

User Feedback for Energy Efficiency in Buildings

FEELings

M. Monsberger, D. Koppelhuber,
S. Pabst, V. Sabol, H. Gursch,
E. Schlager, O. Prentner, S. Singh,
M. Herzlieb, M. Wedam

Berichte aus Energie- und Umweltforschung

39/2020

Liste sowie Downloadmöglichkeit aller Berichte dieser Reihe
unter <http://www.nachhaltigwirtschaften.at>

Impressum

Medieninhaber, Verleger und Herausgeber:
Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie,
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)
Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Verantwortung und Koordination:
Abteilung für Energie- und Umwelttechnologien
Leiter: DI Michael Paula

Auszugsweise Abdruck ist nur mit Quellenangabe gestattet. Es wird darauf verwiesen, dass alle Angaben in
dieser Publikation trotz sorgfältiger Bearbeitung ohne Gewähr erfolgen und eine Haftung der Republik
Österreich und der Autorin/des Autors ausgeschlossen ist. Nutzungsbestimmungen:
<https://nachhaltigwirtschaften.at/de/impressum/>

User Feedback for Energy Efficiency in Buildings

FEELings

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Michael Monsberger,
DDipl.-Ing. Daniela Koppelhuber, Dipl.-Ing. Siegfried Pabst
TU Graz

Dipl.-Ing. Dr.techn. Vedran Sabol, Dipl.-Ing. Heimo Gursch,
Dipl.-Ing. Elke Schlager, Dipl.-Ing. Oliver Prentner, Santokh Singh
KNOW-CENTER GmbH

Ing. Michael Herzlieb
EAM-Systems GmbH

Ing. Dipl.-Ing. Michael Wedam
EUDT Energie- u. Umweltdaten Treuhand GmbH

Graz, Mai 2020

Ein Projektbericht im Rahmen des Programms



des Bundesministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Energie,
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)

Vorbemerkung

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

Um die Wirkung des Programms zu erhöhen sind die Sichtbarkeit und leichte Verfügbarkeit der innovativen Ergebnisse ein wichtiges Anliegen. Daher werden nach dem Open Access Prinzip möglichst alle Projektergebnisse des Programms in der Schriftenreihe des BMK publiziert und elektronisch über die Plattform www.NachhaltigWirtschaften.at zugänglich gemacht. In diesem Sinne wünschen wir allen Interessierten und AnwenderInnen eine interessante Lektüre.

DI Michael Paula
Leiter der Abt. Energie- und Umwelttechnologien
Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie,
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	8
Abstract	9
1. Einleitung.....	10
1.1. Ausgangssituation	10
1.2. Motivation für das Projekt	10
1.3. Stand des Wissens – Nationale und internationale Projekte.....	11
1.3.1. Projekte zur Analyse von Messdaten in Gebäuden und zum Lernen des Nutzerverhaltens.....	12
1.3.2. Projekte zu „Feedback durch direkte Eingaben der User“	13
1.3.3. Stand des Wissens im Projektkonsortium	14
1.4. Zielsetzung des Projekts	15
1.4.1. Projektziel 1 – Proof-of-Concept des Ansatzes	17
1.4.2. Projektziel 2 – Untersuchung von Methoden, wie mit diesem System die Energieeffizienz von Gebäuden erhöht werden kann.....	17
1.4.3. Projektziel 3 – Berücksichtigung datenschutzrechtlicher Aspekte und Sicherstellung der Privatsphäre der Gebäudenutzer.....	18
1.4.4. Projektziel 4 – Untersuchung der unterschiedlichen Wahrnehmung von Raumzuständen durch verschiedene Personengruppen	18
2. Projektinhalt	19
2.1. Projektstruktur	19
2.2. Inhalte der Arbeitspakete und methodisches Vorgehen	19
2.2.1. Definition und Umsetzung des User-Feedback-Systems.....	19
2.2.2. Case Studies.....	22
2.2.3. Datenanalyse und Rückkopplung des Feedbacks.....	23
3. Detaillierte Methodik und Ergebnisse.....	24
3.1. Anforderungsanalyse und Systemkonzept.....	24
3.1.1. Definition der Feedbackparameter der User	24
3.1.2. Definition Datenschnittstellen und Anlagenparameter	25
3.1.3. Anforderungen Datenauswertung und Parameter der Rückkopplung	26
3.1.4. Definition des Systemkonzepts sowie Spezifikation des Funktionsmusters	26
3.2. Nutzerintegration durch Anreizsysteme und intuitives User Interface Design	28
3.2.1. Erarbeitung der Behaglichkeitsabfrage	28

3.2.2.	Erarbeitetes Konzept für Nutzeranreiz und Nutzerakzeptanz	29
3.2.3.	Konzeption eines intuitiven User Interfaces	30
3.2.4.	Evaluierung und Nachjustierung der Anreizsysteme sowie der Feedbackabfrage	31
3.2.5.	Berücksichtigung datenschutzrechtlicher Aspekte	31
3.3.	Erstellung des Funktionsmusters	32
3.3.1.	Funktionsmuster für das Erfassen des Nutzerfeedbacks – die FEELings-App	32
3.3.2.	Erstellung der Datenbanken	35
3.3.3.	Funktionsmuster für das Abrufen von Statistiken und Informationen	38
3.3.4.	Inbetriebnahme und Wartung des Funktionsmusters	38
3.3.5.	Test der erstellten Funktionsmuster	39
3.4.	Case Studies	39
3.4.1.	Vorbereitung der Use Cases, Bereitstellung der Daten und Rollout	39
3.4.2.	Laufende Beurteilung der Datenqualität des Use Cases „Campus TU Graz“	41
3.4.3.	Laufende Begleitung der Nutzerinnen und Nutzer	44
3.5.	Datenanalyse und Rückkopplung des Feedbacks	50
3.5.1.	Vorbereitung der Datenanalysen und laufende (Offline-)Datenanalyse	50
3.5.2.	Interpretation der Daten und Ableitung von Feedback	51
3.5.3.	Rückkopplung von Feedback in das Gebäudeautomationssystem	56
3.5.4.	Vorhersagemodelle	59
3.6.	Einpassung der Projektergebnisse in das Programm „Stadt der Zukunft“	62
4.	Schlussfolgerungen	64
4.1.	Aus dem Projekt gewonnene Erkenntnisse sowie Übereinstimmung der Projektergebnisse mit den Projektzielen	64
4.1.1.	Erkenntnisse zu Projektziel 1: Proof-of-Concept des Ansatzes	64
4.1.2.	Erkenntnisse zu Projektziel 2: Untersuchung von Methoden, wie mit diesem System die Energieeffizienz von Gebäuden erhöht werden kann	64
4.1.3.	Erkenntnisse zu Projektziel 3: Berücksichtigung datenschutzrechtlicher Aspekte und Sicherstellung der Privatsphäre der Gebäudenutzer	65
4.1.4.	Erkenntnisse zu Projektziel 4: Untersuchung der unterschiedlichen Wahrnehmung von Raumzuständen durch verschiedene Personengruppen	65
4.2.	Bisherige und zukünftige Verwertungs- und Verbreitungsaktivitäten der Projektergebnisse durch das Projektteam sowie Potenzial	69
4.2.1.	Wirtschaftliche Verwertung der Projektergebnisse durch das Projektteam	70
4.2.2.	Wissenschaftliche Verwertung der Projektergebnisse durch das Projektteam	70
4.3.	Weitere Verarbeitung der Projektergebnisse sowie Potential	71
5.	Ausblick und Empfehlungen	72

6.	Verzeichnisse	73
6.1.	Abbildungsverzeichnis	73
6.2.	Tabellenverzeichnis	75
6.3.	Literaturverzeichnis	75

Kurzfassung

Energieeffizienz ist im Gebäudesektor von großer Bedeutung. Nach Angaben der Europäischen Kommission sind Gebäude für 40 % des Energieverbrauchs und für 36 % der CO₂-Emissionen in der Europäischen Union verantwortlich. Wie Studien zeigen, kann der Energieverbrauch durch Änderung des Nutzerverhaltens um bis zu 15 % reduziert werden. In ersten Forschungsprojekten wurde das Nutzerverhalten durch den Einsatz von Informations- und Kommunikationstechnologie analysiert und beeinflusst. Die Empfindungen der Gebäudenutzerinnen und -nutzer werden derzeit jedoch erst ansatzweise berücksichtigt.

Ziel des Forschungsprojekts FEELings war es, den Menschen in Gebäuden durch mobile Applikationen die Möglichkeit zu bieten, ein umfassendes Feedback über die empfundene Raumqualität zu geben. Dazu wurde ein neuartiges User-Feedback-System konzipiert und einem grundlegenden Proof-of-Concept unterzogen.

Die über das Feedbacksystem erhaltenen Daten wurden mit den korrelierenden messtechnisch erfassten Raumzuständen kombiniert. Unter Verwendung von Methoden der Datenanalyse wurden daraus ineffiziente Betriebsweisen identifiziert. In einem zweiten Schritt wurde dieses Feedback genutzt, um semi-automatisch bzw. automatisch Einstellungen an den gebäudetechnischen Systemen zu optimieren.

Übergeordnetes Ziel dieses Projektes war es, den Proof-of-Concept eines solchen Feedbacksystems zu zeigen und es in Hinblick auf dessen Anwendbarkeit für Energieeffizienz- und Komfortsteigerungen in Gebäuden zu untersuchen. Das im Projekt FEELings entwickelte Funktionsmuster für ein User-Feedback-System wurde anhand von zwei unterschiedlichen Use Cases getestet, um die grundlegende Anwendbarkeit zu zeigen.

Die Testphase in den Use Cases zeigte, dass das entwickelte System dazu beitragen kann, ein umfassendes Feedback von Nutzerinnen und Nutzern zu erheben, welches in Kombination mit raumklimatischen Messdaten und Anlagenzuständen verwendet werden kann, um Handlungsempfehlungen für den Gebäudebetreiber abzuleiten sowie Steuersignale für Gebäudeautomationsanlagen zu generieren. Das Projekt zeigte zudem, dass durch die Einbeziehung der Nutzerinnen und Nutzer Energieeinsparungen möglich sind. Im Rahmen des Use Cases Campus TU Graz wurden konkrete Maßnahmen gesetzt, um die Energieeffizienz von Gebäuden zu erhöhen.

Im Projekt FEELings spielten Aspekte der Privatsphäre und des Datenschutzes während der gesamten Projektlaufzeit eine wichtige Rolle. Daher wurde das Forschungsprojekt auch genutzt, um zu untersuchen, inwieweit durch ein derartiges Feedbacksystem in die Privatsphäre eingegriffen wird.

Die Projektergebnisse haben das Potential des FEELings-Systems aufgezeigt. Das entwickelte Funktionsmuster und die eingesetzten Technologien wurden umfassend getestet. Das Konzept wurde evaluiert und von den Nutzerinnen und Nutzern positiv angenommen. Nach der Entwicklung des Funktionsmusters im Rahmen dieses Forschungsprojekts könnte in einem nächsten Schritt die Entwicklung eines Prototyps folgen.

Abstract

Energy efficiency plays an important role in the building sector. According to the European Commission, buildings account for 40 % of energy consumption and 36 % of CO₂ emissions in the European Union. Studies have shown that a change in user behavior can reduce energy consumption by up to 15 %. Previous research projects used information and communication technologies to analyze and influence user behavior. However, the subjective well-being of building users has only been considered rudimentarily so far.

The objective of this research project was to develop mobile applications that allow building users to give comprehensive feedback about the indoor climate, e.g. with regard to thermal comfort, functionality of building services, acoustics etc. For this purpose, a new user feedback system was designed in this project and a proof of concept was undertaken.

The data obtained by the feedback system were combined with the correlating measured room conditions. Data analysis methods were subsequently used to identify inefficient operating modes. Moreover, the user feedback data was used to optimize set points of building services systems.

The overall objective was the proof of concept of such a user feedback system and to investigate its potential for increasing the energy efficiency and comfort in buildings. The functional model of the user feedback system developed in the FEELings project was tested in two different use cases in order to demonstrate the general applicability.

The test phase showed that the implemented user feedback system is suitable for collecting comprehensive feedback from building users. In combination with measurement data of indoor climate conditions and operating states of building services systems, it can also be used to derive recommendations for building operators and generate control signals for building automation systems. The project also showed that energy savings can be achieved by involving the building users. In case of the use case Campus TU Graz, concrete measures were taken to increase the energy efficiency of buildings.

Throughout the FEELings project, aspects of privacy played an important role. The research project was used to examine the impact of such a feedback system on privacy issues.

The project results highlight the potential of the FEELings system. The developed system was comprehensively tested; the concept was evaluated and positively accepted by the users. As a follow-up of this research project, the next step could be the development of a prototype.

1. Einleitung

1.1. Ausgangssituation

Energieeffizienz von Gebäuden ist ein wesentlicher Bereich, um dem Klimawandel entgegenzuwirken. Das Verhalten von Menschen in Gebäuden (nachfolgend: Nutzerverhalten)¹ hat einen wesentlichen Einfluss auf den Energieverbrauch von Gebäuden. Eine der „Grand Challenges“ der heutigen Zeit ist die Energiewende.² Um diese für die Europäische Union herbeizuführen, wurden unter anderem von der EU die 20-20-20 Ziele beschlossen. Die drei Ziele des Pakets sind die Senkung der Treibhausgasemissionen um 20 % (gegenüber dem Stand von 1990), 20 % der Energie in der EU soll aus erneuerbaren Quellen stammen und die Energieeffizienz soll um 20 % gesteigert werden, jeweils bis zum Jahr 2020.³ Die Ziele werden im Bereich der Erneuerbaren Energiequellen voraussichtlich erreicht, bei der Reduktion des Primärenergiebedarfs (Energieeffizienz) gestaltet sich die Zielerreichung als deutlich schwieriger.⁴ Nach Angaben der Kommission sind Gebäude für 40 % des Energieverbrauchs und für 36 % der CO₂-Emissionen in der europäischen Union verantwortlich.⁵

1.2. Motivation für das Projekt

Um die Energieeffizienzziele zu erreichen, ist es notwendig, den Energieverbrauch von Gebäuden zu reduzieren. Hierzu sind rein architektonische Lösungen und eine effiziente Gebäudetechnik alleine nicht ausreichend. Das Verhalten der Nutzerinnen und Nutzer ist ein entscheidender Faktor für den Energieverbrauch und die tatsächliche energetische Performance eines Gebäudes.⁶ Die User eines Gebäudes spielen daher eine essentielle Rolle. Aufgrund der Tatsache, dass das Nutzerverhalten schwer abbildbar und beeinflussbar ist, wird es sehr häufig vernachlässigt.⁷ Durch Änderung des Nutzerverhaltens kann der Energieverbrauch um bis zu 15 % reduziert werden.^{8,9} Ebenso können durch eine gut funktionierende Gebäudeautomation Energieeinsparungen im Bereich zwischen 20 % und 60 % erreicht werden.¹⁰ Um die geforderten Energieeffizienzziele der Europäischen Union zu erreichen, ist es somit erforderlich, Nutzerinnen und Nutzer miteinzubeziehen und diese zu motivieren, ihr individuelles Verhalten anzupassen. Informations- und Kommunikationstechnologie (ICT) ist dazu geeignet, das Nutzerverhalten hinsichtlich des Energieverbrauchs zu beeinflussen.¹¹ Wie in Abschnitt 1.3 dargelegt, wird in Forschungsprojekten und durch Produkte versucht, das Nutzerverhalten durch den Einsatz von Informations- und Kommunikationstechnologie zu

¹ Aus Gründen der Lesbarkeit wird in diesem Ergebnisbericht bei zusammengesetzten Formulierungen davon abgegangen, geschlechtsspezifische Formulierungen zu verwenden. Soweit personenbezogene Bezeichnungen nur in männlicher Form angeführt sind, beziehen sie sich auf Männer und Frauen in gleicher Weise.

² Europäische Kommission: Horizon 2020 – Societal Challenges <https://ec.europa.eu/programmes/horizon2020/h2020-sections>. Abgerufen am 30.03.2017

³ https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2020_de, abgerufen am 23.02.2017

⁴ Europäische Kommission: Das Energieeffizienzziel von 20 % für 2020 wird erreicht und sogar übertroffen. Brüssel, 1. Februar 2017. Verfügbar unter http://europa.eu/rapid/press-release_MEMO-17-162_de.htm, abgerufen am 30.3.2017

⁵ https://ec.europa.eu/energy/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/energy-performance-buildings-directive_en, abgerufen am 29.04.2020

⁶ Jadhav, N. Y.: Engaging Occupants in Green and Smart Buildings. In: Green and Smart Buildings. Springer Singapore, 2016. S. 147-154

⁷ Janda, K. B.: Buildings don't use energy: people do. In: Architectural science review 54.1 (2011): S. 15-22

⁸ Vgl. u.A. Ministerium für Wirtschaft und Mittelstand, Energie und Verkehr des Landes Nordrhein-Westfalen: Energieeinsparung in öffentlichen Gebäuden, 2000. S. 15

⁹ European Environment Agency: Achieving energy efficiency through behaviour change: what does it take? EEA Technical report 5/2013. ISBN 978-92-9213-384-9. S. 5

¹⁰ Knoll, P.; Becker, M.: Literaturübersicht zu Energieeinsparpotenzialen durch moderne Elektroinstallation, Studie im Auftrag des ZVEI Fachverbandes Installationsgeräte und -systeme, Oktober 2007

¹¹ Mattern, F.; Staake, T.; Weiss, M.: ICT for green: How computers can help us to conserve energy. Proceedings of the 1st international conference on energy-efficient computing and networking. ACM, 2010

analysieren bzw. zu beeinflussen. Dabei wird bereits dem User selbst die Möglichkeit geboten, Informationen zu geben. Wie die Projekte *myBuildingMessage* oder *PowerZee* zeigen (vgl. Abschnitt 1.3.2), gibt es erste Ansätze in diese Richtung, wo beispielsweise das Temperaturempfinden oder die aktuelle Zufriedenheit im Raum abgefragt wird. Die sich bietenden Möglichkeiten sind dabei jedoch bei weitem noch nicht ausgeschöpft.

Grundsätzlich besteht daher Bedarf an Methoden und Systemen, die es den Nutzerinnen und Nutzern ermöglichen, ihr Verhalten im Sinne von Energieeffizienz zu verbessern. Die Anwendung dieser Methoden lässt eine hohe Akzeptanz erwarten und die User selbst können für sich einen hohen Mehrwert in der Anwendung dieser Systeme generieren (z.B. durch Komfortverbesserungen). Das Forschungsprojekt FEELings hat sich zum Ziel gesetzt, ein System zu untersuchen, welches das Potential hat, beide Ansprüche zu erfüllen.

1.3. Stand des Wissens – Nationale und internationale Projekte

Aufgrund der vorab dargestellten Grundlagen und Fakten wurden in den letzten Jahren Forschungsarbeiten und Entwicklungen initiiert, die das Nutzerverhalten analysieren und zu beeinflussen versuchen. Diese Arbeiten kann man in zwei Themenfelder clustern:

- Erfassung von Sensordaten und Messdaten in Gebäuden, auf Basis derer Big-Data-Analysen durchgeführt werden, um Trends und Verhaltensmuster ableiten zu können und auf dieser Basis Energieeffizienzmaßnahmen umzusetzen.
- Direkte Erfassung von Feedback durch Eingaben der User. In diesem Bereich existieren erste Ansätze, die jedoch noch nicht den Umfang und Entwicklungsstand der Aktivitäten aus Punkt 1 erreicht haben. Beispiele hierfür sind die Projekte *myBuildingMessage* oder *PowerZee*.

Eine eingehende Recherche des Standes der Technik hat die in Tabelle 1 aufgelisteten Forschungsprojekte und Produkte ergeben, welche nachfolgend näher erläutert werden.

Tabelle 1: Forschungsarbeiten, die sich mit dem Thema Nutzerverhalten im Gebäude beschäftigen

Projektziele	Forschungsprojekt	Führende Forschungseinrichtung
Analyse von Messdaten in Gebäuden und Lernen des Nutzerverhaltens	Smart Thermostat	Industrieunternehmen
	ICT for Smart Heating	Joanneum Research
	Analyse von Smart-Meter-Daten	u.a. ETH Zürich
	Amphiro	ETH Zürich
	PowerPedia	ETH Zürich
Feedback durch direkte Eingaben der User	myBuildingMessage	FH Kufstein
	PowerZee	NTU Singapur
	CODALoop	University of Amsterdam (TU Graz ist Projektpartner)

Im Folgenden werden die Forschungsarbeiten kurz beschrieben und die Abgrenzung bzw. Unterschiede zum Projekt FEELings aufgezeigt.

1.3.1. Projekte zur Analyse von Messdaten in Gebäuden und zum Lernen des Nutzerverhaltens

Bei **Smart Thermostats**¹² handelt es sich um selbstlernende Raumthermostate. Die bekanntesten Hersteller sind *nest* (im Eigentum von Google), in Deutschland *Tado*, *alphaEOS* oder *ecozy*. Bei diesen Systemen geht es darum, aus dem Verhalten der Nutzerin, des Nutzers zu lernen (beispielsweise aus den Eingaben am Thermostat), um automatisiert Einstellungen zu treffen, wodurch laut den Herstellern Energieeinsparungen in der Höhe von 10 - 12 % erreicht werden konnten.¹³ Im Unterschied zu FEELings werden Smart Thermostats im Heimbereich (Smart Home) eingesetzt, sie beschränken sich auf die Temperatursteuerung und die direkte Eingabe der Solltemperatur. Bei FEELings werden die Komfortbedürfnisse des Users direkt und umfassend erfasst, der Anwendungsbereich fokussiert sich auf den Zweckbau.

Das Forschungsprojekt **ICT4SmartHeating** (Sondierungsprojekt der FFG Programmschiene „Smart Cities“) von Joanneum Research zielt darauf ab, die zuvor genannten Systeme aus dem Bereich Smart Home auf eine herstellerunabhängige Internet-of-Things (IoT) Plattform zu bringen. Das Projekt fokussiert auf den sozialen Wohnbau. Privacy spielt dabei eine zentrale Rolle. Wie bei den zuvor vorgestellten Produkten sollen durch Lernen des Nutzerverhaltens Energieeinsparungen realisiert werden.

Weltweit wird eine Vielzahl an Haushalten mit Smart Metern ausgerüstet. Parallel dazu existieren Forschungsprojekte, unter anderem an der ETH Zürich¹⁴, die eine **Analyse von Smart-Meter-Daten** durchführen und anhand von Methoden des maschinellen Lernens Charakteristiken und Eigenschaften von Haushalten ableiten. Bei diesen Forschungsaktivitäten werden im Gegensatz zu FEELings ausschließlich Messdaten verarbeitet. Das Einholen von persönlichen Wahrnehmungen von Raumparametern, wie Temperatur, ist ebenfalls nicht Gegenstand dieser Projekte.

In einem weiteren Forschungsprojekt an der ETH Zürich – Projekt **Amphiro** – wurde gezeigt, wie durch direktes Echtzeit-Feedback an die Nutzerin, den Nutzer Energie und Ressourcen gespart werden können. In einem breit angelegten Experiment wurde den Teilnehmern ein Echtzeitfeedback über den Ressourcen- und Energieverbrauch einer täglichen Aktivität „Duschen“ gegeben. Durch dieses Echtzeitfeedback auf das individuelle Verhalten konnte der Ressourcenverbrauch laut einer durchgeführten Studie um 22 % reduziert werden.¹⁵ Im Gegensatz zu FEELings zielt *Amphiro* auf User im Heimbereich ab und es beschränkt sich auf eine Tätigkeit im Gebäude. Außerdem werden hier nicht die Wahrnehmungen der Nutzerinnen und Nutzer über Raumzustände erfasst und analysiert.

An der ETH Zürich wurde das Tool **PowerPedia**¹⁶ entwickelt, ein Feedbacksystem über den Energieverbrauch von Haushaltsgeräten. Durch die Integration einer Community-Plattform haben Nutzerinnen und Nutzer die Möglichkeit, ihre Energieverbräuche mit anderen zu vergleichen. Es soll dadurch auch helfen, ihren Energieverbrauch besser zu verstehen und Maßnahmen zu treffen. In dem Projekt ging es auch darum, ein für die User klar verständliches Feedback zum Energieverbrauch zu geben, das über technische Begriffe und nicht greifbare Zahlen hinausgeht. Im Gegensatz zu FEELings wird *PowerPedia* im Heimbereich mit dem Fokus auf Haushaltsgeräte eingesetzt. In diesem

¹² Lu, J. et al.: The smart thermostat: using occupancy sensors to save energy in homes. Proceedings of the 8th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems. ACM, 2010

¹³ Vgl. Nest Thermostat. <https://nest.com/thermostat/meet-nest-thermostat/>, abgerufen am 24.03.2017

¹⁴ Beckel, C. et al.: Revealing household characteristics from smart meter data. Energy 78. 2014, S. 397-410

¹⁵ Tiefenbeck, V. et al.: Overcoming Saliency Bias: How Real-Time Feedback Fosters Resource Conservation. In: Management Science 2016

¹⁶ Weiss, M. et al.: PowerPedia: Changing energy usage with the help of a community-based smartphone application. In: Personal and Ubiquitous Computing 16 (8). 2012, S. 655-664

Projekt werden auf Grund der Zielrichtung auch keine Wahrnehmungen der Nutzerinnen und Nutzer über die Raumzustände abgefragt.

1.3.2. Projekte zu „Feedback durch direkte Eingaben der User“

Die fünf vorab beschriebenen Forschungsarbeiten dienen der Analyse von Messdaten in Gebäuden und Lernen des Nutzerverhaltens. Die im Folgenden angeführten können der Gruppe „Feedback durch direkte Eingaben der User“ zugeordnet werden.

Das Tool **myBuildingMessage**¹⁷ wurde vom Institut für Facility Management und Immobilienwirtschaft der FH Kufstein entwickelt und dient dazu, die Nutzerzufriedenheit in Gebäuden zu ermitteln und die Wirksamkeit von Maßnahmen des Facility Managements zu überprüfen. Dabei wird ein offener Online-Fragebogen verwendet, welcher in zwei Minuten beantwortet wird. Es wird einerseits die aktuelle Nutzerzufriedenheit auf einer Skala von 1 bis 10 abgefragt und andererseits eine offene Frage gestellt, wo Optimierungsbedarf besteht. Für die Analyse wird eine Texterkennungsoftware verwendet, wo Stimmungen und Gefühle herausgefiltert und Häufungen und Verteilungen von Wortmeldungen analysiert werden. Die Analyse erfolgt in Echtzeit und wird direkt an das Facility Management zurückgegeben. Dabei wird das Thema Datenschutz sehr ernst genommen, indem unter anderem keine personenbezogenen Daten verwendet werden und die Server in Deutschland liegen. Im Gegensatz zu der im Forschungsprojekt FEELings angestrebten Lösung erfolgt die Eingabe von Feedback auf Basis eines freien Textfeldes. FEELings verwendet ein vollstrukturiertes Feedback, wo Empfindungen beispielsweise durch das Drücken von Symbolen erfasst werden. Dadurch dauert die Eingabe deutlich kürzer als zwei Minuten, wodurch auch eine höhere Frequenz des Feedbacks zu erwarten ist. Ebenso gibt es bei *myBuildingMessage* keine Verbindung des Nutzerfeedbacks mit den aktuellen Raum- und Anlagenzuständen (Messdaten aus dem Gebäudeautomationssystem). Die Neuheit von FEELings ist es, das Nutzerfeedback mit den Messdaten zu verbinden, um daraus neues Wissen zu generieren.

Die Smartphone-App **PowerZee**^{18 19} wurde in Kooperation zwischen NTU Singapur und ENGIE-Labs-Singapur entwickelt. Das Ziel dieser Applikation ist, dass Studierende und Bedienstete von Universitäten verantwortungsvoller mit Ressourcen (Energie, Wasser und Müll) am Campus umgehen. Hierzu werden Elemente aus den Bereichen Gamification, Social Networking und Crowd Sourcing verwendet. Kernelemente dieser Applikation sind sogenannte „Ecogestures“ – kleine tägliche Handlungen, um Energie zu sparen, mit denen Punkte gesammelt werden können. Daneben haben die User von *PowerZee* die Möglichkeit, Feedback zur aktuellen Temperatur zu geben. Auf Basis dieser Einstellungen verändert das Facility Management z.B. die Einstellungen von Klimaanlagen. Analysen über die Wirksamkeit der getroffenen Maßnahmen und der Energieverbräuche am Campus werden den Nutzerinnen und Nutzern regelmäßig über das Web zur Verfügung gestellt. In einer Pilotstudie wurde *PowerZee* im Zeitraum zwischen Februar und Juni 2015 getestet und von 1850 Studenten (4,4 %) verwendet.²⁰ Die Applikation *PowerZee* erhebt das Temperaturempfinden auf Gebäudeebene. Im Forschungsprojekt FEELings wird ein umfassenderes Nutzerfeedback auf Raumebene erhoben (z.B. es blendet, schlechte Luftqualität, zu heiß). Um die erhaltenen Daten aussagekräftiger zu machen, werden bei FEELings die Feedbackdaten mit synchronen Messdaten zu

¹⁷ <http://fmi.fh-kufstein.ac.at/myBuildingMessage> abgerufen am 20.03.2017

¹⁸ <http://ecocampus.ntu.edu.sg/Pages/powerz.aspx>, abgerufen am 20.03.2017

¹⁹ Jadhav, N. Y.: Engaging Occupants in Green and Smart Buildings. In: Green and Smart Buildings. Springer Singapore, 2016. S. 147-154

²⁰ <https://biotechn.asia/2016/10/26/energy-efficiency-app-powerzee-reach-singapore-tertiary-institutions/>, abgerufen am 20.03.2017

den Raum- und Anlagenzuständen (Gebäudetechnik) verglichen. Im Projekt FEELings wird auch untersucht, inwieweit diese Informationen zur semi-automatisierten und automatisierten Steuerung gebäudetechnischer Anlagen genutzt werden können. Dadurch sollen Energieeffizienz- und Komfortsteigerungen möglich werden. Außerdem ermöglicht es der Ansatz in FEELings, mehr Informationen zur Qualität des Gebäudes und der gebäudetechnischen Anlagen zu erhalten.

Das primäre Ziel des internationalen Forschungsprojekts **CODALoop** – Community Data-Loops for energy-efficient urban lifestyles²¹ – mit Beteiligung der Technischen Universität Graz liegt darin, eine positive Verhaltensänderung der Energieverbraucher in ausgewählten Stadtteilen von Amsterdam, Istanbul, Graz (Waagner-Biro, Reininghaus) und Leibnitz zu erreichen. Dabei kann jede Nutzerin und jeder Nutzer mit Hilfe einer Web-Plattform die Auswirkungen seines Handelns auf den Energieverbrauch mit dem Durchschnitt seines Stadtteiles bzw. seiner Region vergleichen. Konkret beschäftigt sich *CODALoop* mit den energiebezogenen Veränderungen des Lebensstils in den Bereichen Wohnen, Mobilität, Konsum und Freizeitaktivitäten. Im Rahmen des Projekts werden unterschiedliche Maßnahmen geplant und durchgeführt, die auf die Sensibilisierung und die Aktivierung der Bewohner zum Thema Energieverbrauch abzielen.²² Im Gegensatz zu *CODALoop* liegt der Fokus des Forschungsprojekts FEELings nicht auf Städten und Regionen sowie dem Heimbereich sondern auf Nutzerinnen und Nutzer eines Gebäudes im Zweckbau. Da beide Projekte unter anderem an der Technischen Universität Graz durchgeführt werden, ergeben sich Synergieeffekte sowie Möglichkeiten zum Austausch.

Die Forschungsarbeiten im Projekt FEELings gehen in folgenden Aspekten über den Stand der Technik hinaus:

- Entwicklung von Methoden, um ein umfassendes Nutzerfeedback zu empfundenen Raumzuständen zu erhalten
- Synchrone Kopplung dieses Nutzerfeedbacks mit gemessenen Raum- und Anlagenzuständen. Die gemessenen Zustände werden aus den Systemen der Raum- und Anlagenautomation (Gebäudeautomation) erhalten.
- Anwendung von Methoden der Datenanalyse, um aus diesen Daten automatisch bzw. semi-automatisch auf die Steuerung der gebäudetechnischen Anlagen zum Zweck der Energieeffizienz- und Komfortsteigerung einzuwirken.
- Rückkopplung von Information an die Nutzerinnen und Nutzer, welche Maßnahmen an den Systemeinstellungen getroffen wurden. Über diesen Informationsrückfluss können auch Tipps bezüglich einer Verbesserung des eigenen Verhaltens gegeben werden. Dies ist bereits Stand der Technik, aufgrund der umfassenden Datenerhebung können zusätzliche Empfehlungen und Informationen gegeben werden.

1.3.3. Stand des Wissens im Projektkonsortium

Die Fachgruppe **Integrated Building Systems** an der **TU Graz** verfügt über ein interdisziplinäres Team aus Gebäudetechnik, Architektur, Informatik und Maschinenbau. Sie ist stark interdisziplinär ausgerichtet und agiert im Rahmen des Fields of Expertise „Sustainable Systems“ der TU Graz. Der

²¹ <http://jpi-urbaneurope.eu/project/codaloop/>, abgerufen am 22.03.2017

²² Vgl. <http://www.stadtlaborgraz.at/de/project/codaloop>, abgerufen am 24.03.2017

Fokus liegt im Bereich Gebäudetechnik. Die Idee und das Konzept für dieses Forschungsvorhaben wurden in der Gruppe entwickelt.

