (definiert als Zeiten von Montag bis Freitag von 8-16 Uhr) weiterhin überwiegend in einem Bereich unter 600 ppm liegen. Zu erkennen ist dies in der Grafik in Abbildung 28, bei der der CO₂-Gehalt als Indikator für die Güte der Raumluftqualität (etwa 400 ppm: Außenluftqualität, ab 1.000 ppm Empfehlung zur Lüftung) auf der x-Achse im Verhältnis zu der aktuellen Raumlufttemperatur in °C auf der y-Achse aufgetragen ist.

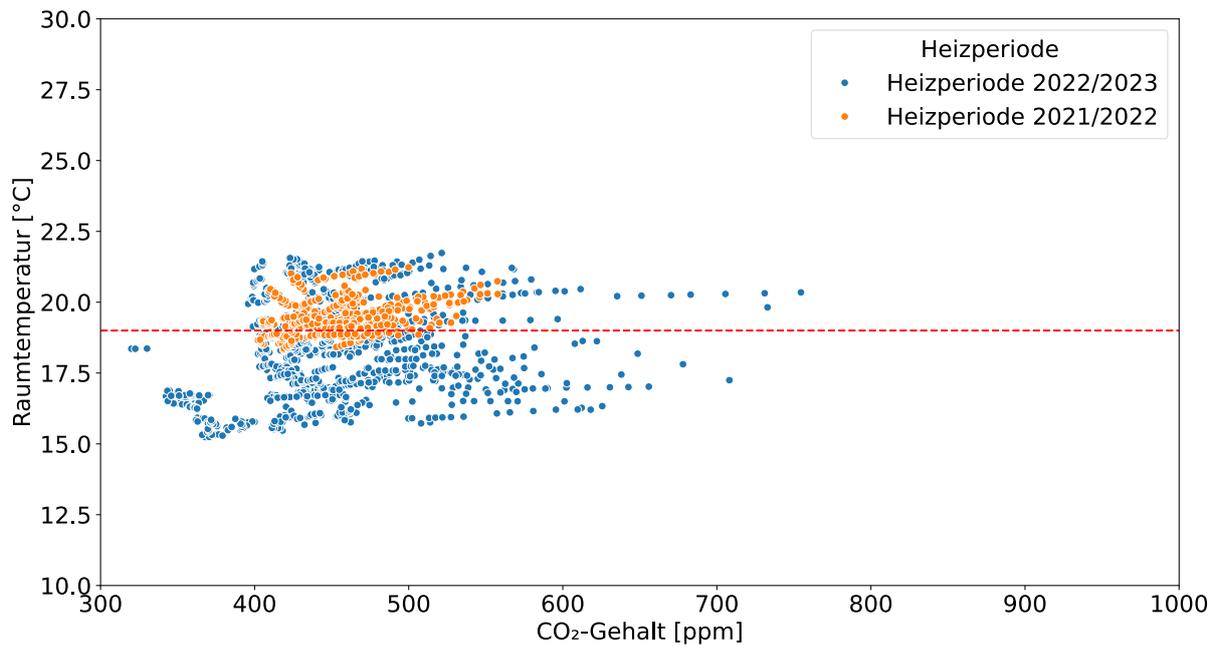
Die waagerechte rote Linie repräsentiert dabei die seit dem 1. September 2022 geltende EnSikuMaV (vgl. Bundesregierung 2022), in der die Raumtemperaturen in öffentlichen Gebäuden auf 19 °C begrenzt wurden. Unterteilt sind die Diagramme in die Heizperiode 2021/2022 mit (blau) und 2022/2023 ohne (orange) geltende EnSikuMaV. Betrachtet sind nur Messwerte bei Außentemperaturen unter 12 °C, um Witterungseffekte zu eliminieren. Insgesamt zeigt sich eine Reduzierung der Raumtemperaturen sowohl während der Arbeitszeiten, in den Nachtstunden und auch am Wochenende. In allen Zeiträumen bildet sich eine vorher nicht vorhandene Punktwolke an Messwerten heraus, die Raumtemperaturen zwischen 15 und 19 °C repräsentieren. Dennoch sind auch weiterhin Punkte über der 19 °C-Grenze in allen Zeiträumen vorhanden, so dass das volle Potenzial mit Blick auf die Auswahl an vermessenen Büros noch nicht ausgeschöpft wurde.

Abbildung 28
Vergleich der Raumlufttemperatur mit der Raumluftqualität (CO₂-Gehalt) an Wochenenden



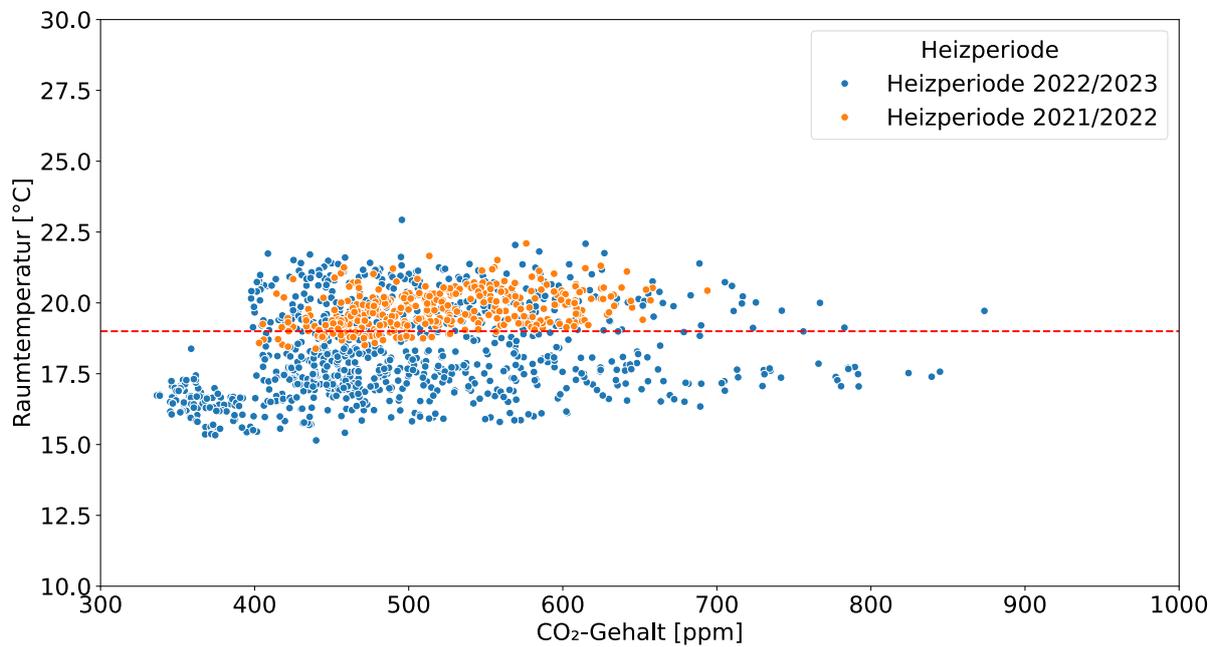
Quelle: EBZ Business School GmbH

Abbildung 29
 Vergleich der Raumlufttemperatur mit der Raumluftqualität (CO₂-Gehalt) in der Nacht



Quelle: EBZ Business School GmbH

Abbildung 30
 Vergleich der Raumlufttemperatur mit der Raumluftqualität (CO₂-Gehalt) während der Arbeitszeiten



Quelle: EBZ Business School GmbH

Ergebnisse zur Nutzerinnen- und Nutzerperspektive

Das Feedback der Büronutzerinnen und Büronutzer verlief während und nach der Testphase 2021/22 sehr positiv und kann in einigen Fällen sogar als emotional („*Piaf ist wie ein Haustier*“) beschrieben werden. Als physisches Objekt ermöglicht Piaf zudem einen guten Einstieg als Gesprächsthema beim Bürob Besuch, zum Beispiel als Debatte um die Energieeffizienz im Gebäudebereich. Als mögliche Probleme wurde bei einigen Testpersonen der „stumme Piaf“ genannt, da kritische CO₂-Werte in einigen Fällen nicht erreicht wurden. Hier wurden als Lösungsvorschläge eine Anpassung der entsprechenden CO₂-Intervalle sowie die Durchführung einer Infoveranstaltung mit Hinweisen zum „stummen Piaf“ und/oder die Erweiterung des bestehenden Q&A genannt. Auch die Möglichkeit, die Klimavogel Homepage mit der ComfortLab Homepage zu verbinden, wurde beim Feedback Workshop am 24. Mai 2022 diskutiert. Wie auch bei den ComfortStripes haben alle Teilnehmerinnen und Teilnehmer des Feedback Workshops hohes Interesse daran geäußert, in der kommenden Heizperiode erneut an dem Projekt teilzunehmen. Schwierigkeit bei der Piaf Installation war, wie auch bereits in der Vergangenheit in Berlin, die Verfügbarkeit und Stabilität des WLAN-Netzwerkes. Durch Abstimmung mit der IT konnte dennoch eine insgesamt zufriedenstellende Datenübertragungsqualität sichergestellt werden.

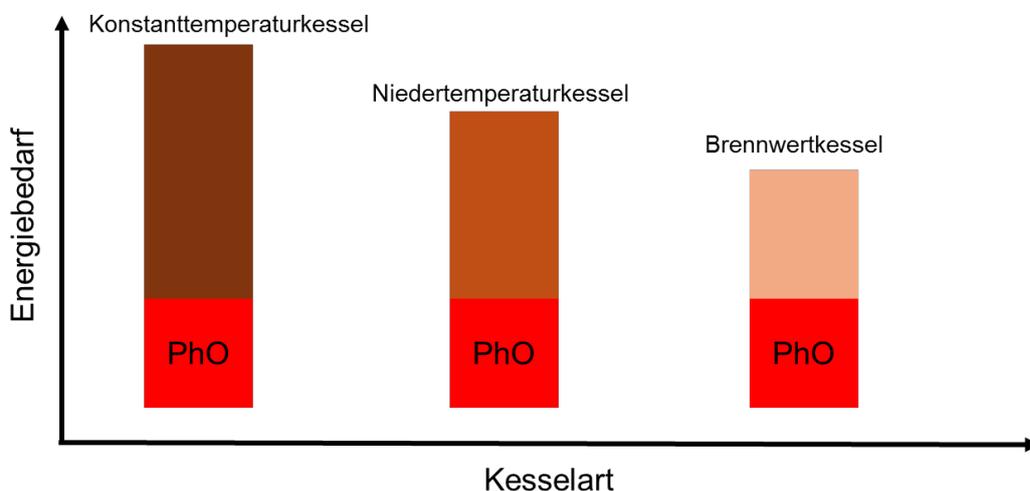
Bestimmung und Auswertung der physikalischen Optima

Im Folgenden werden einerseits die zentralen Ergebnisse zur Aufstellung von Kennzahlen nach dem Ansatz des physikalischen Optimums, beschrieben in der VDI-Richtlinie 4663, zusammengefasst. Andererseits erfolgen exemplarische Berechnungen der aufgestellten Kennzahlen für einzelne Prozesse bzw. Anlagen mit Berücksichtigung der im BMUV Berlin vorhandenen Gebäudetechnik und der Bedarfsberechnung.

Hintergrund des physikalischen Optimums und der VDI 4663

Durch die VDI-Richtlinie 4663 wird eine Methodik beschrieben, mit der sich Kennzahlen von Prozessen bilden lassen. Im Gegensatz zur klassischen Kennzahlenbildung bildet dabei nicht die Grenze der eingesetzten Technik die Referenzgröße, sondern das physikalische Optimum (PhO), welches den idealen Referenzprozess unter Beachtung der physikalischen Grenzen beschreibt. Der Vorteil, den realen Prozess mit dem physikalischen Optimum zu vergleichen, ist, dass dieses Optimum nicht unterschritten werden kann. Bezogen auf beispielsweise eine erdgasbetriebene Heizung stellt der Energieinhalt des eingesetzten Erdgases und nicht die mögliche Energieausbeute durch die verwendete Technik (Konstant-, Niedertemperatur- oder Brennwertkessel) die Referenzgröße dar. Das Prinzip ist qualitativ in der Abbildung 31 verdeutlicht. Der benötigte Energieeinsatz zur Bereitstellung einer gewissen Wärmeenergiemenge nimmt mit verbesserter Technik und Prozessführung (dunkelbrauner, brauner und hellbrauner Balken) tendenziell ab. Das physikalische Optimum (rot) bleibt dabei gleich und liegt stets unter dem realen Energiebedarf. Auch eine mögliche Weiterentwicklung und Verbesserung der verwendeten Technik kann nicht zu einer Unterschreitung des Energiebedarfs führen, der dem physikalisch notwendigen minimalen Energiebedarf entspricht.

Abbildung 31
Energiebedarf und mögliches physikalisches Optimum von Prozessen



Quelle: EBZ Business School GmbH

Die Kennzahlen können die Basis für die Optimierung des Energieeinsatzes in Organisationen bilden, so dass diese für den jeweiligen Prozess oder das jeweilige Gebäude die relevanten Energieströme abbilden können. Diese können sowohl aus der Bedarfs- als auch aus der Verbrauchsperspektive heraus betrachtet werden. Ersteres beschreibt den minimalen Aufwand, der für einen bestimmten Nutzen aufgebracht werden muss, zweiteres betrachtet den maximalen Nutzen, der aus dem zur Verfügung gestellten Aufwand gewonnen werden kann. Für Prozesse, die aus Sicht der Bereitstellung betrachtet werden, bietet sich Verbrauchsperspektive an, für Prozesse, für die die Nutzenergie betrachtet wird, die Bedarfsperspektive.

Bei der Entwicklung der Kennzahlen wurde dies berücksichtigt. Ebenfalls lässt sich in eine Unterteilung in leistungs- und energiebezogene Kennzahlen vornehmen. Leistungsbezogene Kennzahlen umfassen dabei die Verarbeitung von Momentanwerten (Beispiel: Betrachtung der thermischen Leistung (kW) oder des Volumenstroms (m^3/h) eines Heizkreises), energiebezogene Kennzahlen die Verarbeitung von Verbrauchswerten bestimmter Zeiträume (Beispiel: Betrachtung des thermischen Energieverbrauchs (kWh) eines Heizkreises in einem bestimmten Zeitraum). Verbrauchswerte dienen eher der Bewertung von Maßnahmen zum Betrieb und zur Optimierung der Betriebsführung allgemein, Leistungswerte im Betriebszustand dienen der Optimierung der aktuellen Betriebsführung und bestimmter Betriebszustände (beispielsweise An- und Abfahrvorgänge, Brennerstarts einer Heizungsanlage, Wirkungsgrad unter Voll- und Teillast).

