

BEUTH HOCHSCHULE
FÜR TECHNIK
BERLIN

University of Applied Sciences



htw

Hochschule für Technik
und Wirtschaft Berlin

University of Applied Sciences

Forschung EnergieEffizienzLücke Real Estate (FEEL Real Estate)

Kompetenzzentrum Ingenieurwissenschaften

Laufzeit: 01.07.2015–30.06.2017

Abschlussbericht

M.Sc. Frederik Werder
Dipl.-Phys. Frank Scheffler

Projektleitung

Prof. Kai Kummert
Beuth Hochschule für Technik (Beuth)
Luxemburger Straße 10, 13353 Berlin
Tel.: 030-4504-5208
kummert@beuth-hochschule.de

Prof. Dr.-Ing. Friedrich Sick
Hochschule für Technik und Wirtschaft (HTW)
Wilhelminenhofstraße 75a, 12459 Berlin
Tel.: 030-5019-3658
friedrich.sick@htw-berlin.de

Kooperationspartner

b.i.g. bechthold Ingenieurgesellschaft mbH (big)
Brandenburgischer Landesbetrieb für Liegenschaften und Bauen (BLB)
deZem GmbH (deZem)
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)
Kieback&Peter GmbH & Co.KG
Gesellschaft für Immobilienwirtschaftliche Forschung e.V. (gif)
Zentraler Immobilien Ausschuss e.V. (ZIA)

Keithstraße 6, 10787 Berlin
Heinrich-Mann-Allee 103, 14473 Potsdam
Sybelstraße 63, 10629 Berlin
Rutherfordstraße 2, 12489 Berlin
Tempelhofer Weg 50, 12347 Berlin
Mosbacher Straße 9, 65187 Wiesbaden
Unter den Linden 42, 10117 Berlin

17. Juli 2017

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	V
1. Ausgangslage und Zielsetzung	1
2. Durchführung	2
2.1. Pilotobjekt Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin	4
2.1.1. Simulation des energetischen Nutzereinflusses mit IDA/ICE	5
2.1.1.1. Gebäudegeometrien	5
2.1.1.2. Zonierung	6
2.1.1.3. Lastgänge	7
2.1.1.4. Nutzerdaten	7
2.1.2. Simulation verschiedener Ansätze	8
2.1.2.1. Simulation mit Nutzungszeiten laut DIN V 18599-10	8
2.1.2.2. Simulation mit Nutzungszeiten laut DIN V 18599-10	9
2.1.3. Ergebnisse der Simulationen	10
2.2. Pilotobjekt Beuth Hochschule für Technik	11
2.3. Verwaltungsgebäude des DLR in Berlin Adlershof	12
2.3.1. Vorgeschichte	12
2.3.2. Überblick	12
2.3.3. Technische Informationen en:key	13
2.3.4. Technische Informationen Wärmemengenzähler	13
2.3.5. Versuchsaufbau	14
2.3.6. Inbetriebnahme	15
2.3.7. Messergebnisse	16
2.3.7.1. Wärmemengen	16
2.3.7.2. Wochenprofile	18
2.3.7.3. Energetisches Nutzerverhalten	23
2.4. Zusammenfassende Interpretation der Datenauswertungen	26
2.5. Kritische Betrachtung des Untersuchungsaufbaus und der Messwerte	30

2.6. Zwischenfazit und -ausblick	32
3. Kooperation	33
3.1. Aufgabenverteilung zwischen den Partnern	33
3.2. Effekte der Kooperation	34
3.3. Erfahrungen mit fachübergreifender Zusammenarbeit	34
4. Ergebnisse	35
5. Transfermöglichkeiten und -aktivitäten	37
6. Resonanz in der Öffentlichkeit	38
6.1. Publikationen	38
6.2. Veranstaltungen	38
6.3. Websites	38
6.4. Abschlussarbeiten	39
6.5. Medienecho	39
6.6. Stimmen der Kooperationspartner	40
6.6.1. Interview mit Lutz Grunicke, BLB	40
6.6.2. Interview mit Daniel Feser, ZIA	41
6.6.3. Interview mit Torsten Betz, DLR	42
7. Perspektiven für weitere Kooperationen und Forschung	44
8. Ausblick	45
8.1. Forschungsbedarf	45
8.2. Langfristige Auswirkungen	45
8.3. Geplante weitere Verwertung	45
9. Kurzzusammenfassung und Ergebnisse	46
A. en:key	IV
A.1. Umfassende Graphiken	IV
A.2. Anwendungsstrang	V
A.3. Referenzstrang	XIV
A.4. Inhalt LOG-Dateien	XXIV