Know-Center (KC) hat umfangreiche Erfahrung mit Big Data Analytics und sensorbasierten Auswertungen und Analysen. Die Expertinnen und Experten von Know-Center verfügen über sehr gute Kenntnisse im Bereich von Datenvorverarbeitungsmethoden, statistisch/mathematischen Auswertemethoden und maschinellem Lernen. Daneben verfügt der Know-Center-Bereich Wissensvisualisierung über umfassende Erfahrung in visuellen Methoden zur Analyse, Darstellung und Kommunikation von komplexen Wissensbasen. Bislang hat das Know-Center seine Kompetenzen erfolgreich in Projekten aus den Bereichen Industrie 4.0, digitale Bibliotheken oder digitale Verkehrsmodelle eingesetzt.

EUDT betreibt Energiemonitoringsysteme für Gebäude. Dabei werden Räume mit leitungsgebundener und drahtloser Sensorik ausgestattet, um Raumzustände zu messen. Zudem werden Daten aus Gebäudeautomationssystemen erfasst und ausgewertet. Aus den gemessenen Daten werden Energiekennzahlen ermittelt und über eine Web-Applikation visualisiert. EUDT verfügt somit über umfangreiches Wissen und Erfahrungen mit der sensortechnischen Erfassung von Raum- und Anlagenzuständen und der Auswertung dieser Daten.

EAM ist in der Planung, Installation und dem Betrieb von Gebäudeautomationssystemen tätig. Ein wichtiges Geschäftsfeld von EAM ist der Bereich Facility Services, in dem Kunden die technische Betriebsführung der gebäudetechnischen Anlagen angeboten wird. EAM besitzt somit umfassendes Wissen über Gebäudeautomationssysteme, die damit verbundene messtechnische Erfassung von Raum- und Anlagenzuständen sowie über den Betrieb und die Optimierung dieser Anlagen.

Die **TU Graz** ist im vorliegenden Forschungsprojekt auch mit der Abteilung **Gebäude und Technik (GuT)** vertreten, welche die technische Betriebsführung der Campus-Gebäude durchführt. Die Abteilung hat in den letzten Jahren stark in den Ausbau im Bereich der Gebäudeautomation investiert und betreibt mittlerweile ein Energiemonitoringsystem mit über 50.000 Datenpunkten. TU Graz GuT verfügt über umfangreiches Wissen über den Betrieb ihrer gebäudetechnischen Systeme und kennt aufgrund ihrer Zuständigkeit für das Facility Management an der TU Graz die Anforderungen der Nutzerinnen und Nutzer ihrer Gebäude.

1.4. Zielsetzung des Projekts

Der Ansatz des Forschungsprojekts **FEELings** besteht darin, Messdaten aus dem Gebäude (z.B. Raumzustände wie Temperatur, Luftfeuchtigkeit, CO₂-Gehalt, Helligkeit etc.) und dem Gebäudeautomationssystem (z.B. Vorlauftemperaturen von Heizungssystemen, Volumenströme etc.) mit einem direkten Nutzerfeedback zu kombinieren. Dabei werden Informationen zum Komfortempfinden in einem hohen Detaillierungsgrad abgefragt, d.h. neben Temperatur auch Aspekte wie beispielsweise Luftqualität, Geräuschpegel, Blendung durch Sonneneinstrahlung etc.

Die kombinierten Datensätze aus Nutzerfeedback und messtechnisch erfassten Zuständen werden mit Datenanalyse-Methoden untersucht, um daraus Erkenntnisse abzuleiten und diese weiter zu verarbeiten. Durch die Konzeption des Systems ist es möglich, über die Qualität des Gebäudes (bautechnisch, bauphysikalisch) und der technischen Anlagen zu lernen und diese energetisch und in Hinblick auf Komfort zu optimieren. Mit dem System wird den Nutzerinnen und Nutzern selbst die Möglichkeit gegeben, sich über ihr Wohlbefinden im Gebäude zu artikulieren, in einer detaillierteren

Form als in allen bisherigen Forschungsprojekten. Den Usern werden damit auch Informationen über ergriffene Maßnahmen des Facility Managements mitgeteilt, beispielsweise auch Maßnahmen auf Basis des eigenen Feedbacks. Zudem kann das System genutzt werden, um den Usern Empfehlungen zu geben, wie sie ihr Verhalten verbessern können. In einem ersten Schritt erfolgen Auswertung und Ableitung von Feedback offline, um grundsätzlich die passenden Algorithmen und Auswertungen zu erarbeiten. In einem zweiten Schritt wird ein Konzept erarbeitet, wie diese Schritte automatisiert erfolgen können. Das Konzept des User-Feedback-Systems inklusive der Verbindungen zwischen Gebäudenutzerinnen und -nutzern, der Gebäudetechnik sowie den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Facility Managements ist schematisch in Abbildung 1 dargestellt.

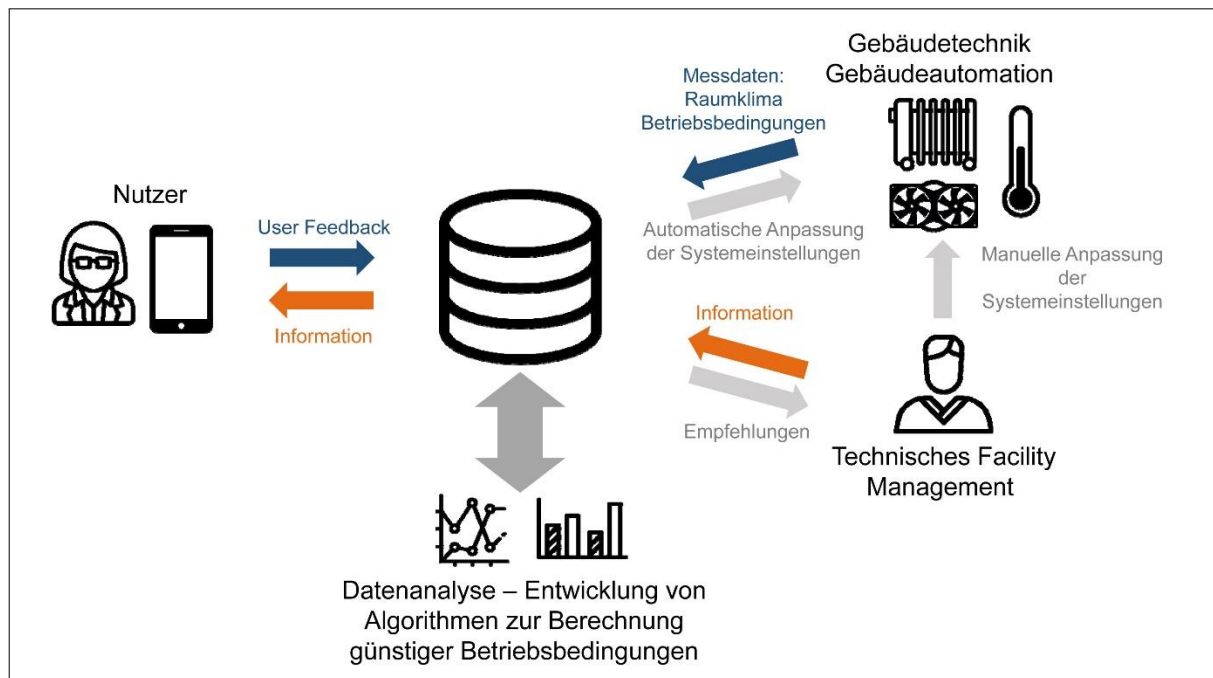


Abbildung 1: Konzept des User-Feedback-Systems

Ein weiterer Forschungsschwerpunkt im Projekt FEELings besteht darin, die erhaltenen Daten (Nutzerfeedback und gemessene Raum- und Anlagenzustände) dahingehend zu verarbeiten, um gebäudetechnische Anlagen semi-automatisch (automatische Generierung von Handlungsempfehlungen für das Personal in der technischen Betriebsführung) oder automatisch (automatisierte Veränderung von Einstellungen der Gebäudeautomationsanlagen) zu steuern und zu optimieren. Die Anlagen können damit auch auf die individuellen Bedürfnisse von Menschen in den Räumen abgestimmt werden. Die Anforderungen an die Konditionierung von Räumen sind von der Art der Nutzung abhängig und werden von Fall zu Fall verschieden sein.

Ein wesentlicher Forschungsschwerpunkt im Projekt FEELings besteht darin, zu untersuchen, wie dieses System eingesetzt werden kann, um den Energiebedarf von Gebäuden bei gleichzeitiger Steigerung des Komforts zu optimieren (z.B. Vermeidung von offenen Fenstern bei gleichzeitigem Heizen durch optimale Einstellung der Vorlauftemperaturen anhand der Bedürfnisse).

Es mag berechtigte Argumente geben, ob es im Zuge der derzeitigen Diskussion Richtung „Low-Tech-Gebäude“ Sinn macht, noch mehr Informationen über die Menschen und deren Verhalten im Gebäude digital zu erfassen. Demgegenüber steht das Argument, dass mit derartigen Verfahren die

Energieeffizienz gesteigert werden kann²³ und dass die Digitalisierung auch in Gebäuden weiter voranschreiten wird. Ein Ziel des Forschungsprojekts ist es daher auch, diese sensiblen Fragen verantwortungsbewusst zu adressieren und zu untersuchen, beispielsweise, inwieweit mit solchen Systemen in die Privatsphäre eingegriffen wird oder welche Erkenntnisse über die Nutzerinnen und Nutzer durch die Anwendung derartiger Systeme abgeleitet werden können. Wie sollte man damit umgehen und welche Maßnahmen können beim Datenschutz ergriffen werden? Diese Fragestellung wird in einem eigenen Task 3.5 in Arbeitspaket 3 adressiert. Im Forschungsprojekt werden daher auch anonymisierte Verfahren, wie beispielsweise die Verwendung von fix installierten Eingabegeräten für das User-Feedback, untersucht.

Im Forschungsprojekt **FEELings** werden vier Hauptprojektziele verfolgt, um den in Abschnitt 1.2.1 identifizierten Forschungsbedarf zu adressieren:

1.4.1. Projektziel 1 – Proof-of-Concept des Ansatzes

Im Forschungsprojekt FEELings wird aufgezeigt, wie der skizzierte Ansatz grundsätzlich dazu beitragen kann, ein umfassendes Nutzerfeedback zu erheben, in Kombination mit Messdaten von Raum- und Anlagenzuständen zu analysieren und daraus automatisiert Handlungsempfehlungen und Steuersignale für Gebäudeautomationsanlagen zu generieren.

Das erste Teilziel besteht darin, die grundlegenden Anforderungen eines solchen Feedbacksystems zu klären. Dies umfasst einerseits die Sicherstellung der Motivation der User für ein ausreichend frequentes Feedback über Anreizsysteme. Daneben ist zu klären, welche Parameter abzufragen sind, um Komfort und Energieeffizienz zu verbessern und das Nutzerverhalten besser zu verstehen. Schließlich ist auch zu zeigen, in welcher Art das Nutzerfeedback am besten erhoben werden kann. Dies schließt die Gestaltung des Benutzerinterfaces und die Wahl des Bediengerätes (Smartphone-App, fix installiertes Raumbediengerät etc.) mit ein.

Das zweite Teilziel besteht darin, das Feedbacksystem anhand von zwei Use Cases zu testen und Sensor- sowie Feedbackdaten über den Zeitraum von einem Jahr zu erfassen.

Das dritte Teilziel besteht darin, zu zeigen, welche Erkenntnisse aus der Kombination von Nutzerfeedback und messtechnisch erfassten Raumzuständen abgeleitet werden können. Dabei kommen Methoden der Datenanalyse und geeignete Algorithmen zum Einsatz. Des Weiteren ist zu zeigen, wie aus diesen Ergebnissen handlungsrelevantes Wissen für das Gebäudeautomationsystem abgeleitet werden kann.

1.4.2. Projektziel 2 – Untersuchung von Methoden, wie mit diesem System die Energieeffizienz von Gebäuden erhöht werden kann

Es ist aus der Literatur bekannt, dass durch Einbeziehung der Nutzerinnen und Nutzer und Beeinflussung des Nutzerverhaltens beträchtliche Energieeffizienzsteigerungen erreicht werden können. Im Projekt FEELings wird untersucht, ob die umfassende Erfassung von Nutzerfeedback und deren

²³ Vgl. u.a. Ministerium für Wirtschaft und Mittelstand, Energie und Verkehr des Landes Nordrhein-Westfalen: Energieeinsparung in öffentlichen Gebäuden, 2000. Seite 15; European Environment Agency: Achieving energy efficiency through behaviour change: what does it take? EEA Technical report 5/2013. Seite 5.

Rückkopplung auf Basis von Datenanalysen grundsätzlich dazu geeignet ist, Energieeinsparungen zu erreichen.

1.4.3. Projektziel 3 – Berücksichtigung datenschutzrechtlicher Aspekte und Sicherstellung der Privatsphäre der Gebäudenutzer

Da im Projekt FEELings umfassende Feedbackdaten der Gebäudenutzer erhoben werden, ist eines der Projektziele die Wahrung der Privatsphäre der Nutzerinnen und Nutzer, die Berücksichtigung von Arbeitnehmerschutzvorschriften sowie die Berücksichtigung datenschutzrechtlicher Aspekte.

1.4.4. Projektziel 4 – Untersuchung der unterschiedlichen Wahrnehmung von Raumzuständen durch verschiedene Personengruppen

Die Auswertungen und Analysemethoden werden genutzt, um Aspekte von Gender und Diversität im Nutzerverhalten zu analysieren. Gibt es Unterschiede in der Empfindung von Raumzuständen durch unterschiedliche Personengruppen?

2. Projektinhalt

Im Folgenden werden die Projektstruktur und die methodischen Vorgangsweisen, welche zu den Projektergebnissen führten, in groben Umrissen erläutert. Eine detaillierte Darstellung der angewandten Methoden sowie der verwendeten Daten mit Quellenangaben erfolgt gemeinsam mit der Erläuterung der Projektergebnisse in Kapitel 3, da nur durch die gemeinsame Beschreibung von Methodik und Ergebnissen eine schlüssige Projektdarstellung möglich ist. Dies ist einerseits bedingt durch das Ineinandergreifen und Rückkoppeln von Arbeitspaketinhalten und -zielen, andererseits dadurch, dass viele, für den Projekterfolg wichtige Teilziele innerhalb der einzelnen Arbeitspakete gesteckt wurden.

2.1. Projektstruktur

Das Projekt wurde in vier Bereiche und acht Arbeitspakete (kurz: AP) gemäß Abbildung 2 gegliedert:

- Organisatorische Arbeitspakete AP 1, AP 8 (blau)
- Arbeitspakete zur Definition, Spezifikation und Umsetzung des User-Feedback-Systems AP 2, AP 3, AP 4 (orange)
- Case Studies AP 5, AP 6 (grün)
- Arbeitspaket zur Datenanalyse und Rückkopplung des gesammelten Feedbacks AP 7 (gelb)

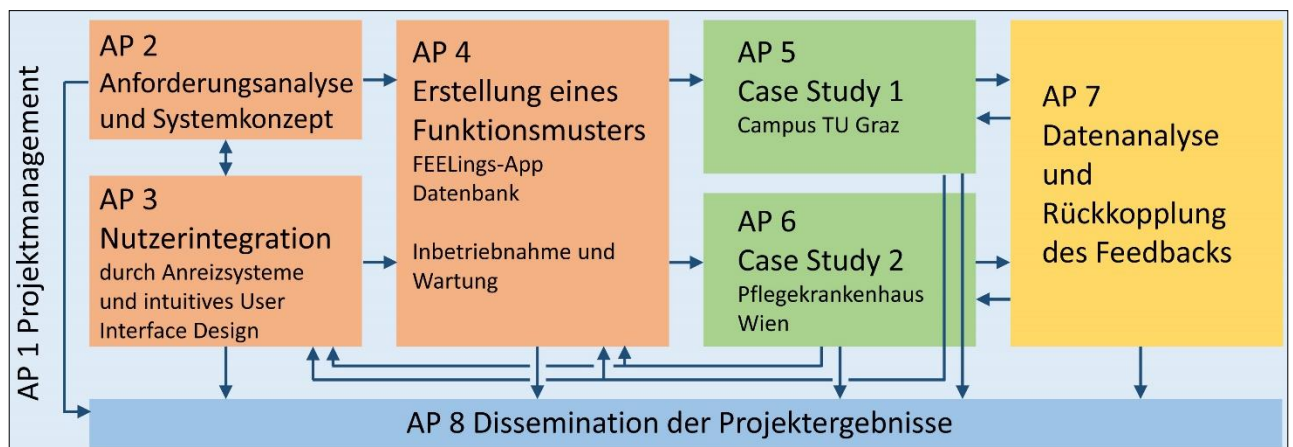


Abbildung 2: Projektflussbild FEELings

2.2. Inhalte der Arbeitspakete und methodisches Vorgehen

Auf die beiden organisatorischen Arbeitspakete wird in diesem Kapitel nicht näher eingegangen. Die Ergebnisse der in Abbildung 2 dargestellten Arbeitspakete 2 bis 7 wurden mit den nachfolgend beschriebenen Methoden erzielt.

2.2.1. Definition und Umsetzung des User-Feedback-Systems

Das Ziel des einleitend zu bearbeitenden Arbeitspakets 2/ Anforderungsanalyse und Systemkonzept“ ist die Definition jener Parameter und Datenpunkte, die vom Gebäudenutzer und dem Gebäudeautomationssystem erhoben werden. Gleichzeitig wird festgelegt, welche Parameter und Informationen nach der Datenanalyse an die Nutzerin bzw. den Nutzer und das Gebäudeautomationssystem

zurückgegeben werden. Durch diese Spezifikation wird die Basis für die Erstellung des Funktionsmusters gemäß AP 4 – für die Erfassung des Nutzerfeedbacks sowie der Datenbanken – gelegt.

Zur Definition der Feedbackparameter kommen Methoden des Requirements Engineering zur Anwendung. Dies sind Workshops und Interviews mit Gebäudenutzerinnen und Nutzern, Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des technischen Facility Managements und Expertinnen und Experten für Datenanalysen. Hierbei wird erhoben, was die User im Gebäude stört und wo die typischen Probleme liegen. Die erhobenen Feedbackparameter werden in einer Matrixform, geclustert nach Problembereich und Häufigkeit, aufbereitet. Gleichzeitig wird definiert, welche Datenpunkte (Sensordaten) aus den Gebäudeautomationssystemen für die späteren Analysen erforderlich sind. Die Festlegung dieser Daten ist notwendig, um das Nutzerfeedback mit den Raum- und Anlagenzuständen korrelieren zu können. Darauf aufbauend wird eine generische, d.h. allgemein gültige, Datenschnittstelle zwischen dem Automationssystem des Gebäudes und dem User-Feedback-System definiert, womit das Feedbacksystem universell – also nicht nur in den Use Cases – einsetzbar wird. Außerdem wird in dieser Datenschnittstelle definiert, welche Informationen an das Gebäudeautomationssystem zurückgegeben werden können. Daneben wird eine Datenschnittstelle zu bestehenden Informationssystemen des Gebäudebetreibers definiert, um Metainformationen über das Gebäude zu erhalten (beispielsweise Raumbezeichnungen).

Auf Basis der definierten Datenschnittstellen und Parameter werden die grundlegenden Methoden für die Herstellung einer Input-Output-Relation festgelegt. Als Inputparameter fungieren die vom User und der Anlage erhobenen Parameter. Der Output der Relationen wird zur Nutzerin, zum Nutzer und dem Gebäudeautomationssystem rückgekoppelt. Bereits in dieser frühen Projektphase sind die später anzuwendenden Methoden der Datenanalysen zu berücksichtigen, um das System auf die Anforderungen der Datenauswertung abzustimmen. Die Beschreibung der technischen Umsetzung für das Systemkonzept sowie die Erstellung der Spezifikation für die Erstellung des Funktionsmusters bilden den Abschluss des Arbeitspakets 2/ Anforderungsanalyse und Systemkonzept.

Die Erarbeitung der Befindlichkeitsabfrage (Behaglichkeit, Temperaturempfinden, subjektive Luftqualität, etc.) sowie die Konzeption eines digitalen, intuitiven Erfassungssystems stellen das Hauptziel von Arbeitspaket 3/ Nutzerintegration durch Anreizsysteme und intuitives User Interface Design dar und sind maßgeblich für den Projekterfolg. Dabei kommen Methoden aus dem Wissenschaftsbereich Human-Machine-Interface zum Einsatz. Der Entwurf einer intuitiven Mensch-Maschine-Nutzeroberfläche erfolgt anhand von Mockup-Methoden. Gleichzeitig ist ein ausreichend frequentes Feedback der Nutzerinnen und Nutzer, d.h. die regelmäßige Verwendung von möglichst vielen Gebäudenutzern, eine essentielle Grundvoraussetzung für den Projekterfolg. Die Herausforderung des Projekts liegt nicht primär in der technischen Umsetzung, sondern in der Entwicklung eines Konzeptes, das von Usern dauerhaft angenommen wird. Ein weiteres Teilziel dieses Arbeitspakets ist deshalb die Definition von Maßnahmen für eine Anreizwirkung, um eine möglichst hohe Verwendung des Feedbacksystems durch die Gebäudenutzer zu erreichen. Dabei werden unter anderem Aspekte des Social Gamings betrachtet, sowie ein Mehrwert durch die Verwendung des Feedbacksystems ausgearbeitet. Die entwickelten Konzepte für ein Anreizsystem werden in den Use Cases getestet und evaluiert, um bei zu geringen Rücklaufquoten Anpassungen am Anreizsystem sowie an den Feedbackanfragen vornehmen zu können.

Datenschutzrechtliche Aspekte spielen bei der Verwendung von Informationstechnologie für die Nutzerakzeptanz eine wichtige Rolle. In diesem Arbeitspaket wird insbesondere untersucht, wie weit

die Erfassung der definierten Feedbackparameter mit der Datenschutz-Grundverordnung im Einklang steht. Es wird im Zuge der Datenerhebung durch Umfragen und Interviews unter den App-Usern zusätzlich festgestellt, inwieweit die User durch das System einen Eingriff in ihre Privatsphäre sehen.

Ziel des Arbeitspakets 4/ Erstellung eines Funktionsmusters ist die Entwicklung einer exemplarischen Softwareinfrastruktur für die Erfassung von Feedback und die Verwaltung von vorhandenen Messdatensätzen. Dazu werden folgende vier Komponenten entwickelt: eine mobile App, die Nutzerfeedback aufzeichnet; eine Datenbankkomponente, welche die Daten pro Use Case sammelt; eine Importkomponente für Batch-Imports von aufgezeichneten Sensorwerten und eine Web-Oberfläche für das Abrufen von Statistiken und zum Export von Daten aus der Datenbank.

Die zentrale Komponente für das Erfassen des Nutzerfeedbacks ist eine mobile App, mit der die Benutzer das aktuelle subjektive Empfinden intuitiv erfassen können, wobei hier die Auswahl der passenden Entwicklungsumgebung, der passenden Bibliotheken sowie die programmiertechnische Umsetzung der App die zentralen Aufgaben darstellen.

Das Nutzerfeedback wird in Use-Case-spezifischen Datenbanken gesammelt. Dazu werden entsprechende Datenbankschemata entwickelt und eine passende Datenbank-Technologie ausgewählt. Zur Anwendung kommt die Umsetzung eines Entity-Attribute-Value (EAV) Modells²⁴, welches eine skalierbare und flexible Datenspeicherung auf Basis einer SQL-Datenbank ermöglicht. Neben dem Nutzerfeedback werden die Sensordaten der untersuchten Gebäude in der Datenbank verwaltet. Dazu werden Importkomponenten entwickelt, die gesammelte Gebäudedaten aufbereiten und in die Datenbank importieren. Dafür wird ein angepasster ETL (Extract-Transform-Load) Prozess definiert, um die Daten in eine kompatible Repräsentation zu bringen. In diesem Prozess werden die relevanten Daten aus verschiedenen Quellen extrahiert, in das Format und Schema der Zieldatenbank transformiert und schließlich in die Zieldatenbank geladen.

Um auf die gesammelten Daten aus der Datenbank zuzugreifen, wird eine Web-Oberfläche entwickelt, mit der es möglich ist, eine Reihe von statistischen Auswertungen der Daten auszuführen. Diese Web-Oberfläche steht nur den Projektbeteiligten zur Verfügung, daher ist ein komplexes Berechtigungskonzept nicht vorgesehen. Neben der statistischen Auswertung stehen auch Werkzeuge zur Verfügung, um Teile der Daten zu exportieren.

Nach Abschluss der ersten Iterationen der Softwareentwicklung steht eine erste Implementation der Funktionsmuster zur Verfügung, die auf den Projektrechnern ausgerollt wird, um Verbesserungsvorschläge durch Projektmitarbeiterinnen und -mitarbeiter einpflegen und notwendige Fehlerbehebungen durchführen zu können. Die erstellten Funktionsmuster werden vor dem Einsatz in den Use Cases zusätzlich nochmals durch eine ausgewählte, projektexterne Nutzergruppe getestet.

Für die Entwicklung der Softwarekomponenten kommen Methoden aus der agilen Softwareentwicklung zum Einsatz. Dadurch ist der Prozess der Erstellung der Komponenten flexibel und es kann auf geänderte Anforderungen rasch eingegangen werden. Basis der Entwicklung sind die Anforderungen, die in Arbeitspaket 2 entwickelt wurden und im Laufe des Projekts gegebenenfalls noch angepasst werden können. Die Softwarearchitektur der Backend-Komponenten folgt dem

²⁴ Nadkarni, P. M.; Marengo, L.; Chen, R.; Skoufos, E.; Shepherd, G.; Miller, P.: Organization of heterogeneous scientific data using the EAV/CR representation. In: Journal of the American Medical Informatics Association, 6(6). 1999, S. 478-493

Prinzip einer Microservice-Architektur²⁵, da diese den Vorteil hat, dass einzelne Komponenten separat entwickelt, getestet und deployed werden können.

2.2.2. Case Studies

Ziel der Arbeitspakete 5 und 6 ist das Erheben des Nutzerfeedbacks an Use Cases, die Sammlung der Sensordaten im Gebäude und der Feedbackdaten der Nutzerinnen und Nutzer über einen Zeitraum von einem Jahr sowie das Testen und Evaluieren des Feedbacksystems durch intensiven Austausch mit den Usern. Zur Zielerreichung werden zwei Use Cases gewählt, zum einen ausgewählte Gebäude am Campus der TU Graz (AP 5), zum anderen ein Pflegekrankenhaus in Wien (AP 6).

Am Campus TU Graz wird das User-Feedback-System anhand von mehreren in Bauweise und gebäudetechnischer Ausstattung differenzierten Gebäuden getestet. Die Teilnahme am Use Case ist für die Gebäudenutzerinnen und -nutzer freiwillig. Durch die Vielzahl an potentiellen Studienteilnehmerinnen und -teilnehmern können die Anreiz- und Feedbackmechanismen besser evaluiert werden.

Die erhobenen Daten werden später in AP 7/ Datenanalyse und Rückkopplung bewertet. Die aus den Analysen abgeleiteten Ergebnisse werden in den konkreten Use Case zurückgespielt, um die Machbarkeit von Energieeffizienz- und Optimierungsmaßnahmen zu zeigen. Die erfassten Daten aus dem Gebäudeautomationssystem werden über die definierten Datenschnittstellen mit der Datenbank verbunden. Da vom Gebäudeautomationssystem nicht alle notwendigen Daten der ausgewählten Gebäude erfasst werden können, wird in drei Gebäuden der TU Graz eine zusätzliche Instrumentierung mit Sensoren durchgeführt.

Am zweiten Use Case, dem Pflegekrankenhaus in Wien, wird das User-Feedback-System im Bereich der Verwaltungsräume von Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern ebenfalls über einen Zeitraum von einem Jahr freiwillig getestet.

Während des Datenerhebungszeitraums wird laufend automatisiert, mit einfachen Methoden der Datenanalysen die Qualität der Daten analysiert und überprüft, um Ausfälle einzelner Datenpunkte frühzeitig erkennen und beheben zu können. Zudem wird laufend evaluiert, in welchem Ausmaß das Nutzerfeedback vorhanden ist. Um das Feedbacksystem und die Anreizmechanismen zu optimieren, werden die Nutzerinnen und Nutzer über die Versuchslaufzeit von einem Jahr begleitet. Hierbei wird insbesondere erhoben, wie die User mit dem System umgehen, wie sie Informationen vom Feedbacksystem annehmen und wo Verbesserungspotential gesehen wird. Diese Evaluierung erfolgt anhand von Befragungen, Interviews und eine abschließenden Online-Umfrage unter soziologischer Begleitung. In Bereichen, wo es wenig Feedback gibt, wird analysiert, warum kein Feedback erfolgt. Dies kann daran liegen, dass die Nutzer zufrieden sind oder dass die Nutzer das Feedbacksystem nicht verwenden. In letzterem Fall werden Maßnahmen zur Steigerung der Nutzerinteraktionen getroffen.

²⁵ Amundsen, M.; McLarty, M.; Mitra, R.; Nadareishvili, I.: Microservice architecture: Aligning principles, practices, and culture. O'Reilly Media, Inc. 2016

2.2.3. Datenanalyse und Rückkopplung des Feedbacks

Auf Basis der in den Case Studies erhobenen Daten (Nutzerfeedback bzw. gemessene Raum- und Anlagenzustände) werden Methoden zur Generierung von Empfehlungen für Nutzerinnen und Nutzer sowie das technische Facility Management und von automatischen Einstellungssignalen für Gebäudeautomationssysteme im Rahmen von AP 7 abgeleitet. Der erste Schritt der Datenanalyse besteht aus einem ETL-Prozess, in dem die Daten aus den unterschiedlichen Quellen zuerst harmonisiert und auf ein gemeinsames Format gebracht werden. Im Zuge dieses Prozesses müssen fehlende und nicht plausible Daten erkannt und gegebenenfalls korrigiert werden. Im nächsten Schritt kommen Methoden aus dem Bereich der Exploratory Data Analytics zum Einsatz, um abschätzen zu können, welche algorithmischen Modelle geeignet sind, um die Daten zu modellieren und zu analysieren. Der letzte Schritt dieses Prozesses ist die algorithmische Auswertung der Daten, um latente Zusammenhänge und Muster zu erkennen und für eine weitere Verwendung brauchbar zu machen. Dabei kommen unter anderem Methoden der Wissensvisualisierung zum Einsatz.

Die erhobenen und analysierten Daten werden von Expertinnen und Experten für Datenanalysen in der Anwendungsdomäne (HLK, Gebäudeautomation, Anwender der Use Cases) interpretiert. Dabei erfolgt ein ständiger Wissenstransfer zwischen den Data-Science- und den Domänen-Expertinnen und Experten, einerseits durch technische Dokumentation und andererseits durch gemeinsame Workshops innerhalb der Arbeitspaketbeteiligten. Abschließend werden für die einzelnen Bereiche Optimierungs- und Verbesserungsmaßnahmen abgeleitet:

- Für das HLK-System: automatisierte Anpassung von Einstellungen (beispielsweise Heizkurven, bedarfsgerechte Optimierung von Anlagen)
- Für das technische Facility Management: Ableitung von Maßnahmen zur Energieeffizienzsteigerung
- Für die User: Ableitung von Empfehlungen für Nutzerinnen und Nutzer zu Energiesparmaßnahmen
- Für das Monitoringsystem: Kombination des Nutzerfeedbacks mit den Energiemonitoring-Daten
- Für die Planerinnen und Planer: Wie werden Maßnahmen und Technologien beurteilt? Wie empfinden Menschen technologische Varianten? Ableitung von Empfehlungen für weitere Gebäude.

Nach Abschluss der Datenerhebungen sowie der Datenanalysen und Auswertungen werden Konzepte entwickelt, wie die gewonnenen Informationen zur automatischen Anpassung von Einstellungen im Gebäudeautomationssystem verwendet werden können. Hierzu ist es notwendig, das gewonnene Wissen in ein handlungsrelevantes Wissen umzuwandeln (Actionable Knowledge), welches in die Anlagen der Beispielgebäude der Use Cases zurückgespielt werden kann. Dabei wird anhand von zwei ausgewählten Testräumen am Campus TU Graz eine Online-Integration des User-Feedbacks in die Heizungsregelung getestet.

Die im vorliegenden Abschnitt dargestellten, für die Projektbearbeitung herangezogenen Methoden haben sich in der Umsetzung bewährt und zur Zielerreichung geführt, wie dies detailliert der Darstellung der Ergebnisse im folgenden Kapitel 3 entnommen werden kann.

3. Detaillierte Methodik und Ergebnisse

Im folgenden Abschnitt werden die Projektergebnisse beschrieben und zusammengefasst. Dabei wird insbesondere auf die detaillierte Methodik, die Innovation des Projekts und die gewonnenen Erkenntnisse in der Projektlaufzeit eingegangen. Zusätzlich wird dargestellt, wie das gegenständliche Forschungsprojekt die Gesamtziele des Programms „Stadt der Zukunft“ unterstützt. Auch in diesem Kapitel wird nicht näher auf das erste Arbeitspaket/ Projektmanagement, welches die gesamte Projektlaufzeit begleitete, eingegangen.

3.1. Anforderungsanalyse und Systemkonzept

Das anfangs zu bearbeitende Arbeitspaket 2/ Anforderungsanalyse und Systemkonzept gliederte sich in die Teilziele Definition der Feedbackparameter der User, Definition der Datenschnittstellen und der Anlagenparameter sowie Anforderungen und Parameter der Rückkopplung.