Während der Arbeitszeit an dem Arbeitspaket des Gesamtprojekts befand sich die Richtlinie in der Entwurfsphase. Der Weißdruck der Richtlinie ist im Dezember 2021 erschienen, die Veröffentlichung eines zweiten Blatts mit konkreten Anwendungsbeispielen steht noch aus. Aufgrund des bisherigen Fokus auf Produktionsprozesse gibt es bisher noch relativ wenige Erfahrungen und konkrete Anwendungen mit Blick auf gebäudetechnische Anlagen. Verfügbar sind unter anderem allgemeine Ausführungen und Rechenbeispiele (vgl. Sankol/Keichel/Volta 2018) zur Bewertung von Energie- und Stoffeffizienz sowie teilweise prozessspezifische Beispielberechnungen zur Bewertung der Effizienz von Power-to-X-Verfahren (vgl. Birth/Eggers 2020).

Entwurf für die Kennzahlen

Um Möglichkeiten der Anwendung der Berechnungsmethodik auf gebäudetechnische Anlage zu evaluieren und eine Fachexpertise einzuholen, wurde im Rahmen des Projektes Kontakt zu Prof. Dr.-Ing. Dirk Volta, Professor am Fachbereich Energie und Biotechnologie der Hochschule Flensburg, aufgebaut. Prof. Volta hat das Prinzip der Kennzahlenbildung über das physikalische Optimum im Rahmen seiner Promotion angestoßen und den Richtlinienentwurf maßgeblich mitentwickelt. Aufbauend auf der Analyse hat die EBZ zehn Kennzahlen für die Bewertung der Anlagentechnik entwickelt, die im Folgenden näher beschrieben werden. Für die Gleichungen werden dabei die Abkürzungen gemäß Tabelle 5 verwendet.

Tabelle 5
Abkürzungen und Formelzeichen bei der Anwendung des physikalischen Optimums

Kürzel	Bedeutung
\dot{Q}	Wärmestrom [W]
T_o	Temperatur auf der warmen Seite des Carnot-Prozesses (Heizbetrieb Wärmepumpe: Verflüssigerseite) [K]
T_u	Temperatur auf der kalten Seite des Carnot-Prozesses (Heizbetrieb Wärmepumpe: Verdampferseite) [K]
c_p	Spezifische Wärmekapazität [kJ/(kg*K)]
\dot{m}	Massenstrom [kg/s]
η_{carnot}	Carnot-Wirkungsgrad [-]
ΔT	Temperaturdifferenz [K]
B	Bedarfsperspektive
EA	Energieausweis
F	Energiebezogene Kennzahl [-]
f	Leistungsbezogene Kennzahl [-]
FW	Fernwärme
KW	Kaltwasser
m	Masse [kg]
P	Elektrische Leistung [W]
PEF	Primärenergiefaktor [-]
PhO	Physikalisches Optimum
PV	Photovoltaik
Q	Wärmeenergie [kWh]
Sp	Speicher
V	Verbrauchsperspektive
WB	Wärmebedarf
WP	Wärmepumpe
WW	Warmwasser
ϵ	Leistungszahl [-]

Quelle: EBZ Business School GmbH

Warmwasserbereitung Küche:

Für die Küche im BMUV Berlin existiert ein separater Heizkreis, der den Warmwasserspeicher lädt. Auf Entnahmeseite ist ein Warmwasserzähler vorhanden, der die abgenommene Warmwassermenge erfasst. Zusätzlich sind die Ein- und Austrittstemperatur des Warmwassers zu vermessen, um die hier abgenommene Wärmeenergie zu berechnen und als Kennzahl zu implementieren. Als Kennzahl lässt sich der Vergleich bspw. zu einem elektrischen Durchlauferhitzer als idealem Wassererwärmer ziehen. Der reale Nutzungsgrad wird aufgrund von Wärmeübertragungs-, Zirkulations- und Strahlungsverlusten entsprechend darunter liegen. Die Kennzahlen zur Warmwasserbereitung lassen sich entsprechend aus der Verbraucher- oder Erzeugerperspektive und dabei leistungs- oder energiebezogen aufstellen.

Aus Verbraucherperspektive ist interessant, wie viel Warmwasserenergie/-leistung aus der zur Verfügung gestellten Wärmeenergie/-leistung am Speicher abgenommen wird. Die energiebezogene Kennzahl ergibt sich aus der Integration der Leistung als Produkt des Massenstroms, der spezifischen Wärmekapazität sowie der Differenz der Ein- und Austrittstemperaturen, die leistungsbezogene Kennzahl als Momentanbetrachtung der beiden Leistungswerte.

Formel 1: Warmwasserbereitung: Energiebezogen, Verbraucherperspektive

$$F_{Pho,WW}^V = \frac{\int \dot{m}_{WW-Verbrauch} * c_{p,WW} * (T_{KW} - T_{WW})}{\int \dot{m}_{WW-Bereitung} * c_{p,WW} * (T_{Sp,ein} - T_{Sp,aus})} \leq 1$$

Formel 2: Warmwasserbereitung: Leistungsbezogen, Verbraucherperspektive

$$f_{Pho,WW}^V = \frac{\dot{m}_{WW-Verbrauch} * c_{p,WW} * (T_{KW} - T_{WW})}{\dot{m}_{WW-Bereitung} * c_{p,WW} * (T_{Sp,ein} - T_{Sp,aus})} \leq 1$$

Aus Bedarfsperspektive ist interessant, wie viel Wärmeenergie/-leistung dem Speicher hinzugeführt werden muss, damit die notwendige Warmwasserenergie/-leistung gedeckt wird.

Formel 3: Warmwasserbereitung: Energiebezogen, Bedarfsperspektive

$$F_{Pho,WW}^B = \frac{\int \dot{m}_{WW-Bereitung} * c_{p,WW} * (T_{Sp,ein} - T_{Sp,aus})}{\int \dot{m}_{WW-Verbrauch} * c_{p,WW} * (T_{KW} - T_{WW})} \geq 1$$

Formel 4: Warmwasserbereitung: Leistungsbezogen, Bedarfsperspektive

$$f_{Pho,WW}^B = \frac{\dot{m}_{WW-Bereitung} * c_{p,WW} * (T_{Sp,ein} - T_{Sp,aus})}{\dot{m}_{WW-Verbrauch} * c_{p,WW} * (T_{KW} - T_{WW})} \geq 1$$

Mit den leistungsbezogenen Kennzahlen lässt sich die Effizienz des Prozesses der Warmwasserbereitung und Speicherladung bewerten. Die energiebezogenen Kennzahlen lassen Rückschlüsse auf die tatsächliche Nutzung des Trinkwarmwassers und ggfs. vorhandene Optimierungsansätze, beispielsweise Abschaltzeiten in Nicht-Anwesenheitszeiten unter Berücksichtigung des Legionellenschutzes, zu. Eine Beispielberechnung findet sich im Vorlesungsskript von Prof. Dr.-Ing. Bernd Sankol, HAW Hamburg (vgl. Sankol 2022).

Wärmepumpe:

Die beiden Abwasser-Wärmepumpen im BMUV in Berlin dienen zur Deckung des Wärmebedarfs des Neubaubereichs, planerisch sollen diese den Wärmebedarf des Bereichs (nahezu) komplett decken. Im ersten Untersuchungszeitraum war eine der beiden Wärmepumpen defekt und konnte so keinen Beitrag leisten, daher war im Jahr 2020 die zusätzliche Einspeisung von Fernwärme aus der Hauptversorgung in den entsprechenden Heizkreis notwendig (zwischen Januar und September kamen etwa 50.000 kWh aus der laufenden Wärmepumpe und knapp 70.000 kWh zusätzlich aus der Fernwärme).

Die thermodynamische Grenze bei der Wandlung thermischer Energie in mechanische Energie ist über den Carnot-Wirkungsgrad definierbar. Dabei werden die Absolut-Temperaturen der Wärmequelle und -senke betrachtet. Hierzu ist die Messung der Temperatur auf der Verdampferseite (kalte Seite/unteres Temperaturniveau: T_u , Im Falle des Heizbetriebs der Wärmepumpe entsprechend der Wärmeaufnahme aus der Umgebung) und der Verflüssigerseite (warme Seite/oberes Temperaturniveau: T_o , Im Falle des Heizbetriebs der Wärmepumpe entsprechend der Wärmeabgabe an das Heizsystem) notwendig. Der Carnot-Wirkungsgrad ist dabei wie folgt definiert:

Formel 5: Definition Carnot-Wirkungsgrad

$$\eta_{carnot} = \frac{T_o - T_u}{T_o} = 1 - \frac{T_u}{T_o} < 1$$

Ist die Differenz zwischen den beiden Temperaturen Null, wird der Carnot-Wirkungsgrad Null. Mit steigender Temperaturdifferenz steigt auch der Carnot-Wirkungsgrad.

Als physikalisches Optimum des Wärmepumpenprozesses lässt sich die theoretisch mögliche Leistungszahl der Wärmepumpe (ϵ) als Kehrwert des Carnot-Wirkungsgrads definieren. Da durch den Einsatz der Wärmepumpe möglichst viel der abgegebenen Wärme auf der Verflüssigerseite aus der Umweltenergie gewonnen werden soll, ist eine hohe Leistungszahl vorteilhaft. Die Leistungszahl (auch als COP, Coefficient of Performance bezeichnet) bildet die übliche Bewertung der Effizienz der Betriebsweise der Wärmepumpe in unterschiedlichen Betriebspunkten. Da diese dem theoretischen Optimum des Prozesses entspricht, lässt sich diese entsprechend der Nomenklatur der VDI 4663 als Kennzahl (f) aus der Verbrauchersperspektive (V) definieren. Die Kennzahlen lassen sich prinzipiell für beide Richtungen des Kreisprozesses generieren, je nachdem ob mit der Wärmepumpe Wärme- oder Kälteenergie abgegeben wird.

Formel 6: Wärmepumpe Wärmeerzeugung

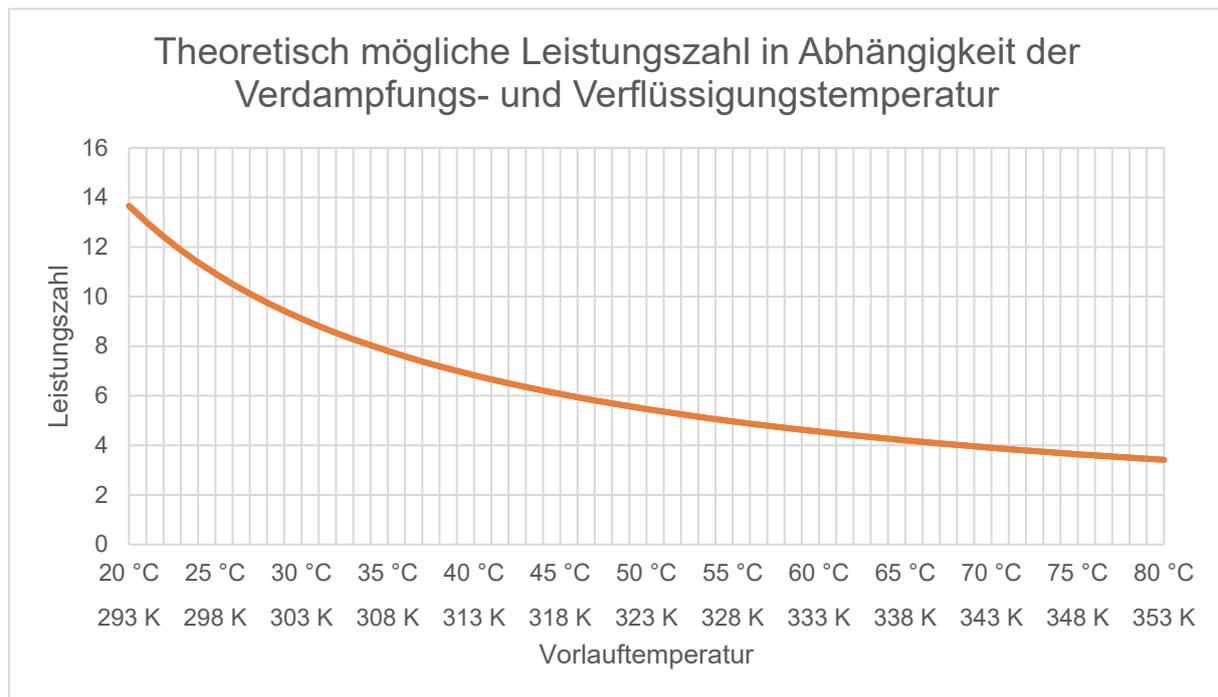
$$f_{PhO,WP,Wärme}^V = \frac{T_o}{T_o - T_u}$$

Formel 7: Wärmepumpe Kälteerzeugung

$$f_{PhO,WP,Kälte}^V = \frac{T_u}{T_o - T_u}$$

Die physikalische Grenze der Leistungszahl steigt mit sinkender Verflüssigertemperatur bzw. steigender Temperatur auf Verdampferseite. Die folgende Abbildung zeigt den Verlauf des physikalischen Optimums der Leistungszahl bei einer Temperatur auf der Verdampferseite (T_u) von 0 °C (273,15 K) in Abhängigkeit der Vorlauftemperatur (T_o) des Heizsystems.