Abbildungsverzeichnis

2.1.	Projektzeitplan aus Projektantrag	3
2.2.	Methodischer Ansatz der Simulationen	5
2.3.	Zonenmodell des Seminarraums C357 in IDA/ICE	6
2.4.	Geschossansicht zониert	6
2.5.	Tageslastgang eines Standardprofils in IDA/ICE	7
2.6.	Wärmebilanz Raum C357, KW40/2016, DIN V 18599-10	9
2.7.	Wärmebilanz Raum C357, KW40/2016, LSF-Veranstaltungen	10
2.8.	Beispielhafte HeatMap-Daten der Beuth Hochschule für Technik Berlin	11
2.9.	Raumsensor und Ventilregler des en:key-Systems	13
2.10.	Strangschema der Heizanlage beider Stränge	14
2.11.	Raumweise Nutzflächenverteilung der Stränge	15
2.12.	Zeitlicher Verlauf der Inbetriebnahme des en:Key-Systems am DLR	16
2.13.	Wärmemengen der Heizungsstränge	16
2.14.	Wärmemengenverhältnis der Heizungsstränge	17
2.15.	Flächenspez. Wärmemengenverbräuche pro Tag	18
2.16.	Heizwahrscheinlichkeit des Raumes R4	19
2.17.	Heizprofil des Raumes R4	20
2.18.	Profildifferenzen der Heizwahrscheinlichkeiten für den Raum R4	21
2.19.	Übersicht Heizwahrscheinlichkeiten aller Räume	22
2.20.	Übersicht Heizprofile aller Räume	23
2.21.	Heizwahrscheinlichkeit und Heizprofile des Anwendungsstrangs	24
2.22.	Heizwahrscheinlichkeit und Heizprofile des Referenzstrangs	25
2.23.	Euklidische Distanzen von Raum R12	26
2.24.	Beispielhafte HeatMap-Daten der Beuth Hochschule für Technik Berlin	30
A.1.	Daten des Raums R1 (Anwendungsstrang)	VI
A.2.	Daten des Raums R2 (Anwendungsstrang)	VII
A.3.	Daten des Raums R3 (Anwendungsstrang)	VIII
A.4.	Daten des Raums R4 (Anwendungsstrang)	IX

A.5. Daten des Raums R5 (Anwendungsstrang)	X
A.6. Daten des Raums R6 (Anwendungsstrang)	XI
A.7. Daten des Raums R7 (Anwendungsstrang)	XII
A.8. Daten des Raums R8 (Anwendungsstrang)	XIII
A.9. Daten des Raums R9 (Referenzstrang)	XV
A.10. Daten des Raums R10 (Referenzstrang)	XVI
A.11. Daten des Raums R11 (Referenzstrang)	XVII
A.12. Daten des Raums R12 (Referenzstrang)	XVIII
A.13. Daten des Raums R13 (Referenzstrang)	XIX
A.14. Daten des Raums R14 (Referenzstrang)	XX
A.15. Daten des Raums R15 (Referenzstrang)	XXI
A.16. Daten des Raums R16 (Referenzstrang)	XXII
A.17. Matrix der Heizwahrscheinlichkeiten und -profile aller Räume	XXIII

Tabellenverzeichnis

- 2.1. Erläuterung der Teilaufgaben aus Projektablaufplan des Forschungsantrags. . . . 2
- 2.2. Auswahl von in [Ne16] vorgegebenen Werten für die Hinterlegung in IDA/ICE . . . 8

1. Ausgangslage und Zielsetzung

Die zentrale These des Forschungsprojektes „Forschung EnergieEffizienzLücke Real Estate“ lautet: Die Energieeffizienzlücke in Nichtwohngebäuden beruht sehr oft und sehr wesentlich auf energiekritischem Nutzerverhalten.

Bei den Untersuchungen soll ein selbst entwickeltes Framework auf ein Gebäudeportfolio angewendet werden, um Prozesse des Energiemanagements zu objektivieren und wissenschaftliche Faustregeln (sogenannte Heuristiken und Metaheuristiken) zur Differenzierung von nutzer- und gebäudebasiertem Energiebedarf abzuleiten. Dieses Framework ist im vorausgegangenen Forschungsprojekt „FEEL“ entstanden.