3.1.1. Definition der Feedbackparameter der User

Ein interdisziplinärer Workshop zu Beginn der Projektlaufzeit hatte zum Ziel, die Feedbackparameter der Nutzerinnen und Nutzer zu definieren, diese zu spezifizieren und in Funktionsgruppen zu clustern. Abschließend erfolgte eine Priorisierung der Abfrageparameter durch die teilnehmenden Projektmitarbeiterinnen und -mitarbeiter, um das Nutzerfeedback einfach und übersichtlich zu gestalten. In einem intuitiven Brainstorming-Prozess wurden Abfrageparameter aus sämtlichen Bereichen wie Behaglichkeit, Funktionsstörungen, Nutzungskomfort und bauliche Rahmenbedingungen gesammelt. Hierbei wurde vor allem auf die eigene Erfahrung an der Arbeitsstätte TU Graz sowie auch auf vorab geführte Gespräche mit Kolleginnen und Kollegen zurückgegriffen. Insbesondere wurden energierelevante Themen wie Sonnenschutz und Heizung berücksichtigt. Als wichtiger Input für die Art und Häufigkeit von User-Feedback wurden von der Abteilung Gebäude und Technik (GuT) der TU Graz vorab Informationen zu Störungen am Campus TU Graz gesammelt. Dabei wurde vorerst die Art der auftretenden Betriebsstörungen unter Beteiligung der zuständigen Gebäudetechniker erhoben und in Funktionsgruppen gebündelt, anschließend erfolgte eine Abschätzung der Häufigkeit der Meldungen der vorangegangenen Jahre auf Basis der Erfahrung der Service-Mitarbeiterinnen und -mitarbeiter, um eine Gewichtung durchführen zu können. Zusätzlich wurde eine detaillierte, bereits nach Funktionen geclusterte Anliegenliste aus der Literatur (Sakellaris et al, 2016)²⁶, (Bluyssen, 2009)²⁷, (Bluyssen & Cox, 2002)²⁸ zusammengefasst, sodass schlussendlich ein großer Datenpool an möglichen Feedbackparametern zur Verfügung stand. Diese wurden gemäß den Funktionen Licht, Luft, Temperatur etc. spezifiziert und abschließend, nach Priorität gereiht, in Matrixform zusammengefasst. Diese Matrix diente im Weiteren als Grundlage für die mobile App zur Erfassung des Nutzerfeedbacks.

Des Weiteren wurden acht Möglichkeiten der Erfassung der Position im Gebäude untersucht und bezüglich Parametern wie Wartung, Kosten, Usability und Genauigkeit bewertet. Eine Evaluierung

²⁶ Sakellaris, Ioannis A.; Saraga, Dikaia E.; Mandin, Corinne; Roda, Celina; Fossati, Serena; de Kluzenaar, Yvonne; Carrer, Paolo; Dimitroulopoulou, Sani; Mihucz, Victor G.; Szigeti, Tamas; Hanninen, Otto; Fernandes, Eduardo de Oliveira; Bartzis, John G.; Bluyssen, Philomena, M.: Perceived Indoor Environment and Occupants' Comfort in European "Modern" Office Buildings: The OFFICAIR Study. In: International Journal of Environmental Research and Public Health. 13 (5). 2016, S. 444

²⁷ Philomena, B.: The Indoor Environment Handbook: How to Make Buildings Healthy and Comfortable, 1st Edition, Routledge, 2009

²⁸ Bluyssen, P.M.; Cox, C.: Indoor environment quality and upgrading of European office buildings. In: Energy and Buildings Volume 34, Issue 2, February 2002, S. 155-162

und Aufwandsabschätzung aller verfügbaren Lokalisierungsmethoden wurde durchgeführt und ihre Umsetzbarkeit in den Use Cases diskutiert. Schlussendlich erfolgte die Entscheidung über zwei generisch umsetzbare und benutzerfreundliche Methoden der Lokalisierung bei Nutzung der mobilen App, welche eine Rückkopplung zu den gebäudetechnischen Anlagen zulassen und somit für das Forschungsprojekt geeignet sind. Es wurde die Anwendung von QR-Codes, welche auf den bestehenden Raumnummernschildern ergänzt werden, sowie die Raumauswahl mittels Drop-Down-Menü gemäß der Raum- und Gebäudestrukturierung der Use Cases gewählt.

3.1.2. Definition Datenschnittstellen und Anlagenparameter

Als Datenschnittstelle zwischen der Datenbank des Know-Centers und dem bestehenden Gebäudeautomationssystem wurde eine *.csv Schnittstelle festgelegt und für den ersten Use Case der TU Graz, dem Gebäude Inffeldgasse 13, umgesetzt und getestet. Dabei wurde die ca. 3000 Daten umfassende Datenpunktliste der technischen Betriebsführung mit analogen und digitalen Messwerten (z.B. Raumtemperaturen, Feuchte, Fensteröffnung etc.) von Anlagen und Sensoren für den Gebrauch gefiltert und in der vorhandenen Matrixform im Projekt verwendet. Die Aufzeichnungsfrequenz der Sensoren wurde an die Erfordernisse der Datenauswertung für das Projekt angepasst und auf ein viertelstündliches Intervall angehoben. Diese Vorgehensweise wurde bei allen weiteren Gebäuden des Use Cases Campus TU Graz wiederholt.

Des Weiteren wurden, vorerst im Gebäude Inffeldgasse 13, zusätzliche mobile Sensorstationen für die Testphase in einzelnen Räumen festgelegt, welche durch das Know-Center installiert wurden (Abbildung 3). Diese Sensorstationen sind modular aufgebaut und wurden von der Firma Tinkerforge geliefert. Diese Sensoren verfügen über ein wesentlich höheres zeitliches Auflösungsvermögen als jene Sensoren, welche in der Gebäudetechnik verbaut sind. Die Sensoren werden über eine eigene, integrierte Hardware ausgelesen, sind an das Netzwerk angebunden und somit flexibel einsetzbar. Jede Sensorstation verfügt über acht Sensoren für Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit, CO₂-Gehalt der Luft, Luftdruck, Lichtstärke, Bewegungsmelder, Beschleunigungsmesser und Lautstärkemessung. Die integrierte Hardware wertet die Sensoren aus und sendet die Messdaten per MQTT Protokoll (Message Queuing Telemetry Transport)²⁹ im JSON Format (JavaScript Object Notation) an die Datenbank. Während des Zeitraums der Feedback-Erfassung wurden auch andere Gebäude des Campus mit zusätzlicher Sensorik, wie in Kapitel 3.4.1 angeführt, ausgestattet. Durch die Nutzung einer universell anwendbaren *.csv Schnittstelle konnten die Messdaten der zusätzlichen Sensoren ohne großen Mehraufwand in die Datenbank übernommen und mit dem User-Feedback-System kombiniert werden.

²⁹ Hillar, G. C.: MQTT Essentials-A lightweight IoT protocol. Packt Publishing Ltd. 2017

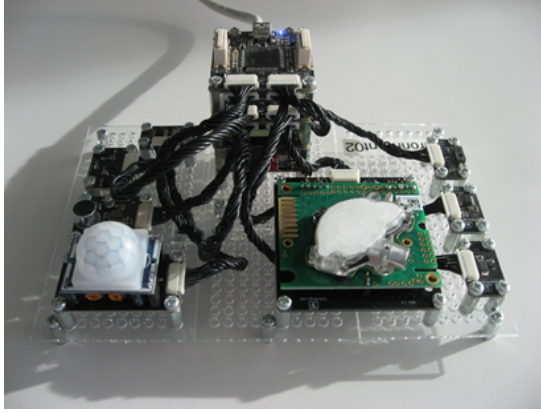


Abbildung 3: Sensorstation Know-Center

In Use Case 2/ Pflegekrankenhaus Wien erfolgte die Datenaufzeichnung gemäß folgendem Muster: Die aufgezeichneten Energie- und Gebäudedaten wurden über einen Datenkonzentrator (Beckhoff-Industrie-PC) per Internet an die BLUAUL-Plattform übertragen. Neben der Temperatur wurden auch noch die Raumlufffeuchte und der CO₂-Gehalt in ausgewählten Räumen detektiert. Die Daten wurden von vorhandenen, wie auch zusätzlichen Zählern und Fühlern per Modbus an die SmartBox übermittelt. Die Auswahl der Sensoren in diesem Use Case erfolgte abhängig von der vorhandenen Busverkabelung. Bei vorhandener Busanbindung wurden Kombinationssensoren (Temperatur, Feuchte und CO₂) der Firma EAP electric eingesetzt. In Räumen ohne direkte Anschlussmöglichkeit wurde auf „energy harvesting“ Lösungen via EnOcean zurückgegriffen. Dafür wurden Gateways (Funk EnOcean – Modbus rtu; STC-RS485 Modbus) und Raumsensoren, beides vom Hersteller Thermokon, eingesetzt.

3.1.3. Anforderungen Datenauswertung und Parameter der Rückkopplung

Auf Basis der definierten Feedback- und Anlagenparameter wurde in einem nächsten Schritt die Input-Output-Relation festgelegt und die Systemarchitektur in grafischer und textlicher Form definiert. Die Infrastruktur für das Sammeln (Übertragungsprotokolle), Speichern (Datenbanken) und Analysieren (Algorithmen-Bibliotheken und Softwarepakete) von Daten wurde definiert und aufgesetzt. Erste Experimente mit der Anwendung von Analysemethoden (statistisch, maschinelles Lernen) auf Sensordaten wurden durchgeführt, um Effekte oder Verhalten zu erkennen. Auf dieser Basis wurden in weiterer Folge Methoden für eine Rückkopplung untersucht und evaluiert. Im nächsten Schritt wurden die Experimente vertieft und die Sensordaten schlussendlich mit dem gesammelten User-Feedback der Use Cases während des Datenaufzeichnungszeitraums verknüpft.

3.1.4. Definition des Systemkonzepts sowie Spezifikation des Funktionsmusters

Ausgehend von den erarbeiteten und definierten Anforderungen wurde eine Systemarchitektur entworfen. Dabei diente die von Reekie et al. (2006)³⁰ vorgeschlagene Aufteilung in unterschiedliche Views als Basis für die Erstellung der Architektur. Konkret wurde in einem ersten Schritt die konzeptionelle Architektur (Abbildung 4) erstellt. In dieser wurden die domänenspezifischen Verantwortlichkeiten als Komponenten visualisiert. Die Verbindungen entsprechen dem Informationsfluss. Die konzeptuelle Architektur umfasst dabei die Beziehungen zwischen den

³⁰Reekie, J.; Mcadam, R. J.; McAdam, R.: A software architecture primer. Angophora Press, 2006

verschiedenen technischen Komponenten und Services des Systems (zwei mobile Clients, Desktop/Browser Client, der Server, drei verschiedene Datenbanken, Maschine Learning Komponente), externen Systemen und Einrichtungen (Sensordatenquellen, Lokalisationssysteme, TU Graz-Informationssysteme) und allen Akteuren (Stakeholder) mit ihren entsprechenden Rollen (Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter von TU Graz, Pflegekrankenhaus und Abteilung GuT, User Interface Developer/Designer, Server Entwickler, Data Scientist). Diese Art der Darstellung gibt einen guten Überblick über die Funktionalität des Systems, die sogenannte Statik, wobei das dynamische Verhalten des Systems ebenfalls mittels Use Case Maps (Buhr, 1998)³¹ modelliert und mit den Partnern diskutiert wurde.

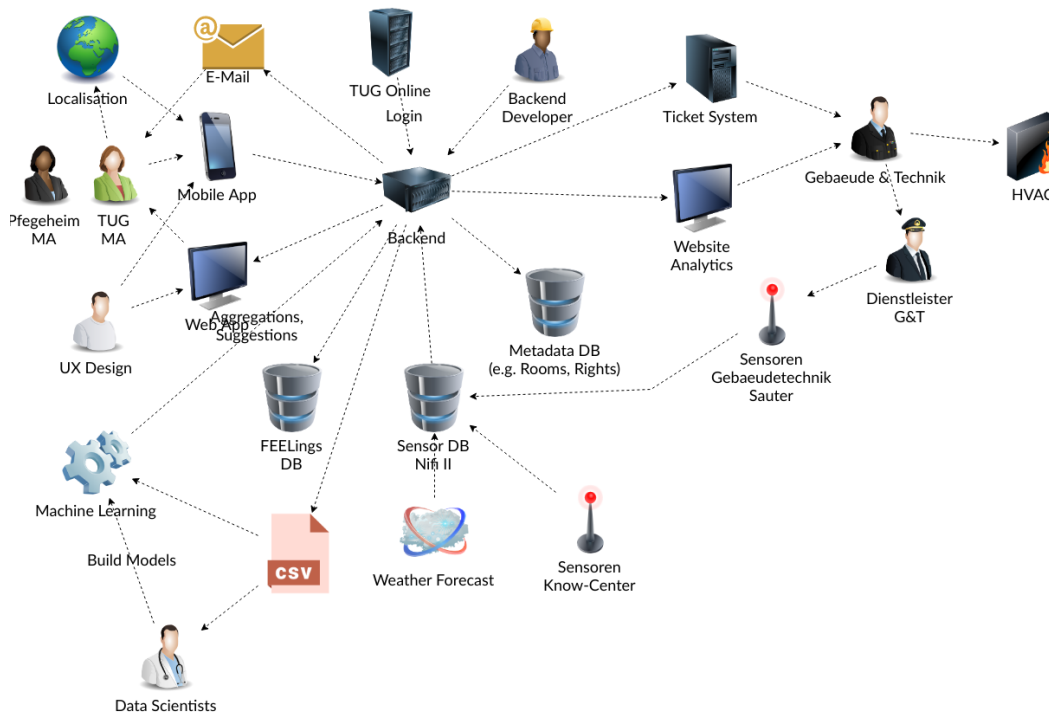


Abbildung 4: Konzeptuelle Systemarchitektur

Aus der Systemarchitektur wurde die Umsetzungsarchitektur (Abbildung 5) abgeleitet, die spezifiziert, welche Softwarekomponenten implementiert, installiert und integriert werden müssen, um das in der konzeptuellen Architektur definierte System umsetzen zu können.

³¹Buhr, R.J.A.: Use Case Maps as Architectural Entities for Complex Systems In: IEEE Transactions on Software Engineering. Vol. 24, No. 12, December 1998, S. 1131-1155

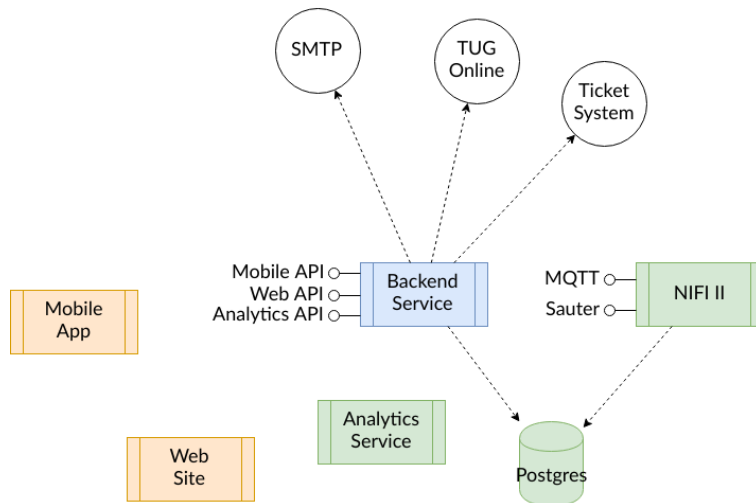


Abbildung 5: Umsetzungsarchitektur

In der Umsetzungsarchitektur gemäß Abbildung 5 werden separat Applikationskomponenten und Infrastrukturkomponenten dargestellt. Zudem wurden externe Systeme, wie beispielsweise der SMTP Server, mit in die System-Grafik integriert. Die Beziehungen zwischen den Komponenten wurden als Programmierschnittstellen (APIs, Kommunikationsprotokolle) definiert. Aufgrund der geringen Anzahl an Nebenläufigkeitsquellen und durch die konsistente Verwendung von bekannten Entwurfsmustern konnte auf eine Laufzeitdarstellung verzichtet werden.

3.2. Nutzerintegration durch Anreizsysteme und intuitives User Interface Design

Das für den Projekterfolg ausschlaggebende Hauptziel war die Umsetzung eines ansprechenden und intuitiv zu bedienenden Feedbacksystems sowie von Anreizfunktionalitäten für die Gebäudenutzerinnen und -nutzer, damit diese das entwickelte Feedbacksystem nutzen. Sämtliche Vorarbeiten zur Erreichung dieses Projektziels wurden im Zuge des hier beschriebenen Arbeitspaketes durchgeführt.

3.2.1. Erarbeitung der Behaglichkeitsabfrage

Im Rahmen von Workshops wurden Konzepte für das Abfragen von Behaglichkeitsempfinden und Wohlbefinden im Raum anhand von bildhaften Mustern vorgestellt und diskutiert. Dabei kristallisierten sich vor allem die Methode der Abfrage mittels einer Mood-Map ergänzt durch Slider (Schieberegler) als geeignet für eine Behaglichkeitsabfrage heraus, da diese Möglichkeiten einer für Mobilgeräte optimierten und benutzerfreundlichen Erfassung bieten. Durch diese beiden, hier näher beschriebenen Abfragemodule kann einerseits die generelle Behaglichkeit der Nutzerinnen und Nutzer abgefragt werden, andererseits können einzelne Behaglichkeitsparameter von Usern spezifiziert werden.

- Mood-Map (Abbildung 6): Zur Erfassung des persönlichen Empfindens wurde ein 2-dimensionales Farbsystem gewählt, welches bereits in mehreren Forschungsarbeiten untersucht und bestätigt wurde³². Stimmungen, Emotionen und andere emotional

³² Rivera-Pelayo, V.; Fessler, A.; Müller, L.; Pammer-Schindler, V.: Introducing Mood Self-Tracking at Work: Empirical Insights from Call Centers, CM Transactions on Computer-Human Interaction, 24(1). 2017, S. 3:1-3:28

aufgeladene Ereignisse können hiermit vereinfacht über die beiden Zustände „fühle mich gut/schlecht“ bzw. „hohe/niedrige Energie“ erfasst werden.

Ihr Persönliches Empfinden:



Abbildung 6: Mood-Map

- Slider (Abbildung 7): Slider (Schiebereglern) ermöglichen eine detailliertere Abfrage für die Auswertung von relevanten Behaglichkeitsparametern. Ein weiterer Vorteil ist die einfache Verwendung und die Vertrautheit der Benutzer mit dieser Art der Eingabe auf mobilen Geräten. Die Slider-Bewertung wurde für die einzelnen Befindlichkeitsparameter Temperatur, Luftqualität, Umgebungslautstärke und Lichtstärke eingesetzt. Zusätzlich kann bei der Art der Tätigkeit mittels Slider zwischen *sitzend*, *stehend* und *in Bewegung* differenziert werden.

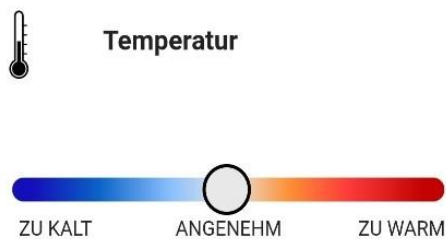


Abbildung 7: Slider für Temperatur-Feedback

3.2.2. Erarbeitetes Konzept für Nutzeranreiz und Nutzerakzeptanz

Eine hohe Nutzerakzeptanz kann nur mit einer guten Usability der App sowie spürbarem Mehrwert durch die Anwendung erreicht werden. Aufbauend auf diesen beiden Zielen wurden die Funktionen der App festgelegt sowie das User Interface gestaltet. Der Mehrwert der Anwendung für die User liegt einerseits an der Rückkopplung vom Gebäudebetreiber in Form einer *Gebäudeinformation*, welche den Nutzerinnen und Nutzern Informationen über das Gebäude weitergibt. Andererseits führen die strukturierte Erfassung und einfache Meldemöglichkeit von Funktionsstörungen durch User dazu, dass diese durch das zuständige Servicepersonal rascher behoben werden. Schlussendlich soll durch die Rückkopplung mit dem Gebäudeautomationsystem eine spürbare Verbesserung im energetischen Bereich – z.B. durch optimierte Fensteröffnung oder Heizleistungsanpassung – aber auch im Komfortempfinden der Nutzerinnen und Nutzer erzielt werden.

Neben diesen Anreizsystemen, welche durch die Hauptfunktion der FEELings-App gegeben sind, wurden weitere Möglichkeiten für eine verstärkte Nutzer motivation gesammelt, welche zu einem

hohen und vor allem kontinuierlichen Nutzerfeedback führen. Hierbei wurde zwischen der Erstregistrierung und -anwendung und der möglichst dauerhaften und oftmaligen Verwendung unterschieden.

Das wichtigste Anreizsystem stellt gemäß App-Designer Badelme der Spaß dar, die App zu nutzen³³. Dies wird vor allem durch die drei spielerischen Elemente des *Role Play* – eine Verbesserung des Nutzererlebnisses durch intensive Verwendung der App –, des Wettbewerbs mit anderen Usern und durch vorgegebene Ziele erreicht. Diese Elemente wurden mittels spielerischer Funktionen in einfacher Weise bei der Gestaltung der Benutzeroberfläche grafisch und inhaltlich berücksichtigt, wie in Kapitel 3.3.1. näher erläutert. Dabei standen jedoch die Einfachheit und Usability der App im Vordergrund, da diese maßgebend für eine hohe Feedback-Frequenz sind.

3.2.3. Konzeption eines intuitiven User Interfaces

Aufbauend auf den definierten Feedbackparametern, der erarbeiteten Befindlichkeitsabfrage und dem Konzept für Nutzeranreiz und Akzeptanz wurde die Benutzeroberfläche festgelegt, über die die Gebäudenutzerinnen und -nutzer ihre Empfindungen sowie auch Anliegen an das Feedbacksystem weitergeben können. Zusätzlich wurde eine eigene Funktion in die App integriert, welche Informationen des Feedbacksystems an die User in Form einer *Gebäudeinformation* – ähnlich einem schwarzen Brett – zurückgibt. Dadurch können einerseits allgemeine Informationen zum Gebäude wie z.B. Funktionsstörungen, aber auch Empfehlungen an Nutzerinnen und Nutzer gegeben werden, andererseits wird der Stand der Bearbeitung der eigenen Anliegen aufgelistet, wodurch für den User sofort ein Mehrwert sichtbar wird.

Die Gestaltung der intuitiven Benutzeroberfläche wurde in mehreren interdisziplinären Workshops von den Projektpartnern gemeinsam durch Anregungen für Icons, Text- und Button-Anordnungen sowie Textvorgaben definiert und in einem iterativen Prozess laufend überarbeitet. Skizzen der Benutzerschnittstelle wurden zuerst per Hand vorgezeichnet und besprochen, um eventuelle Probleme und Fragen zu identifizieren. Als nächster Schritt wurde das grobe Design der mobilen Applikation in acht verschiedenen Use-Case-Szenarien mit Hilfe von Mockups entwickelt und in mehreren Zyklen diskutiert und verfeinert.

Nach Fixierung des groben Designs erfolgte eine Erstellung von klickbaren Mockups als HTML5 Seiten ohne Logik, sodass neben dem visuellen Design auch das Interaktionsdesign vollständig definiert war und für Diskussionen zur Verfügung stand (Abbildung 8). Die Mockups wurden durch einzelne User, aber auch in Projekt-Workshops evaluiert und anschließend weiter optimiert. Die Erstellung als HTML-Seite ermöglichte später eine direkte Verwendung der Mockups zur Erstellung des Funktionsmusters.

Die Struktur des Funktionsmusters wurde bereits auf verschiedene Benutzergruppen ausgelegt, sodass Elemente des User Interfaces jederzeit ohne großen Aufwand an die jeweiligen Bedürfnisse angepasst werden können, z.B. besonders große Icons für ältere Personen.

³³ Klaffinger, L.: Das (App-) Leben ist ein Spiel, Meine Woche 34 (05), 2018

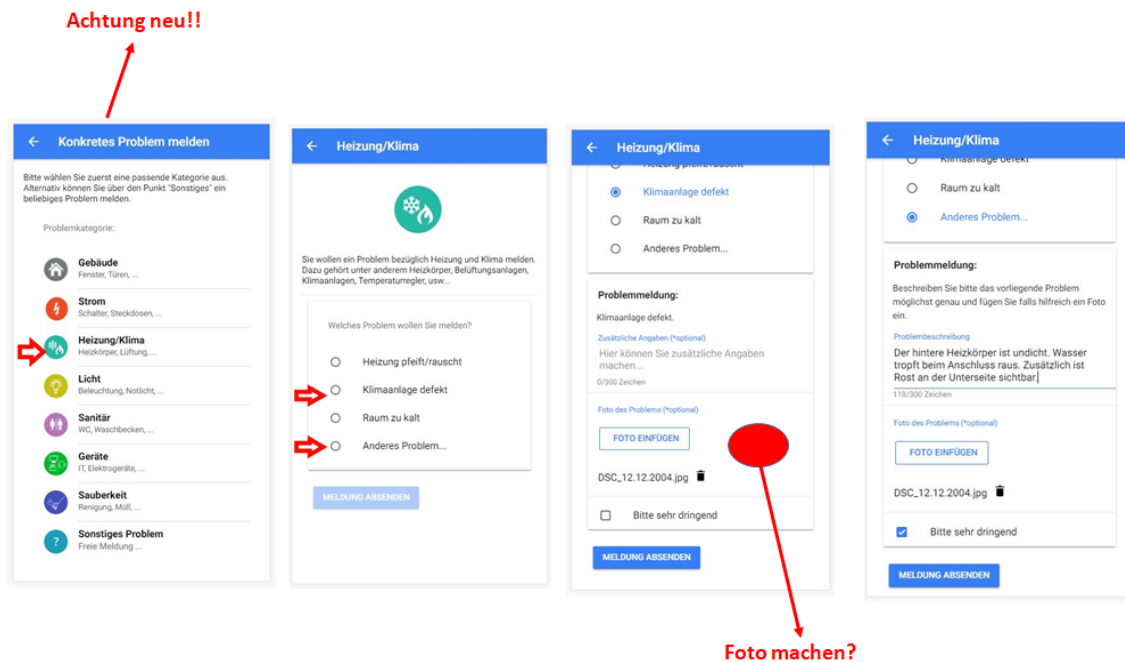


Abbildung 8: Klickbare Mockups mit HTML5

3.2.4. Evaluierung und Nachjustierung der Anreizsysteme sowie der Feedbackabfrage

Die ständige Betreuung der Nutzerinnen und Nutzer fand einerseits durch regelmäßige persönliche Gespräche und Interviews statt, andererseits konnten User mittels E-Mail sowie eines Online-Formulars jederzeit Feedback an das Projektteam senden. Der direkte Kontakt mit den Usern sowie die große Anzahl an User-Feedback via FEELings-App zeigten, dass keine zusätzlichen Anforderungen an die Feedbackabfrage gefordert wurden, weshalb eine Nachjustierung dieser entfiel. Diese positiven Ergebnisse decken sich auch mit der gegen Ende der Projektlaufzeit durchgeführten Online-Umfrage unter allen Usern. Lediglich Anpassungen an Software-Updates sowie etwaige Fehlerbehebungen wurden während des Testzeitraums durchgeführt.

Die Evaluierung der Rückmeldungen der zweiten User-Gruppe – die im Hintergrund tätigen Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter der Gebäudebetreiber, welche für die Bearbeitung von gemeldeten Anliegen und auch für die Eingabe von Gebäudeinformationen zuständig sind – zeigte einige wenige Verbesserungsvorschläge. Nachdem diese keinen Einfluss auf die Funktionen der Bearbeitung seitens der Gebäudebetreiber haben, wurde auf eine Umsetzung im Rahmen des Projekts abgesehen. Für eine wirtschaftliche Weiternutzung der App wurden die Verbesserungsvorschläge der Gebäudebetreiber dokumentiert und deren Umsetzung zeitlich und monetär bewertet.

3.2.5. Berücksichtigung datenschutzrechtlicher Aspekte

Bei der Implementierung datenschutzrechtlicher Aspekte wurde insbesondere die neue Datenschutzgrundverordnung (DSGVO) berücksichtigt. Seitens der TU Graz gibt es exakte Vorlagen und Mustertexte, um Datenschutzinformationen an künftige Nutzer DSGVO-konform weitergeben zu können. Diese Mustertexte wurden in die App sowie die Website übernommen, an die Erfordernisse der Datenauswertung angepasst und von den verantwortlichen Datenschutzbeauftragten überprüft, adaptiert und um eine englischsprachige Version ergänzt. Zusätzlich wurden zwei weitere Maßnahmen zum Schutz der Daten umgesetzt: Zum einen wurde eine *Vereinbarung zur*

gemeinsamen Verantwortung über die Datenverarbeitung (Joint Control) erstellt, da die Datenverarbeitung gemeinsam von der Projektleitung TU Graz und dem Projektpartner Know-Center GmbH durchgeführt wird. Bei dieser Vereinbarung wurde hinsichtlich der Verantwortung zwischen der Evaluierung und Datenauswertung durch die TU Graz und zusätzlich dazu der Datensammlung und -speicherung durch die Know-Center GmbH unterschieden. Zum anderen wurden die technischen und organisatorischen Maßnahmen gemäß Art 32 DSGVO festgelegt, wobei auch hier wieder eine Abstimmung zwischen TU Graz und Know-Center GmbH im Sinne der gemeinsamen Verantwortung über die Datenverarbeitung erfolgte.

Eine Anonymisierung bzw. Pseudonymisierung der User-Feedback-Daten wurde aufgrund der Berücksichtigung des Stands der Technik, der Implementierungskosten und der Art, des Umfangs, der Umstände und der Zwecke der Verarbeitung (Art. 32 (1) DSGVO) nicht umgesetzt. Es wurde jedoch bereits programmiertechnisch vorbereitet, dass unternehmensspezifische elektronische Zugangssysteme inklusive einer Pseudonymisierung der Daten in die FEELings-App implementiert werden können. Zusätzlich wurden sämtliche Projektmitarbeiterinnen und -mitarbeiter zur Vertraulichkeit verpflichtet sowie sichergestellt, dass ausschließlich diese Zugriff zu den gespeicherten Daten haben. Die Maßnahmen zur Berücksichtigung datenschutzrechtlicher Aspekte wurden von den FEELings-Usern als ausreichend empfunden, wie dies Gespräche und Interviews, gemäß Kapitel 3.4.3, während der Projektlaufzeit zeigten. Die in der App und auf der Website aufscheinende und bei Registrierung zu bestätigende Datenschutzinformation war für die User gut verständlich aufbereitet.

3.3. Erstellung des Funktionsmusters

Das konzipierte User Interface Design für die Erfassung des Nutzerfeedbacks inklusive der Konzepte für Anreizsysteme sowie des Datenschutzes mündete in der Erstellung des Funktionsmusters für das Erfassen des Nutzerfeedbacks.

3.3.1. Funktionsmuster für das Erfassen des Nutzerfeedbacks – die FEELings-App

Aufbauend auf den definierten Feedbackparametern und dem erarbeiteten Konzept eines intuitiven User Interfaces wurde das Funktionsmuster für die mobile App vom Projektpartner Know-Center umgesetzt. Um dieses sowohl auf allen gängigen mobilen Betriebssystemen als auch als Web-Applikation anbieten zu können, wurde auf eine native Entwicklung für jede einzelne Plattform verzichtet und eine Cross-Plattform App erstellt. Grundtechnologie ist hierbei das Angular 2.x Framework zur Erstellung webbasierender Applikationen. Darauf aufbauend wurden zwei Bibliotheken verwendet, um dem Funktionsmuster das Look-and-Feel einer nativen mobilen Anwendung zu geben und eine Bereitstellung in den App-Stores von Google und Apple zu ermöglichen:

- Ionic-Framework 3.x, welches alle Front-End-Komponenten zur Verfügung stellt, die für eine mobile Anwendung benötigt werden.
- Apache Cordova 4.x, für die Unterstützung aller mobilen Plattformen, Zugriff auf Hardwarefunktionen wie Kamera, GPS-Sensor usw., sowie Umwandlung der Web-Applikation in eine für das jeweilige mobile Betriebssystem angepasste App.

Als Entwicklungsumgebung wurde das freie Microsoft Visual Studio Code verwendet, welches plattformübergreifend für Windows, macOS und Linux verfügbar ist. Die verwendeten Programmiersprachen sind TypeScript für die komplette Logik und HTML5 bzw. (S)CSS für das User Front-End. Alle für das Funktionsmuster verwendeten Tools und Bibliotheken sind als freie Softwarelizenz verfügbar. Die benötigten Bilder und Icons wurden entweder aus einem durch das Ionic-Framework bereitgestelltem Set entnommen oder selbst erstellt. Die Anpassbarkeit des Funktionsmusters an die differenzierten Anforderungen der beiden Use Cases wurde in die Systemarchitektur integriert.

Die App wurde den Usern in den Sprachen Deutsch und Englisch zur Verfügung gestellt. Das schlussendlich fixierte umgesetzte Design des User Interfaces ist in Abbildung 9 und Abbildung 10 in englischer Sprache dargestellt. Abbildung 9 zeigt links die drei Hauptfunktionen der FEELings-App, die Behaglichkeitsmeldung, die Anliegen-Meldung und die Gebäudeinformation; letztere, um eine Rückkopplung des Feedbacks zu den Usern bewerkstelligen zu können. Für die User, welche sich einmalig zur Nutzung der App inkl. Angabe des Arbeitsplatzes registrieren müssen, ist auf der Startseite sofort der hinterlegte Arbeitsplatz sowie die Anzahl von gemeldeten Anliegen oder Gebäudeinformationen für diesen Arbeitsplatz ersichtlich. Die Änderung des Raums mittels QR-Codes bzw. Drop-Down-Menüs ist jederzeit durchführbar, um die Möglichkeit zu bieten, eine Meldung für einen anderen Raum abgeben zu können. Abbildung 9 (Mitte) zeigt das umgesetzte User Interface der Behaglichkeitsmeldungen. Die mittels Mood-Map abgegebene Behaglichkeitsmeldung kann zusätzlich mittels Slider für Temperatur, Luftqualität, Umgebungslautstärke und Lichtstärke konkretisiert werden. Zudem kann die Art der Tätigkeit (sitzend, stehend, in Bewegung) mittels Slider definiert sowie ein freier Text hinzugefügt werden.