Abbildung 32
Leistungszahl in Abhängigkeit der Verdampfungs- und Verflüssigungstemperatur



Quelle: EBZ Business School GmbH

Die Leistungszahl kann dabei entsprechend nur zur Beurteilung der Effizienz des aktuellen Betriebspunktes herangezogen werden. Soll nicht der aktuelle Arbeitspunkt der Wärmepumpe betrachtet werden, sondern eine Bewertung der Gesamteffizienz über einen längeren Zeitraum (beispielsweise Bezug zu einer Heizperiode) erfolgen, wäre entsprechend die kontinuierliche Messung der Temperaturen notwendig. Eine detaillierte Aufstellung erreichter Leistungszahlen unterschiedlicher Wärmepumpentypen ist unter anderem im Abschlussbericht des Projekts „Wärmepumpen im Bestand“ des Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme zu finden (vgl. Wapler/Miara/Günther 2019). Je nach Wärmequelle sind dort Arbeitszahlen von Wärmepumpen im Feld differenziert untersucht. Eine Beispielberechnung für die Abwasser-Wärmepumpen, die den Neubaubereich des BMUV Berlin versorgen, ist in Kapitel 0 zu finden.

PV-Anlage:

Die reale Leistung einer PV-Anlage ist sowohl witterungsabhängig, bspw. von der Einstrahlungsintensität und des Einstrahlungswinkels, als auch abhängig von der Güte und Qualität der verwendeten Module und Anlagenkomponenten.

Das physikalische Optimum hängt vom verwendeten Modultyp ab. Bei Silizium beträgt dieser maximal 29 % - 33 %, abhängig von der Einstrahlungsintensität $\eta_{PV,max}$ (Greenhouse Media GmbH), entsprechend lässt sich dies als Bezugspunkt für das physikalische Optimum heranziehen. Die Kennzahl wird aus der Verbrauchssicht definiert. Wie bei der Bewertung der Effizienz des Wärmepumpenprozesses, lässt sich einerseits die aktuelle Effizienz als leistungsbezogene Kennzahl definieren, andererseits ist auch die Ausbeute der PV-Anlage über einen längeren Zeitraum als energiebezogene Kennzahl zu ermitteln.

Formel 8: PV-Anlage leistungsbezogen

$$f_{Pho,PV}^V = \frac{P_{PV}}{P_{Solar}} \leq \eta_{PV,max}$$

Formel 9: PV-Anlage energiebezogen

$$F_{PhO,PV}^V = \frac{E_{PV}}{E_{Solar}}$$

Für die Berechnung der Kennzahl ist entsprechend die PV-Leistung sowie die Einstrahlung auf die entsprechende Fläche notwendig. Die PV-Erzeugung ist als Datenpunkt im BMUV Berlin bereits verfügbar, die exakte Messung der solaren Einstrahlung unter Berücksichtigung der Fläche und des Einfallwinkels wäre noch nachzurüsten.

Wärmeversorgung gesamt:

Es ist denkbar, als Kennzahl für den aktuellen Anlagenbetrieb die primärenergetisch optimale bzw. CO₂-ärmste Energieversorgung zu definieren. Die Wärmeversorgung des Passivhausbereichs erfolgt aus zwei Wärmequellen, entweder der Fernwärme oder den Abwasser-Wärmepumpen. Der Primärenergiefaktor für Fernwärme in Berlin beträgt laut Vattenfall 0,452 bzw. laut den Dokumentationsunterlagen 0,56. Der Primärenergiefaktor für Strom, der aus dem Netz bezogen wird, beträgt derzeit 1,8. Für eigens erzeugten PV-Strom kann dieser mit 0 angegeben werden. Je nach notwendiger Vorlauftemperatur der Heizkreise erzielt die Wärmepumpe bei der Wärmebereitung dabei einen bestimmten Wirkungsgrad. Als Kennzahl lässt sich das primärenergetische Minimum (Primärenergiefaktor PEF) der Deckung des Wärmebedarfs definieren:

Formel 10: Primärenergieverbrauch Wärmebedarf leistungsbezogen

$$f_{PhO, PE}^B = \frac{PEF_{FW} * \dot{Q}_{FW} + PEF_{Strom} * \dot{Q}_{WP}}{PEF_{FW} * \dot{Q}_{WB}} \geq PEF_{opt}$$

Formel 11: Primärenergieverbrauch Wärmebedarf energiebezogen

$$F_{PhO,PE}^B = \frac{PEF_{FW} * Q_{FW} + PEF_{Strom} * Q_{WP}}{PEF_{FW} * Q_{WB}} \geq PEF_{opt}$$

Analog ließe sich dies aus Sicht der mit der Wärmeversorgung verbundenen CO₂-Emissionen berechnen. Der Ansatz wird im folgenden Kapitel mit Bezug auf die Bedarfsberechnung mit Werten aus dem Energieausweis aufgegriffen.

Evaluation der Pilottests Berlin mittels VDI-Richtlinie 4663

Die Ergebnisse des ComfortLabs sollten anhand von technischen Kennzahlen unter Beachtung des physikalischen Optimums, entsprechend den vorgeschlagenen Kennzahlen, evaluiert werden. Der Fokus wurde im Projektverlauf auf Kennzahlen und Auswertungen der ComfortLab-Plattform gelegt, in denen vor allen Dingen die Auswirkungen auf den witterungsbereinigten Wärmeenergieverbrauch der Liegenschaften relevant sind. Im Rahmen des Projektes wurde dazu der Betrieb der Anlagentechnik sowie der damit verbundene Energieverbrauch untersucht. Hierzu wurden die übermittelten Daten aufbereitet. Die Zählerstruktur und die Energieflüsse für Wärme, Kälte und elektrische Energie wurden entsprechend den Nutzungszonen zugeordnet und daraus ableitend Sankey-Diagramme erstellt. Sankey-Diagramme können nach VDI 4663 eine Basis für die weitere Analyse von Prozessen und Berechnung von Kennzahlen bilden. Diese zeigen mengenproportionale Pfeile von Produkt-, Energie- oder sonstigen Strömen. Aufgrund der Größe und Menge an Messpunkten sind die erstellten Sankey-Diagramme im Großformat dem Anhang zu entnehmen. Als Bezugszeitraum dient dabei der 1. Februar 2019 – 31. Januar 2020. Für den Wärmeverbrauch (Abbildung 44) ergibt sich eine Differenz zwischen Wärmebereitstellung (Bezug Fernwärme + Wärmebereitstellung der beiden Wärmepumpen) und Verbrauch (Summe des Verbrauchs der angeschlossenen Heizkreise) von etwa 14 %.

Der größte Verbrauch ist dabei im Vorderhaus für die statische Heizung zu verzeichnen. Die Datenqualität und Vollständigkeit ist für den Bereich der Wärmeenergie für die erste Zuordnungsebene gut geeignet, um das Verständnis für die Wärme Flüsse zu schärfen und die größten Verbraucher zu identifizieren sowie Optimierungsmaßnahmen bewerten zu können.

Beim Stromverbrauch (Abbildung 43) ergibt sich eine sehr gute und vollständige Zuordnung der Verbräuche auf der ersten Ebene, die Abweichung zwischen der Summe der Verbräuche der einzelnen Unterzähler und dem Hauptbezugszähler beträgt nur etwa 3 %. Bei den weiteren Stromverbrauchsebenen ergeben sich mehr oder weniger große Abweichungen. Dies kann aber der teilweise unvollständigen Datenverfügbarkeit geschuldet sein. Da im Bereich des Elektroenergieverbrauchs neben der beispielhaften Betrachtung auf Büroebene keine weiteren Untersuchungen stattgefunden haben, wurde die Vervollständigung der Zuordnung zu den Verbrauchskreisen nicht weiter vertieft.

Im Bereich der Kälteenergie (Abbildung 45) ist bereits auf der ersten Ebene erkennbar, dass etwa 30 % der Energieströme nicht zugeordnet werden können. Auch hier wäre eine tiefergehende Untersuchung der offenen, relevanten Ströme sowie ggfs. die Nachinstallation von Kältemengenzählern empfehlenswert. Da der Fokus des Projekts bei der Betrachtung der Heizperioden und der Wirkung des ComfortLab lag, wurden die Kälteenergieflüsse nicht weiter betrachtet.

Um eine Referenz der Anwendung des physikalischen Optimums für das BMUV zu erstellen, wurden die Ergebnisse ins Verhältnis zur Bedarfsberechnung des Energieausweises des Passivhausbereichs gesetzt. Hierzu wurde seitens BBSR der Zugang zur Software „SolarComputer“, Version 5.27.01, Modul Energieeffizienz EnEV 2014 B55 gestellt. Als Referenzvariante wurde die Berechnung für den Passivhausbereich inklusive Fernkälte genutzt (Passivhaus_EnEV2009_V2_FK).

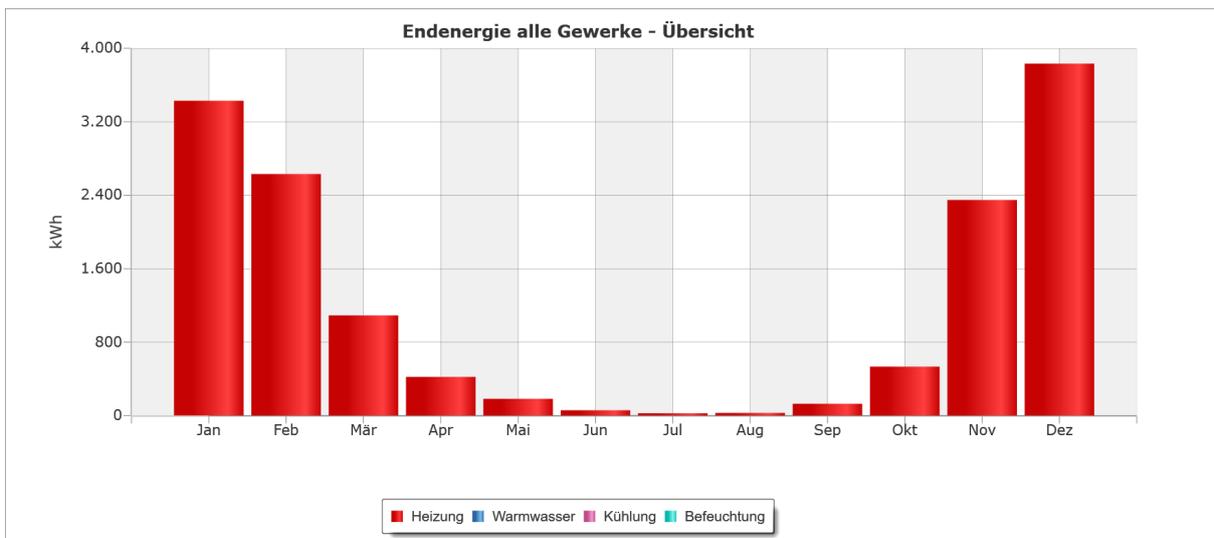
Für den Betrieb der Abwasser-Wärmepumpen ergeben sich gemäß den beiden folgenden Abbildungen bedarfstechnisch die entsprechenden monatlichen Nutzenergieabgaben sowie eingesetzten Endenergieaufwände.

Abbildung 33
 Monatsweise Nutzenergie der Wärmepumpe laut Energieausweis



Quelle: EBZ Business School GmbH

Abbildung 34
 Monatsweise Endenergie der Wärmepumpe laut Energieausweis



Quelle: EBZ Business School GmbH

Die Abwasser-Wärmepumpen versorgen dabei folgende Wärmeübergabe-Systeme mit den entsprechenden Auslegungstemperaturen:

- Verteilkreis Heizung 35/30 mit Flächenheizung, mit Wasser beheizt, Raumhöhe <= 4 m, Fußbodenheizung, mit Wasser beheizt, Raumhöhe > 4 m, Fußbodenheizung, mit Wasser beheizt, Raumhöhe > 4 m
- Verteilkreis Heizung 60/40 mit Umluftheizung, Raumhöhe <= 4 m, Umluftheizung, Raumhöhe <= 4 m, Umluftheizung, Raumhöhe <= 4 m
- Verteilkreis RLT 60/40 mit Heizregister in RLT-Anlagen

Versorgt werden acht unterschiedliche Nutzungszonen mit den jeweiligen Flächen, Übergabesystemen und Verbräuchen gemäß Tabelle 7 im Anhang.

Rechnerisch ergibt sich für die Versorgung der acht Nutzungszonen mit den entsprechenden Übergabesystemen eine Nutzenergieabgabe der Wärmepumpe von 98.758,55 kWh/a. Dabei werden 80.809,20 kWh/a aus der Umweltenergie entnommen und 17.949,35 kWh/a aus der elektrischen Energieaufnahme des Kompressors, dies entspricht einer planerischen Jahresarbeitszahl von 5,5.

Mit Bezug auf das physikalische Optimum ergeben sich für die beiden unterschiedlichen Vorlauftemperaturen (35 °C und 60 °C) physikalisch mögliche Leistungszahlen von 13,4 (35 °C) bzw. 6,9 (60 °C) gemäß Formel 6. Dabei wird eine konstante Abwassertemperatur von 12 °C zugrunde gelegt:

$$f_{PhO,WP,Wärme,35\text{ °C}}^V = \frac{308,15\text{ K}}{308,15\text{ K} - 285,15\text{ K}} \approx 13,4$$

$$f_{PhO,WP,Wärme,60\text{ °C}}^V = \frac{333,15\text{ K}}{333,15\text{ K} - 285,15\text{ K}} \approx 6,9$$

Werden die notwendigen Nutzenergiebedarfe (60 °C Vorlauftemperatur für den Heizungskreis und die RLT-Anlagen: 27.565 kWh/a; 35 °C für den Niedertemperatur-Heizkreis: 49.785 kWh/a) zugrunde gelegt, wäre ein theoretisch minimaler Endenergiebedarf von 7.687 kWh/a notwendig:

$$F_{PhO,WB\text{ Neubau,EA}}^V = \frac{27.565 \frac{kWh}{a}}{6,9} + \frac{49.785 \frac{kWh}{a}}{13,4} = 7.687 \frac{kWh}{a}$$

Wird gemäß Kapitel 0 ein Emissionsfaktor von 55,6 g CO₂/kWh für die Berliner Fernwärme sowie nach Statista (vgl. Ember) ein Emissionsfaktor von 380,95 g CO₂/kWh für den aktuellen deutschen Strommix angesetzt, so ergibt dies rechnerische CO₂-Emissionen von 4.301 kg CO₂/a für die Fernwärme bzw. 3.336 kg CO₂/a für den elektrischen Energiebedarf für die Abwasser-Wärmepumpe. Würde das physikalische Optimum also technisch ausgeschöpft werden können, wäre mit Beachtung der aktuellen Emissionsfaktoren der Berliner Fernwärme und des deutschen Strommixes eine Versorgung des Neubaubereichs mittels elektrisch betriebener Abwasser-Wärmepumpen vorteilhaft.