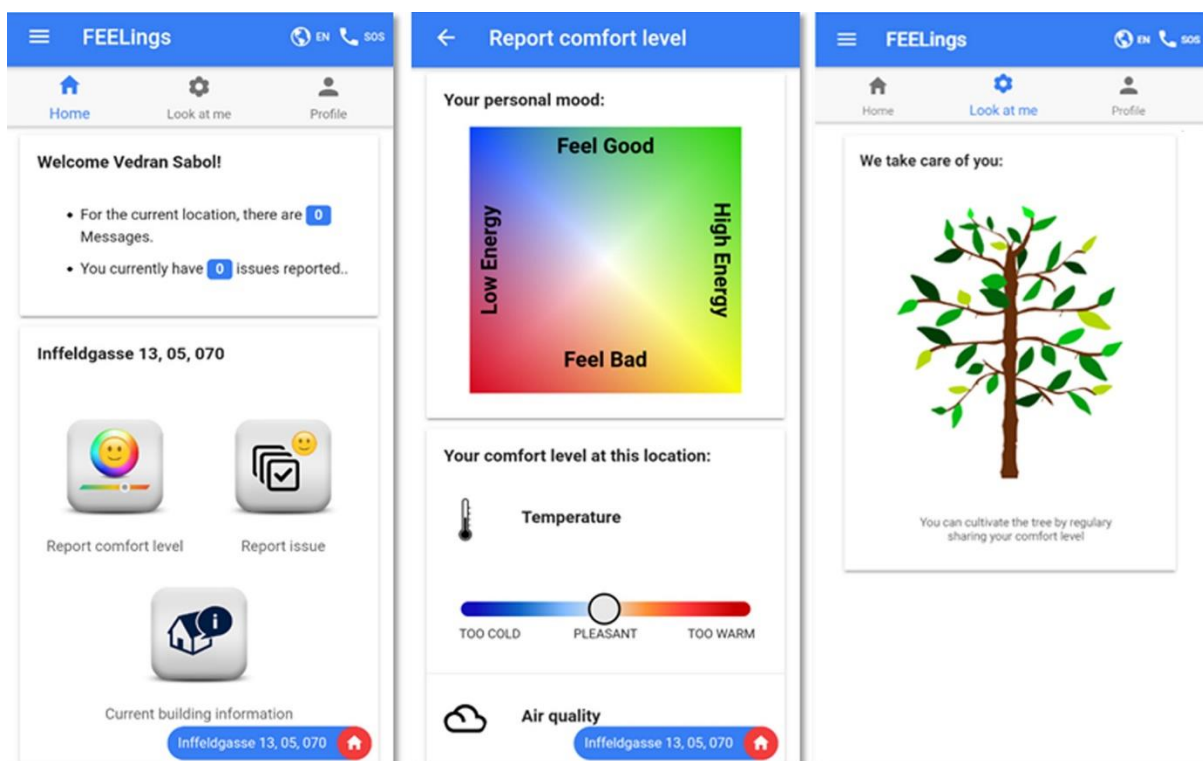


Abbildung 9: Benutzeroberfläche der FEELings-App – englischsprachige Version. Links: Startseite mit persönlicher Anrede und hinterlegtem Arbeitsplatz; Mitte: Interface Behaglichkeitsmeldung mit Mood-Map und Slidern; Rechts: Motivationsbaum

Die erarbeiteten Maßnahmen des Nutzeranreizsystems wurden als Gaming-Elemente in der Benutzeroberfläche umgesetzt. Dazu zählen der *Motivationsbaum*, welcher sich bei Verwendung der

App in Abhängigkeit der Häufigkeit der Behaglichkeitsmeldungen verändert (erblüht, vertrocknet) (Abbildung 9, rechts) sowie der *Feel Good Index*, welcher die Auswertung des Behaglichkeitsfeedbacks grafisch darstellt und für den User in gewohnter Darstellung (z.B. Sterne-Bewertung in Hotellerie) verständlich macht (Abbildung 10 rechts).

In Abbildung 10 sind die anderen beiden Hauptfunktionen – die Anliegen-Meldung sowie die Gebäudeinformation – dargestellt.

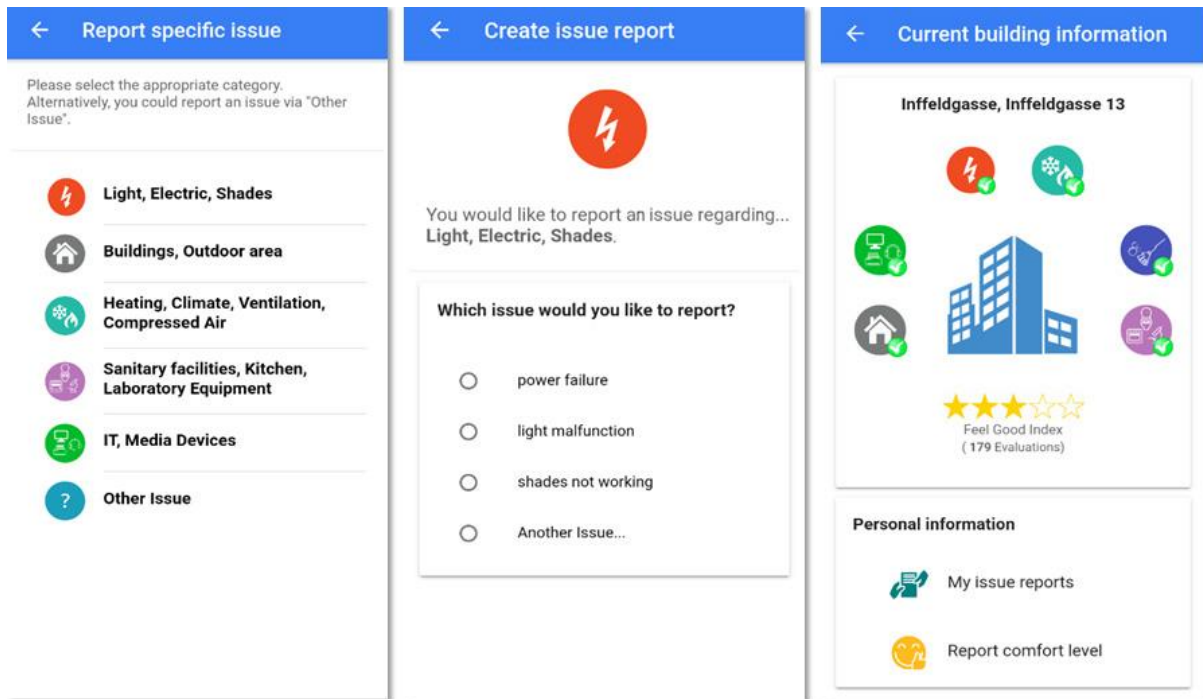


Abbildung 10: Benutzeroberfläche der FEELings-App. Links: Auswahlkategorien Anliegen-Meldung; Mitte: Auswahlkategorie Anliegen Licht/ Elektro/ Sonnenschutz; Rechts: Spezifizierung Gebäudeinformation sowie Gebäudebewertung.

Die Inhalte der Funktion Anliegen-Meldung wurden gemäß der gesammelten und geclusterten Feedbackparameter strukturiert, wobei hier in Haupt- und Unterkategorien geteilt wurde. Bei jedem Anliegen besteht zusätzlich die Möglichkeit der freien Texteingabe sowie der Eingabe eines Fotos durch direkte Verknüpfung mit der Smartphone-Kamera. Auch können wichtige Anliegen zur raschen Bearbeitung speziell gekennzeichnet werden. Durch die Verortung der Anliegen-Meldung gelangen diese direkt an das zuständige Servicepersonal. Dies führte zu einer schnelleren Bearbeitung, was einem der Ziele des Nutzeranreizsystems entsprach. Nach der Meldung eines Anliegens erhält der User per E-Mail ein Feedback, dass das Anliegen in Bearbeitung gesetzt wurde und das Anliegen wird auf der Startseite der App (Abbildung 9 links) hinzugefügt. Nach Bearbeitung des gemeldeten Anliegens, z.B. einer Funktionsstörung, erhält der User erneut eine E-Mail-Nachricht, dass das Anliegen behoben wurde, sodass ein ständiger Rückkanal zu den Nutzerinnen und Nutzern gegeben ist. Diese E-Mails können vom Servicepersonal der Gebäudebetreiber automatisch über eine Web-Benutzeroberfläche generiert werden. Die Nutzung eines Rückkanals mittels E-Mails wurde vom Projektteam als universell einsetzbare Lösung angesehen, weshalb von einem aufwendig zu implementierenden Ticketing-System abgesehen wurde.

Die Funktion der Gebäudeinformation ist in Abbildung 10 rechts dargestellt. Hier werden gebäude-spezifische Informationen für User bereitgestellt. Dabei können einerseits aus dem Feedback abgeleitete Hinweise, wie z.B. Empfehlungen zu Energiesparmaßnahmen, andererseits technische

Informationen, z.B. Wartungsarbeiten am Aufzug, an die Gebäudenutzerinnen und -nutzer weitergegeben werden. Dieser Mehrwert ist ein wichtiger Teil des Nutzeranreizsystems.

Die Befüllung dieses Rückkanals obliegt, so wie auch die Bearbeitung der Anliegen-Meldungen, dem Gebäudebetreiber, welcher dies über eine einfache Benutzeroberfläche als Push Notification mittels Smartphone oder Desktop-Browser durchführen kann. Der Status sämtlicher gemeldeter Anliegen ist für den Gebäudebetreiber auf einem Web-Interface gemäß Abbildung 11 einsehbar, um hier eine zusätzliche Kontrolle sowie den Überblick über gemeldete Anliegen zu ermöglichen.

Anliegen Navigieren

[voriges Anliegen](#) [nächstes Anliegen](#)

Filter:

Anliegen-ID: 4d9e62dd-b8d5-4aab-8d99-f9a18243aaa6, status: RESOLVED

Ein dringendes Anliegen wurde in Inffeldgasse gemeldet

Anliegen Beschreibung

CategoryId: ELECTRIC
Categorie: Licht, Strom, Beschattung
Subjekt: Stromausfall
Text: Testanliegen
Datum:
Dringlichkeit: **Es handelt sich um ein dringendes Anliegen!!**

Ort

Bereich: Inffeldgasse
Gebäude: Inffeldgasse 31
Stockwerk: 01
Raumnummer: 002
Roomcode: GT01002

Absender

Name:
Email:
telefonnummer:

Status

Das Anliegen wurde **BEHOBEN!**

[Anliegen als OFFEN Setzen](#)

Galerien

Abbildung 11: Benutzeroberfläche des Gebäudebetreibers zum Einsehen der Anliegen-Meldungen

3.3.2. Erstellung der Datenbanken

Die Messdatenerfassung und -speicherung gemäß Abbildung 12 nimmt alle relevanten Messdaten im Projekt entgegen und speichert diese zentral in einer Datenbank für die spätere Analyse und Auswertung.

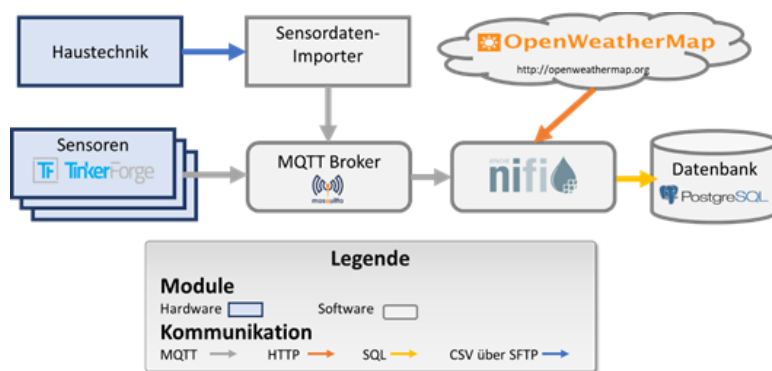


Abbildung 12: Softwarearchitektur für Messdatenerfassung und Speicherung

Der Großteil der Messdaten kommt von der bereits in den Gebäuden installierten Haustechnik. Diese Daten wurden als Comma-Separated Values (CSV) Dateien aus dem Leitsystem der Haustechnik exportiert. Zur Auswertung müssen die Daten vorher importiert und sinngemäß abgespeichert werden. Daher stellte der Projektpartner Know-Center GmbH den Partnern einen Zugriff auf einen SFTP-Server zur Verfügung, damit aufgezeichnete Sensordaten (CSV-Dateien) dort hochgeladen werden können. Ein eigens dafür entwickelter Sensordaten-Importer (Python Script) las diese CSV-Dateien ein und wandelte diese Dateien dann in ein JSON-Format um. In diesem Format können die Daten per MQTT-Protokoll an einen gemeinsamen Broker geschickt werden. An diesem Broker trafen auch die Messdaten der temporär für dieses Projekt im Gebäude installierten Sensoren ein. Als zentraler Knotenpunkt fungierte Apache NiFi. NiFi übernahm die Daten vom MQTT-Broker und schrieb sie in die Datenbank. Zusätzlich fragte NiFi auch Daten über das aktuelle Wetter vom Online-Dienst OpenWeatherMap³⁴ ab und speicherte diese ebenso in der Datenbank ab.

Alle Messdaten in der Datenbank haben einen Typ, eine Identifikation, einen Zeitstempel und einen Wert.

- Typ: Gibt an, welche physikalische Größe von welchem Messpunkt gemessen wurde, z.B. Temperatur gemessen durch einen Raumsensor der Haustechnik. Gespeichert als Zeichenkette.
- Identifikation: Laufende Nummer bzw. Seriennummer eines Sensors, der an einem Messpunkt verbaut ist. Gespeichert als Zeichenkette.
- Zeitstempel: Zeitpunkt der Messung gespeichert mit Mikrosekunden-Genauigkeit.
- Wert: Gemessener Wert, der unterschiedliche Formate haben kann. Es sind ganze Zahlen, Gleitkommazahlen, Boolesche Werte und Zeichenketten erlaubt.

Nur Typ und Identifikation gemeinsam können Sensor und Messpunkt eindeutig identifizieren. Die Kombination aus einem bestimmten Typ, Identifikation und Zeitstempel kommt nur einmal in der Datenbank vor. Jeder dieser vier Teile eines Messpunktes wurde im Datenbankschema abgebildet. Das Datenbankschema besteht aus zwei Tabellen. Die erste Tabelle beschreibt die Messpunkte und speichert immer den Typ und die Identifikation. Zusätzlich wurde jedem Messpunkt eine eindeutige, interne Nummer zugewiesen und auch der Datentyp des Messwertes wurde gespeichert. Die zweite Tabelle speicherte die eigentlichen Messdaten und besteht aus den Spalten der internen

³⁴ <https://openweathermap.org/>

Messpunktnummer, dem Zeitstempel und dann vier Spalten für die unterschiedlichen Werte, also ganze Zahlen, Gleitkommazahlen, Boolesche Werte und Zeichenketten. Dieses Datenschema ist eine Umsetzung des EAV-Modells und ermöglicht eine skalierbare und flexible Datenspeicherung. Die Tabelle für die Messwerte wurde partitioniert gespeichert, d.h. die Tabelle wurde von der Datenbank in mehrere Teile zerlegt, um schneller darauf zugreifen zu können. Bei der Tabelle mit den Messpunkten war dies nicht von Nöten, da hier die Anzahl der Einträge weitaus geringer ist.

Zusätzlich zu den Signaldaten wurden Nutzerdaten sowie das User-Feedback in eine weitere Datenbank gespeichert. Diese beinhaltet die vollständigen Daten über User und Gebäude, das Benutzerfeedback (Mood-Werte, Slider-Werte und Problembeschreibungen) und begleitende Information zu Position (Gebäude/freie Fläche, Raum) und Zeit. Abbildung 13 zeigt das allgemeine Schema dieser Datenbank zur Sammlung des Nutzerfeedbacks.

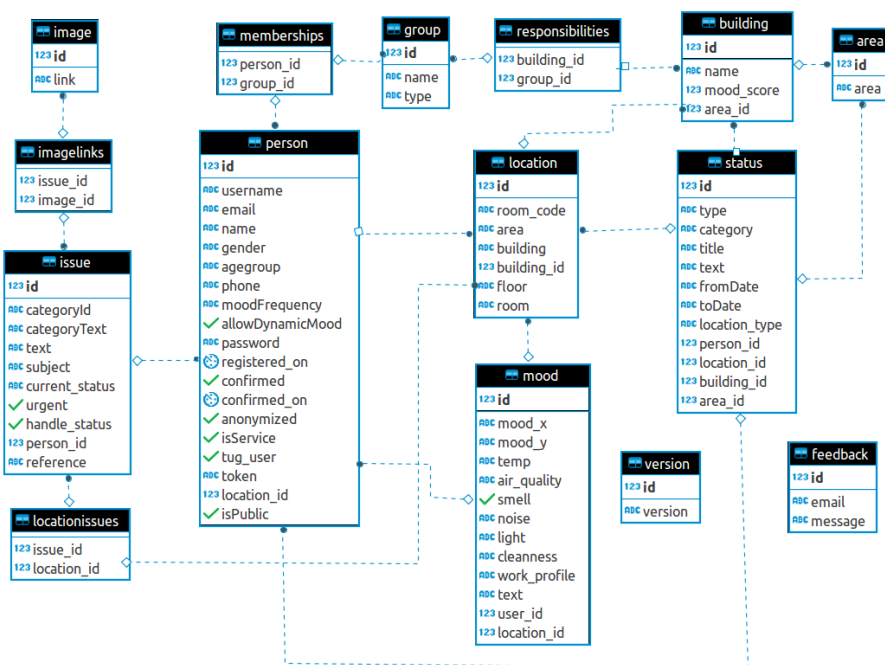


Abbildung 13: Schema der Datenbank zur Sammlung des Nutzerfeedbacks

Die abgegebenen Befindlichkeiten von einer Person in einem Raum (z.B. Behaglichkeit, Temperatur-empfinden, subjektive Luftqualität etc.) wurden in der Tabelle „mood“ abgespeichert, die entsprechend mit der Tabelle „person“ und „location“ verbunden sind. Gemeldete Anliegen wurden sowohl dem technischen Facility Management über E-Mails mitgeteilt als auch in der Tabelle „issue“ abgespeichert. Die Störmeldungen, die einen Raum, ein Gebäude oder einen Bereich betreffen können, wurden in der Tabelle „status“ gespeichert und automatisch nach ihrer Ablaufzeit aus der Datenbank gelöscht.

Die mobile App kommuniziert mit dem Server über eine REST-Schnittstelle³⁵. Um dabei die beiden Use Cases, die TU Graz und das Pflegekrankenhaus, komplett voneinander zu trennen, wurden identische Instanzen vom Server und den Datenbanken durch zwei verschiedene, als Docker Container³⁶ eingesetzte, Installationen bereitgestellt. Durch die Nutzung verschiedener

³⁵ Masse, M.: REST API Design Rulebook: Designing Consistent RESTful Web Service Interfaces. O'Reilly Media, Inc. 2011

³⁶ Nickoloff, J.; Kuenzli, S.: Docker in action. Manning Publications Co. 2016

Server/Datenbank-Instanzen, die durch Docker Container voneinander isoliert sind, wurden die Datensicherheit und die Privatsphäre der Nutzerinnen und Nutzer optimal geschützt.

3.3.3. Funktionsmuster für das Abrufen von Statistiken und Informationen

Alle im Projekt erfassten Daten wurden in einer zentralen Datenbank gespeichert. Somit bildet die Datenbank die Grundlage für alle Auswertungen und Statistiken. Die Partner im Projekt können über mehrere Wege auf die Daten zugreifen:

- Der Hauptweg für den Zugriff sind sogenannte Reports, welche in regelmäßigen Abständen erstellt werden. Die Reports enthalten beschreibende Statistik über die gesammelten Daten und bilden die Grundlage für die meisten Auswertungen und Erkenntnisse im Projekt. Die Reports sind im HTML-Format verfasst, sodass diese über einen Web-Browser betrachtet werden können. Diese Reports sind integraler Teil von Arbeitspaket 7/ Datenanalyse und Rückkopplung des Feedbacks und werden in diesem Abschnitt entsprechend beschrieben.
- Zusätzlich gibt es noch eine pgAdmin4³⁷-Installation am Datenbank-Server. Über die Web-Oberfläche von pgAdmin4 können die Projektmitarbeiter direkt auf die Daten in der Datenbank zugreifen und per SQL-Befehl individuell Daten abfragen.
- Spezielle Zusammenstellungen der Daten für Auswertungen wurden per Python-Skript aus der Datenbank zusammengestellt und als CSV-Datei an den jeweiligen Partner übergeben.

Um die gesammelte Datenmenge handhabbar zu machen, mussten die Daten entsprechend organisiert werden. Dazu wurden die Daten nach Zeit, Ort und Art eingeteilt. Bei der Einteilung nach dem Ort wurde auf das bestehende System der TU Graz mit Gebäudebereich, Gebäude und Raumnummer zurückgegriffen. Die Datenbank wurde entsprechend gegliedert, sodass die Daten auch nach diesen Gesichtspunkten separiert werden konnten und zusätzlich in zwei unterschiedliche Kategorien eingeteilt: die Behaglichkeitsmeldungen der Gebäudenutzerinnen und -nutzer, welche in einer eigenen Datenbank-Tabelle abgelegt wurden, sowie die Messdaten von Sensoren (z.B. Temperatur, Luftfeuchte). Diese Daten wurden nach dem EAV-Modell wie in Abschnitt 3.3.2 beschrieben umgesetzt.

3.3.4. Inbetriebnahme und Wartung des Funktionsmusters

Die Bereitstellung des Funktionsmusters erfolgte durch den App-Store des jeweiligen Anbieters (Google, Apple) bzw. auf der Website des FEELings-Projektes als Desktop-Version. Spätere Fehlerbehebungen oder Funktionserweiterungen wurden dem User automatisch als Update durch den jeweiligen App-Store angeboten. Ein Update der Web-Varianten des Funktionsmusters musste jeweils manuell durch das Projektteam erfolgen.

Die modulare Architektur der Software hat sich als sehr praktikabel erwiesen, denn die im Laufe des Projekts notwendigen Aktualisierungen und Anpassungen konnten für die Module unabhängig voneinander durchgeführt werden. Waren z.B. Änderungen an der Datenerfassung für ein Gebäude notwendig und musste deshalb die Datenerfassung für diese Gebäude pausieren, so konnte die Datenerfassung für die anderen Gebäude dennoch ungestört fortgeführt werden. Diese Möglichkeit der modularen Aktualisierung ist auch ein wichtiger Sicherheitsaspekt. Um die personenbezogenen

³⁷ <https://www.pgadmin.org/>, abgerufen am 10.12.2019

Daten der Gebäudenutzerinnen und -nutzer im Projekt sicher zu halten, wurden in regelmäßigen Abständen relevante Aktualisierungen und Sicherheitspatches eingespielt, ohne den Betrieb des Funktionsmusters als Gesamtes zu stören.

3.3.5. Test der erstellten Funktionsmuster

Die erstellten Funktionsmuster wurden vor dem Einsatz in den Use Cases getestet, um Fehler zu beheben und Verbesserungen durchzuführen. Der Test der erstellten Funktionsmuster erfolgte in verschiedenen Abstufungen. Am Beginn standen Unit- und Integrationstest als fester Bestandteil der Softwareentwicklung. Daran anschließend gab es sogenannte Szenariotests der Softwareentwickler, bei denen ausgewählte Anwendungsfälle durchgespielt wurden. Das Funktionsmuster für die Erfassung des Nutzerfeedbacks stand ab Juni 2018 allen Projektmitarbeiterinnen und -mitarbeitern zur Verfügung, um das finale Interface zu fixieren. Als nächster Schritt folgte ein Test mit sogenannten „Friendly Users“, d.h. die Funktionsmuster wurden unter realen Bedingungen von Personen getestet, welche nicht in die Entwicklung eingebunden waren, sodass die Entwickler vor der nächsten Phase noch Fehler korrigieren konnten. Als letzte Phase folgte der eigentliche und großflächige Test der Funktionsmuster mit allen Probandinnen und Probanden aus den beiden Case Studies (Kapitel 3.4). In dieser Hauptphase konnten die Gebäude-User durch Befragungen und Feedback-Funktionen in den Apps eine Bewertung der Funktionsmuster abgeben.

3.4. Case Studies

Um die erstellten Funktionsmuster in einem realen Umfeld testen und dabei Feedback- und raumklimatische Messdaten generieren und analysieren zu können, wurden zwei Case Studies realisiert. Als Use Cases wurden ausgewählte Gebäude am Campus der TU Graz sowie ein Pflegekrankenhaus in Wien gewählt. Ziel war der Test und die Evaluierung der Funktionsmuster durch intensiven Austausch mit den Usern sowie die Sammlung der Sensordaten im Gebäude und der Feedbackdaten der Nutzerinnen und Nutzer über einen Zeitraum von einem Jahr. Das Rollout für beide Use Cases wurde im Dezember 2018 durchgeführt, ab diesem Zeitpunkt war die App zum Download in App-Stores bzw. auch als Browser-Variante über die FEELings-Website für die Probandinnen und Probanden zugänglich.

3.4.1. Vorbereitung der Use Cases, Bereitstellung der Daten und Rollout

Die Vorbereitungen für das Rollout am Use Case „Campus TU Graz“ setzten sich aus mehreren gleichzeitig laufenden Aktivitäten zusammen. Dazu gehörten einerseits die Bekanntmachung des Projekts und die Vorbereitung der künftigen User auf die Nutzung des Feedbacksystems, andererseits mussten technische Vorbereitungen durchgeführt werden. Zum einen wurden die vorhandenen Raumnummern des ersten Use-Case-Gebäudes am Campus der TU Graz (Inffeldgasse 13), mit QR-Codes versehen, um eine Lokalisierung bei der Registrierung sowie beim Abgeben von User-Feedback zu erleichtern. Zum anderen wurde die Anzahl der Gebäude am Campus, an denen auch raumklimatische Daten erhoben werden, von ursprünglich geplanten zwei auf fünf angehoben, um durch unterschiedliche Gebäude-, Raum-, Nutzungs- und User-Konstellationen Feedbackdaten differenzierter analysieren zu können. Dies bedingte eine zusätzliche Instrumentierung einzelner Räume, wie in Tabelle 2 dargestellt. Die gewählten Gebäude eigneten sich einerseits aufgrund der technischen Ausstattung (Gebäudeautomation und Messtechnik) für die Untersuchung, andererseits

aufgrund von Räumen mit nicht optimalen klimatischen Bedingungen, für welche eine Bestandsaufnahme und Verbesserung der Situation angestrebt wurde.

Tabelle 2: Sensorenausstattung am Use Case „Campus TU Graz“

Gebäude	Messung über (Zusatz-) Sensorik ab	Anzahl Gebäude-User ca.	Ausstattung mit Sensorik
Inffeldgasse 13	Dezember 2018	200	Vorhandene Temperatur-Sensoren über Gebäudeautomation für Temperaturzonen (nicht Einzelräume). Zusatzsensoren Tinkerforge in 2 Räumen zur Messung von: <ul style="list-style-type: none"> - Temperatur [°C] - Rel. Luftfeuchte [%] - CO2 Gehalt [ppm] - Lichtstärke [lx] - Luftdruck [mbar] - x,y,z, Beschleunigung [g] - Bewegungsmelder - Geräuschintensität
Stremayrgasse 16	Dezember 2018	90	Vorhandene Temperatur- und CO ₂ -Sensoren über Gebäudeautomation
Mensa Inffeldgasse 10	Dezember 2018	Rund 200 Sitzplätze	Vorhandene Temperatur-Sensoren über Gebäudeautomation
Petersgasse 14	Juni 2019	100	Zusätzliche Temperatur-Datenlogger UT330A in 10 Räumen
Inffeldgasse 16, 16a, 16b, 16c	Juni 2019	460	Zusätzliche THY-LAB-41NW SENLAB H LoRaWAN Indoor-Sensoren zur Messung von Temperatur und Luftfeuchtigkeit in 14 Räumen
Inffeldgasse 25c, 25d, 25e, 25f	Juni 2019	320	Zusätzliche Temperatur-Datenlogger UT330A in 12 Räumen für 3 Monate Danach Sensoren Smartgate ^{Flex} zur Messung von Temperatur und Luftfeuchtigkeit in 20 Räumen

Zur Bekanntmachung der FEELings-App wurden die User in einem E-Mail über das Forschungsprojekt sowie die App informiert und zu einer Informationsveranstaltung am Campus eingeladen. Am darauffolgenden Tag wurden die User des ersten Use-Case-Gebäudes Inffeldgasse 13 zu Arbeitsbeginn bereits im Foyer an einem Informationsstand über die App informiert und ihnen die Nutzung direkt am Smartphone erklärt. Gleichzeitig wurden Flyer mit dem Hinweis auf die Projekt-Website <https://feelings-project.tugraz.at> verteilt, um die FEELings-App auch zu einem späteren Zeitpunkt in Erinnerung zu rufen. Durch diese Maßnahmen konnten bereits im ersten Monat nach dem Rollout rund 50 User des ersten Testgebäudes, das entspricht ca. 25 % der Gebäudenutzerinnen und -nutzer, für das Forschungsprojekt gewonnen werden. Aufgrund des Erfolgs dieses Rollout-Konzepts – persönliches Ansprechen und Informieren der User – wurde die FEELings-App in weiteren Gebäuden am Campus gemäß Tabelle 2 in ähnlicher Weise beworben.

Als weitere Vorbereitungsmaßnahme wurde für die Mensa im Gebäude Inffeldgasse 10 eine Tablet-Variante für das Behaglichkeitsfeedback umgesetzt. Ziel war einerseits der Test eines fix installierten Benutzereingabegeräts, andererseits sollten durch diese Variante alle Besucher der Mensa – unabhängig von einer Registrierung – die Möglichkeit finden, eine Behaglichkeitsmeldung abzugeben. Es stellte sich in Folge heraus, dass durch den strategisch gut gewählten Standort des

Tablet-Pults und der hohen Frequenz an Mensa-Besuchern der Wiedererkennungswert bei der Bewerbung der App sehr hoch war, wodurch die Nutzermotivation verstärkt wurde. Zur Umsetzung der Tablet-Variante wurde eine Benutzeroberfläche für das Tablet Samsung Galaxy Tab A 10.5 konzipiert, welche auf einer Seite die Funktionen Mood-Map und Slider vereint (Abbildung 14 links). Das Behaglichkeitsfeedback wird dabei einem universellen User zugeordnet, ohne Differenzierung von Alter und Geschlecht. Schlussendlich wurde ein Stehpult konzipiert, welches die vier Anforderungen und Herausforderungen dieser fix installierten Variante, nämlich Diebstahlschutz, ständige Energieversorgung, Vermeidung von Wandmontagen und Standort mit hoher Nutzerfrequenz in sich vereinte (Abbildung 14 Mitte und rechts).



Abbildung 14: Tablet-Variante Mensa. Links: Benutzeroberfläche und Projektinformation; Mitte: Hoch frequentierter Standort; Rechts: Stehpult mit Diebstahlschutz für Tablet

Über das Tablet in der Mensa wurden im Zeitraum Mitte Juni 2019 bis Ende Dezember 2019 insgesamt 330 Behaglichkeits-Feedbacks gesammelt, dies entspricht rund 3 Meldungen je Werktag.

Für den zweiten Use Case, das Pflegekrankenhaus in Wien, wurde als Vorbereitungsmaßnahme die App mit den Raumdaten der vier zu beobachtenden Verwaltungsräume mit entsprechender Sensorik hinterlegt. Die App wurde für diesen Use Case gesondert zum Download in App-Stores bereitgestellt bzw. war sie auch als Desktop-Variante über die FEELings-Homepage verfügbar. Die User wurden bei einer Info-Veranstaltung direkt vom betreuenden Projektpartner über das Ziel des Projekts sowie den Umgang mit dem Feedbacksystem informiert.

3.4.2. Laufende Beurteilung der Datenqualität des Use Cases „Campus TU Graz“

Die 49 registrierten User des Gebäudes Inffeldgasse 13 gaben im ersten Monat insgesamt knapp 120 Behaglichkeitsmeldungen ab. Nach verstärkter Bewerbung der App in anderen Gebäuden mittels persönlicher Information der User konnten bis Ende Jänner 2020 rund 180 App-User gewonnen und rund 1600 Behaglichkeitsmeldungen gesammelt werden (Abbildung 15, Abbildung 16). Dies bedeutet, dass 5 % der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter der TU Graz – gemessen am Mitarbeiterstand aus dem Jahr 2018³⁸ – sich auf der FEELings-App registrierten bzw. rund 16 % der Nutzerinnen und Nutzer der fünf Gebäude (ohne Berücksichtigung der Mensa), in denen die App aufgrund der vorhandenen bzw. nachgerüsteten Sensorik verstärkt beworben wurde. In etwa 160

³⁸ TU Graz Facts & Figures 2018/19

https://www.tugraz.at/fileadmin/user_upload/tugrazInternal/TU_Graz/Universitaet/TU_Graz_kompakt/Facts_Figures_2018.pdf. S. 35

Personen nutzten die App mindestens einmal für eine Behaglichkeitsmeldung und wurden in Abbildung 15 als User aufgenommen.