Mit Bezug zum realen Verbrauch ergeben sich aus dem Monitoringbericht („Energetisches Monitoring BMUB – 4,5 Jahre nach Übergabe an den Nutzer“) des Bundesinstitut für Bau-, Stadt und Raumforschung als Datenquelle für die Jahre 2013-2015 durchschnittliche Verbräuche von 58.849 kWh/a für die statische Heizung sowie 18.896 kWh/a für die dynamische Heizung des Neubaubereichs. Würde dieser durch eine Wärmepumpe gedeckt werden können, die gemäß dem physikalischen Optimum arbeitet, so würde sich ein elektrischer Energiebedarf von 7.114 kWh/a ergeben:

$$F_{PhO,WB\text{ Neubau,real}}^V = \frac{18.896 \frac{kWh}{a}}{6,9} + \frac{58.849 \frac{kWh}{a}}{13,4} = 7.114 \frac{kWh}{a}$$

Im Vergleich zum Wärmebedarf des Neubaubereichs fand in den drei Jahren eine durchschnittliche Wärmebereitstellung durch die beiden Wärmepumpen in Höhe von 53.881 kWh/a statt. Dabei wurden durchschnittlich 16.067 kWh/a elektrische Energie aufgenommen, wodurch sich eine mittlere Leistungszahl von 3,35 ergibt.

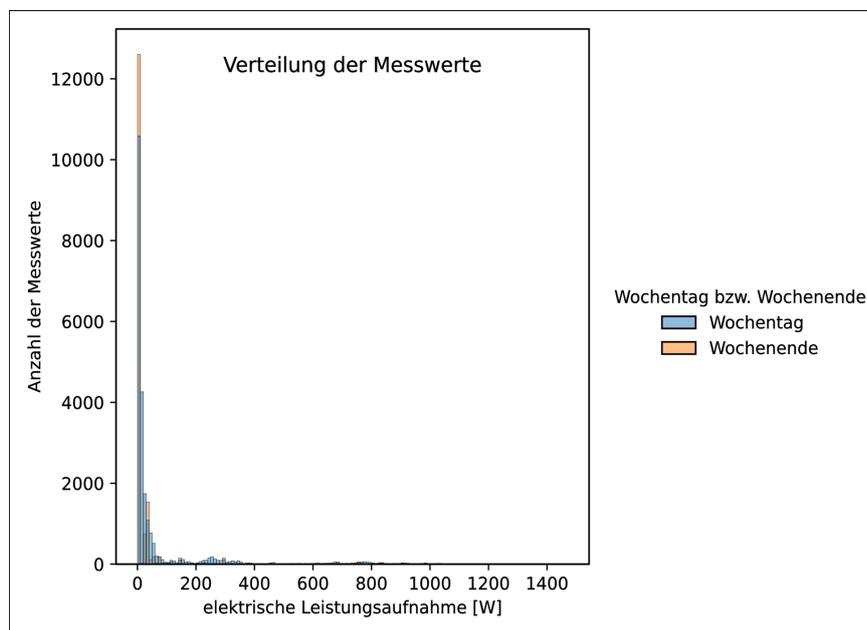
Ergebnisse zum Elektroenergieverbrauch in Berlin

Im Folgenden werden die zentralen Ergebnisse zur Umsetzung von Strategien im Bereich des Elektroenergieverbrauchs beschrieben (Berlin AS 1.3; bis zum 23. Dezember 2020). Dabei waren Messungen des Elektroenergieverbrauchs vom 15.11.2019 bis zum 31.12.2020 geplant.

In allen teilnehmenden Büros sowie ausgewählten Zentralräumen (2 Etagen-Drucker, 1 Teeküche, 1 Premium-Wasserspender) wurde eine Kombination aus Z-Wave-Steckdose und Z-Wave-Gateway installiert. Soweit vorhanden, wurde in Vorzimmer-Büros der zentrale Drucker ebenso ausgestattet. Das Z-Wave-Gateway diente einerseits zur Kommunikation mit den Steckdosen und Übermittlung der Verbrauchsdaten, andererseits auch zur Übermittlung der Daten über das Mobilfunknetzwerk an den EBZ-Server. Da zu Projektbeginn keine ausreichende Möglichkeit bestand, die Gateways in das bauseitige Ethernet-Netzwerk einzubinden, wurde dieser Ansatz gewählt. Die Mobilfunk-Empfangsqualität innerhalb des Gebäudes war jedoch insgesamt unzureichend, sodass das Monitoring des Elektroenergieverbrauchs trotz mehrmaliger Justage der Technik nicht dauerhaft stabil betrieben werden konnte. Die Nutzung des Mobilfunknetzwerks entsprach nicht der ursprünglich geplanten und beauftragten Einbindung in das bauseitige Netzwerk. Dies hätte zu weniger Aufwand bei der Installation und dem Betrieb sowie einer stabileren Datenkommunikation geführt und sollte für künftige Aktivitäten präferiert werden.

Die Installation sollte einerseits in den Büros erfolgen, die bereits mit einem PIAF ausgestattet wurden (15 Stück), andererseits in sechs Zentralräumen. Insgesamt konnten knapp 45.000 Leistungswerte sowie 2.200 Energiewerte erfasst werden. Abbildung 35 zeigt die Verteilung aller aufgenommenen Leistungswerte. Zu erkennen ist, dass nahezu alle Messwerte in einem Leistungsbereich unterhalb von 50 Watt liegen.

Abbildung 35
Verteilung der aufgenommenen elektrischen Leistungsaufnahme der Geräte



Quelle: EBZ Business School GmbH

Systembedingt senden die Steckdosen allerdings nicht periodisch neue Werte, sondern nur in Abhängigkeit der Nutzung bzw. bei Überschreitung bestimmter Schwellen (zum Beispiel: +10 % Lastanstieg oder -abfall, oder pro verbrauchter Wh). Zudem sind einige der Systeme (Teeküche, Wasserspender) außerhalb des regulären Netzwerk-Abdeckungsbereichs. Erschwerend hinzu kommt der Einbauort der Systeme in den Schreibtischen.

Durch dort ebenfalls vorhandene Kabel etc. kann es zu einer erheblichen Beeinträchtigung der Sende- und Empfangsleistung der Gateways kommen. Da die Büroräume mit Terminalzugängen ausgestattet sind, die einen sehr geringen Energiebedarf besitzen (die Verarbeitung der genutzten Software erfolgt zentral am Server), ist auch der entsprechende gemessene Verbrauch an den Steckdosen sehr gering. Die durchschnittliche Leistungsaufnahme der Büroarbeitsplätze im Stand-by-Betrieb während der Messungen betrug zwischen 1 und 5 Watt. Die maximale Leistungsaufnahme in fünf der vermessenen Büros übersteigt diesen Wert nicht, so dass hier keine Arbeitstätigkeit und keine Anwesenheit zu vermuten ist. Die deckt sich mit den PIAF-Messungen und der allgemeinen, geringen Anwesenheit während der Zeit.

Im Bereich des Strommonitorings wurde empfohlen, die verbaute Technik und die bauseitige Infrastruktur noch einmal zu prüfen und zu optimieren, so dass gegebenenfalls noch einmal Daten, auch im Hinblick auf eine Wiederbelegung des Gebäudes, erhoben werden können. Durch technologische Fortschritte war zudem geplant, die bestehende Hardware gegen WLAN-basierte Sensorik auszutauschen, die kein Parallelnetzwerk benötigt. Dieser Ansatz wurde im Laufe des Projekts jedoch nicht mehr weiterverfolgt, da die Ergebnisse kein großes Einsparpotenzial vermuten ließen und so keine Messungen einzelner elektrischer Verbraucher/Räume in der Bonner Liegenschaft durchgeführt wurden.

Für die Befragung der 15 Teilnehmer und Teilnehmerinnen zum Nutzerverhalten wurde ein Gesprächsleitfaden entwickelt, der zwischen den Projektpartnern und in einem internen Pre-Test getestet und überarbeitet wurde. Die fertige Version wurde mit der Ansprechpartnerin des BMUV rückgekoppelt. Trotz intensiver Bemühungen konnten vor dem Hintergrund der Homeoffice-Regelungen während der Corona-Pandemie nur 11 der 15 geplanten Teilnehmerinnen und Teilnehmer für ein Interview gewonnen werden. Aus diesem Grund war Ende 2021 geplant, das Projekt durch Experimente mit programmierbaren Smart Home Ventilen im Winter 2021/2022 bzw. 2022/2023 als Pilot 2 zu testen und Interviews durchzuführen. Der Vorschlag, in einem Teil der Büros ein offenes und kommunikationsfähiges Smart Home/Building-System einzusetzen, wurde nicht umgesetzt. Dies hätte eine einfache Integration der Daten der GLT ermöglicht. Stattdessen wurde ein autarkes System für einige Büros installiert, so dass die Integration von Daten der Raumautomation nicht weiterverfolgt wurde und keine weiteren Interviews geführt wurden.

Grundvoraussetzungen und Empfehlungen für die Nutzung von ComfortLab

Die vorangegangenen Kapitel haben gezeigt, dass in öffentlichen Gebäuden zahlreiche Herausforderungen für einen ressourcen- und klimaschonenden Betrieb bestehen, die sowohl auf die Verhaltensweisen der Nutzerinnen und Nutzer als auch auf die technische Betriebsführung und die Kommunikation zwischen Facility Management und Büronutzerinnen und Büronutzern zurückgeführt werden können. Sie können in ihrem Zusammenspiel mit weiteren Faktoren zu unerwünschten Effekten (Rebounds, Performance Gaps u.ä.) führen, die einen deutlich erhöhten Energieverbrauch zur Folge haben. Öffentliche Gebäude können somit als schlafende Riesen der Energiewende betrachtet werden.

Mit der im Rahmen des Projekts entwickelten ComfortLab-Plattform wurde ein digitales, interaktives Tool geschaffen, um diese Stellschrauben nicht (mehr) separat zu betrachten, sondern in einer integralen Betrachtungsweise, in der sämtliche Komponenten soziotechnischer Systeme vereint werden. Dies grenzt die entwickelte Plattform einerseits klar von konventionellen technischen Facility Management- und Gebäudeleittechnik-Systemen ab, in denen technische Informationen verarbeitet werden und kein Kommunikationskanal zu den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern besteht. Andererseits ergänzt dies die Ausrichtung und Funktionalität sozio-technischer Systeme, in denen auf einer hochaggregierten Ebene technische Informationen einbezogen werden.

Der Fokus lag dabei vor allem auf der Entwicklung und Erprobung von Energieeinsparstrategien, die den Energie- und Ressourcenverbrauch des Gebäudebetriebs an zwei Standorten des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) verringern. Dabei wurde ein nutzerzentrierter Innovationsansatz verfolgt, bei dem der Forschungsschwerpunkt vor allem auf den Nutzerinnen und Nutzern der Gebäude und ihren Verhaltensweisen sowie tatsächlichen Bedürfnissen lag, um so mit der ComfortLab-Plattform einen Ansatz der nutzerzentrierten Betriebsführung zu entwickeln, mit dem Energieeffizienzpotenziale langfristig und anwendungsbezogen geschaffen werden können. Zudem sollte mit dem Ansatz der ComfortLab-Plattform die Akzeptanz und Bereitschaft für notwendige Absenkstrategien gefördert sowie die Kommunikation zwischen Büronutzerinnen und Büronutzern und dem Facility Management erhöht werden.

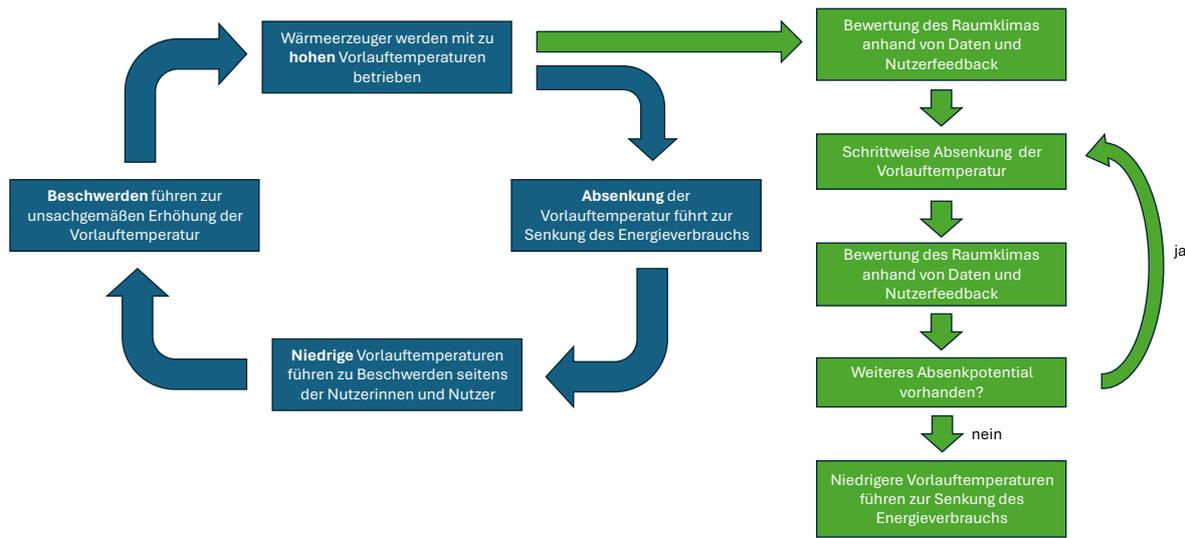
Die Plattform wurde in mehreren Iterationsschleifen entwickelt und in den Heizperioden 2021/2022 und 2022/2023 an zwei Standorten des BMUV implementiert und getestet (siehe Kapitel 3). Das wesentliche Ziel der Plattform lag darin, dem Facility Management vor Ort eine tagesaktuelle Auswertung des Wohlbefindens aller teilnehmenden Büronutzerinnen und Büronutzer zur Verfügung zu stellen, die es ihnen ermöglicht, die Vorlauftemperaturen einzelner Heizstränge bedarfsgerecht zu steuern.