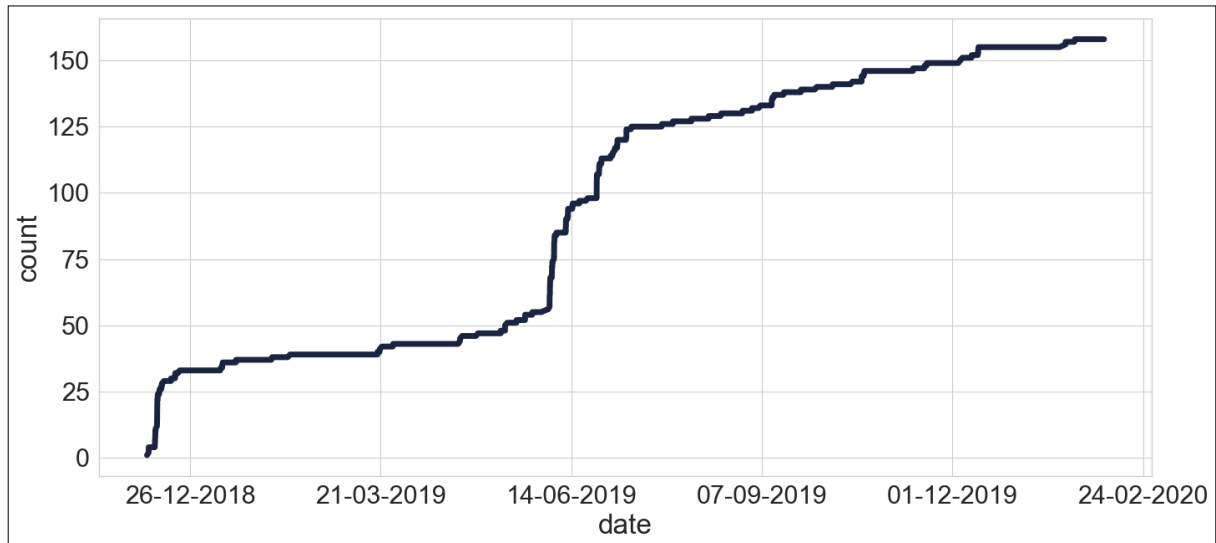


Abbildung 15: Anzahl der User mit mindestens einem Behaglichkeits-Feedback während des Testzeitraums

Ein wichtiger Schritt zur Motivation der User war die Montage der zusätzlichen Sensoren in einzelnen Räumen, da dadurch ein Vergleich des Raumklimas mit dem Feedback möglich gemacht wurde. Die Montage der Sensoren in den drei zusätzlichen Gebäuden sensibilisierte die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter der betroffenen Räume und führte zu einem deutlichen Anstieg des Nutzerfeedbacks, wie dies in Abbildung 16 ab Juni 2019 erkennbar ist.

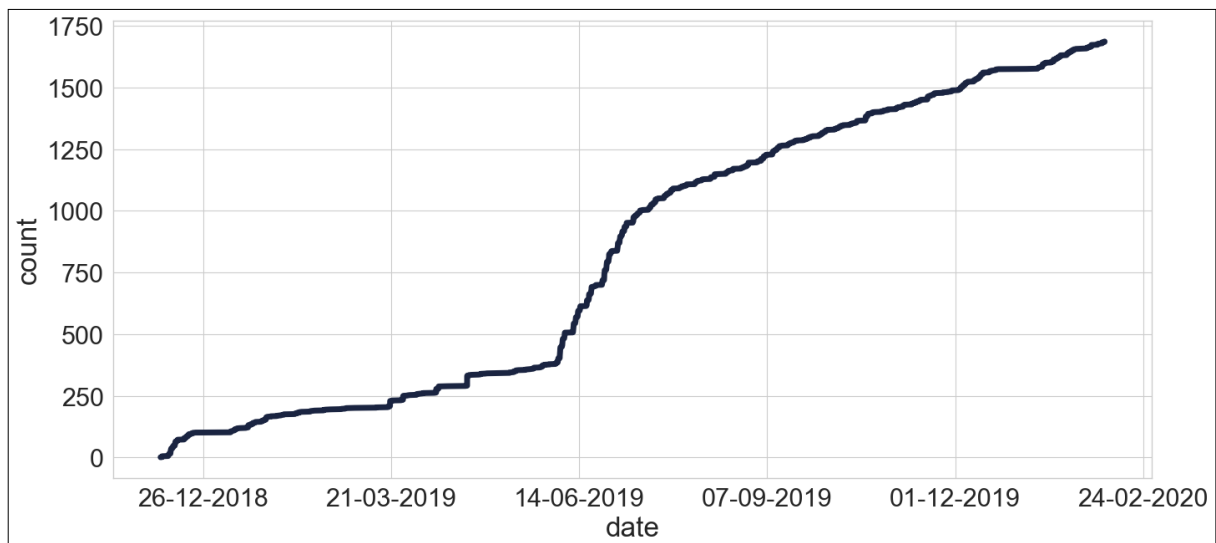


Abbildung 16: Anzahl des User-Feedbacks während des Testzeitraums

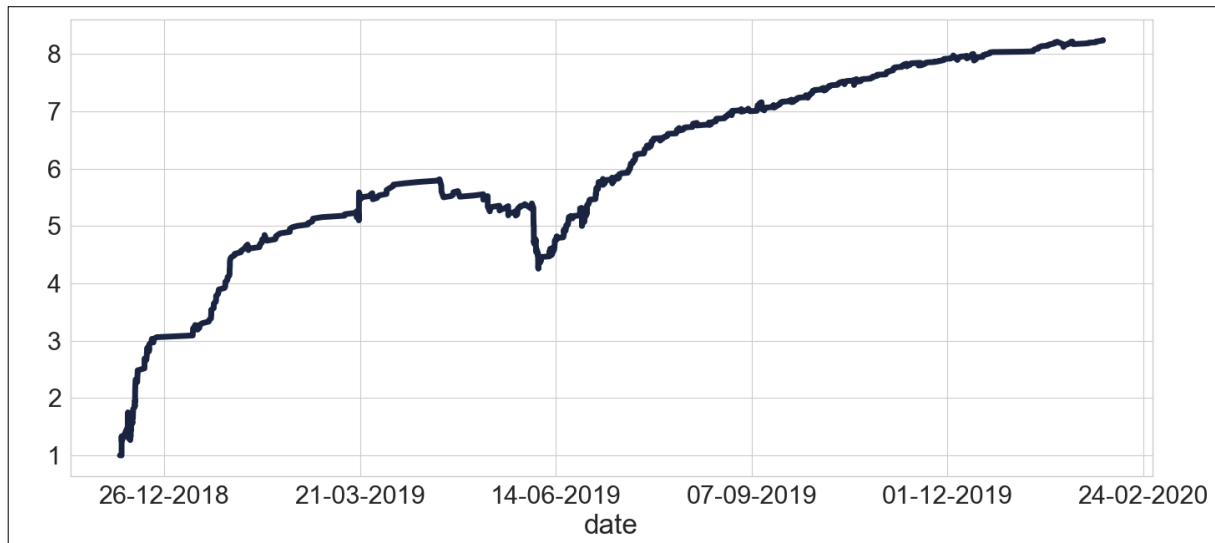


Abbildung 17 zeigt, dass die Bereitschaft, ein Behaglichkeits-Feedback via App zu melden, im Laufe des Datenerhebungszeitraums kontinuierlich zunahm. So gab zu Beginn des Feedback-Erfassungszeitraums ein User durchschnittlich drei Mal eine Behaglichkeitsmeldung ab, bis zum Ende des Testzeitraums stieg die Bereitschaft auf rund acht Meldungen je User an.

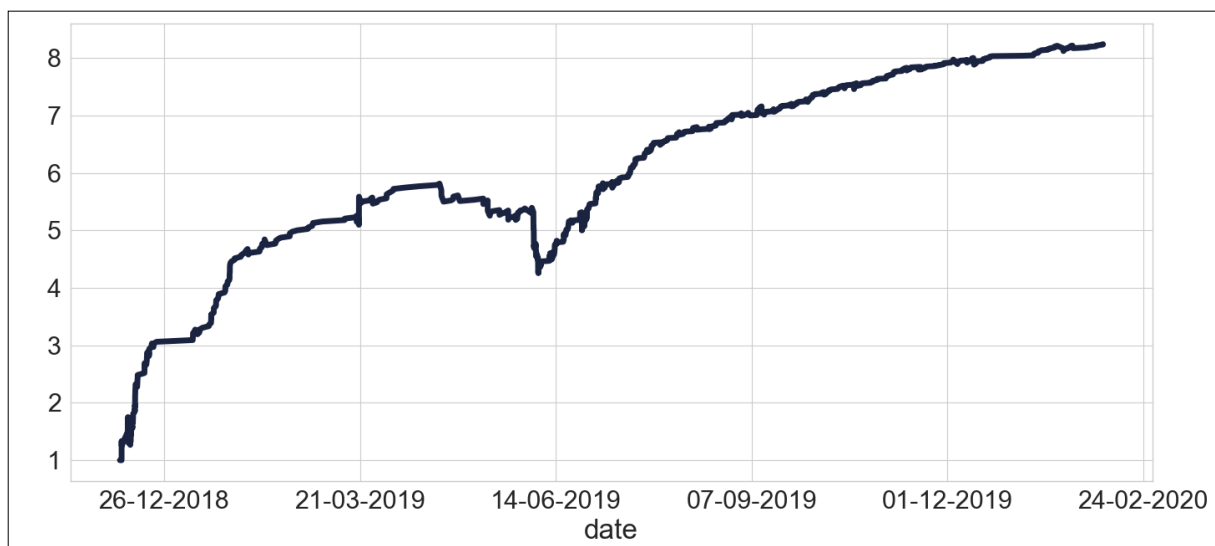


Abbildung 17: Durchschnittliche Anzahl an Behaglichkeitsmeldungen je User während des Testzeitraums

Die mittels automatisierter Datenerhebung mit dem erstellten Funktionsmuster gewonnenen Daten wurden in einem nächsten Schritt einer Datenanalyse unterzogen. Dabei wurde die Datenqualität laufend in Hinblick auf Datenmenge, kontinuierliche Datenübertragung sowie Ausmaß an Nutzerfeedback kontrolliert. Die Data Analysis Reports wurden in einem zweimonatigen Abstand von der Know-Center GmbH erstellt. Hierfür wurden vom Projektpartner einfache Methoden der Datenanalyse angewandt. Um die Datenanalyse zu unterstützen, wurden eigene Reports entworfen und in regelmäßigen Abständen erstellt. Die Reports sind ein wichtiger Teil von AP 7/ Datenanalyse und Rückkopplung des Feedbacks und wurden in Abstimmung zwischen den Arbeitspaketen so gestaltet, dass auch die laufende Beurteilung der Datenqualität damit möglich war.

In Use Case 2, dem Pflegekrankenhaus in Wien, nutzten in Summe 11 User, mehrheitlich aus dem Bereich der Verwaltung, die FEELings-App. Diese hatten die Möglichkeit für vier Bereiche (Büros, Lobby) die Behaglichkeit zu melden. Es wurden insgesamt rund 25 Meldungen abgegeben. Der Mehrwert der App, die Meldung von Anliegen, wurde vom Personal des Pflegekrankenhauses nicht in Anspruch genommen, da diese mit einem eigenen Störungsmeldesystem arbeiten. Daher wurde ein verstärktes Augenmerk auf die direkt in den Verwaltungsbereichen gemessenen Daten von Raumlufttemperatur, relativer Luftfeuchtigkeit und CO₂ gelegt. Die Messdaten vor Ort wurden mehrmals in der Messperiode durch Referenzmessung auf deren Konsistenz sowie über das Datenmanagement automatisiert auf Vollständigkeit und Plausibilität der übertragenen Daten geprüft.

3.4.3. Laufende Begleitung der Nutzerinnen und Nutzer

Um möglichst umfassende Rückmeldungen und valide Ergebnisse sowohl während als auch am Ende der Testphase des User-Feedback-Systems generieren zu können, wurde der gesamte Ablauf der Case Study um eine soziologische Begleitforschung ergänzt. Ein intensiver Austausch mit den Studienprobandinnen und -probanden und eine stete Erhebung des Nutzerfeedbacks sollte eine durchgängige Evaluierung der Funktionalität und Inhalte des Feedbacksystems gewährleisten.

In einem ersten Schritt erfolgte hierzu die Implementierung eines jederzeit abrufbaren Feedbackformulars in der Benutzeroberfläche der FEELings-App. Das Formular in Form eines Kurzfragebogens umfasste dabei sechs geschlossene Fragen unter anderem zur Aufmachung, Nutzerfreundlichkeit und Funktionalität der FEELings-App wie auch eine Kommentarfunktion für Anregungen und Verbesserungsvorschläge. Während des Ablaufs der Testphase zeigte sich allerdings zunehmend, dass das Feedbackformular von den Usern nicht genutzt wurde. Als möglicher Erklärungsansatz kann hier die Überlegung angestellt werden, dass die Nutzerinnen und Nutzer ein in der App implementiertes Feedbackformular unter Umständen nur dann aufrufen oder überhaupt erst wahrnehmen, wenn es tatsächlich zu Problemen bei der Anwendung kommt oder andere Unstimmigkeiten auftreten.

In Absprache mit einer Soziologin wurde daraufhin die Methodik der Begleitforschung modifiziert bzw. durch ein zweistufiges qualitativ-quantitatives Konzept erweitert, um auf diesem Wege das Feedback der User eruieren und reflektierend in die Forschung einfließen lassen zu können. Dabei wurde festgelegt, dass in weiterer Folge zunächst leitfadengestützte Interviews mit Studienteilnehmerinnen und -teilnehmern durchgeführt werden sollen. Abschließend wurde das Feedbackformular – ergänzt um die Erkenntnisse aus den Interviews – zu einem kurzen Fragebogen erweitert, welcher anschließend an alle App-User ausgesendet wurde. Diese Herangehensweise sollte einigen Nutzerinnen und Nutzern die Möglichkeit geben, ihre Erfahrungen mit der App und ihre Meinung dazu in kurzen Interviews möglichst frei artikulieren zu können, ohne von vorgegebenen Fragen und geschlossenen Antwortkategorien eingeschränkt zu werden. Der Interviewleitfaden umfasste dabei offene Fragen zu verschiedenen Themen, wie der derzeitigen und künftigen Nutzung und Funktionalität der App, sowie Fragen zu möglichen Problemen wie Datenschutzbedenken. Es wurden in Summe sechs Interviews mit je drei weiblichen und drei männlichen App-Usern geführt, welche zwischen 10 und 20 Minuten dauerten. Nach der Durchführung der Interviews wurden diese mit der

Software f4 transkribiert und auf inhaltlich strukturierende Weise zusammengefasst und analysiert. Die zentralen Ergebnisse der Interviews³⁹ sind im Folgenden angeführt.

Regelmäßige Nutzung der App:

Die Befragten nutzten die FEELings-App für die Meldung der Behaglichkeit, aber auch teilweise zur Meldung von Anliegen. Dabei wurden die vorhandenen Funktionen der App als ausreichend bewertet und auch die Usability und Verständlichkeit als sehr einfach angesehen, wie in einem Interview speziell betont wurde: „[...] ich finde die App ist ganz einfach, ich brauche nicht mehr als ein paar Sekunden um etwas zu melden und daher mache ich das auch regelmäßig.“⁴⁰

Die Nutzung der FEELings-App für eine Behaglichkeitsmeldung erfolgt hauptsächlich bei einem schlecht empfundenen Raumklima, wobei mit Ausnahme einer befragten Person, alle eine zu hohe Raumtemperatur als störend empfanden.

Insbesondere die Funktion der Anliegen-Meldung wurde oftmals positiv hervorgehoben, „weil das ist eine schnelle Möglichkeit zu melden und das kann jeder melden. Das muss nicht ausschließlich im Sekretariat gemeldet werden.“⁴¹ Auch bei Nichtnutzung der Anliegen-Funktion wurden positive Rückkopplungen von Kolleginnen und Kollegen wahrgenommen, so wurde z.B. berichtet: “[...] ich habe Kollegen von Gebäude und Technik beim Eingang zum Portier getroffen [...] ich habe gesehen, wie es (Anm.: die Anliegen-Meldung) angekommen ist [...]. Das ist eben das Entscheidende.“⁴²

Erwartungen an die Eingabe einer Behaglichkeitsmeldung:

Die Erwartungshaltung an eine Rückkopplung der Behaglichkeitsmeldung war bei den Befragten unterschiedlich gelagert. Während ein Teil der interviewten Personen vor allem das Bedürfnis hat, seine Behaglichkeit mitzuteilen oder das Forschungsprojekt als den Beginn von Verbesserungsmaßnahmen – jedoch noch ohne konkrete Auswirkung auf das Raumklima des eigenen Büros – zu sehen, erwartet sich der andere Teil eine positive Rückkopplung mit Auswirkungen auf das Raumklima. So streuten sich die Meinungen der Befragten von „Ein Tag allein muss für mich jetzt nicht bedeuten, dass irgendjemand reagieren soll. Das ist nicht meine Erwartung. [...] Aber deswegen mache ich ja mit, damit ihr diese Erfahrungen auch sammeln könnt, damit dann in Zukunft auch noch weiter etwas daraus entstehen kann.“⁴³ bis hin zur Voraussetzung für eine künftige Nutzung, nämlich nur dann, „wenn ich merke, es gibt eine Rückkopplung.“⁴⁴

Erwartungen an die Eingabe einer Anliegen-Meldung

Einige der Befragten machten bereits positive Erfahrungen bei der Meldung eines Anliegens/einer Funktionsstörung mit der FEELings-App, obwohl die Erwartungshaltung im Vergleich zur Erwartungshaltung bei der Rückkopplung der Behaglichkeitsmeldungen sehr hoch angesetzt ist, wie beispielhaft im folgenden Interviewausschnitt deutlich wurde: „Dass das zur richtigen Person kommt. [...] dass es schneller behoben wird und man eben weniger Zeit mit telefonieren und Personensuche verbringen muss.“⁴⁵ Während bei Behaglichkeitsmeldungen nicht unbedingt mit einer sofortigen

³⁹ Die Interviewzitate wurden aus Gründen der Lesbarkeit und Verständlichkeit gegebenenfalls geglättet.

⁴⁰ Interview Person 1, Z. 103-103.

⁴¹ Interview Person 1, Z 15-16.

⁴² Interview Person 1, Z 38-39, 43, 56

⁴³ Interview Person 1, Z 82- 83; 106-109.

⁴⁴ Interview Person 4, Z 17.

⁴⁵ Interview Person 2, Z 14, 20-21.

Reaktion auf eine Meldung gerechnet wird, wünschen sich die interviewten Personen beim Melden eines Anliegens sehr wohl, dass es zu einer zügigen Behebung der Störung kommt.

Eingriffe in die Privatsphäre – Datenschutz

Sämtliche der sechs direkt Befragten sehen durch die Bekanntgabe und Speicherung ihres User-Feedbacks keinen Eingriff in ihre Privatsphäre bzw. haben auch keine Bedenken bzgl. Datenschutz. „[...] wenn ich irgendeine App nutze, dann weiß ich, dass die Daten im Zweifel des Falles bei jemandem landen können.“⁴⁶ Zusätzlich wurde auch die Wichtigkeit der integrierten Datenschutzerklärung deutlich: „Also, wenn ich schon weiß, dass es das auch gibt und richtig implementiert ist, dann habe ich eigentlich keine Bedenken.“⁴⁷

Mögliche Konflikte durch die Nutzung der App

Angesprochen auf mögliche Konflikte mit Kolleginnen und Kollegen, welche durch die Nutzung der App möglicherweise auftreten könnten, waren sich die interviewten Personen einig. „Ich kann mir nicht vorstellen, dass direkt dadurch Konflikte entstehen“,⁴⁸ so die Meinung eines Einzelnen, die sich mit den anderen Gesprächen deckte. Auch Konflikte mit Vorgesetzten durch die Nutzung einer App während der Arbeitszeit schließen die Befragten aus: „Die App ist ja relativ leicht und schnell zu bedienen. Das ist ja keine Stundenangelegenheit [...]“⁴⁹ bzw. „Also wenn man das ordentlich kommuniziert, dann sollte da kein Konflikt entstehen.“⁵⁰

Die interviewten Personen merken sehr wohl an, dass Konflikte in Büros durch unterschiedliches Temperaturempfinden auftreten können, sehen jedoch die FEELings-App hier nicht als Konfliktverursacher sondern als Lösungswerkzeug: „Wenn 50 % sagen, es ist an diesem Tag zu kalt und die anderen 50 % sagen, es ist zu heiß, dann ist es halt so. Aber deshalb machen wird dann ja einen Durchschnitt.“⁵¹

Weitere Nutzung der FEELings-App

Ein wichtiger Aspekt bei der Befragung der App-User war die Bereitschaft und Motivation zur weiteren Nutzung der App auch über den Versuchszeitraum hinaus. Dabei zeigten alle interviewten Personen die Bereitschaft, die FEELings-App auch nach Ablauf der Testperiode weiterhin zu nutzen, wobei hier unterschieden werden kann in User, welche die Nutzung an eine Bedingung bzw. an eine Situation knüpfen, wie die Aussagen „Ja, in den extremen Situationen“⁵² oder auch „Wenn ich merke, es gibt eine Rückkopplung“⁵³ zeigen, und jene, welche einfach das Bedürfnis haben, ihre Behaglichkeit am Arbeitsplatz kommunizieren zu können: „Einfach, dass man über einen längeren Zeitraum auch sieht, ob die Temperatur, die im Winter eingestellt ist, funktioniert bzw. wenn man eine irgendwie geartete Kühlmöglichkeit im Sommer hat, ob sich das auch niederschlägt in der Behaglichkeit oder im Gefühl von den Leuten, die dort sitzen.“⁵⁴; „Ja, also ich würde auf alle Fälle weitermachen. Ich finde das nicht so schlecht. Sowieso, wenn es dann nachher ausgewertet wird.

⁴⁶ Interview Person 3, Z 44-45.

⁴⁷ Interview Person 6, Z 48-49.

⁴⁸ Interview Person 4, Z 43-44.

⁴⁹ Interview Person 4, Z 52.

⁵⁰ Interview Person 3, Z 36-37.

⁵¹ Interview Person 2, Z 64-65.

⁵² Interview Person 2, Z 40.

⁵³ Interview Person 3, Z 17.

⁵⁴ Interview Person 4, Z 32-35.

Wenn man das bekanntgeben kann. Weil, man weiß eben nie, wen man ansprechen kann und so hat man dann vielleicht die Möglichkeit, das irgendwo weiterzubringen.“⁵⁵

Aufbauend auf der Analyse der sechs Interviews erfolgte in weiterer Folge eine Modifikation und Ergänzung des Feedbackformulars aus der FEELings-App zu einem Kurzfragebogen, welcher als Onlinefragebogen im Umfrageprogramm LimeSurvey⁵⁶ realisiert und anhand eines E-Mail-Verteilens an alle 181 registrierten App-User versandt wurde. Auf diese Weise konnte mit rund 40 % ein deutlich höherer Rücklauf als bei dem zuvor implementierten Feedbackformular erzielt werden. Nachstehend wird ein Auszug der Auswertungen des Fragebogens unter Berücksichtigung der 72 ausgefüllten und eingelangten Umfragen angeführt.

Auf die erste Frage, „Wie nützlich finden Sie die FEELings-App?“, antworteten rund drei Viertel der Befragten mit *sehr nützlich* bzw. *eher nützlich*. Nur in etwa 15 % der befragten User finden die App *wenig* bzw. *gar nicht nützlich* (Abbildung 18).

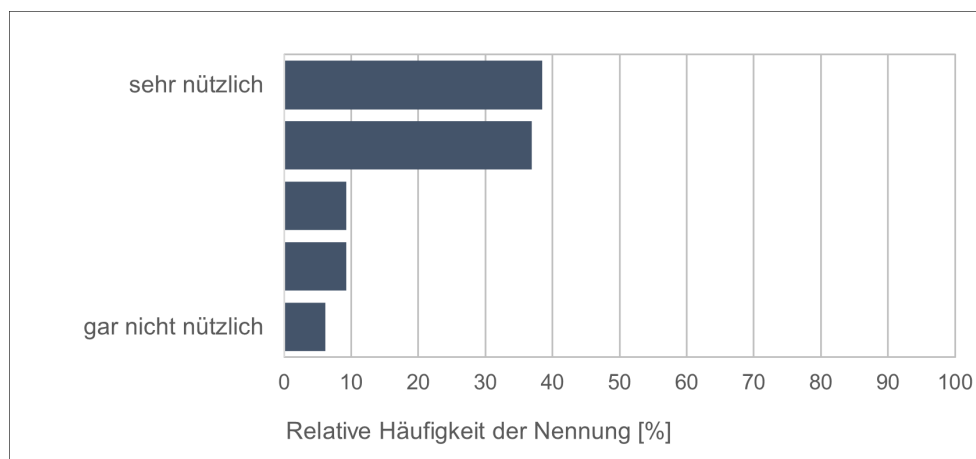


Abbildung 18: Auswertung der Frage: "Wie nützlich finden Sie die FEELings-App?"

Eine einfache und intuitive Benutzeroberfläche war ein wichtiges Teilziel des Projekts. Deshalb wurde im Rahmen der Umfrage auch folgende Frage gestellt: „Wie beurteilen Sie die Handhabung/ Benutzbarkeit der FEELings-App?“. Die Rückmeldung von über 80 % der an der Umfrage teilnehmenden App-User, welche mit *sehr einfach* bzw. *einfach zu verwenden* antworteten, zeigt, dass dieses Projektziel erreicht wurde (Abbildung 19). Auch das Design der FEELings-App wurde von rund 70 % der Umfrageteilnehmerinnen und -teilnehmer als *sehr gelungen* bis *eher gelungen* bewertet.

⁵⁵ Interview Person 5, Z23-25.

⁵⁶ <https://www.limesurvey.org/de/>

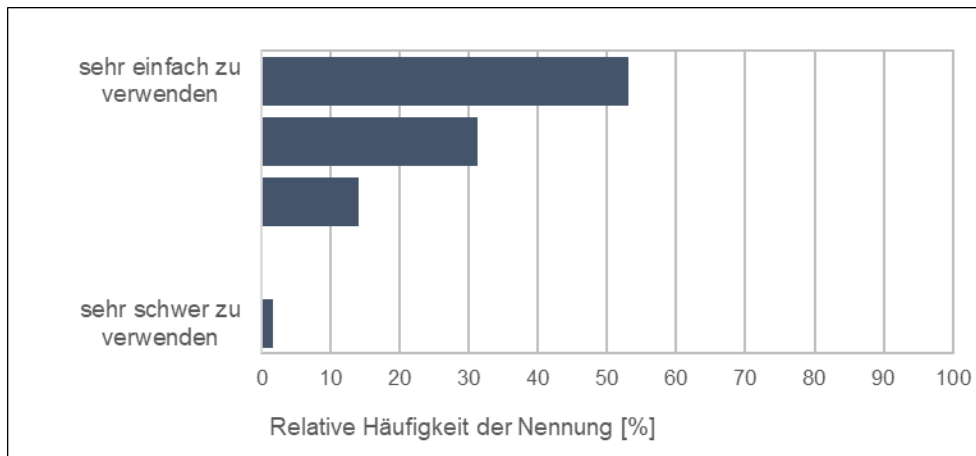


Abbildung 19: Auswertung der Frage: „Wie beurteilen Sie die Handhabung/Benutzbarkeit der FEELings-App?“

Mit der Funktion der Anliegen-Meldung sollte ein Mehrwert zur Nutzung der App geschaffen werden. Voraussetzung hierfür war, dass die Bearbeitung von gemeldeten Anliegen und Funktionsstörungen vom Servicepersonal durch die Eingabe mittels der FEELings-App gleich gut bzw. besser funktionieren sollte, als jene, welche über die bisher genutzten Kommunikationskanäle wie Telefonat oder E-Mail gemeldet wurden. Aus diesem Grund wurde mit der Frage „Wie hat die Bearbeitung von gemeldeten Anliegen in Gebäuden funktioniert?“ dieses wichtige Teilziel der App-Nutzung abgefragt.

Bei drei Viertel der Umfrageteilnehmerinnen und -teilnehmer hat die Bearbeitung der Anliegen durch das zuständige gebäudetechnische Personal *sehr gut* bzw. *gut funktioniert* (Abbildung 20). Zusätzliches persönliches Feedback, Rückmeldungen per E-Mail aber auch Erfahrungen der Projektmitarbeiterinnen und -mitarbeiter können dieses Ergebnis der Umfrage unterstreichen.

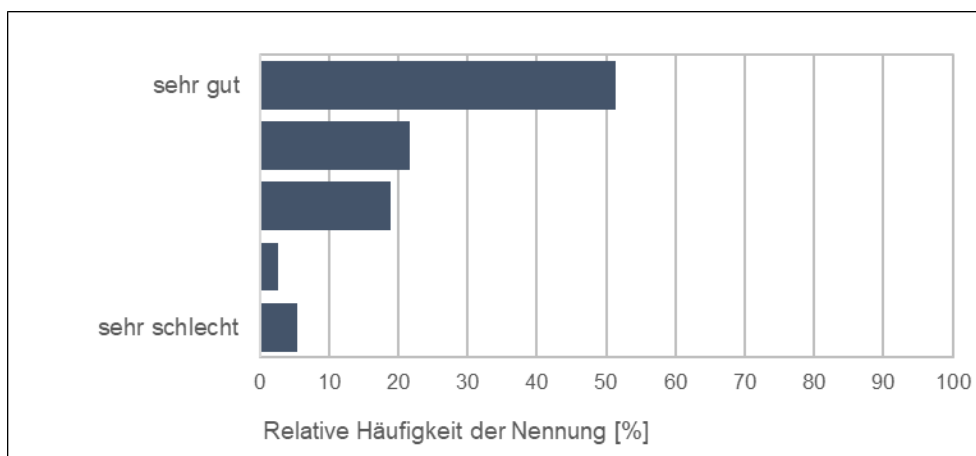


Abbildung 20: Auswertung der Frage: „Wie hat die Bearbeitung von gemeldeten Anliegen in Gebäuden funktioniert?“

Ein zentraler Aspekt des Projekts ist die anhaltende Motivation der Nutzerinnen und Nutzer, um ein digitales Feedbacksystem über einen längeren Zeitraum – über den Versuchszeitraum hinaus – zu verwenden. Deshalb wurde den App-Usern auch die folgende Frage gestellt: „Würden Sie die FEELings-App (auch) zukünftig für die Meldung eines Anliegens/der Behaglichkeit verwenden?“ (Auswertung Abbildung 21).

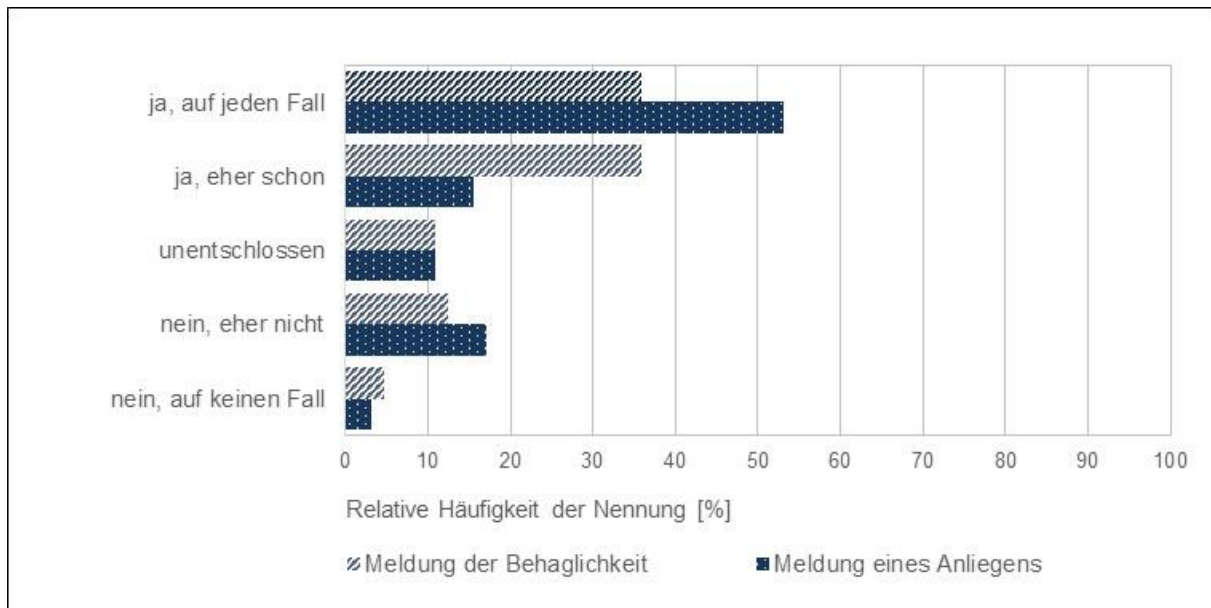


Abbildung 21: Auswertung der Frage: „Würden Sie die FEELings-App (auch) zukünftig für die Meldung eines Anliegens/der Behaglichkeit verwenden?“

Bei der Wahl der Abfrageparameter der Behaglichkeit ist die Identifikation der individuellen Behaglichkeitsgrößen der User ein wichtiger Punkt. Im Zuge der Umfrage wurden die User deshalb beauftragt, die vier vorgegebenen raumklimatischen Einflussgrößen Temperatur, Umgebungslautstärke, Luftqualität und Lichtverhältnisse nach ihrer persönlichen Priorität bezogen auf die Beeinflussung der Behaglichkeit zu reihen. Die Auswertung gemäß Abbildung 22 zeigt deutlich, dass die Temperatur für 38 der an der Umfrage teilnehmenden Nutzerinnen und Nutzer die wichtigste raumklimatische Einflussgröße darstellt, gefolgt von der Umgebungslautstärke (10 Personen), der Luftqualität (8 Personen) sowie schlussendlich den Lichtverhältnissen (3 Personen). Dieses Ergebnis verdeutlicht, dass die Raumtemperatur die maßgebliche Stellgröße ist, um den Nutzerkomfort im Gebäude anzuheben.