Die Ergebnisse des Projekts haben gezeigt, dass eine nutzerzentrierte Einsparstrategie, bei der die unterschiedlichen Nutzerinnen und Nutzer des Gebäudes (Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter, technisches Personal, Facility Management) in die Entwicklung und Umsetzung einbezogen werden und ihnen mithilfe unterschiedlicher Feedbacksysteme eine Interaktion mit der Plattform ermöglicht wird, notwendig ist, um höhere Einsparziele in der Energie- und Ressourceneffizienz tatsächlich zu erreichen (siehe Kapitel 0). Dabei kann die entwickelte ComfortLab-Plattform als Gesamtsystem einer nutzerzentrierten Betriebsführung verstanden werden, welches diese Verzahnung unterschiedlicher Methodenbausteine herstellt und dem BMUV ein geeignetes Werkzeug an die Hand gibt, um langfristig das Potenzial einer entsprechenden Anlagentechnik und energieeffizientem Nutzerverhalten am Arbeitsplatz heben zu können.

Mit Blick auf die Perspektive der Nutzerinnen und Nutzer haben die Ergebnisse aus den Testphasen der letzten Heizperioden gezeigt, dass bis auf wenige technische Herausforderungen überwiegend positive Erfahrungen mit der ComfortStripes Lösung gesammelt und das Interface und Design der ComfortStripes als ansprechend und anwendungsbezogen empfunden wurden. Zudem hat die Auseinandersetzung mit der tatsächlichen Raumtemperatur die Büronutzerinnen und Büronutzer angeregt, sich mit dem eigenen Heizverhalten auseinanderzusetzen.

Auch die Rückmeldungen der Technikerinnen und Techniker des Facility Managements haben mit Blick auf die Visualisierungen und das Interface des ComfortHubs gezeigt, dass die Darstellung, wie sie im Rahmen der Projektlaufzeit entwickelt und erprobt wurde, bereits als hilfreich und verständlich empfunden wurde, womit Maßnahmen zur zukünftigen Implementierung vor allem auf eine Steigerung der Motivation zur Interaktion mit der Plattform abzielen. Mit der Implementierung der aus diesem Projekt hervorgegangenen Strategien in den fortdauernden Gebäudebetrieb öffentlicher Verwaltungsgebäude des BMUVs können nach Schätzung der Autorinnen und Autoren 20 bis 30 % des derzeitigen Wärmeenergieverbrauchs langfristig verringert werden und der Regelkreis der Energieverschwendung durchbrochen werden (siehe Abbildung 36).

Abbildung 36
ComfortLab durchbricht den Regelkreis der Energieverschwendung



Quelle: EBZ Business School GmbH

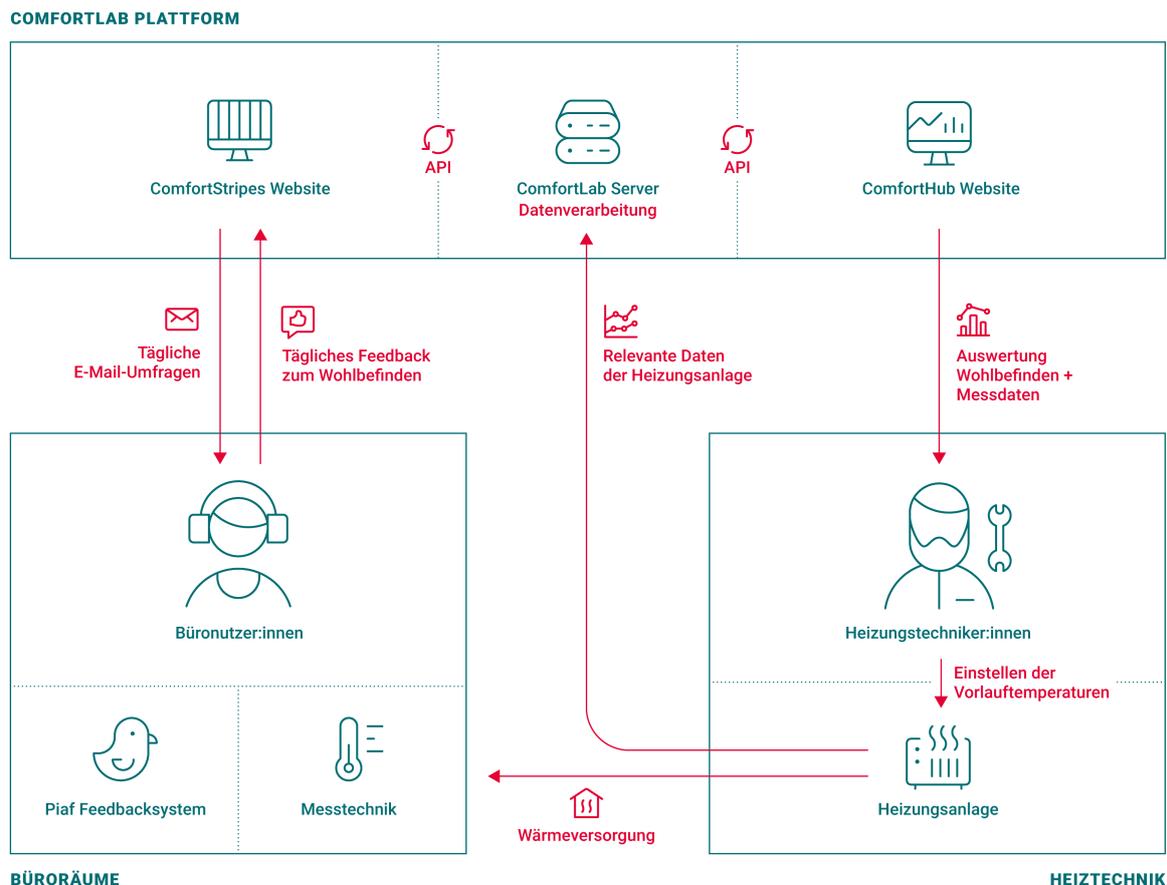
Jedoch haben die Erfahrungen der Testphasen auch gezeigt, dass bei der Entwicklung, Implementierung und Umsetzung der ComfortLab-Plattform noch Hürden aufgetreten sind, die insbesondere mit Blick auf eine mögliche Weiterentwicklung und Skalierung der Plattform benannt werden müssen.

Bei der Infrastruktur der Gebäude und den gesammelten Erfahrungen in der Testphase zeigt sich im Rahmen der Installation, dass wesentliche Herausforderungen in einer oftmals veralteten Anlagentechnik liegen sowie bei Hürden, die mit Bezug auf die vorhandene Infrastruktur oder einer nicht immer gegebenen stabilen Netzwerkarchitektur auftreten. Für die ComfortLab-Plattform ist eine stabile Netzwerkarchitektur jedoch entscheidend, damit alle relevanten Daten zuverlässig in Echtzeit ausgelesen und zusammengeführt werden können. Für die Skalierung solcher Plattformen bleibt deshalb eine Herausforderung, bei unterschiedlichen Gebäuden mit individuellen Datenschnittstellen ein möglichst effizientes und standardisiertes Zusammenführen der Daten aus den Büroräumen und Heizungsanlagen zu erreichen. Auch der Zugang zum gebäudeseitigen Netzwerk ist dabei eine Herausforderung, da aufgrund von Sicherheitsanforderungen und detaillierten Abstimmungen mit der IT häufig ein hoher Aufwand entsteht.

Die gesamte Haustechnik im Zusammenspiel mit der Gebäudephysik ist ein komplexes System, bei dem nicht nur viele technische und physikalische, sondern auch menschliche und organisationstrukturelle Faktoren einen entscheidenden Einfluss nehmen. Hier lag eine Hürde in der aktiven und engen Zusammenarbeit der verschiedenen Akteurinnen und Akteure im ComfortLab sowie in einer geringen Motivation/Bereitschaft des Facility Managements, womit Möglichkeiten zur Ansprache und Abklären von Verantwortlichkeiten kompliziert und teils intransparent waren. Im Rahmen der Nutzungsphase bestehen aktuell vor allem unzureichende Möglichkeiten der Kommunikation zwischen den Büronutzerinnen und Büronutzern und dem Facility Management sowie mangelnde Anreize und zeitliche Kapazitäten seitens des Facility Managements die ComfortLab-Plattform in ihren Alltag zu integrieren.

Ihr Fokus lag bislang auf den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern, womit ihre größte Priorität darin bestand, eine ausreichende Grundversorgung für angemessene Raumtemperaturen herzustellen. Auch bei den Nutzerinnen und Nutzern zeigten die Erfahrungen im Projekt, dass die alltäglichen Verhaltensmuster der Büronutzerinnen und Büronutzer (zum Beispiel Lüften, Heizen, Umgang mit elektronischen Geräten) häufig mit hohen Energieverbräuchen einhergehen und ihre Bedürfnisse (ohne ComfortLab) meist unzureichend berücksichtigt werden. In der Nutzungsphase der ComfortLab-Plattform lagen technische Herausforderungen auf Seite der Nutzerinnen und Nutzern beispielsweise in Problemen mit den Datenloggern, „eingefrorenen“ Temperaturanzeigen oder nicht versendeten E-Mails.

Abbildung 37
Nutzerzentrierte Betriebsführung im ComfortLab



Quelle: EBZ Business School GmbH

Mit dem Konzept der „Nutzerzentrierten Betriebsführung“ (siehe Abbildung 37) wird eine Orientierung für die im Projekt entwickelten und evaluierten Strategien angestrebt, über die diese zentralen Herausforderungen überwunden und eine erfolgreiche Implementierung der ComfortLab-Plattform in den Betrieb öffentlicher Büro- und Verwaltungsgebäude der Bundesministerien langfristig erfolgen kann. Dafür werden im Folgenden Grundvoraussetzungen für den Einsatz von ComfortLab in öffentlichen Gebäuden (Kapitel 0) beschrieben sowie Empfehlungen aufgezeigt, wie eine Marktreife von ComfortLab langfristig gefördert werden kann (Kapitel 0).

Grundvoraussetzungen für den Einsatz von ComfortLab in öffentlichen Gebäuden

Während der Testphase der ComfortLab-Plattform wurden vier zentrale Schritte als Grundvoraussetzung identifiziert, mit denen eine reibungslose und erfolgreiche Implementierung der ComfortLab-Plattform in öffentlichen Büro- und Verwaltungsgebäuden gelingen kann.

(1) Geeignete technische Infrastruktur und Schnittstellen schaffen

Eine abgestimmte Einrichtung der einzelnen Komponenten ist Grundvoraussetzung für eine langfristig funktionierende und nutzerfreundliche Bedienbarkeit der Plattform. Hierzu gehören die lokale IT-Infrastruktur, der Zugriff auf die Daten der Heizungstechnik und eine stabile Netzwerkarchitektur (ggf. Einrichtung eines separaten Netzwerks) mit Einbeziehung der jeweils zuständigen Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter. Dies ermöglicht es, dass alle relevanten Daten aus den Büroräumen und Heizungsanlagen zuverlässig ausgelesen, zusammengeführt und zwischen den einzelnen Teilsystemen kommuniziert werden können. Es ist empfehlenswert, einen lokalen Gateway-PC zu installieren, der als „Vermittler“ zwischen den Daten im Gebäude und dem ComfortLab-Ökosystem fungiert. Eine Checkliste mit weiteren Empfehlungen für technische Implementierungsmaßnahmen, die einen reibungslosen Betrieb der ComfortLab-Plattform ermöglichen können, ist der Infobox 5 im Anhang zu entnehmen.

(2) Verantwortungen identifizieren und Verantwortliche in den Onboarding-Prozess integrieren

Die Mitarbeit und Zusammenarbeit der am ComfortLab beteiligten Personen ist essenziell für einen langfristigen Erfolg der Plattform. So früh wie möglich sollten alle Zuständigkeiten sowie Nutzerinnen und Nutzer im ComfortLab identifiziert und diese in den Onboarding-Prozess eingebunden werden. Dazu zählen die Leitung, Gebäude- und Facility-Management, Heizungstechnikerinnen und Heizungstechniker, die IT-Abteilung, Datenschutz-Abteilung sowie die Büronutzerinnen und Büronutzer. Für unter anderem öffentliche Liegenschaften gilt, dass die Verantwortungen über unterschiedliche Instanzen abgestimmt sein sollten, z. B. Ministerien, Bundesanstalt für Immobilienaufgaben (BImA) und Gebäude- und Facility-Management-Unternehmen oder auch Eigenbetreiberinnen und Eigenbetreiber von Liegenschaften.

(3) Zum Mitmachen animieren: Büromitarbeiterinnen und Büromitarbeiter und Facility Management

Wie bei jeder Plattform funktioniert der Betrieb nur, wenn eine ausreichende Anzahl von aktiven Nutzerinnen und Nutzern vorhanden ist. Auf der einen Seite sind dies die Büromitarbeiterinnen und Büromitarbeiter, die regelmäßig Feedback zum Raumklima geben sollten (ComfortStripes). Zum anderen ist dies das Facility-Management, welches auf Basis des Raumklima-Feedbacks die Absenk-Strategien und Einstellung der Heizstränge vornehmen sollte. Folgende Ansätze können die Plattform-Beteiligung unterstützen: eine frühe Akquisephase vor der Heizperiode inkl. (digitaler) Informationsveranstaltungen, Flyer für jeden Schreibtisch, Info-Mail und ein aktives Onboarding, um offene Fragen zu klären. Weitere Empfehlungen, um die Büronutzerinnen und Büronutzer für energieeffiziente Strategien zu sensibilisieren und zum Mitmachen bei der ComfortLab-Plattform zu animieren, sind der Infobox 6 im Anhang zu entnehmen. Infobox 7 im Anhang enthält auf Seite des Facility Managements Empfehlungen zur optimalen Bedienbarkeit der Plattform sowie zur Steigerung der Motivation des Facility Managements, mit dem ComfortLab zu interagieren und die Plattform langfristig in ihren Arbeitsalltag zu integrieren. Damit verbunden sind der Anlage ebenfalls Mail-Entwürfe der Designagentur inbestergesellschaft zu entnehmen, die entwickelt wurden, um das Interesse und die Interaktion der Technikerinnen und Techniker des Facility Managements am Umgang mit der ComfortLab-Plattform zu erhöhen.