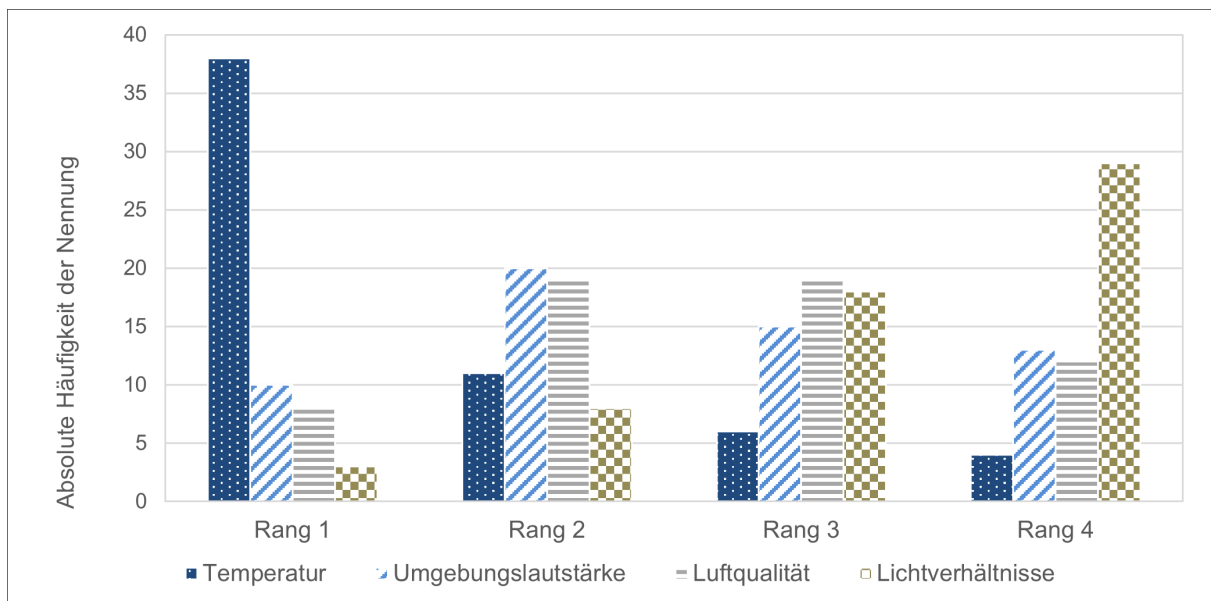


Abbildung 22: Auswertung der Reihung der vier vorgegebenen raumklimatischen Einflussgrößen durch die User

Bei dieser Frage konnten die Umfrageteilnehmerinnen und -teilnehmer auch zusätzliche Faktoren hinzufügen, welche den Komfort am Arbeitsplatz beeinflussen. Hier wurde vermehrt das Vorhandensein von Pflanzen, die Anordnung und Qualität der Möblierung sowie die Sauberkeit des Arbeitsplatzes genannt.

Aufbauend auf dieser abschließenden Frage mit dem Ergebnis, dass die Temperatur für den Großteil der User die wichtigste raumklimatische Einflussgröße darstellt, wurde eine online-Rückkopplung von User-Behaglichkeitsdaten in die Heizungsregelung angedacht und schlussendlich für zwei Testräume gemäß der Darstellung in Kapitel 3.5.3 umgesetzt.

Die laufende Begleitung der Nutzerinnen und Nutzer des zweiten Use Cases, des Pflegekrankenhauses in Wien, fand durch persönlich, in regelmäßigen Abständen von Mitarbeitern des Projektpartners EUDT GmbH durchgeführte Gespräche statt. Zum Projektstart haben sich 11 von 23 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter, welche in den mit zusätzlichen Sensoren ausgestatteten Verwaltungseinheiten regelmäßig verkehren bzw. ihren Arbeitsplatz haben, auf der Feelings-App registriert. Die Möglichkeit, die Behaglichkeit direkt über eine App zu melden, wurde in persönlichen Gesprächen ausdrücklich gewürdigt und auch als Wertschätzung ihres Tuns angesehen. Ein allerdings bereits seit Jahren vorhandenes Störmeldungssystem sowie die unmittelbare Nähe zum Büro der Haustechnik (Kundmachung durch Zuruf) trugen dazu bei, dass die Feelings-App nur bedingt genutzt wurde. Alle Bereiche sind mit zu öffnenden Fenstern ausgestattet und mechanisch belüftet, wobei die Lüftungsanlage mit Heiz- und Kühlregister sowie mit einer Dampfbefeuchtung ausgestattet ist. Das dadurch wesentlich konstantere Raumklima im Vergleich zu nicht mechanisch konditionierten Bereichen ist mit ein Grund, dass es kaum Gründe für Beschwerden betreffend des Raumklimas gibt und damit eine intensivere Nutzung der App nicht erforderlich macht.

3.5. Datenanalyse und Rückkopplung des Feedbacks

Die Sensorik für das Abgreifen der Daten und entsprechende Protokolle für die Datenübertragung, das Datenschema sowie die Signa-Datenbanken wurden bereits vor dem Rollout der FEELings-App gemäß Kapitel 3.1.2 und 3.1.3 bereit gestellt, sodass sofort mit dem Start der Datenerhebung in den Use Cases im Dezember 2018 eine laufende Analyse durchgeführt werden konnte.

3.5.1. Vorbereitung der Datenanalysen und laufende (Offline-)Datenanalyse

Um allen Projektpartnern die laufende Analyse der Daten so einfach wie möglich zu gestalten, wurden spezielle Reports entworfen und in regelmäßigen Abständen erstellt. Ziel dieser Reports war es, eine übersichtliche, grafische Darstellung der gesammelten Daten zu geben, welche von möglichst vielen Projektpartnern und Arbeitspakten gleichermaßen genutzt werden konnte. Die Reports wurden als HTML-Dokumente ausgelegt und können somit auf jeden herkömmlichen Web-Browser angesehen werden.

Die Reports gliedern die abgegebenen Bewertungen der Gebäudenutzerinnen und -nutzer zunächst nach absoluter bzw. relativer Häufigkeit und nach Gebäuden (Beispiele gemäß Abbildung 15 bis Abbildung 17). Im nächsten Abschnitt folgte eine detailliertere Aufschlüsselung der abgegebenen Bewertungen nach verschiedenen Aspekten wie Alter, Geschlecht, zeitliches Verhalten sowie nach diversen Bewertungskriterien wie Temperatur, Luftqualität, Geräuschpegel, Licht und Stimmung. Dabei wurde erkannt, dass die Temperatur mit Abstand die wichtigste Ursache für Unzufriedenheit der Gebäudenutzerinnen und -nutzer darstellt, was auch die Auswertung der Online-Umfrage gemäß

Abbildung 22 zeigte. Die weitere Aufschlüsselung erfolgte nach Gebäuden bzw. Räumen, wobei einzelne Räume, für welche es besonders viele Rückmeldungen gab, automatisch in der Liste der *Negative Ratings* verzeichnet wurden (Abbildung 24). Zusätzlich wurde die Beeinflussung der Bewertungen untereinander untersucht und auch eine Vorhersage von bestimmten Bewertungen, basierend auf Messwerten, versucht. Aufgrund der für diese Analysen zu geringen Datenmenge konnten die trainierten Modelle maschineller Lernmethoden nur eine geringe Vorhersagegüte liefern.

3.5.2. Interpretation der Daten und Ableitung von Feedback

Die entwickelten und regelmäßig aktualisierten Reports stellten eine Grundlage für die Interpretation der Daten dar. Die visuelle Aufbereitung ermöglichte die gemeinsame Diskussion über die Daten mit den Partnern im Projekt, um Interpretationen und Maßnahmen ableiten zu können. Im Laufe des Projekts wurden die Reports deshalb auch laufend angepasst und erweitert, um auf neue Fragestellungen bzw. neue Situationen reagieren zu können. Um spezielle Aspekte im Detail untersuchen zu können, wurden für einzelnen Fragenstellungen auch weitere, detailliertere Auswertungen angefertigt.

Um einen Überblick über die „Grundstimmung“ der App-User eines Use Cases oder auch eines spezifischen Gebäudes zu bekommen, wurde die Heatmap „Mood“ eingesetzt. Diese zeigt eine Auswertung des Feedbacks mittels Mood-Map, über welche die Nutzerinnen und Nutzer ihre Behaglichkeit bekannt geben konnten. Die in Abbildung 23 beispielhaft dargestellte Heatmap beinhaltet sämtliche Behaglichkeitsmeldungen des Use Cases TU Graz und zeigt, dass 346 User in ihrem Feedback angaben, sich gut zu fühlen und auch viel Energie zu haben. Diesen zufriedenen Usern stehen 176 User gegenüber, welche sich schlecht fühlten und auch über geringe Energie klagten.

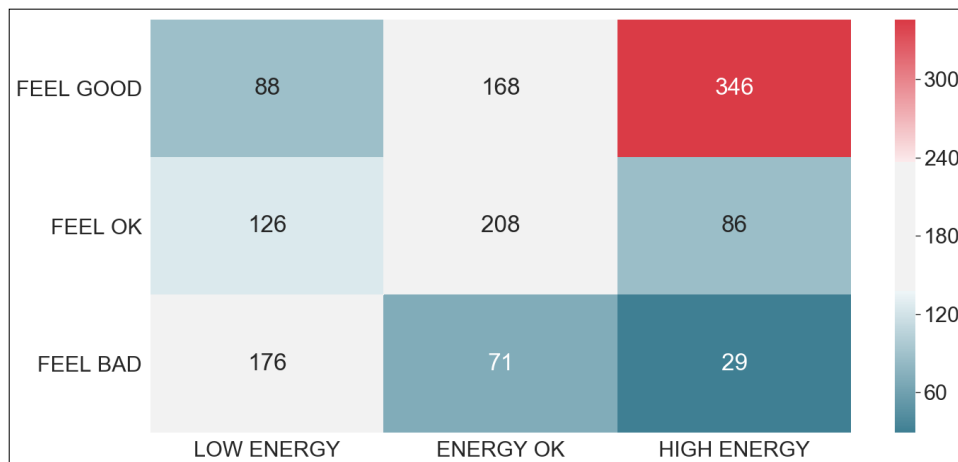


Abbildung 23: Heatmap Mood

Während die Heatmap Mood nur einen groben Überblick über den gesamten Use Case bzw. ein Gebäude gibt, zeigte die Auflistung der Räume mit den meisten negativen Ratings gemäß Abbildung 24 die näher zu betrachtenden Gebäudebereiche im Detail an. Diese Aufzählung beinhaltet neben der Angabe der Raumnummern auch die detaillierte Anzahl des eingegangenen Behaglichkeitsfeedbacks, die Anzahl der negativen Bewertungen und zusätzlich – farblich hinterlegt – den relativen Anteil der negativen Bewertungen bezogen auf die raumklimatischen Faktoren Luftqualität, Temperatur, Umgebungslautstärke und Lichtverhältnisse. Durch diese grafische

Darstellung inklusive der farblichen Differenzierung – Felder in roten Farbtönen bedeuten vermehrtes negatives Feedback – konnten nicht ideale raumklimatische Zustände schnell erkannt und die Ursache der negativen Feedbacks einfach erhoben werden.

room	count	bad count	mood [%]	air [%]	temp [%]	noise [%]	light [%]
[redacted]	92	69	45	32	39	0	5
[redacted]	49	36	32	20	59	8	4
[redacted]	38	32	52	47	52	31	0
[redacted]	37	32	78	16	83	21	2
[redacted]	32	30	34	31	34	15	93
[redacted]	61	23	31	1	31	0	1
[redacted]	37	23	18	43	29	5	0
[redacted]	47	22	14	0	38	0	4
[redacted]	26	21	11	23	80	3	0
[redacted]	23	20	39	26	78	30	0

Abbildung 24: Negative Ratings (Auszug der ersten 10 Räume)

Auf Basis der Datenanalyse – insbesondere der Reports – wurden Optimierungs- und Verbesserungsmaßnahmen für folgende Bereiche abgeleitet:

Für das HKL-System:

Durch die zeitnahe Verfügbarkeit von Reports, welche raumbezogene Handlungsfelder aufzeigen, konnte eine gezielte Ursachenforschung nach den maßgeblichen Parametern durch den technischen Betriebsführer durchgeführt werden. Basierend auf den dabei gewonnenen Erkenntnissen können zielgerichtete Anpassungen/Optimierungen der gebäudetechnischen Einrichtungen erfolgen. Dies führt zu einer Optimierung der eingesetzten Energiemenge bei gleichzeitig gesteigertem Komfortempfinden der Nutzerinnen und Nutzer, wie dies die im Folgenden angeführten beispielhaften Maßnahmen für das technische Facility Management aufzeigen.

Für das technische Facility Management:

Um Maßnahmen zur Energieeffizienzsteigerung ableiten zu können, war insbesondere die Datenanalyse der negativen Ratings (Abbildung 24) von Bedeutung. Durch die Unterteilung der Behaglichkeitsmeldungen in Mood, Luftqualität, Temperatur, Umgebungslautstärke und Lichtstärke konnten die zugeordneten und gespeicherten Raummessdaten analysiert und Optimierungsmaßnahmen abgeleitet werden. Zwei Verbesserungsmaßnahmen aus dem Projektzeitraum sind hier beispielhaft angeführt:

1. Die zu hoch eingestellte Heiztemperatur eines Großraumbüros, deren User via App wiederholt eine zu hohe Raumtemperatur meldeten, konnte im Winter 2018/2019 detektiert werden. Gleichzeitig zeigte die Aufzeichnung der automatischen Fensteröffner, dass aufgrund der hohen Raumtemperatur die Fenster in der kalten Jahreszeit sehr oft geöffnet waren. Durch das Absenken der Heiztemperatur dieses Raums verbunden mit reduzierter Fensteröffnung konnte die

Energieeffizienz gesteigert und der Nutzerkomfort deutlich erhöht werden.

2. Eine weitere Verbesserungsmaßnahme wurde im Sommer 2019 in einem anderen Gebäude durch vermehrtes User-Feedback via App initiiert: Zu niedrige Temperaturen in diesem, mittels Bauteilaktivierung gekühlten Gebäude führten zu hoher Unzufriedenheit der Nutzerinnen und Nutzer. Durch die Drosselung der Kühlung konnte auch hier Energie gespart und die Zufriedenheit der User deutlich erhöht werden.

Für die Nutzerinnen und Nutzer:

Die vorab beschriebenen Beispiele verdeutlichen die Vielfalt an möglichen Optimierungsmaßnahmen durch die Datenanalyse des User-Feedbacks und der raumklimatischen Daten sowohl im Bereich des Nutzerkomforts als auch des Energieverbrauchs. Durch die Erhöhung der Behaglichkeit und damit verbundener Steigerung der Nutzerzufriedenheit werden Empfehlungen für Energiesparmaßnahmen – wie z.B. Verringerung der Heizleistung durch Reduktion der Fensterlüftung im Winter – besser angenommen und umgesetzt, wie dies das vorab beschriebene Beispiel 1 verdeutlicht. Auch allgemeine Empfehlungen für Energiesparmaßnahmen konnten und können über die App-Funktion „Gebäudeinformation“ direkt an die Nutzerinnen und Nutzer kommuniziert werden – z.B. die Nutzung öffentlicher Verkehrsmittel für den Weg zum Arbeitsplatz, notwendig durch die Einschränkung von Parkplätzen durch Baumaßnahmen am Campus.

Abschließend sei das elektronische Feedback bei Meldung eines Anliegens, welches auf der Nutzeroberfläche der App, aber auch mittels E-Mail beim User einlagt, hier ebenfalls angeführt wie das deutlich spürbare Feedback, wenn ein gemeldetes Anliegen rasch und kompetent durch Servicemitarbeiter des Gebäudebetreibers behoben wird.

Für das Monitoringsystem:

Durch Kombination des Nutzerfeedbacks mit Energiemonitoring-Daten können Verbesserungsmaßnahmen im Bereich Energieeffizienz und Komfort erzielt werden. Als Ansatz hierfür wurden vom auf Energiemanagement und -beratung spezialisierten Wirtschaftspartner EUDT sogenannte Behaglichkeitsfelder im Zusammenhang mit dem Nutzerfeedback analysiert. Behaglichkeitsfelder können für unterschiedliche Parameter bzw. Kombinationen (z.B. CO₂, Licht, ...) definiert und projektspezifisch erstellt werden. Zur Analyse für das gegenständliche Forschungsprojekt wurde das allgemein anerkannte, vielfach im Zusammenhang mit Behaglichkeit, Temperatur und Raumfeuchte zitierte Behaglichkeitsfeld nach Frank⁵⁷ verwendet. Durch die individuellen Bewertungen kann für jede erfasste Zone ein behagliches „Soll-Klima“ definiert werden. Dieses Klima gilt es durch Anpassung der regeltechnischen Möglichkeiten bestmöglich zu erreichen. Über- bzw. Unterversorgung bestimmter Zonen wird dadurch vermieden und dies bringt nicht nur eine höhere Kunden- bzw. Mitarbeiterzufriedenheit, sondern liefert auch einen wesentlichen Beitrag zur Energieeffizienz.

Werden z. B. permanent und unabhängig gemessene Temperatur/Feuchte-Wolken definierter Räume bzw. Zonen über ein standardisiertes Behaglichkeitsfeld gelegt, so können sehr rasch und für alle verständlich die tatsächlichen Zustände der angegebenen Parameter und die Abweichung vom Standard dargestellt werden, wie dies die Beispiele aus Use Case 2 gemäß Abbildung 25 bis Abbildung 27 zeigen. Dadurch kann ein individuelles User-Feedback jederzeit in Relation zu den

⁵⁷ Vgl. Frank W.: Berichte aus der Bauforschung, Raumklima und Thermische Behaglichkeit, Berlin, München, Düsseldorf: Ernst & Sohn. 1975

annähernd zeitgleich erfassten gemessenen Werten gesetzt werden. Die Richtung und der Abstand zum gemessenen Wert drücken die Intensität des „Unbehagens“ aus.

Mit diesen Informationen kann ein „Soll-Klima“ für individuelle Behaglichkeit eingestellt werden. Je mehr Bewertungen vorliegen, desto genauer lässt sich die optimale Konditionierung eines Raumes oder einer Zone nach Behaglichkeitskriterien festlegen und mögliche unterschiedliche Anforderungen eines Gebäudes bzw. eines Raumes können abgelesen werden. Die Anforderungen an die Behaglichkeit können z.B. je nach Gruppe von Nutzenden (Geschlecht, Alter), Tätigkeiten im Raum (ruhend, Bewegung) oder Lage im Gebäude (Himmelsrichtung) differenzieren.

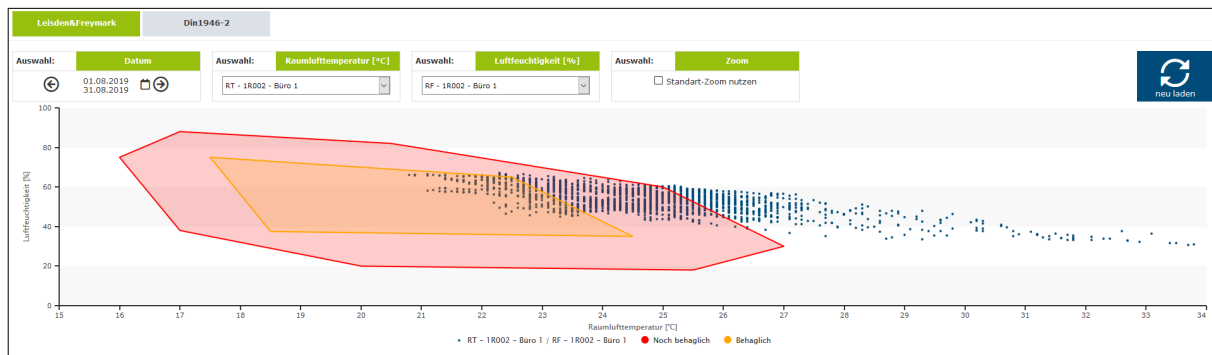


Abbildung 25: Gemessene Raumtemperatur/Raumluftfeuchte: Daten für den Zeitraum 01.08.2019 bis 31.08.2019 über ein Behaglichkeitsfeld Raumtemperatur/Raumluftfeuchte nach Frank gelegt.

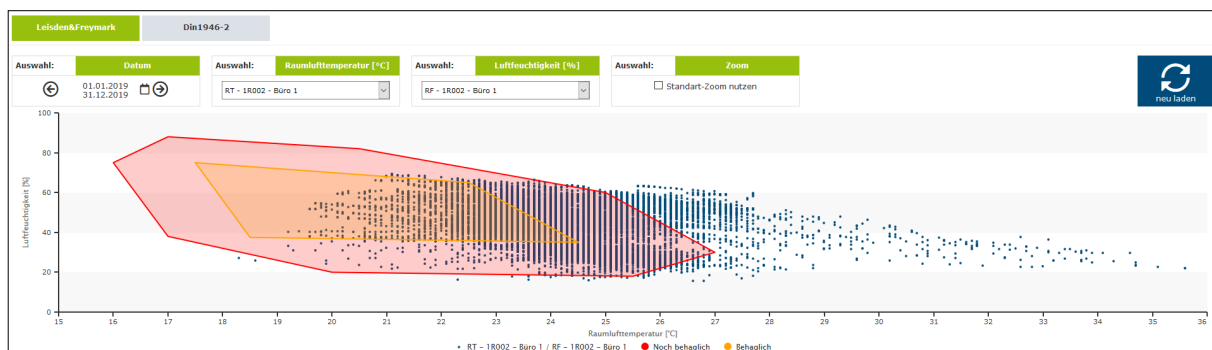


Abbildung 26: Gemessene Raumtemperatur/Raumluftfeuchte: Daten für den Zeitraum 01.01.2019 bis 31.12.2019 über ein Behaglichkeitsfeld Raumtemperatur/Raumluftfeuchte nach Frank gelegt.

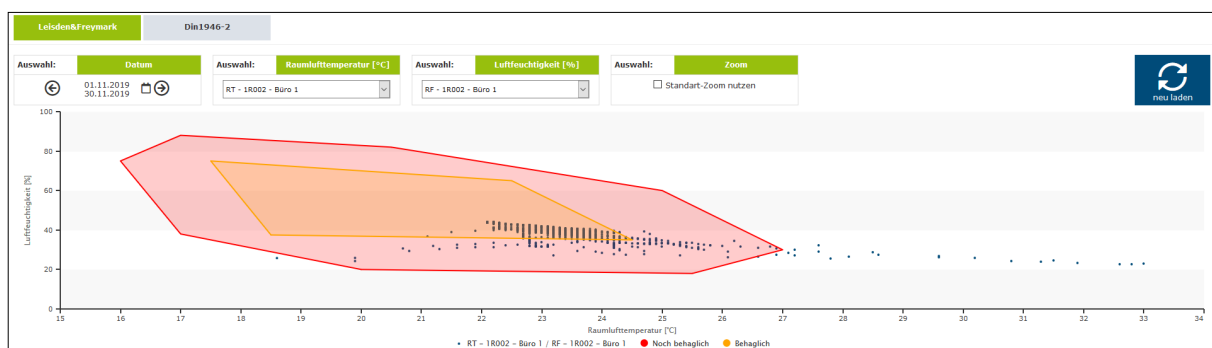


Abbildung 27: Gemessene Raumtemperatur/Raumluftfeuchte: Daten für den Zeitraum 01.11.2019 bis 30.11.2019 über ein Behaglichkeitsfeld Raumtemperatur/Raumluftfeuchte nach Frank gelegt.

Für die Planerinnen und Planer:

Durch die Vielzahl der Beispielgebäude am Campus TU Graz, an denen zusätzlich zum User-Feedback auch raumklimatische Daten erhoben wurden, konnten Vergleiche von unterschiedlichen Bauweisen, Ausrichtungen der Arbeitsräume sowie Technologien für Heizung, Kühlung und Sonnenschutz evaluiert werden. Dies erfolgte durch eine Offline-Analyse der Liste der negativen Ratings (Abbildung 24), teilweise verglichen mit den gemessenen raumklimatischen Verhältnissen. Dabei wurde analysiert, in welchen Gebäuden vermehrt negatives Feedback auftrat und was den Unterschied zu positiv bewerteten Gebäuden ausmachte. Die Ergebnisse dieser Untersuchung – ergänzt um schriftliches und mündliches Feedback der Gebäudenutzerinnen und -nutzer – zeigten folgende Faktoren auf, welche das Raumklima positiv beeinflussen, die Energieeffizienz steigern, zur Behaglichkeit der User maßgeblich beitragen können und deshalb als Empfehlung an Planerinnen und Planer weitergegeben werden können:

- Vorziehen von Massivbauweisen gegenüber Leichtbauweisen – Erhöhung der Speichermasse
- Reduzierung des Glasanteils an Fassaden
- Vorziehen von außenliegenden Beschattungselementen (z.B. Raffstore) gegenüber automatisiert bewegten Fassadenelemente bzw. Sonnenschutz im Scheibenzwischenraum
- Heizen über Boden, eventuell unterstützt durch Fancoils
- Kühlen/Heizen über deckennahe Bauteilaktivierung
- Einzelraumregelung
- Kontrollierte Raumlüftung mit Wärmerückgewinnung

Um das User-Feedback sowie die Ergebnisse der Datenanalyse für eine weitere Verwendung nutzbar zu machen, wurde zusätzlich zur algorithmischen Auswertung der Daten eine Abfolge von Operationen definiert, welche erforderlich ist, um abgeleitete Maßnahmen zielgerichtet an verschiedene Gruppen wie technisches Facility Management, Gebäudenutzerinnen und -nutzer, Planerinnen und Planer, Gebäudebetreiber etc. weiterleiten zu können.

In Abbildung 28 ist beispielhaft die Bearbeitung der Aufgabe „Anomalien bei der Anzahl der User-Feedbacks“ in Form eines Flussdiagrammes grafisch dargestellt. Dieses Diagramm beschreibt die Folgen von Operationen, Zuständigkeiten und Verbindungen, welche zur Lösung der Fragestellung erforderlich sind und für eine automatisierte Rückkopplung in die FEELings-App integriert werden müssen.

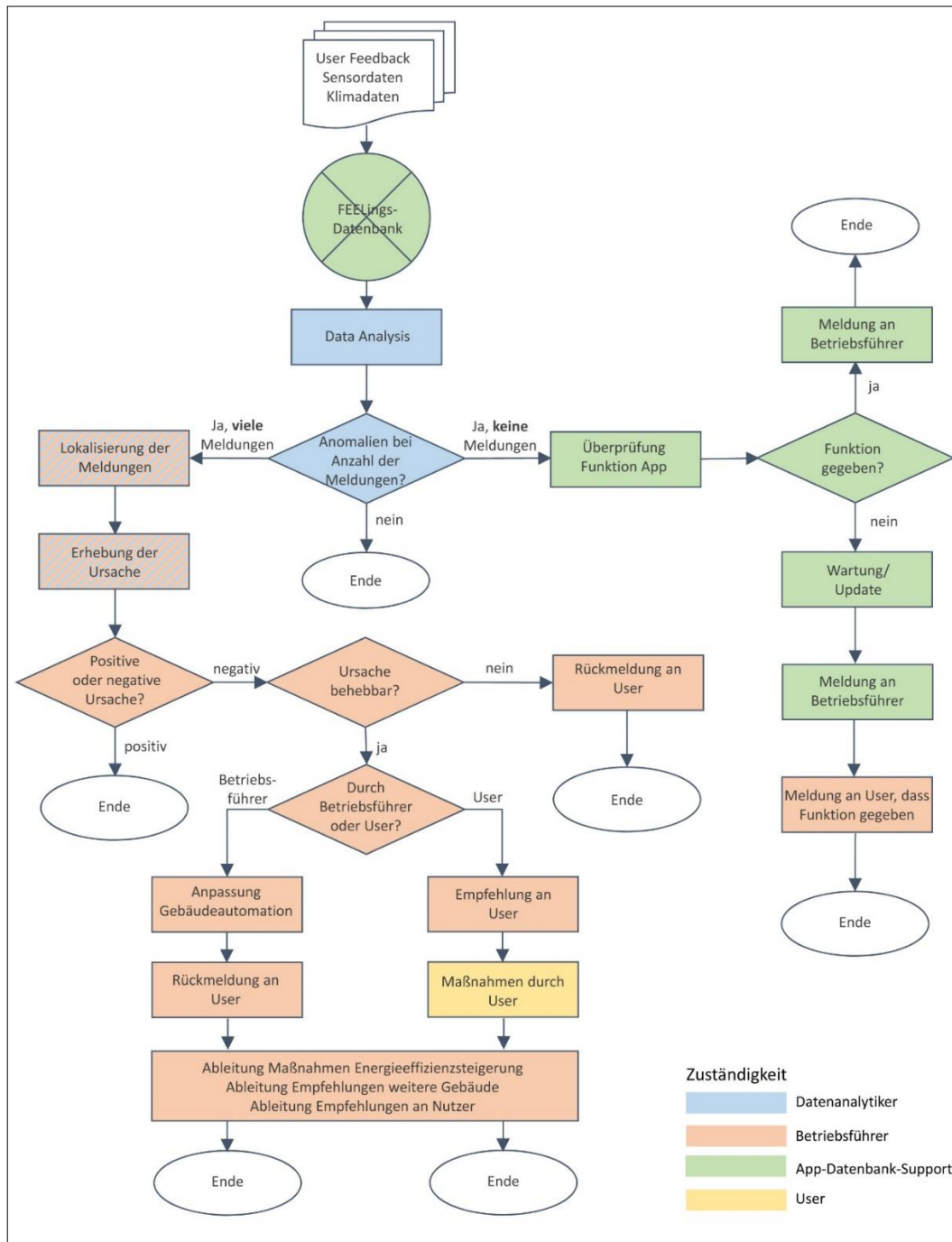


Abbildung 28: Flussdiagramm zur Lösung der Aufgabe „Anomalien bei der Anzahl der User-Feedbacks“

3.5.3. Rückkopplung von Feedback in das Gebäudeautomationssystem

Zusätzlich zu den vorab erläuterten Möglichkeiten und Ergebnissen für die Ableitung von Feedback wurden nach Abschluss der Datenerhebungen sowie der Datenanalysen und Auswertungen Konzepte entwickelt, wie die gewonnenen Informationen aus der Datenanalyse zur automatischen Anpassung von Einstellungen im Gebäudeautomationssystem verwendet werden können.

Als maßgebliche Behaglichkeitsgröße wurde bei der Auswertung der Online-Umfrage gemäß Abbildung 22 sowie der Reports der Datenanalyse die Temperatur identifiziert, wodurch eine online-Rückkopplung von User-Behaglichkeitsdaten in die Heizungsregelung naheliegend war. Als für den Test der Rückkopplung des User-Feedbacks geeignete Räume wurden zwei Raumzonen im 6. OG des

bereits im Projekt als Monitoring-Objekt verankerten Gebäudes Inffeldgasse 13 festgelegt. Maßgebliches Kriterium für die Auswahl dieser Räume war das Vorhandensein von Monitoring-Daten und eine entsprechende Feedback-Frequenz der Nutzerinnen und Nutzer durch die Feelings-App.



Abbildung 29: Grundriss 6. OG des Use Cases mit Darstellung der Test-Raumregelzonen (gelb markiert)

Die betroffenen Räume wurden auf eine raumzonenbasierende Einzelraumregelung umgerüstet, womit ein direkter Einfluss auf die Konditionierung der einzelnen Raumzonen sowohl im Heiz- als auch im Kühlbetrieb durch die Gebäudeautomatisierung vorgenommen werden kann. Aufgrund der vorherrschenden baulichen Rahmenbedingungen erfolgte die Nachrüstung von entsprechender Raumsensorik durch den Einsatz von LORA-WAN IOT Sensoren, welche über ein Funkgateway in die Gebäudeautomatisierung eingebunden wurden. Durch die Verwendung dieser ortsflexiblen Sensorik konnte eine optimale Positionierung der Sensoren vorgenommen werden.