(4) Ansprechpartnerinnen und Ansprechpartner und technischer Support:

Während des aktiven Betriebs der Plattform sollte durchgehend ein technischer Support erreichbar sein, z. B. via E-Mail oder Ticket-System, so dass auftretende Probleme zeitnah bearbeitet werden können.

Empfehlungen zur Förderung einer Weiterentwicklung von ComfortLab

Die ComfortLab-Plattform wurde prototypisch im realen Betrieb erprobt. Eine potenzielle Weiterentwicklung der Plattform kann als Schlüssel dafür gesehen werden, das Potenzial öffentlicher Gebäude als Vorreiter in der Erprobung und Durchsetzung innovativer Konzepte zur Energieeinsparung zu heben, was diese als essenziellen Baustein für das Gelingen der Energiewende positioniert. Für eine zukünftige Weiterentwicklung wurden wesentliche Empfehlungen identifiziert.

(1) Verständnis und Nutzung der Plattform

Um Verständnis und Nutzung der Plattform für alle Zielgruppen (Büronutzerinnen und Büronutzer, Facility Management, Gebäudeleitung, Interessierte) zu Beginn zu verbessern, sollte eine Landingpage die Mehrwerte, Funktionen und ersten Schritte zur Einrichtung erläutern, z. B. mittels kurzen Videos und eines Q&A-Bereichs.

(2) Rollout-Strategie: Skalierung der ComfortLab-Plattform

Um Erkenntnisse zur Skalierung und Übertragbarkeit der Plattform zu erhalten, sollte im Rahmen eines Forschungsprojekts eine Erprobung in einer Heizperiode mit 50+ Gebäuden/öffentlichen Liegenschaften erfolgen. Ein erster Schritt für diese Rollout-Strategie kann die Anwendung der Basisfunktion sein: eine effektive Wochenend- und Nachtabsenkung mithilfe des Nutzerinnen- und Nutzerfeedbacks energieeffizient regeln und iterativ parametrieren. Für dieses Ziel sind nur geringe Anpassungen an das jeweilige Gebäude nötig. In einem zweiten Schritt sollte es das Ziel sein, den Tagesbetrieb durch das Feedback der Büronutzerinnen und Büronutzer effizienter zu gestalten. In diesem Fall wäre die Nutzung der ComfortLab-Plattform in Abstimmung mit den Gebäudespezifika nötig. Eine Übersicht möglicher Absenkstrategien, die im Rahmen des Projekts identifiziert wurden und mit denen deutliche Einsparpotenziale erreicht werden könnten, ist dem Anhang zu entnehmen.

(3) Weiterentwicklung der Plattform-Funktionen

Für das Facility-Management und im ComfortHub umfasst die technische Weiterentwicklung der Plattform-Funktionen durch IT-Expertinnen und Experten unter anderem:

- Gebäude-Insight-Tool: Um die Plattform optimal einzurichten, bedarf es vorab Gebäude- und Nutzerdaten, die in die Plattform eingepflegt werden müssen, z. B. Anzahl der Wärmestränge, Anzahl und Ort der Büros (Büronummern). Eine Abfragemaske für nötige Daten könnte diese Eingabe erleichtern.
- KI-unterstützte Auswertung der Ergebnisse: Die aufbereitete Darstellung der Ergebnisse zu (potenziellen) Wärmeenergieeinsparungen, Verbräuchen sowie zu den Raumklima-Abstimmungen wurden bisher durch die Begleitforschung vorgenommen. Die zukünftige Plattform sollte diese Auswertung automatisiert und KI-basiert vornehmen können, um u. a. während des Betriebs Empfehlungen für eine regelgerechte und energieeffiziente Steuerung der Heizungsanlage vorzunehmen (z. B. Darstellung der Einflussfaktoren am Gesamtverbrauch). Dadurch könnten Teile der Begleitforschung automatisiert erfolgen und die Übertragbarkeit und Skalierung der ComfortLab-Plattform unterstützen.
- Darstellung der Änderungen der Vorlauftemperatur sowie die Möglichkeit zur Planung angestrebter Änderungen in der Wochenend- und Nachtabsenkung.

-
- Automatisierte, regelmäßige Updates mit erreichten Wärmeenergieeinsparungen per Mail oder Push-Notifikation.
 - Schnittstelle zur Unterstützung der Nachhaltigkeits-Berichterstattung (ESG-Reporting).

Für Büronutzerinnen und Büronutzer und die ComfortStripes umfasst die Weiterentwicklung der Plattform-Funktionen unter anderem:

- Automatisierte Erfassung der Raumtemperatur über kommunikative Temperatursensoren.
- Planungstool zur Auswahl flexibler Arbeitsplätze und Kommunikation von Remote Work.
- Automatisierte, regelmäßige Updates mit erreichten Wärmeenergieeinsparungen per Mail oder Push-Notifikation.

Ausblick

Die im Projekt gesammelten Erfahrungen haben gezeigt, dass heutige Strategien zur Verbesserung der Energieeffizienz in Büro- und Verwaltungsgebäuden meist entweder nur die alltäglichen Verhaltensmuster der Nutzerinnen und Nutzer, die technische Betriebsführung oder die Kommunikationswege zwischen den Büronutzerinnen und Büronutzern und dem Facility Management betrachten. Das hat zur Folge, dass die Nutzerinnen und Nutzer durch ihr energieintensives Verhalten den Gebäudebetrieb erheblich beeinflussen und ihnen gleichzeitig keine Möglichkeiten und Werkzeuge an die Hand gegeben werden, um ihre Verbräuche effektiv zu reduzieren. Auch auf Seiten des Facility Managements konnten mit dem Projekt zahlreiche Herausforderungen identifiziert werden, die in ihrem Zusammenspiel mit anderen Faktoren zu immensen Energieverbräuchen führen, womit öffentliche Gebäude leichthin als schlafende Riesen der Energiewende gesehen werden können.

Die ComfortLab-Plattform wurde im Rahmen des Projekts als innovativer und nutzerzentrierter Lösungsansatz zur Unterstützung des Energieeinsparverhaltens von Nutzerinnen und Nutzern in Büro- und Verwaltungsgebäuden in mehreren Iterationsschleifen entwickelt und prototypisch in zwei Heizperioden im realen Betrieb erprobt. Die Ergebnisse des Projekts haben gezeigt, dass eine nutzerzentrierte Betriebsführung notwendig ist, um höhere Einsparziele in der Energie- und Ressourceneffizienz tatsächlich zu erreichen. Diese Erkenntnis ist unter anderem darauf zurückzuführen, dass bei der nutzerzentrierten Betriebsführung die unterschiedlichen Nutzerinnen und Nutzer des Gebäudes (Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter, technisches Personal, Facility Management) in die Entwicklung und Umsetzung einbezogen werden und ihnen mithilfe unterschiedlicher Feedbacksysteme eine Interaktion mit der Plattform ermöglicht wird. Dabei kann die entwickelte ComfortLab-Plattform als Gesamtsystem einer nutzerzentrierten Betriebsführung verstanden werden, die diese Verzahnung unterschiedlicher Bausteine ermöglicht und dem BMUV ein geeignetes Werkzeug an die Hand gibt, um langfristig das Potenzial einer effizienten Anlagentechnik im Zusammenspiel mit einem energiesparenden Nutzerverhalten am Arbeitsplatz heben zu können.

Für eine zukünftige Marktreife und die Anwendung von ComfortLab in anderen öffentlichen Liegenschaften wird empfohlen, die bestehende Plattform in ihrem Verständnis und ihren Funktionen stetig weiterzuentwickeln und sie im Rahmen einer großflächigen Rollout-Strategie in weiteren öffentlichen Liegenschaften zu testen, um tiefere Erkenntnisse zur Skalierung und Übertragbarkeit der Plattform zu erhalten.

Mit der Implementierung der aus diesem Projekt hervorgegangenen Maßnahmen in den Betrieb öffentlicher Verwaltungsgebäude können nach Schätzung der Autorinnen und Autoren bis zu 30 % des derzeitigen Wärmeenergieverbrauchs reduziert werden. Mit dem Einsatz der ComfortLab-Plattform zur interaktiven und nutzerzentrierten Betriebsführung könnte das BMUV aufgrund der zu erwartenden Kosten-, Energie- und Ressourcen- sowie CO₂-Einsparungen eine Vorbildfunktion für andere öffentliche Büro- und Verwaltungsgebäude übernehmen und somit einen wesentlichen Beitrag zum Erreichen des Ziels eines klimaneutralen Gebäudebestands leisten.

Literaturverzeichnis

- Baedeker, C.; Piowar, J.; Themann, P.; Grinewitschus, V.; Krisemendt, B.; Lepper, K.; Zimmer, C.; Geibler, J. von, 2020: Interactive Design to Encourage Energy Efficiency in Offices: Developing and Testing a User-Centered Building Management System Based on a Living Lab Approach. *Sustainability*, 12. Jg. (17): 6956.
- Birth, T.; Eggers, N., 2020: Bewertung der Effizienz von Power-to-X-Verfahren mittels VDI 4663. "Efficiency First" am Beispiel der Ressourceneffizienz. Berlin.
- Bundesregierung, 2022: Verordnung zur Sicherung der Energieversorgung über kurzfristig wirksame Maßnahmen. Kurzfristenergieversorgungssicherungsmaßnahmenverordnung – EnSikuMaV. Berlin. Zugriff: <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/E/ensikumav.pdf> [abgerufen am 20.06.2024].
- DGUV – Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V., 2016: Klima im Büro: Antworten auf die häufigsten Fragen. Berlin.
- e-genius – Initiative offene Bildung in Technik und Naturwissenschaften, 2024: Bewertung der thermischen Behaglichkeit. Wien. Zugriff: <https://www.e-genius.at/lernfelder/energieeffiziente-gebaeudekonzepte/thermische-behaglichkeit/bewertung-der-thermischen-behaglichkeit> [abgerufen am 06.06.2024].
- Ember – Sandbag, 2024: Entwicklung des Emissionsfaktors der Stromerzeugung in Deutschland und Frankreich im Zeitraum 2000 bis 2023 (in g CO₂-Äquivalent pro Kilowattstunde Strom). Hamburg. Zugriff: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1421117/umfrage/emissionen-strom-deutschland-und-frankreich/> [abgerufen am 11.06.2024].
- Greenhouse Media GmbH, 2024: Photovoltaik Wirkungsgrad. Hamburg. Zugriff: <https://photovoltaik.org/photovoltaikanlagen/solarzellen/photovoltaik-wirkungsgrad> [abgerufen am 11.06.2024].
- Sankol, B., 2022: Modul Energieeffiziente Anlagensysteme im Wintersemester 2021/22. Hamburg. Zugriff: https://www.researchgate.net/publication/359369433_Modul_Energieeffiziente_Anlagensysteme_im_Wintersemester_202122 [abgerufen am 20.06.2024].
- Sankol, B.; Keichel, C.; Volta, D., 2018: VDI 4663: Bewertung von Energie- und Stoffeffizienz Methode der grenzwertorientierten Kennzahlen. *Brennstoff-Waerme-Kraft*, Bd. 70 (2018) Nr. 7/8: 3.
- Wagner, A.; Schakib-Ekbatan, K., 2010: Nutzerzufriedenheit als ein Indikator für die Beschreibung und Beurteilung der sozialen Dimension der Nachhaltigkeit: Abschlussbericht; Mit Leitfaden INKA (Instrument für Nutzerbefragungen zum Komfort am Arbeitsplatz). Stuttgart.
- Wapler, J.; Miara, M.; Günther, D., 2019: Reale Effizienz von Wärmepumpen im Bestand. *HLH*, 70. Jg. (02): 24–28.
- Wille, J., 2024: Energie im Haushalt sparen mit KI für den Saugroboter. Frankfurt. Zugriff: <https://www.fr.de/wirtschaft/energie-im-haushalt-sparen-mit-ki-fuer-den-saugroboter-92869388.html> [abgerufen am 06.06.2024].
- Zimmer, C., 2024: Twistid GmbH & Co. KG. Düsseldorf. Zugriff: <https://www.twistid.de> [abgerufen am 06.06.2024].