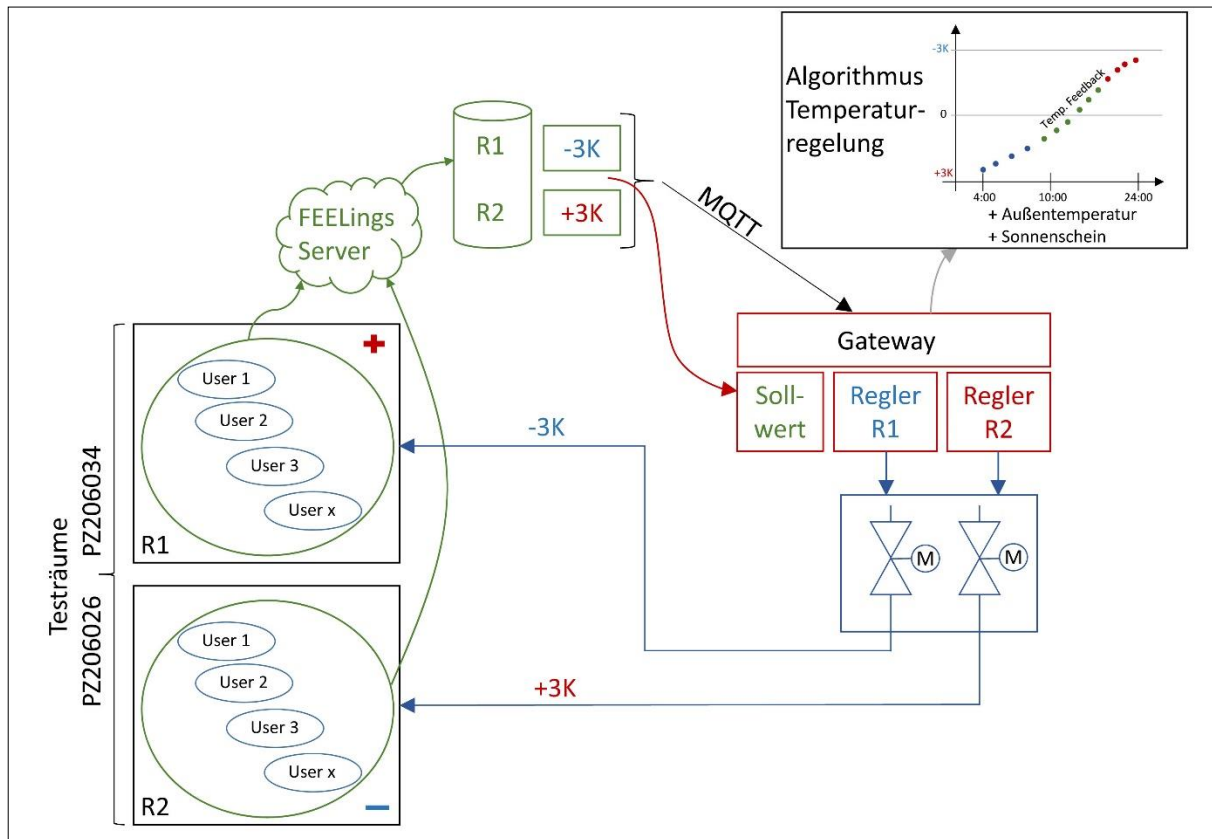


Abbildung 30: Schema Umsetzung Einzelraumregelung Heizung durch Rückkopplung des Feedbacks in das Gebäudeautomationssystem für zwei Testräume

Für jeden der Testräume gibt es einen vorgegebenen Temperatursollwert, welchen die Heizungstechnik zu erreichen versucht. Für den Versuch wurde das Datenverarbeitungssystem so angepasst, dass dieser Sollwert abhängig vom Feedback der Gebäudenutzerinnen und -nutzer um eine Sollwertkorrektur von maximal ± 3 K korrigiert werden kann. Die Heizungstechnik übermittelt dazu die aktuell gemessenen Temperaturen, den aktuellen Sollwert und die Sollwertkorrektur an die Datenbank. Diese Werte werden gleich wie alle anderen Messwerte verarbeitet und gespeichert. Gemeinsam mit dem User-Feedback wird daraus alle fünf Minuten einen neue Sollwertkorrektur bestimmt. Dazu wird je nach User-Feedback und vorhergehender Sollwertkorrektur ein neuer Wert berechnet. Die neue Sollwertkorrektur wird dann wieder an die Heizungstechnik gesendet. Die Versuchsanordnung ist in Abbildung 30 schematisch erklärt, die einfache Regelfunktion zur Berücksichtigung des User-Feedbacks stellt sich wie folgt dar:

$$c_{t+1} = c_t - \frac{\bar{r}_t - 50}{50}$$

- gerundet auf 0,5
- begrenzt auf ± 3 K
- 50 ist die Normierung der Feedbacks, welche zwischen 0 und 100 liegen
- c_{t+1} neuer Korrekturwert
- c_t alter Korrekturwert
- \bar{r}_t arithmetisches Mittel der Bewertungen seit der Berechnung des alten Korrekturwertes c_t

Die Kommunikation mit der Heizungstechnik funktionierte über das IP-Netzwerk der TU Graz und das Kommunikationsprotokoll MQTT. Da MQTT ein standardisiertes Protokoll ist, gibt es sowohl

Software-Bibliotheken als auch Kommunikationskomponenten für die Heizungstechnik, um Daten per MQTT zu übermitteln. Die Datenrepräsentation der per MQTT übermittelten Messwerte ist jedoch nicht standardisiert. Um die Kommunikation möglichst einfach zu gestalten, wurden die Messwerte als einfache ASCII-Zahlen direkt übertragen. Jeder Messwert erhielt ein eigenes MQTT-Topic und wurde demnach in einer eigenen Nachricht separat übermittelt.

Während des Versuchszeitraums von rund 1,5 Monaten (Mitte Dez. 2019 bis Ende Jänner 2020) nutzten 15 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter der beiden Räume die Möglichkeit, die Temperaturregelung mittels FEELings-App zu beeinflussen. Das Temperaturfeedback mittels Slider führte zu folgenden Korrekturen an der eingestellten Raumtemperatur:

Testraum 1:

- 4x Korrektur um +1 K
- 1x Korrektur um +0,5 K
- 1x Korrektur um -0,5 K

Testraum 2:

- 5x Korrektur um +1 K
- 3x Korrektur um -0,5 K
- 1x Korrektur um -1 K

Der Versuch zeigte, dass eine Rückkopplung des User-Feedbacks in das Gebäudeautomationssystem hard- und softwaretechnisch umsetzbar ist und die Möglichkeit auch von den Usern der Räume genutzt wird. Durch die Trägheit der Fußbodenheizung der Testräume wird die Raumtemperaturänderung allerdings stark zeitverzögert wahrgenommen. Trotzdem zeigt das Ergebnis die Möglichkeit auf, ähnliche Rückkopplungen auch für die Bereiche Lüftung und Kühlung umzusetzen, in denen eine schnellere Auswirkung von Änderungen für Nutzerinnen und Nutzer spürbar sein würde.

3.5.4. Vorhersagemodelle

Aufbauend auf den Ergebnissen der Datenanalyse wurden verschiedene maschinelle Lernmethoden auf die Daten angewandt. Dabei wurde die Frage untersucht, ob es möglich ist, die subjektiven Bewertungen in einem oder mehreren Räumen in Abhängigkeit von verschiedenen Messgrößen vorherzusagen. Somit könnte in weiterer Folge die Behaglichkeitsempfindung der Gebäudenutzerinnen und -nutzer nachgebildet und die Gebäuderegulung dahingehend automatisiert beeinflusst werden.

Zuerst wurden zwei Random-Forrest-Klassifikatoren⁵⁸ auf die Daten trainiert. Diese wurden trainiert, um die in fünf Stufen eingeteilte Temperaturbewertung (zu kalt, kalt, angenehmen, warm, zu warm) einmal aus der Außentemperatur und einmal aus der Raumtemperatur vorherzusagen. Die Vorhersagekurve ist für beide Fälle in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** dargestellt.

Visuell ist deutlich erkennbar, dass die Bewertungen der Nutzerinnen und Nutzer sowohl über die Außen- als auch über die Raumtemperatur sehr stark streuen. Daraus resultiert eine sehr geringe Vorhersagequalität. Bewertungen der Vorhersagequalität werden häufig durch den sogenannten F1-

⁵⁸ Tan, P.-N.; Steinbach, M.; Kumar, V.: Introduction to Data Mining, Pearson Education. 2014

Wert⁵⁹ bewertet. Dieser ist das harmonische Mittel aus der Trefferquote (Sensitivität) und der Genauigkeit (Relevanz) und liegt immer zwischen Null und Eins. Dabei stellt Null die schlechteste und Eins die beste Wertung dar. Im gezeigten Fall liegt der F1-Wert für die Vorhersage auf Basis der Außentemperatur bei ca. 0,33 und für die Vorhersage auf Basis der Raumtemperatur bei ca. 0,38. Diese Werte sind sehr gering und weisen darauf hin, dass keine zuverlässige Vorhersage der subjektiven Bewertungen aus der Außen- bzw. Raumtemperatur möglich ist. Ein Grund für diese geringe Vorhersagegüte ist die große Streuung der subjektiven Bewertungen über die Temperatur. Wie **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** zeigt, deckt jede Bewertung (von zu kalt bis zu warm) einen sehr großen Temperaturbereich sowohl in der Raum- als auch in der Außentemperatur ab.

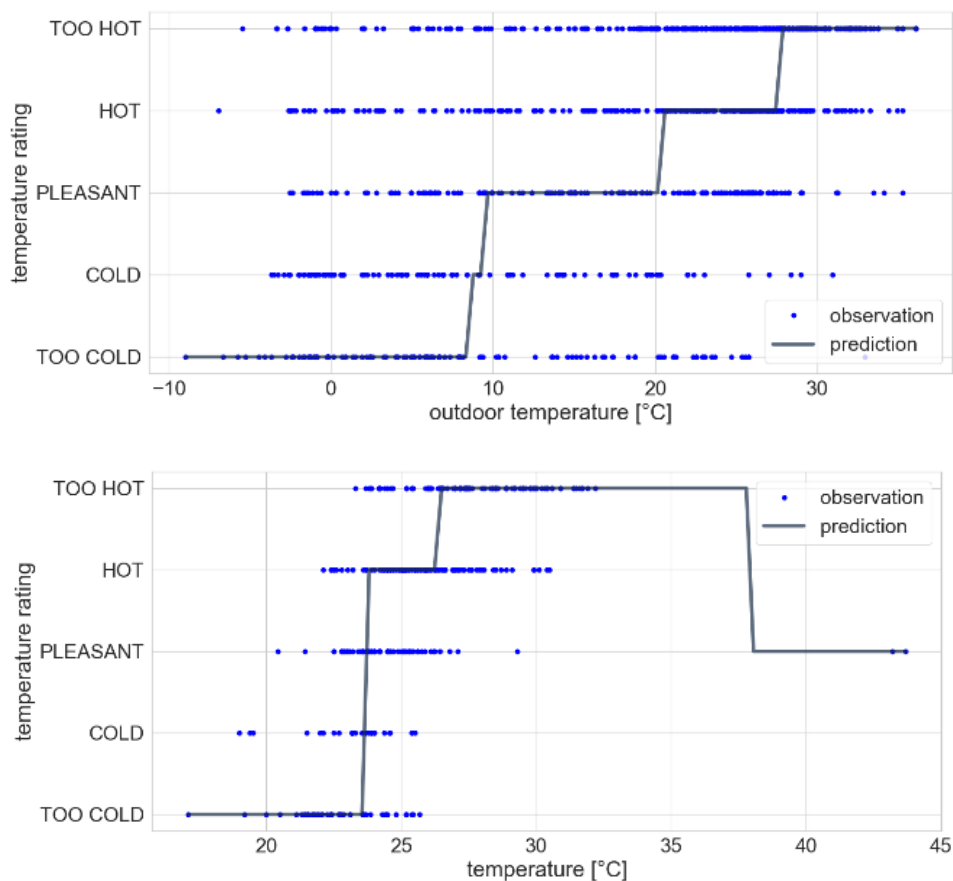


Abbildung 31: Vorhersage der Nutzerinnen- und Nutzerbewertung aus der Außentemperatur (oben, $F1=0,33$) und der Raumtemperatur (unten, $F1=0,38$) mit einem Random-Forest-Klassifikator

Um sicherzugehen, dass die geringe Vorhersagegüte nicht auf unberücksichtigte Einflussfaktoren zurückzuführen ist, wurde eine automatische Gruppierung (englisch Clustering) mit mehr Eingangsvariablen durchgeführt. Diese Gruppierung wurde mit dem KMeans-Algorithmus⁶⁰ implementiert. Um mögliche zusätzliche Einflussfaktoren erkennen zu können, wurde diese Analyse nur für einen ausgewählten Raum umgesetzt, in dem die Außentemperatur, Raumtemperatur, CO₂-Konzentration und die Raumluftfeuchte gemessen wurden.

⁵⁹ Maimon, O.; Rokach, L. (Eds.): Data mining and knowledge discovery handbook, Springer. 2005

⁶⁰ Zaki, M. J.; Meira Jr, W.; Meira, W.: Data mining and analysis: fundamental concepts and algorithms. Cambridge University Press. 2014

Abbildung 32 zeigt Ergebnisse der Gruppierung. In beiden Teilen von Abbildung 32 sind die Meldungen der Nutzerinnen und Nutzer in der Mood-Map dargestellt. Ein Punkt repräsentiert eine Meldung und die Lage der Meldung entspricht der angegebenen Beurteilung der Nutzerin bzw. des Nutzers. Die Gruppen sind jeweils farblich gekennzeichnet. Im linken Teil wurde die Gruppierung ausschließlich nach der Raumtemperatur durchgeführt; im rechten Teil wurde die Gruppierung nach der Außentemperatur, Raumtemperatur, CO₂-Konzentration und Raumluftheuchte durchgeführt. In beiden Teilen konnte kein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Lage und den Gruppen, also der Position und den Farben erkannt werden. Jedoch kann im rechten Teil der Grafik eine Häufung der blauen Gruppe in der linken unteren Ecke bei niedriger Energie und schlechtem Gefühl erkannt werden. Diese Häufung sollte wegen der sehr geringen Anzahl der Daten jedoch nicht überinterpretiert werden. Dennoch lässt es vermuten, dass die Raumtemperatur allein nicht aussagekräftig genug ist, die Rückmeldungen der Nutzerinnen und Nutzer vorherzusagen, aber die Raumtemperatur gemeinsam mit Außentemperatur, CO₂-Konzentration und Raumluftheuchte hier besser geeignet sind. Auch wenn die geringe Anzahl der zur Verfügung stehenden Daten hier keine belastbaren Schlüsse erlaubt, wäre dies eine Möglichkeit, gängige Maßzahlen wie Predicted Mean Vote (PMV) zu validieren. Hier gibt es ein Potential für zukünftige Arbeiten.

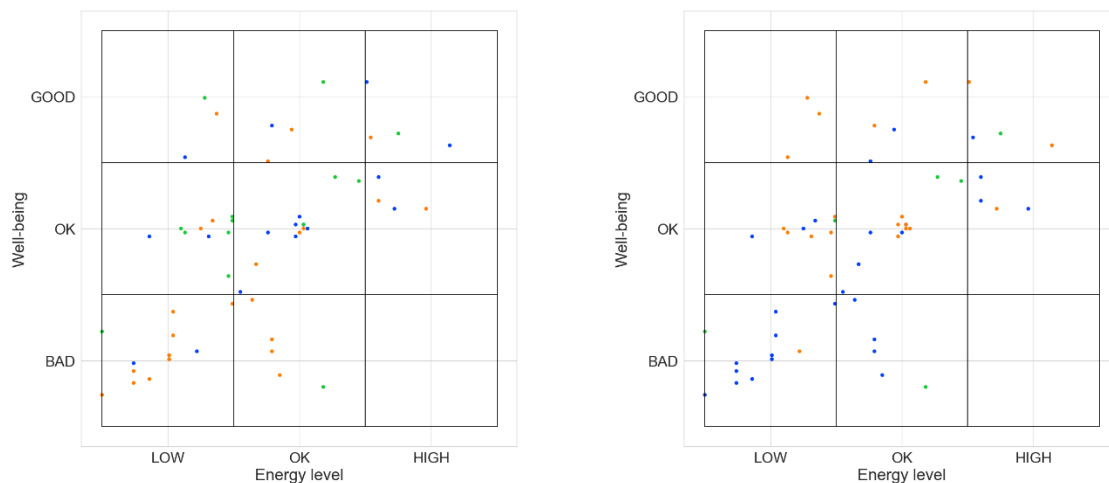


Abbildung 32: Die Rückmeldungen in der Mood-Map wurden mit dem KMeans-Algorithmus automatisch gruppiert. Die Lage entspricht der Bewertung und die Farbe der automatisch zugewiesenen Gruppe. Links wurden die Gruppen nur auf Basis der Raumtemperatur gebildet, rechts wurden zusätzlich auch die Außentemperatur, CO₂-Konzentration und die Luftfeuchtigkeit hinzugenommen.

Um mögliche Gruppen auch visuell untersuchen zu können, wurden die Daten zusätzlich wie in Abbildung 33 gezeigt dargestellt. Dabei sind die Rückmeldungen mit der gemessenen Raum- (Abszisse) und Außentemperatur (Ordinate) aufgetragen und entsprechend der Art der Rückmeldung eingefärbt. In dieser Darstellung kann man mit dem Auge keinerlei Gruppen erkennen, d.h. dass Raum- und Außentemperatur nicht ausreichen, um die Meldungen nach den Bewertungsgruppen zu trennen.

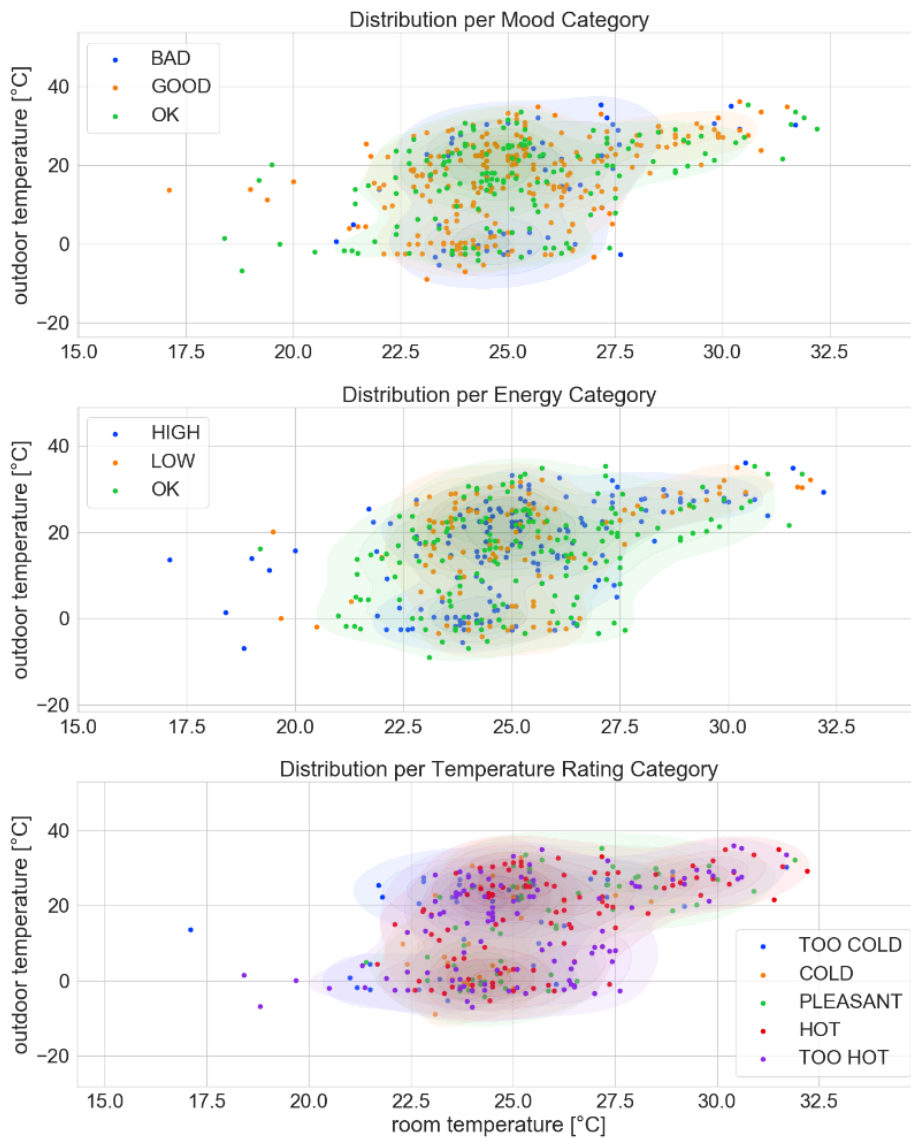


Abbildung 33: Bivariate Verteilungen der Rückmeldungen aus der Mood-Map (oben und Mitte) und der Raumtemperatur (unten) jeweils der Außen- und Raumtemperatur gegenübergestellt

Da im Projekt die CO₂-Konzentration und Luftfeuchte nur in wenigen Räumen gemessen wurden, muss an dieser Stelle darauf hingewiesen werden, dass die verfügbaren Rückmeldungen für die Erstellung von verlässlichen Vorhersagemodellen zu gering waren. Dennoch konnten dafür Potentiale erkannt werden, bei denen sich weitere Messreihen bzw. Modellierungen als erfolgversprechend abzeichnen. Hier gibt es also weitere Möglichkeiten für zukünftige Analysen mit neuen bzw. erweiterten Messdaten.

3.6. Einpassung der Projektergebnisse in das Programm „Stadt der Zukunft“

Die Projektergebnisse betreffen insbesondere das Ziel „Reduktion des Energieverbrauches in Gebäuden“ des Programms „Stadt der Zukunft“. Dabei kann die FEELings-App im Zusammenspiel mit einer zielgerichteten Datenanalyse Gebäudebetreiber bei der Umsetzung von Maßnahmen zur Energieeffizienzsteigerung von Gebäuden unterstützen und gleichzeitig den Komfort der User durch direkte Einbindung in den Prozess deutlich anheben.

Des Weiteren konnte durch die Einbeziehung von Unternehmenspartnern in das Forschungsprojekt die Innovationskraft dieser Unternehmen gestärkt und parallel dazu deren Wettbewerbsfähigkeit erhöht werden. Die Basis hierfür ist das im Projekt FEELings entwickelte innovative Softwaretool, die FEELings-App, sowie die darauf aufgebauten Software-Dienstleistungen. Das Leistungsportfolio der Unternehmenspartner kann durch das Angebot der FEELings-App, kombiniert mit damit verbundenen Dienstleistungen, massiv erweitert werden.

Hierfür können speziell die ausgearbeiteten Methoden zur Rückkopplung des User-Feedbacks in das HKLS-System, an die Gebäudenutzerinnen und -nutzer, an Energiemonitoringsysteme und an Planerinnen und Planer beitragen. Andererseits können die Unternehmen ihre im Projekt teilweise neu eingesetzten und getesteten hard- und softwaretechnischen Betriebsmittel flexibel an die bautechnischen Gegebenheiten, gebäudetechnischen Ausstattungen sowie die Nutzerstruktur der Kunden anpassen und durch die Erhöhung der technologischen Leistungsfähigkeit mitunter auch einen neuen Kundenkreis gewinnen. Ferner wurde die Möglichkeit der direkten Rückkopplung des Feedbacks in die Heizungsregelung – gekoppelt mit der vorhandenen Raumtemperatur – technisch umgesetzt und erprobt. Dieses Muster kann von den Unternehmenspartnern wiederholt bei Kunden angewandt bzw. auch abgewandelt für andere raumklimatische Verbesserungsmaßnahmen wie z.B. der Luftqualität eingesetzt werden.

Die FEELings-App wird zusätzlich bei weiteren F&E-Projekten eingesetzt, wodurch die Projektergebnisse um weitere Erkenntnisse angereichert werden, von denen auch die teilnehmenden Projektpartner profitieren werden. Die Vielzahl an Einsatzmöglichkeiten der App in F&E-Projekten und in weiterer Folge in realen Projekten stellt einen Beitrag zur Umsetzung der nationalen Klima- und Energiestrategie dar.

4. Schlussfolgerungen

Abschließend werden die aus dem Projekt gewonnenen Erkenntnisse des Projektteams zusammengefasst und ein Vergleich mit den gesteckten Projektzielen gezogen sowie aufgezeigt, wie die Ergebnisse aus wirtschaftlicher und wissenschaftlicher Sicht für das Projektteam, aber auch für andere Zielgruppen relevant und interessant sein können.

4.1. Aus dem Projekt gewonnene Erkenntnisse sowie Übereinstimmung der Projektergebnisse mit den Projektzielen

In den folgenden Abschnitten wird – aufgeschlüsselt nach den vier definierten Projektzielen – dargestellt, welche Erkenntnisse das Projektteam aus dem Projekt gewinnen konnte und inwieweit durch die in den vorangegangenen Kapiteln dargestellten Projektergebnisse die Projektziele erfüllt wurden.

4.1.1. Erkenntnisse zu Projektziel 1: Proof-of-Concept des Ansatzes

Im Forschungsprojekt FEELings wurde gezeigt, dass das mittels FEELings-App umgesetzte User-Feedback-System dazu beitragen kann, ein umfassendes Feedback von Nutzerinnen und Nutzern bestimmter Gebäude zu erheben, welches in Kombination mit raumklimatischen Messdaten und Anlagenzuständen dazu geeignet ist, daraus Handlungsempfehlungen für einzelne Bereiche abzuleiten sowie Steuersignale für Gebäudeautomationsanlagen zu generieren. Eine automatisierte Ableitung wurde in der Projektlaufzeit für den Bereich der Gebäudeautomation umgesetzt.

Die Gestaltung des User Interfaces für die beiden Varianten Smartphone-App sowie fix installiertes Tablet im Raum und die gewählten Abfrageparameter trugen dazu bei, dass das Feedbacksystem einfach und intuitiv zu bedienen ist und somit ausreichend Feedback gesammelt werden konnte. Auch die Anwendungsmöglichkeit der App als Desktop-Variante fand großen Zuspruch. Durch die Erfassung des Feedbacks über einen Zeitraum von einem Jahr im Rahmen von Use Cases konnten das Nutzerverhalten analysiert und Maßnahmen für Komfort- und Energieeffizienzsteigerungen abgeleitet werden.

Die Kombination von Nutzerfeedback und messtechnisch erfassten Raumzuständen ließ teilweise wiederkehrende Muster bei Behaglichkeitsrückmeldungen erkennen, wobei hier unterschiedliche Datenaufbereitungs- und Analyse-Methoden zum Einsatz kamen. Aus diesen Ergebnissen konnte handlungsrelevantes Wissen für das Facility Management, für Planerinnen und Planer und für die Gebäudenutzerinnen und -nutzer abgeleitet werden. Steuerungsrelevante Informationen für das Gebäudeautomationssystem wurden anhand der Umsetzung einer Heizungsregelung, welche auf das User-Feedback reagiert, in zwei Räumen getestet.

4.1.2. Erkenntnisse zu Projektziel 2: Untersuchung von Methoden, wie mit diesem System die Energieeffizienz von Gebäuden erhöht werden kann

Ziel des Projekts war unter anderem die Erhöhung der Energieeffizienz von Gebäuden durch die Einbeziehung der Nutzerinnen und Nutzer.

Die Erfassung von Nutzerfeedback und deren Rückkopplung auf Basis von Datenanalysen kann zu Änderungen der Raumtemperatur, zur Reduktion von Kühlmaßnahmen und somit zu

Energieeffizienzsteigerungen führen. Dazu trug sowohl das Feedback von Nutzern in der heißen Jahreszeit als auch in der kalten Jahreszeit bei. Zwei konkrete, in Kapitel 3.5.2 erläuterte Beispiele zeigen, dass Fehler bei der Heizungsregelung, aber auch bei der Kühlung den Energieverbrauch deutlich steigerten. Durch das User-Feedback mittels FEELings-App konnten diese Fehlregelungen detektiert und behoben und somit eine Energieeinsparung erreicht werden.

Das Projekt zeigte, dass Energieeinsparungen durch die Einbeziehung der Nutzerinnen und Nutzer möglich sind, und am Use Case Campus Graz wurden auch konkrete Maßnahmen gesetzt, um die Energieeffizienz von Gebäuden zu erhöhen.

4.1.3. Erkenntnisse zu Projektziel 3: Berücksichtigung datenschutzrechtlicher Aspekte und Sicherstellung der Privatsphäre der Gebäudenutzer

Die Privatsphäre der Nutzer konnte durch eindeutig definierte Maßnahmen zum Datenschutz gemäß Kapitel 3.2.5, welche mittels Datenschutzerklärung den Nutzerinnen und Nutzern kommuniziert wurden, ausreichend gewahrt werden. Die Maßnahmen wurden als ausreichend empfunden, wie Interviews mit sechs Nutzerinnen und Nutzern zeigten (Kapitel 3.4.3). Die App-User fühlten sich in ihrer Privatsphäre nicht gestört, die Notwendigkeit einer Registrierung inklusive der Bekanntgabe des permanenten Arbeitsplatzes zur einfacheren Bearbeitung von Anliegen sowie der automatischen Verortung von Behaglichkeitsmeldungen wurde von den Usern als angemessen angesehen. Geschlecht und Altersgruppe konnten bei der Registrierung optional angegeben werden, da diese vorrangig für weitere wissenschaftliche Analysen, jedoch nicht für die Bearbeitung von Anliegen oder Feedback-Zuordnung interessant waren. Fast alle User nutzten diese Möglichkeit.

Das Projektziel, Berücksichtigung datenschutzrechtlicher Aspekte und Sicherstellung der Privatsphäre der Gebäudenutzer, konnte mit den umgesetzten Datenschutzmaßnahmen umfassend erfüllt werden.

4.1.4. Erkenntnisse zu Projektziel 4: Untersuchung der unterschiedlichen Wahrnehmung von Raumzuständen durch verschiedene Personengruppen

Die Auswertungen und Analysemethoden in Arbeitspaket 7 wurden unter anderem genutzt, um Aspekte von Gender und Diversität im Nutzerverhalten zu analysieren. Dabei konnten auch geschlechterspezifische Unterschiede in der Empfindung von Raumzuständen festgestellt werden. Es wurde dabei das gesamte Feedback des Use Cases TU Graz ab dem Rollout der FEELings-App im Dezember 2018 bis zum Ende des Projektzeitraums (Jänner 2020) berücksichtigt. Jener geringe Anteil an Meldungen von App-Usern (< 2 %), welche das Geschlecht bei der Registrierung nicht angegeben hatten, wurde bei den geschlechterspezifischen Auswertungen (Abbildung 34 bis Abbildung 38) nicht miteinbezogen. Die Analysen des Feedbacks nach Geschlecht und Altersgruppe beinhalten auch nicht die Rückmeldungen via Tablet, welche in der Mensa abgegeben wurden, da hier keine Abfrage zu Alter und Geschlecht vorgenommen wurde.

Die Nutzung der FEELings-App spiegelt die geschlechterspezifische Zusammensetzung der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter der TU Graz – mit einem Anteil von rund 30 %⁶¹ an weiblichen Mitarbeiterinnen – wider. 45 der registrierten App-User waren weiblich, dies entspricht einem Anteil

⁶¹ TU Graz Facts & Figures 2018/19 https://www.tugraz.at/fileadmin/user_upload/tugrazInternal/TU_Graz/Universitaet/TU_Graz_kompakt/Facts_Figures_2018.pdf. S. 35.

an den Gesamtusern von 25 %. Obwohl der Anteil der App-Nutzerinnen bei einem Viertel lag, wurden 30 % der 1277 Behaglichkeitsmeldungen von Mitarbeiterinnen via App übermittelt (Abbildung 34). Das bedeutet, dass Frauen die FEELings-App öfter für eine Behaglichkeitsmeldung nutzten als Männer.

Bei den in Summe 214 gemeldeten Anliegen ist der Prozentsatz des weiblichen Feedbacks mit 36 % deutlich höher. Dieser höhere Anteil kann auf den hohen weiblichen Anteil der Sekretariats-Mitarbeiterinnen zurückgeführt werden, welche weitestgehend für die Kommunikation von Betriebsstörungen und Anliegen ihrer zugeordneten Organisationseinheit zuständig sind.

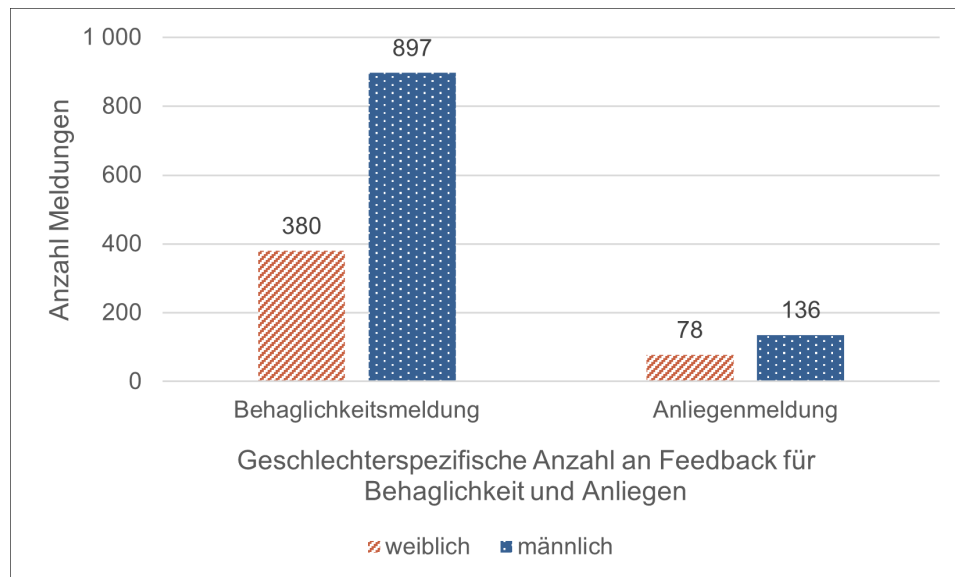


Abbildung 34: Anzahl des Feedbacks Behaglichkeit und Anliegen, getrennt nach Geschlecht

In den Diagrammen in Abbildung 35 bis Abbildung 38 wird die unterschiedliche Wahrnehmung der vier, per App mittels Slider spezifizierbaren raumklimatischen Bedingungen Temperatur, Luftqualität, Geräuschpegel und Lichtstärke durch weibliche und männliche App-User dargestellt. Bewertungen der Behaglichkeit ohne Slider-Spezifikation (Default-Werte) flossen in diese vier Auswertungen nicht mit ein.

Zudem sind die vier Grafiken in absteigender Reihenfolge der Anzahl der Slider-Bewertungen angeführt, was verdeutlicht, dass die Temperatur der am meisten spezifizierte Raumzustand war. Mit einer Bewertung weniger, also fast gleichauf, folgt die Luftqualität, danach der Geräuschpegel und abschließend die Lichtstärke. Der Anteil der von Frauen spezifizierten Raumzustände zu Temperatur, Geräusch und Luft liegt bei je rund einem Fünftel bis einem Viertel, während die Lichtqualität mit 15% von Mitarbeiterinnen weniger oft bewertet wurde als von Mitarbeitern.

Abbildung 35 zeigt die geschlechterspezifische Temperaturbewertung am Arbeitsplatz. Es ist deutlich ersichtlich, dass Frauen höhere Temperaturen im Raum ihren männlichen Kollegen vorziehen, welche hier deutlich öfter die Temperatur mit „zu heiß“ und „heiß“ bewerteten, hingegen reagieren Männer weniger sensibel auf niedrigere Temperaturen.

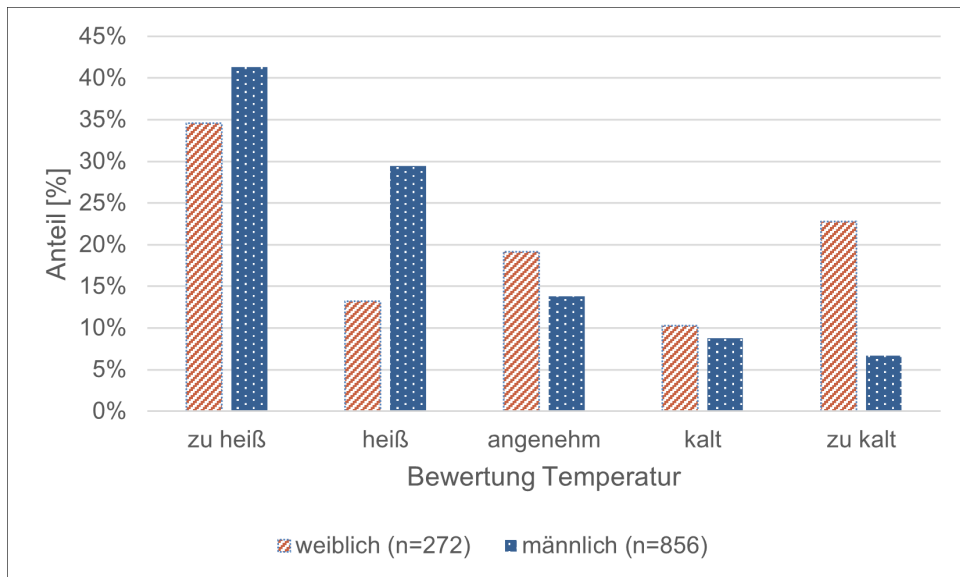


Abbildung 35: Unterschiedliche Wahrnehmung der Temperatur durch weibliche und männliche User (n=Anzahl der Bewertungen)

In Abbildung 36 wird die Wahrnehmung der Luftqualität von Frauen und Männern differenziert dargestellt. Hier ist nur ein geringer Unterschied zwischen männlichen und weiblichen App-Usern erkennbar.

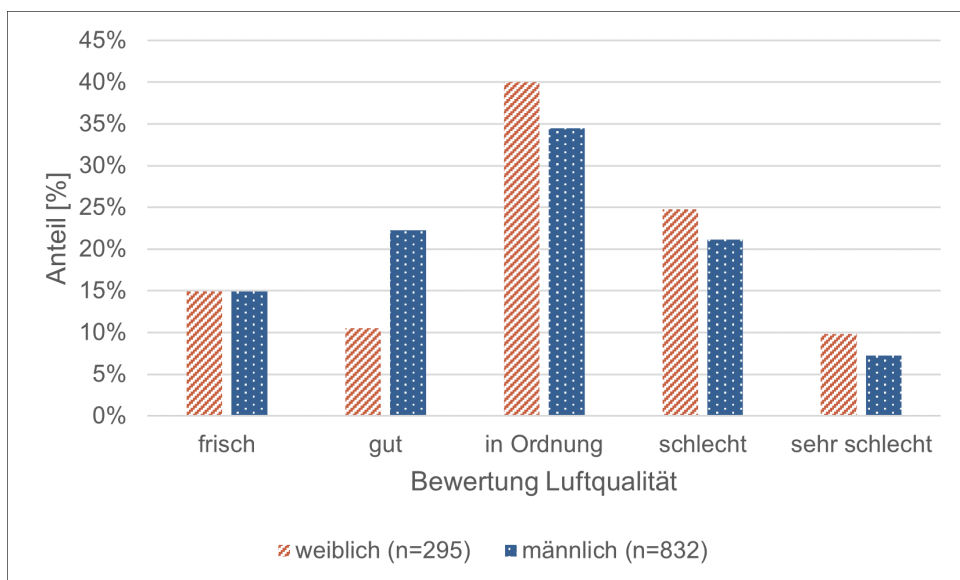


Abbildung 36: Unterschiedliche Wahrnehmung der Luftqualität durch weibliche und männliche User (n=Anzahl der Bewertungen)

Deutliche Abweichungen des geschlechterspezifischen Feedbacks zum Geräuschpegel sind in Abbildung 37 ersichtlich. Während fast zwei Drittel der Frauen den Geräuschpegel am Arbeitsplatz mit ruhig und annehmbar bewerteten, liegt dieser Anteil bei den Männern bei nicht einmal 50 %.

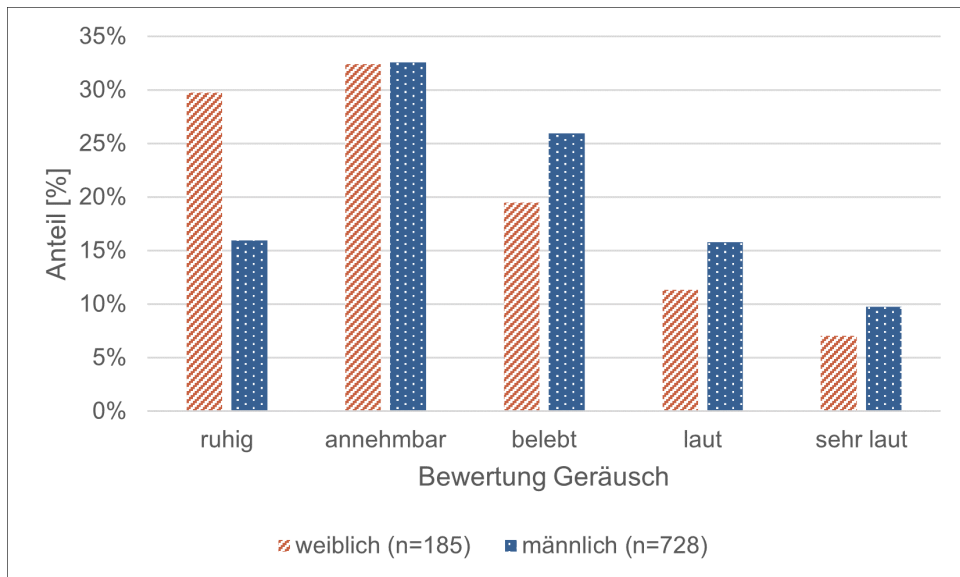


Abbildung 37: Unterschiedliche Wahrnehmung des Geräuschpegels durch weibliche und männliche User (n=Anzahl der Bewertungen)

Nur 15 % der weiblichen App-User bewerteten die Lichtstärke, wie dies in Abbildung 38 dargestellt wird. Die Grafik zeigt deutlich, dass wiederum fast zwei Drittel der Frauen mit der Lichtstärke am Arbeitsplatz zufrieden sind, während dieser Anteil bei den Männern bei nur einem Drittel liegt.

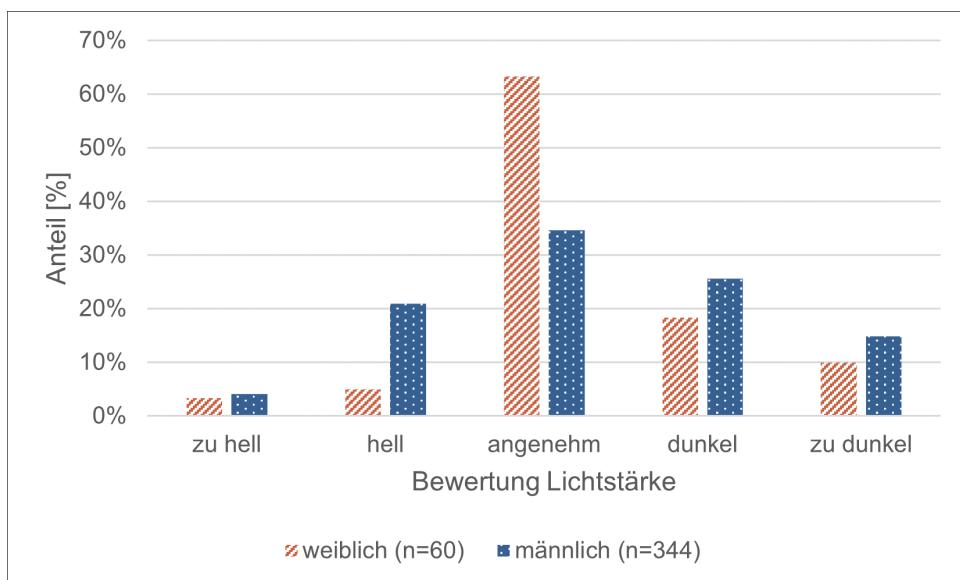


Abbildung 38: Unterschiedliche Wahrnehmung der Lichtstärke durch weibliche und männliche User (n=Anzahl der Bewertungen)

Bei den geschlechterspezifischen Auswertungen zum Geräuschpegel sowie zur Lichtstärke könnte die Anordnung der Arbeitsplätze in Einzel- oder Gruppenbüros sowie die Lage des Schreibtisches nahe am Fenster eine wesentliche Rolle spielen. Auf diesen Aspekt wurde im Zuge des Forschungsprojekts jedoch nicht näher eingegangen.

Abbildung 39 zeigt die Verteilung der Behaglichkeitsmeldungen nach Altersgruppen. Das Behaglichkeits-Feedback von Personen im Alter von 26 bis 45 Jahren macht drei Viertel aller Meldungen aus. Von Personen ab 46 Jahren wurden rund 15 % der Behaglichkeitsmeldungen abgegeben. Von Personen unter 26 kam weniger als 10 % des Behaglichkeits-Feedbacks, rund 1 %

der Meldungen wurde von Personen geliefert, welche das Alter nicht angegeben haben. Bei dieser Auswertung kann jedoch kein direkter Vergleich mit der Altersstruktur der TU Graz-Mitarbeiter gezogen werden, da dem Projektteam keine Daten dazu zur Verfügung stehen. Aus diesem Grund kann hier nicht analysiert werden, ob der hohe Anteil der Nutzerinnen und Nutzer zwischen 26 und 45 am großen Interesse an neuen digitalen Möglichkeiten zur Verbesserung der Energieeffizienz und des Komforts am Arbeitsplatz liegen oder sich hier die Altersstruktur der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter der TU Graz spiegelt.

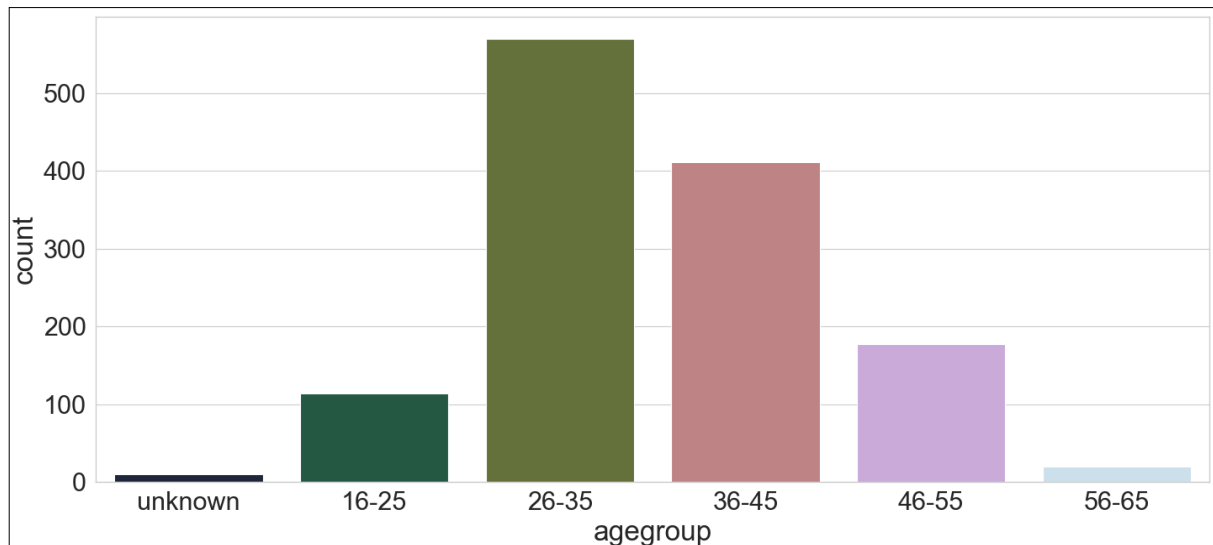


Abbildung 39: Behaglichkeitsfeedback je Altersgruppe

Eine Ableitung der raumspezifischen Bedingungen gemäß Abbildung 35 bis Abbildung 38 für die einzelnen Altersgruppen wurde im Zuge des Projektverlaufs nicht durchgeführt.

Zusammengefasst zeigen die vorab angeführten Projektergebnisse, dass es mitunter ausgeprägte geschlechterspezifische Unterschiede in der Empfindung von Raumzuständen gibt und dass die App von Frauen anteilmäßig häufiger genutzt wurde als von Männern. Des Weiteren wurde erkannt, dass Personen zwischen 26 und 45 Jahren die App am häufigsten nutzten.

4.2. Bisherige und zukünftige Verwertungs- und Verbreitungsaktivitäten der Projektergebnisse durch das Projektteam sowie Potenzial

Kernstück des Forschungsprojekts ist die FEELings-App zur Eingabe von Behaglichkeitsmeldungen durch Gebäude-User, weshalb eine breite Anwendung der App im Rahmen des Projekts für den Erfolg essentiell war. Ab Dezember 2018 war der Download der FEELings-App über die App-Stores (Android und iOS) sowie die Nutzung der App als Desktop-Variante über gängige Browser für alle Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter der TU Graz möglich. Bis Projektende konnten 181 registrierte User, welche rund 1600 Behaglichkeitsfeedbacks abgegeben haben, gewonnen werden. Neben der wissenschaftlichen Auswertung dieses Feedbacks war für die Abteilung Gebäude und Technik der TU Graz vor allem die Funktion der Anliegen-Meldung ein Mehrwert. Die erleichterte Störungsbehebung kombiniert mit Anpassungen der Regelungstechnik durch die Auswertungen der Behaglichkeitsmeldungen konnte zum einen den Komfort der Nutzerinnen und Nutzer messbar steigern, zum anderen wurden Energieeinsparungen in den Versuchsgebäuden erzielt. Aus diesem Grund besteht

das Bestreben der Projektpartner, den im Rahmen dieses Forschungsprojekts entwickelten Ansatz wirtschaftlich und wissenschaftlich weiterzuentwickeln, wie in diesem Kapitel näher erläutert wird.

4.2.1. Wirtschaftliche Verwertung der Projektergebnisse durch das Projektteam

Die FEELings-App soll in einem ersten Schritt weiter entwickelt werden, um sie als Werkzeug für das Facility Management an der TU Graz im Regelbetrieb einsetzen zu können bzw. einen neuen, innovativen Informationskanal zwischen den Nutzerinnen und Nutzern und den verantwortlichen Dienstleistern anbieten zu können. Zusätzlich wird die Möglichkeit diskutiert, die FEELings-App auch außerhalb der TU Graz einem erweiterten Kundenkreis anbieten zu können. Hierfür wurden Kosten für einen weiterführenden laufenden Betrieb (Support, Wartung, Releases) sowie für die Überarbeitungen der Benutzeroberfläche des Betriebsführers (z.B. Raumdaten, Zuordnung Serviceteams) kalkuliert. Die Erhöhung des Serviceangebots der Unternehmenspartner im Projekt durch ein zusätzliches Angebot an Gebäudebetreiber, Facility Manager und technische Betriebsführer sind Anreize für eine Weiterentwicklung und zukünftige Vermarktung der FEELings-App. Die Durchführung einer Marktanalyse sowie die Entwicklung eines Stakeholder- und Finanzierungskonzepts sind für diesen weiteren Schritt notwendig und vom Projektteam angedacht.

Ein Auszug der erzielten Projektergebnisse wurde in einem öffentlichen Abschlussworkshop an der TU Graz präsentiert. Eingeladen waren neben Probandinnen und Probanden auch Wirtschaftstreibende, Verbände und Gebäudebetreiber. Der Workshop zeigte, dass das entwickelte System positiv gesehen wird und sowohl eine weitere Nutzung der FEELings-App an der TU Graz als auch eine externe Weiterentwicklung und Nutzung durch Unternehmen (inklusive einer Produktentwicklung) mögliche Weiterführungsoptionen sind.

4.2.2. Wissenschaftliche Verwertung der Projektergebnisse durch das Projektteam

Zwischenergebnisse des Projekts wurden auf der internationalen Konferenz *Sustainable Built Environment D-A-CH Conference 2019: Transition Towards a Net Zero Carbon Built Environment* im September 2019 präsentiert. Weitere Konferenzbeiträge sowie Papers mit den Endergebnissen des Projekts sind in Planung.

Zusätzlich wird die FEELings-App sowie die kombinierten Datenanalysemethoden im Forschungsprojekt „Comfort“⁶² des Programms IKT der Zukunft (6. Ausschreibung) von der Know-Center GmbH eingesetzt. Dabei wird die FEELings-App erneut zur Messung der Behaglichkeit in Räumen verwendet.

Des Weiteren wurde eine Projekt-Homepage unter <http://feelings-project.tugraz.at> eingerichtet, auf der das Projekt präsentiert und die Ergebnisse disseminiert werden.

Die erhaltenen Daten stehen den Projektpartnern für drei Jahre auf der FEELings-Datenbank für weitere wissenschaftliche Verwertung und Publikationen zur Verfügung.

⁶² Vgl. <https://projekte.ffg.at/projekt/3044951>

4.3. Weitere Verarbeitung der Projektergebnisse sowie Potential

Im Zuge des Projekts wurden Geschäftsmodellideen gesammelt, welche auf eine weitere Entwicklung des Systems, insbesondere auf eine Vermarktung der FEELings-App, abzielen. Dass ausreichend Potential für die Einbeziehung des Feedbacks von Nutzerinnen und Nutzern, welches einerseits die Energieeffizienz von Gebäuden steigert, andererseits den Komfort erhöht, besteht, wurde durch die erzielten Projektergebnisse bestätigt.

Zielgruppen für die Nutzung der App sind beispielsweise Facility Manager, Gebäudebetreiber oder Bauträger, die ein innovatives Instrument zur Energieeinsparung und Verbesserung des Komforts für Nutzerinnen und Nutzer einsetzen möchten.

Auch eine Vereinfachung der Kommunikation, durch die einfach handzuhabende und flexibel anpassbare Funktion der Anliegen-Meldung wurde im Projekt verdeutlicht, weshalb auch hier Marktpotential besteht. Gebäudeverwaltungen steigen zunehmend auf die digitale Erfassung von Funktionsstörungen um, wobei bestehende Produkte nicht die drei gebündelten Funktionen der FEELings-App – die Behaglichkeitsmeldung, die Anliegen-Meldung sowie die Gebäudeinformation als Rückkanal zu den Nutzerinnen und Nutzern – in sich vereinen.

5. Ausblick und Empfehlungen

Die im Projekt angestrebten Ziele, die Erstellung eines Funktionsmusters für die Erfassung und Auswertung von Nutzerfeedback sowie der Proof-of-Concept konnten mit der Entwicklung sowie dem Test der FEELings-App über einen Zeitraum von über einem Jahr erreicht werden. Die gewonnenen Ergebnisse und Erkenntnisse bilden eine Grundlage für weitere Forschungsaktivitäten, aber auch für eine angestrebte Produktentwicklung.

Die Projektergebnisse haben das große Potential der FEELings-App sowie der Datenanalyse- und Rückkopplungsmethoden aufgezeigt. Die entwickelten Funktionsmuster und eingesetzten Technologien wurden ausreichend getestet, das Konzept wurde evaluiert und von den Nutzerinnen und Nutzern positiv angenommen.

Nach der ersten Station des Projekts, der Entwicklung der Funktionsmuster, könnte nun in einem nächsten Schritt die Entwicklung eines Prototyps für eine reale Anwendung folgen. Bei längerem Betrieb durch Pilot User kann eine breitere Datenbasis aufgebaut werden, die wiederum in weiterführende wissenschaftliche Arbeiten einfließen kann, was von den Projektpartnern neben einer wirtschaftlichen Verwertung angestrebt wird.



6. Verzeichnisse

6.1. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Konzept des User-Feedback-Systems	16
Abbildung 2: Projektflussbild FEELings.....	19
Abbildung 3: Sensorstation Know-Center	26
Abbildung 4: Konzeptuelle Systemarchitektur.....	27
Abbildung 5: Umsetzungsarchitektur.....	28
Abbildung 6: Mood-Map	29
Abbildung 7: Slider für Temperatur-Feedback.....	29
Abbildung 8: Klickbare Mockups mit HTML5	31
Abbildung 9: Benutzeroberfläche der FEELings-App – englischsprachige Version. Links: Startseite mit persönlicher Anrede und hinterlegtem Arbeitsplatz; Mitte: Interface Behaglichkeitsmeldung mit Mood-Map und Slidern; Rechts: Motivationsbaum.....	33
Abbildung 10: Benutzeroberfläche der FEELings-App. Links: Auswahlkategorien Anliegen-Meldung; Mitte: Auswahlkategorie Anliegen Licht/ Elektro/ Sonnenschutz; Rechts: Spezifizierung Gebäudeinformation sowie Gebäudebewertung.	34
Abbildung 11: Benutzeroberfläche des Gebäudebetreibers zum Einsehen der Anliegen-Meldungen	35
Abbildung 12: Softwarearchitektur für Messdatenerfassung und Speicherung.....	36
Abbildung 13: Schema der Datenbank zur Sammlung des Nutzerfeedbacks	37
Abbildung 14: Tablet-Variante Mensa. Links: Benutzeroberfläche und Projektinformation; Mitte: Hoch frequentierter Standort; Rechts: Stehpult mit Diebstahlschutz für Tablet	41
Abbildung 15: Anzahl der User mit mindestens einem Behaglichkeits-Feedback während des Testzeitraums	42
<i>Abbildung 16: Anzahl des User-Feedbacks während des Testzeitraums.....</i>	<i>43</i>
Abbildung 17: Durchschnittliche Anzahl an Behaglichkeitsmeldungen je User während des Testzeitraums	43
Abbildung 18: Auswertung der Frage: "Wie nützlich finden Sie die FEELings-App?"	47
Abbildung 19: Auswertung der Frage: „Wie beurteilen Sie die Handhabung/Benutzbarkeit der FEELings-App?“	48
Abbildung 20: Auswertung der Frage: „Wie hat die Bearbeitung von gemeldeten Anliegen in Gebäuden funktioniert?“	48
Abbildung 21: Auswertung der Frage: „Würden Sie die FEELings-App (auch) zukünftig für die Meldung eines Anliegens/der Behaglichkeit verwenden?“	49
Abbildung 22: Auswertung der Reihung der vier vorgegebenen raumklimatischen Einflussgrößen durch die User	49
Abbildung 23: Heatmap Mood	51
Abbildung 24: Negative Ratings (Auszug der ersten 10 Räume).....	52
Abbildung 25: Gemessene Raumtemperatur/Raumluftfeuchte: Daten für den Zeitraum 01.08.2019 bis 31.08.2019 über ein Behaglichkeitsfeld Raumtemperatur/Raumluftfeuchte nach Frank gelegt. ...	54

Abbildung 26: Gemessene Raumtemperatur/Raumlufffeuchte: Daten für den Zeitraum 01.01.2019 bis 31.12.2019 über ein Behaglichkeitsfeld Raumtemperatur/Raumlufffeuchte nach Frank gelegt. ...	54
Abbildung 27: Gemessene Raumtemperatur/Raumlufffeuchte: Daten für den Zeitraum 01.11.2019 bis 30.11.2019 über ein Behaglichkeitsfeld Raumtemperatur/Raumlufffeuchte nach Frank gelegt. ...	54
Abbildung 28: Flussdiagramm zur Lösung der Aufgabe „Anomalien bei der Anzahl der User-Feedbacks“	56
Abbildung 29: Grundriss 6. OG des Use Cases mit Darstellung der Test-Raumregelzonen (gelb markiert).....	57
Abbildung 30: Schema Umsetzung Einzelraumregelung Heizung durch Rückkopplung des Feedbacks in das Gebäudeautomationssystem für zwei Testräume.....	58
Abbildung 31: Vorhersage der Nutzerinnen- und Nutzerbewertung aus der Außentemperatur (oben, $F1 \approx 0,33$) und der Raumtemperatur (unten, $F1 \approx 0,38$) mit einem Random-Forest-Klassifikator	60
Abbildung 32: Die Rückmeldungen in der Mood-Map wurden mit dem KMeans-Algorithmus automatisch gruppiert. Die Lage entspricht der Bewertung und die Farbe der automatisch zugewiesenen Gruppe. Links wurden die Gruppen nur auf Basis der Raumtemperatur gebildet, rechts wurden zusätzlich auch die Außentemperatur, CO ₂ -Konzentration und die Luftfeuchtigkeit hinzugenommen.....	61
Abbildung 33: Bivariate Verteilungen der Rückmeldungen aus der Mood-Map (oben und Mitte) und der Raumtemperatur (unten) jeweils der Außen- und Raumtemperatur gegenübergestellt	62
Abbildung 34: Anzahl des Feedbacks Behaglichkeit und Anliegen, getrennt nach Geschlecht.....	66
Abbildung 35: Unterschiedliche Wahrnehmung der Temperatur durch weibliche und männliche User (n=Anzahl der Bewertungen)	67
Abbildung 36: Unterschiedliche Wahrnehmung der Luftqualität durch weibliche und männliche User (n=Anzahl der Bewertungen)	67
Abbildung 37: Unterschiedliche Wahrnehmung des Geräuschpegels durch weibliche und männliche User (n=Anzahl der Bewertungen).....	68
Abbildung 38: Unterschiedliche Wahrnehmung der Lichtstärke durch weibliche und männliche User (n=Anzahl der Bewertungen)	68
Abbildung 39: Behaglichkeitsfeedback je Altersgruppe.....	69

6.2. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Forschungsarbeiten, die sich mit dem Thema Nutzerverhalten im Gebäude beschäftigen	11
Tabelle 2: Sensorenausstattung am Use Case „Campus TU Graz“	40

6.3. Literaturverzeichnis

Amundsen Mike, McLarty Matt, Mitra Ronnie, Nadareishvili Irakli: Microservice Architecture. Aligning Principles, Practices, and Culture. Hrsg.: MacDonald Brian, Bauer Holly. O'Reilly, Sebastopol 2016.

Beckel Christian, et al.: Revealing household characteristics from smart meter data. In: Lund Henrik (Hrsg.): Energy – the international journal 78, S. 397-410. 2014.

Bluyssen Philomena: The Indoor Environment Handbook: How to Make Buildings Healthy and Comfortable. Earthscan, London 2009.

Bluyssen Philomena, Cox Chrit: Indoor environment quality and upgrading of European office buildings. In: Energy and Buildings 34 (2), S. 155-162. 2002.

Buhr R. J. A.: Use Case Maps as Architectural Entities for Complex Systems. In: IEEE Transactions on Software Engineering 24 (12), S. 1131–1155. 1998.

Europäische Kommission: Horizon 2020 – Societal Challenges: <https://ec.europa.eu/programmes/horizon2020/h2020-sections> (abgerufen am 30.03.2017; 09:46)

Europäische Kommission: Klima- und Energiepaket 2020: https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2020_de (abgerufen am 23.02.2017; 13:18)

Europäische Kommission: Das Energieeffizienzziel von 20 % für 2020 wird erreicht und sogar übertroffen. Brüssel, 1. Februar 2017. http://europa.eu/rapid/press-release_MEMO-17-162_de.htm (abgerufen am 30.3.2017; 16:22)

Europäische Kommission: Energy performance of buildings directive: https://ec.europa.eu/energy/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/energy-performance-buildings-directive_en (abgerufen am 29.04.2020; 08:36)

European Environment Agency: Achieving energy efficiency through behaviour change: what does it take? EEA Technical report 5/2013. EEA, Copenhagen 2013.

Frank Walther: Raumklima und Thermische Behaglichkeit. Berichte aus der Bauforschung Heft 104. Ernst & Sohn Verlag, Berlin 1975.

Hillar Gaston C.: MQTT Essentials. A Lightweight IoT Protocol. Packt Publishing Ltd., Birmingham 2017.

Jadhav Nilesh Y.: Engaging Occupants in Green and Smart Buildings. In: Green and Smart Buildings, S. 147-154. Springer, Singapore 2016.

Janda Kathryn B.: Buildings don't use energy: people do. In: Architectural science review 54 (1), S. 15-22. 2011.

Klaffinger Lisa: Das (App-) Leben ist ein Spiel. In: Wochenzeitungs GmbH Steiermark (Hrsg.): Meine Woche 34, Graz 2018.

Knoll Peter und Becker Martin: Literaturübersicht zu Energieeinsparpotenzialen durch moderne Elektroinstallation. Studie im Auftrag des ZVEI Fachverbandes Installationsgeräte und -systeme. Hochschule Biberach 2007.

Lu Jiakang, et al.: The smart thermostat: using occupancy sensors to save energy in homes. In: Proceedings of the 8th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems, S. 214-224. ACM, 2010.

Maimon Oded, Rokach Lior (Hrsg.): Data Mining and Knowledge Discovery Handbook. Springer, New York 2010.

Masse Mark: REST API Design Rulebook. Hrsg.: St. Laurent Simon. O'Reilly Media, Sebastopol 2011.

Mattern Friedemann, Staake Thorsten, Weiss Markus.: ICT for green: how computers can help us to conserve energy. In: Proceedings of the e-Energy 2010 - 1st international conference on energy-efficient computing and networking. S 1-10. ACM, 2010.

Ministerium für Wirtschaft und Mittelstand, Energie und Verkehr des Landes Nordrhein-Westfalen: Energieeinsparung in öffentlichen Gebäuden. MWMEV, Düsseldorf 2000.

Nadkarni Prakash M., Marengo Luis, Chen Roland, Skoufos Emmanouil, Shepherd Gordon, Miller Perry: Organization of Heterogeneous Scientific Data Using the EAV/CR Representation. In: Journal of the American Medical Informatics Association (JAMIA) 6 (6), S. 478-493. 1999.

Nickoloff Jeffrey, Kuenzli Stephen: Docker in Action. Second. Hrsg.: Vail Janet. Manning, Shelter Island 2019.

Reekie John, McAdam Rohan James: A Software Architecture Primer. Angophora Press, Sydney 2006.

Rivera-Pelayo Verónica, Fessl Angela, Müller Lars, Pammer Viktoria: Introducing Mood Self-Tracking at Work. Empirical Insights from Call Centers. In: ACM Transactions on Computer-Human Interaction 24 (1), S. 3:1-3:28. 2017.

Sakellaris Ioannis, et al.: Perceived Indoor Environment and Occupants' Comfort in European "Modern" Office Buildings: The OFFICAIR Study. In: International Journal of Environmental Research and Public Health. 13 (5). S. 444, 2016.

Tan Pang-Ning, Steinbach Michael, Kumar Vipin: Introduction to Data Mining. Pearson Education, Harlow 2014.

Tiefenbeck Verena, Goette Lorenz, Degen Kathrin, Tasic Vojkan, Fleisch Elgar, Lalive Rafael, Staake Thorsten: Overcoming Saliency Bias: How Real-Time Feedback Fosters Resource Conservation. In: Management Science 64 (3). 2018.

TU Graz: TU Graz Facts & Figures 2018/19: https://www.tugraz.at/fileadmin/user_upload/tugrazInternal/TU_Graz/Universitaet/TU_Graz_kompakt/Facts_Figures_2018.pdf.

Weiss Markus, Staake Thorsten, Mattern Friedemann, Fleisch Elgar: PowerPedia: changing energy usage with the help of a community-based smartphone application. In: Personal and Ubiquitous Computing 16 (8), S. 655-664. 2012.

Zaki Mohammed J., Meira Wagner (JR.): Data Mining and Analysis. Fundamental Concepts and Algorithms. Cambridge University Press, New York 2014.

Zichermann Gabe, Cunningham Christopher: Gamification by Design. Implementing Game Mechanics in Web and Mobile Apps. Hrsg. Treseler, Mary. O'Reilly Media, Sebastopol 2011.

Internetquellen

<https://nest.com/thermostat/meet-nest-thermostat/> (abgerufen am 24.03.2017; 08:27)

<http://fmi.fh-kufstein.ac.at/myBuildingMessage> (abgerufen am 20.03.2017; 10:27)

<http://ecocampus.ntu.edu.sg/Pages/powerz.aspx> (abgerufen am 20.03.2017; 15:52)

<https://biotechn.asia/2016/10/26/energy-efficiency-app-powerzee-reach-singapore-tertiary-institutions/> (abgerufen am 20.03.2017; 11:13)

<http://jpi-urbaneurope.eu/project/codaloop/> (abgerufen am 22.03.2017; 18:05)

<http://www.stadtlaborgraz.at/de/project/codaloop> (abgerufen am 24.03.2017; 13:37)

<https://www.pgadmin.org/> (abgerufen am 10.12.2019; 16:22)

<https://projekte.ffg.at/projekt/3044951> (abgerufen am 09.01.2020; 08:33)

<https://openweathermap.org/> (abgerufen am 12.12.2019; 09:26)

<https://www.limesurvey.org/de/> (abgerufen am 14.10.2019; 16:34)

**Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie,
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)**

Radetzkystraße 2, 1030 Wien

[bmk.gv.at](https://www.bmk.gv.at)