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Regelkreis der Energieverschwendung	8
Abbildung 2 Aktivitäten innerhalb der vier Iterationsschritte.....	9
Abbildung 3 Datenfluss- und Infrastrukturschema projektübergreifend	12
Abbildung 4 Raum- und Außentemperaturen im Frühjahr/Sommer 2020 in Bonn	14
Abbildung 5 Beispieldarstellung der serverseitigen Plattform	15
Abbildung 6 Zusammenhang zwischen PMV und PPD.....	16
Abbildung 7 Behaglichkeitsmessung in Bonn, PMV während der Arbeitszeit und Homeoffice Tätigkeit.....	16
Abbildung 8 Durchschnittliche Raumtemperatur der BAPPU-Messungen außerhalb der Arbeitszeiten	17
Abbildung 9 Darstellung verschiedener Komponenten der ComfortLab-Plattform.....	22
Abbildung 10 Funktionsweise der ComfortLab-Plattform	23
Abbildung 11 Nutzung der ComfortLab-Plattform, Schritte 1 bis 3.....	23
Abbildung 12 Nutzung der ComfortLab-Plattform, Schritt 4	24
Abbildung 13 Täglicher Heizenergieverbrauch über der durchschnittlichen täglichen Außentemperatur.....	26
Abbildung 14 Durchschnittliche Temperaturen im Passivhausbereich Berlin	27
Abbildung 15 Wärmeverbrauch in Berlin im zeitlichen Verlauf.....	28
Abbildung 16 Wärmeverbrauch in Bonn im zeitlichen Verlauf.....	29
Abbildung 17 Umfrageergebnisse zur Wohlfühltemperatur im Büro (Berlin und Bonn).....	30
Abbildung 18 Aggregierte Abstimmungsergebnisse in Berlin	31
Abbildung 19 Aggregierte Abstimmungsergebnisse in Bonn	31
Abbildung 20 Umfrageergebnisse individuelles Temperaturempfinden (Heizperiode 2022/23)	33
Abbildung 21 Umfrageergebnisse Vorbildfunktion öffentlicher Gebäude	34
Abbildung 22 Auswertung der Antworten zur Vorbildfunktion öffentlicher Gebäude.....	34
Abbildung 23 Umfrageergebnisse Feedback Haustechnik (1= sehr wichtig, 7= überhaupt nicht wichtig)	35
Abbildung 24 Umfrageergebnisse 19 Grad im nächsten Winter (1= stimme zu, 7= stimme nicht zu)	36
Abbildung 25 Übersicht zu den drei verschiedenen Prototypen.....	37
Abbildung 26 Raumtemperaturmessung zwischen Januar und Juni 2022	38
Abbildung 27 CO ₂ -Messung zwischen Januar und Juni 2022	38
Abbildung 28 Vergleich der Raumlufttemperatur mit der Raumluftqualität an Wochenenden.....	39
Abbildung 29 Vergleich der Raumlufttemperatur mit der Raumluftqualität in der Nacht.....	40
Abbildung 30 Vergleich der Raumlufttemperatur mit der Raumluftqualität in der Nacht.....	40
Abbildung 31 Energiebedarf und mögliches physikalisches Optimum von Prozessen	42
Abbildung 32 Leistungszahl in Abhängigkeit der Verdampfungs- und Verflüssigungstemperatur.....	47
Abbildung 33 Monatsweise Nutzenergie der Wärmepumpe laut Energieausweis	49
Abbildung 34 Monatsweise Endenergie der Wärmepumpe laut Energieausweis	50

Abbildung 35 Verteilung der aufgenommenen elektrischen Leistungsaufnahme der Geräte	52
Abbildung 36 ComfortLab durchbricht den Regelkreis der Energieverschwendung.....	55
Abbildung 37 Nutzerzentrierte Betriebsführung im ComfortLab	56
Abbildung 38 Persona 1: Die Kompromissbereite.....	65
Abbildung 39 Persona 2: Der*Die Kälteempfindliche	65
Abbildung 40 Persona 3: Der*Die Vermeider*in	66
Abbildung 41 Auszug aus den Mails an das Facility Management.....	67
Abbildung 42 Auszug aus den Mails an das Facility Management.....	67
Abbildung 43 Sankey-Diagramm Stromfluss	72
Abbildung 44 Sankey-Diagramm Wärmeenergie.....	73
Abbildung 45 Sankey-Diagramm Kälteenergie	74

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Übersicht der wesentlichen Aktivitäten zur Grundlagenermittlung	10
Tabelle 2 Wesentliche Parameter der BMUV-Liegenschaften Berlin und Bonn	11
Tabelle 3 Übersicht der Anzahl der Teilnehmerinnen und Teilnehmer in den jeweiligen Heizperioden	21
Tabelle 4 Übersicht relevanter Daten zur Testphase in der Heizperiode 2021/2022	30
Tabelle 5 Abkürzungen und Formelzeichen bei der Anwendung des physikalischen Optimums	44
Tabelle 6 Übersicht der im Projekt identifizierten Absenkstrategien	71
Tabelle 7 Nutzungsbereiche und Simulationsparameter BMUV Berlin, Neubau	75

Anlagen

Personas auf Basis der Abschlussumfrage Ergebnisse Mai 2023 (Kapitel 3.2)

Abbildung 38
 Persona 1: Die Kompromissbereite

Bedürfnisse & Anforderungen an das ComfortLab

Persona 1: Die Kompromissbereite



Arbeitssituation

- Arbeitet vorwiegend im Büro
- Lebt klimabewusst und ist offen für Maßnahmen

Bedürfnisse & Probleme

- Kann etwas "Kälte" tolerieren
- Möchte, dass auf ihr Feedback eingegangen wird

Vorschläge

- 20°C als Kompromiss
- Updates zu den erreichten Einsparungen

Ein bis zwei Grad wären deutlich angenehmer. Ich hatte oft kalte Füße, völlig ungewohnt bei mir.

"19 Grad ist zu kalt, 20 Grad wären für mich OK, wenn es nochmal sein muss."

19 Grad fand ich zu kalt, 19,5 Grad fände ich okay. Morgens hatte ich oft 18 oder 18,5 Grad. Raum erwärmte sich erst durch mich dann auf 19 Grad.

Vielleicht wären 20°C besser. Zudem gab es keine Kontrolle und viele haben trotzdem stark geheizt.

Vielleicht könnte man sich bei der Vorgabe auf 20° C einigen.

Ich unterstütze eine festgelegte Raumtemperatur, wenn dadurch der Energieverbrauch erheblich gesenkt werden kann, sofern diese nicht dazu führt, dass man im Büro friert.

Quelle: Wuppertal Institut

Abbildung 39
 Persona 2: Der/Die Kälteempfindliche

Bedürfnisse & Anforderungen an das ComfortLab

Persona 2: Der*Die Kälteempfindliche



Arbeitssituation

- Arbeitet vorwiegend im Büro
- Möchte bzw. kann nur wenig oder gar nicht in das HomeOffice

Bedürfnisse & Probleme

- Komforttemperatur nötig z.B. gesundheitsbedingt
- Zu kalt: schlechter Isolierung, Durchzug, offenen/defekte Außentüren
- Fehlende Zeit im Arbeitsalltag zur Beantwortung der E-Mail-Abfragen

Vorschläge

- Heiztechnik und Isolierung optimieren
- Regelmäßige Reminder: Warum sind Einsparungen wichtig?

"Die Vorgabe lag zwar bei 19 C Grad, in meinem Büro in der vierten Etage und im äußersten Winkel des Gebäudes kamen diese 19 C Grad jedoch nicht an, so dass die wirkliche Temperatur meist nur bei 17,5 bis 18 C Grad lag."

"Das Problem ist weniger die 19°C Raumtemperatur sondern die undichten Fenster. Zug und niedrige Temperaturen haben sicher auch noch zum höheren Krankenstand beigetragen. Zudem sind die alten Gebäude und Heizungsanlagen nicht darauf ausgelegt. Alles in allem eine gute Idee, die aber nur zum Teil wirklich praktikabel ist."

"Scheinbar gibt es im Haus sehr unterschiedliche "Klimazonen", ich hörte von Kollegen, bei denen die Raumtemperatur immer deutlich unter 19 Grad lag und die kleidungstechnisch wie im Outdoorcamp agieren mussten. Das geht gar nicht."

"Das Problem ist nicht nur das Büro selbst, sondern auch die starke Zugluft durch undichte Fenster und das Temperaturdelta zu den total ausgekühlten Fluren. Teilweise wurde das Büro gar nicht wärmer als 17/18 Grad. Wenn man dann mit Skiunterwäsche ins Büro muss, ist das nur noch bedingt lustig."

Quelle: Wuppertal Institut

Abbildung 40
Persona 3: Der/Die Vermeider/in

Bedürfnisse & Anforderungen an das ComfortLab

Persona 3: Der*Die Vermeider*in



Arbeitssituation

- Eher HomeOffice / außer Haus
- Büro ist aufgrund häufiger Abwesenheit meist zu kalt

Bedürfnisse und Probleme

- Bedarf an Komforttemperatur nach längerer Abwesenheit
- Geringes Interesse an ComfortLab
- E-Mails eher lästig / überflüssig

Vorschläge

- Wegen HomeOffice wenig Handlungsbedarf
- Trotzdem: Updates zu Einsparungen durch ComfortLab

*"Es hat ganzheitlich betrachtet nicht viel gebracht, da **viele dadurch mehr im HO gearbeitet haben** und dadurch der Energieverbrauch in privaten Haushalten gestiegen ist. **Effektiv wurde die Last auf Privatpersonen übertragen**, die dadurch höhere Energiekosten zu tragen hatten. Wurde dies in Bezug auf den gesenkten Energieverbrauch berücksichtigt? Nein."*

*"wenn ich morgens ins Büro kam, **herrschten manchmal nur 13 °C**, bis ich die 19 Grad erreicht hatte (wenn diese überhaupt erreicht wurden), war der Arbeitstag schon fast rum."*

*"Es ist nicht überzeugend, dass **Mitarbeiter*innen im Büro frieren müssen und stattdessen ihr Home-Office angenehm (und auf eigene Kosten) heizen**, während nichts an dem grundsätzlich zu schlecht gedämmten Gebäude mit zugigen Fenstern und einer prähistorischen Heizungsanlage verbessert wird (...)"*

Quelle: Wuppertal Institut

Design Vorschläge – Auszug aus der Mail-Erinnerung an das Facility Management (Kapitel 6)

Abbildung 41
Auszug aus den Mails an das Facility Management



Design: InbesterGesellschaft 2023)

Abbildung 42
Auszug aus den Mails an das Facility Management



Design: InbesterGesellschaft 2023

Checklisten/Empfehlungen für die Nutzung von ComfortLab in öffentlichen Gebäuden

Infobox 5: Checkliste mit technischen Implementierungsmaßnahmen für einen reibungslosen Betrieb der ComfortLab-Plattform

Bezüglich der technischen Gegebenheiten vor Ort kann ein höherer Modernisierungsstand der Anlagentechnik den Handlungsspielraum des Facility Managements für individuelle Temperaturregelungen sowie ein angepasstes Energiemanagement deutlich erhöhen.

Vorteilhaft ist die weitestgehend verbreitete Nutzung des BACnet-Standards für die Kommunikation zwischen den Gewerken und Anlagen in der Gebäudeautomation in öffentlichen Gebäuden. Dieser Standard bietet gewerke- und herstellerübergreifend ein einheitliches Datenmodell (siehe auch AMEV Empfehlungen BACnet und GA allgemein). Die nachfolgende Checkliste bietet eine Übersicht aller technischen Implementierungsmaßnahmen, die für eine reibungslose Installation und Betrieb der Plattform empfohlen werden:

- Installation Edge-Device pro Liegenschaft (Schnittstelle Gebäude und Plattform)
- Checkliste für Rollout, um Schnittstellen einzurichten (Gebäude- und Nutzerdaten)
- Bestandsgebäudetyp/GLT-System Typ A (alte Technik, keine Messtechnik)
- Bestandsgebäudetyp/GLT -System Typ B (offenes System; geschlossenes System)
- Funktechnologie nachrüsten oder hauseigenes Netzwerk nutzen
- Abstimmung für vorliegende Büropläne: Zuordnung für Heizkreise, Raumplanungsbücher/Daten aus dem System
- Rechtsfragen; Datenschutz
- Onboarding Facility Management; beteiligte Personen – Heizungstechnikerinnen und Heizungstechniker; Betreiberinnen und Betreiber; Leitung FM; Fremdbetrieb; Datenschutz Akteure
- Server-Anforderungen; Steckdose ausfallsicher, wenn nicht erfüllt dann Nachrüstung.
- Sicherstellung einer stabilen Netzarchitektur und Dateninfrastruktur, damit alle relevanten Daten zuverlässig ausgelesen und zusammengeführt werden können sowie eine gut funktionierende API als Grundvoraussetzung für das System, um dezentral und sicher über mehrere Server zu kommunizieren
- Geeignete Maßnahme(n) zur Bewältigung von Herausforderungen beim Zugang zum gebäudeseitigen Netzwerk (z. B. hoher Aufwand aufgrund von Sicherheitsanforderungen und detaillierten Abstimmungen mit der IT) wie beispielsweise das Aufspannen und Nutzen eigener (Funk-)Netzwerke
- Maßnahmen zur Bewältigung und/oder Minimierung von technischen Herausforderungen bei etwaigen Absenkstrategien wie beispielsweise eine Trägheit des Anlagensystems, die Belüftung von Besprechungsräumen mit Außenluft oder die aufgrund von Hygienevorschriften notwendigen Mindesttemperaturen in Gemeinschaftsküchen zur Legionellenprävention bestehen, die die technischen Möglichkeiten der Umsetzung einer ComfortLab-Plattform einschränken.

Infobox 6: Empfehlungen zur Förderung eines energieeffizienten Verhaltens seitens der Nutzerinnen und Nutzer und ihres Umgangs mit der ComfortLab-Plattform

Entwicklung einer Checkliste mit spezifischen Empfehlungen, um die Büronutzerinnen und Büronutzer für energieeffiziente Strategien zu sensibilisieren und um sie (stärker) in den Prozess der Entwicklung, Durchführung und Verstetigung von Maßnahmen wie der Implementierung des ComfortLabs in öffentlichen Liegenschaften einzubeziehen. Die Checkliste sollte Empfehlungen dazu enthalten:

- wie der Umgang der Nutzerinnen und Nutzer mit dem ComfortLab erhöht werden kann,
- wie ein energieeffizientes Nutzerverhalten gefördert werden kann,
- wie etwaige technische Herausforderungen möglichst verhindert/minimiert werden können,
- und wie das Nutzererlebnis gesteigert werden kann.

Die folgenden Aufzählungen zeigen diesbezüglich neue Funktionen, deren Integration in die ComfortLab-Plattform für ein verbessertes Nutzererlebnis und die Sichtbarmachung weiterer Energieeinsparpotenziale empfohlen werden:

- Energieeinsparpotenziale und erreichte Einsparungen (z. B. über individuelle Verbrauchsübersichten zu den genutzten elektronischen Geräten) visualisieren
- Funktion zur Angabe von Homeoffice-Tagen, damit E-Mail-Abfragen nur an den Vor-Ort-Arbeitstagen versendet werden
- Funktion der flexiblen Anpassung bei wechselnden Arbeitstagen
- Automatisierte Erfassung der tatsächlichen Temperatur
- Empfehlungen aussprechen: Mail, Merkblatt oder Info-Veranstaltung zum optimalen Umgang mit ComfortLab (z. B. Platzierung des Tischthermometers etc.)
- Regelmäßige Updates versenden, welche Einsparungen in der Heizperiode bereits erreicht wurden
- Transparenten Analysebericht verschicken: Aufbereitung der tatsächlich erreichten Einsparungen und zentralen Ergebnissen aus der Heizperiode

Infobox 7: Empfehlungen zur optimalen Bedienbarkeit des ComfortHubs

Mit der Implementierung der ComfortLab-Plattform kann erreicht werden, dass sich die notwendige Kommunikationslücke zwischen den Büronutzerinnen und Büronutzern und dem Facility Management schließt und eine Zusammenführung der tagesaktuellen Analysen zum durchschnittlichen und individuellen Wohlbefinden aller Büronutzerinnen und Büronutzer und den technischen Parametern und Messdaten des Heizsystems stattfindet. Damit ist das Facility Management in der Lage, sich ein umfassenderes Bild über das Wohlbefinden zu machen und ein Absenken der Vorlauftemperaturen im Abgleich einrichten zu können.

Die folgenden **Checklisten** bieten dahingehend Empfehlungen zur

- optimalen Bedienbarkeit des ComfortLab und Überwindung technischer Herausforderungen
- Steigerung der Motivation seitens der Technikerinnen und Techniker des Facility Managements zur Interaktion und langfristigen Integration des ComfortLabs in ihren Arbeitsalltag

Nachfolgend werden mit der ersten Checkliste **Empfehlungen zur optimalen Bedienbarkeit** des ComfortHubs aufgezeigt:

- Auskunft über die Position der Heizkörperthermostate in den Büros
- Auskunft über die An- und Abwesenheitstage der Büronutzerinnen und Büronutzer (Datenschutzvorgaben beachten)
- Neue Filter für eine verbesserte Darstellung der Werte
- Darstellung, die anzeigt, wann die Vorlauftemperatur geändert wurde oder wann die Technikerin oder der Techniker sie ändern möchte

Die zweite Checkliste zeigt **Empfehlungen zur Steigerung der Motivation** seitens des Facility Managements:

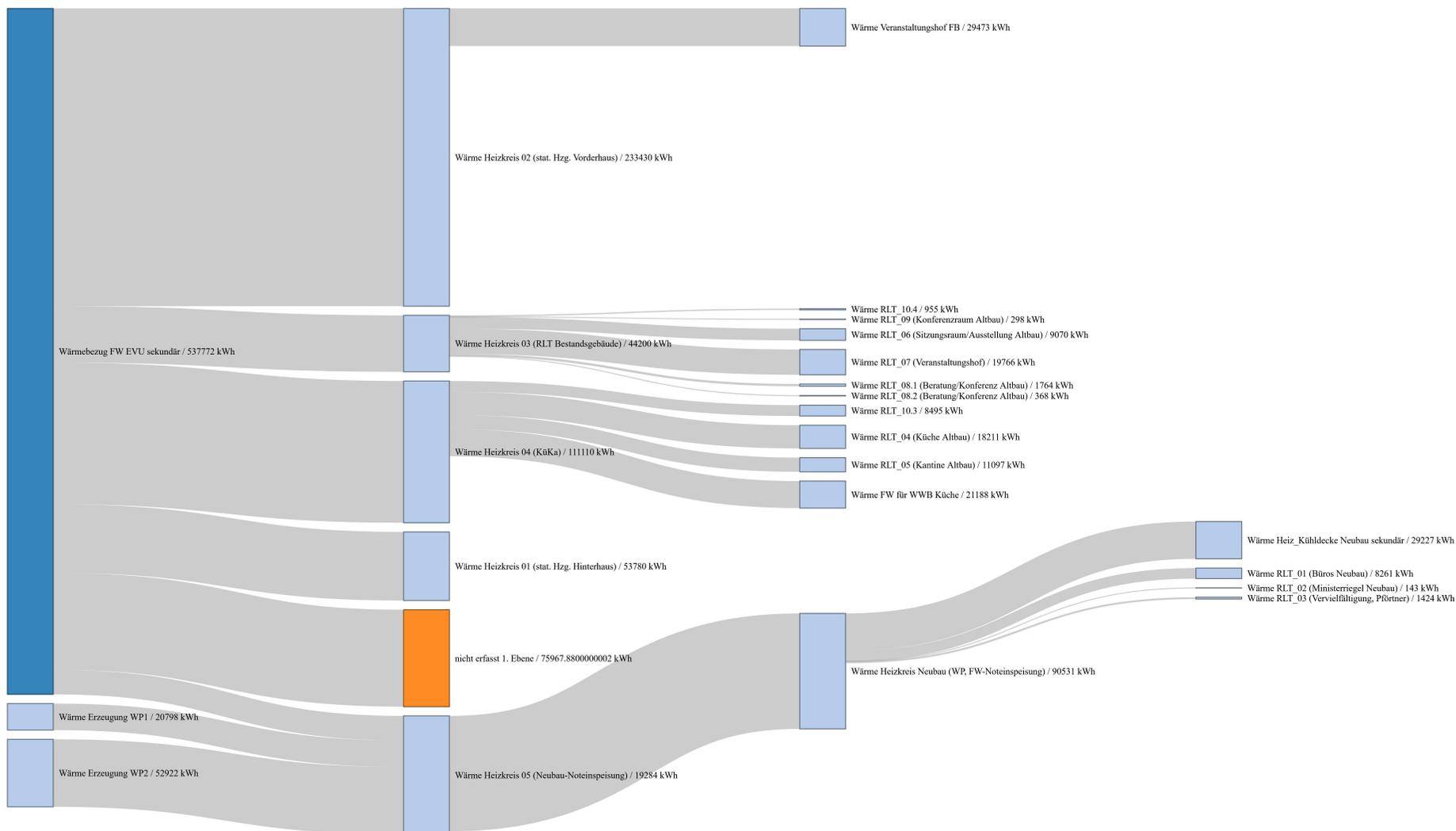
- Versenden regelmäßiger Mails an Technikerinnen und Techniker des Facility Managements mit erreichten Einsparungen oder neuen Funktionen im ComfortHub
- Sprechstunde/Ansprechpartnerin oder Ansprechpartner: Technikerinnen und Technikern die Möglichkeit geben, sich bei Problemen zum ComfortHub an eine festgelegte Stelle zu wenden

Tabelle 6
Übersicht der im Projekt identifizierten Absenkstrategien

Absenkstrategien	
Wochenend- und Nachtabsenkung	Absenkstrategien haben hohe Potenziale bei Einsparungen. Oft werden diese aus der Sorge heraus, zum Wochen- bzw. Arbeitsbeginn zu kühle Räume zu haben oder um entsprechende Kanabilisierungseffekte wie das volle Aufdrehen der Heizventile zu vermeiden, nicht vollständig ausgenutzt. Eine Plattform wie ComfortLab bietet dem Facility Management die Möglichkeit, das Wohlbefinden tagesaktuell zu analysieren und verschiedene Absenkstrategien im Abgleich mit dem Wohlbefinden zu erproben.
Absenkstrategie „Schmerzgrenze“ Nutzerinnen und Nutzer empfinden die Büroräume als zu kalt	Die Rückmeldungen des technischen Personals haben gezeigt, dass etwaige Herausforderungen insbesondere im individuellen Temperaturempfinden von unterschiedlichen Personen liegen, wie beispielsweise einem zielgerichteten Umgang mit einer besonders kälteempfindlichen Person am entsprechenden Heizstrang. Wenn die Vorlauftemperatur zu stark reduziert wurde und Nutzerinnen und Nutzer die Büroräume als zu kalt empfinden, muss die Temperatur wieder etwas erhöht werden.
Nutzerinnen und Nutzer empfinden die Büroräume als zu warm	Eine Plattform wie ComfortLab stellt ebenfalls fest, wenn den Büronutzerinnen und Büronutzern zu warm ist und die Vorlauftemperaturen entlang bestimmter Heizstränge reduziert werden können. Es hat sich gezeigt, dass das regelmäßig auch mit der Gebäudephysik zusammenhängt, zum Beispiel wenn die Sonneneinstrahlung bestimmte Fassaden zusätzlich erwärmt und die Wärmebereitstellung durch die Heizungsanlage reduziert werden kann.

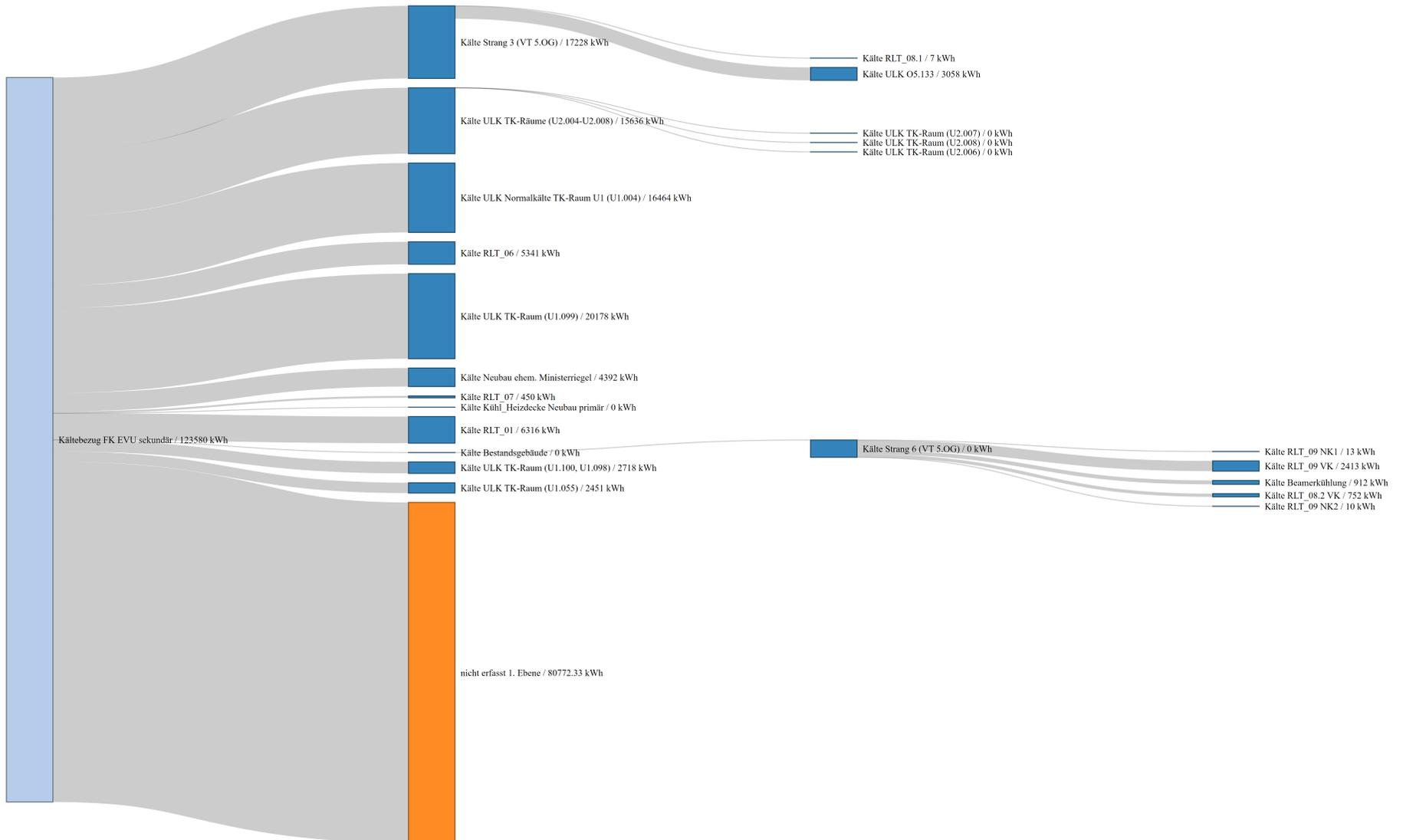
Quelle: Wuppertal Institut

Abbildung 44
Sankey-Diagramm Wärmeenergie



Quelle: EBZ Business School GmbH

Abbildung 45
Sankey-Diagramm Kälteenergie



Quelle: EBZ Business School GmbH

Tabelle 7
Nutzungsbereiche und Simulationsparameter BMUV Berlin, Neubau

Bereich	001 N_01_HKL		002 N_04_HKL		003 N_16_HL		004 N_17_H		005 N_19_H		006 N_20_HL		007 N_21_HKL		008 N_21_HL				
Nutzungsprofil	Einzelbüro		Besprechung		WC/ Sanitärräume		Sonstige Aufenthaltsräume		Verkehrsfläche		Lager		Nebenflächen		Rechenzentrum				
Bezugsfläche [m ²]	849		372,8		47		83		1545,6		105		92		66				
Wärmeübergabe	RH 35/30	RLT	RH 60/40	RLT	RH 35/30	RLT	RH 35/30	RLT	RH 35/30	RLT	RH 35/30	RLT	RH 60/40	RLT	RH 60/40	RLT	Summe RH 35/30	Summe RH 60/40	Summe RLT
Januar [kWh]	3.330	990	1.584	1.567	25	1.287	1.813	0	7.061	0	239	5	61	4	0	70	12.469	1.645	3.924
Februar [kWh]	2.576	824	1.312	1.302	23	1.103	1.541	0	5.033	0	204	4	53	3	0	59	9.377	1.365	3.294
März [kWh]	1.484	629	422	994	22	982	1.106	0	327	0	184	3	52	3	0	45	3.123	474	2.655
April [kWh]	183	255	0	402	13	600	323	0	0	0	104	1	36	1	0	18	623	36	1.278
Mai [kWh]	0	74	0	117	3	353	49	0	0	0	31	0	20	0	0	6	82	20	551
Juni [kWh]	0	21	0	34	0	215	5	0	0	0	2	0	10	0	0	2	8	10	272
Juli [kWh]	0	0	0	0	0	145	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	4	145
August [kWh]	0	0	0	0	0	156	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0	0	5	156
September [kWh]	57	0	0	0	5	141	88	0	0	0	47	0	18	0	0	0	197	18	141
Oktober [kWh]	685	266	111	419	16	664	629	0	0	0	127	1	36	1	0	19	1.457	147	1.370
November [kWh]	2.289	693	1.184	1.094	23	1.032	1.455	0	4.650	0	195	3	52	3	0	49	8.612	1.236	2.875
Dezember [kWh]	3.479	1.021	1.853	1.614	24	1.313	1.920	0	8.171	0	241	5	61	4	0	73	13.836	1.914	4.029
Jahr [kWh]	14.082	4.774	6.467	7.544	156	7.991	8.929	0	25.243	0	1.375	22	408	19	0	340	49.785	6.874	20.690

Quelle: EBZ Business School GmbH