Zur weiteren Durchdringung der Forschungsthese werden Gebäudesimulationen für die quantitative Bestimmung des Nutzereinflusses durchgeführt. Die Simulationsergebnisse sollen unter anderem eine bessere Energiebedarfsabschätzung im Rahmen von Gebäudesanierungsplanungen ermöglichen.

Das Forschungsprojekt wurde durch das Institut für angewandte Forschung Berlin (IFAF)¹ über Drittmittel finanziert und als Kooperationsprojekt zwischen der Beuth Hochschule für Technik Berlin und der Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin durchgeführt. Die Stellen der wissenschaftlichen Mitarbeiter an beiden Institutionen sind mit einem Arbeitsaufwand von 20 Wochenstunden angesetzt.

¹<http://www.ifaf-berlin.de/>

2. Durchführung

Um das Projekt koordiniert durchzuführen, werden inhaltlich und zeitlich abgegrenzte Projektphasen angesetzt. Die jeweiligen Phasen schließen mit Meilensteinen ab, die eine Überprüfung und eventuelle Neuorientierung des Projektablaufs zulassen sollen. In Abbildung 2.1 ist der dem Projektantrag entnommene Projektzeitplan abgebildet. Es sind die in Tabelle 2.1 aufgelisteten Teilaufgaben angesetzt.

Entgegen des ursprünglich vorgesehenen Zeitplans war es aufgrund verschiedener Aktivitäten und Entwicklungen erforderlich, von diesem abzuweichen und alternative Teilaufgaben (TA) und Meilensteine (M) zu setzen.

Tabelle 2.1.: Erläuterung der Teilaufgaben aus Projektablaufplan des Forschungsantrags.

TA	Beschreibung
1	Wissenssynchronisation
2	Laufender Desk-Research
3	Beitrag und Partizipation an der Forschung zum Thema Nutzerverhalten
4	Terminplanung und -verfolgung
5	Festlegung des zu untersuchenden Gebäudeportfolios
6	Nachwuchsförderung und Professionalisierung der Berufseinsteiger
7	Road-Show der FEEL-Stele zur Interaktion mit den Nutzern
8	Energetische Gebäudeerfassung durchführen
9	Simulationsprozess aufsetzen
10	Simulationen durchführen
11	Heuristiken aus Simulationsergebnissen gewinnen
12	Handlungsempfehlungen aus Heuristiken herleiten
13	Cockpitsteuerung mit Handlungsempfehlungen verstärken
14	Evaluation der Projektergebnisse und -methoden

Die folgenden Teilaufgaben konnten plangemäß umgesetzt werden: Das Wissen der Forschergruppen wurde durch laufende hochschulinterne Jour-Fixe-Veranstaltungen synchronisiert. Parallel wurde der Desk-Research weiter geführt, durch den aktuelle Publikationen gesichtet wurden (TA 1 und TA 2 ([AM12], [BS14], [FACO12], [FW11], [HPF⁺15], [HKP08], [HHL⁺09], [HJC15], [JGTC13], [LPK12], [MG10], [MKG⁺14], [MCBB12], [OG14], [PSH11], [THS08], [TBEC14], [Gra14], [YBG14], [YFH⁺11], [YTS09])). Die Nachwuchsförderung (TA 6) durch studentische Abschlussarbeiten erfolgte durch in Abschnitt 6.4 aufgeführte Arbeiten. Entgegen der Planung

wurde dieser Punkt kontinuierlich über die gesamte Projektlaufzeit durchgeführt. Das im Vorgängerprojekt bereit gestellte Informationsterminal (sogenannte FEEL-Stele) wurde auf der 25-Jahre-Brandenburg-Feier im September in Potsdam eingesetzt (TA 7). Aufgrund eines technischen Defekts im Herbst 2016 musste die Road-Show der FEEL-Stele auf unabsehbare Zeit unterbrochen werden. Die energetische Erfassung der Pilotgebäude sowie das Aufsetzen eines Simulationsprozesses mit der Software IDA/ICE wurde durchgeführt. Die TA 8 wurde in die reine Gebäudeerfassung und die Erfassung zusätzlicher Daten aufgeteilt.

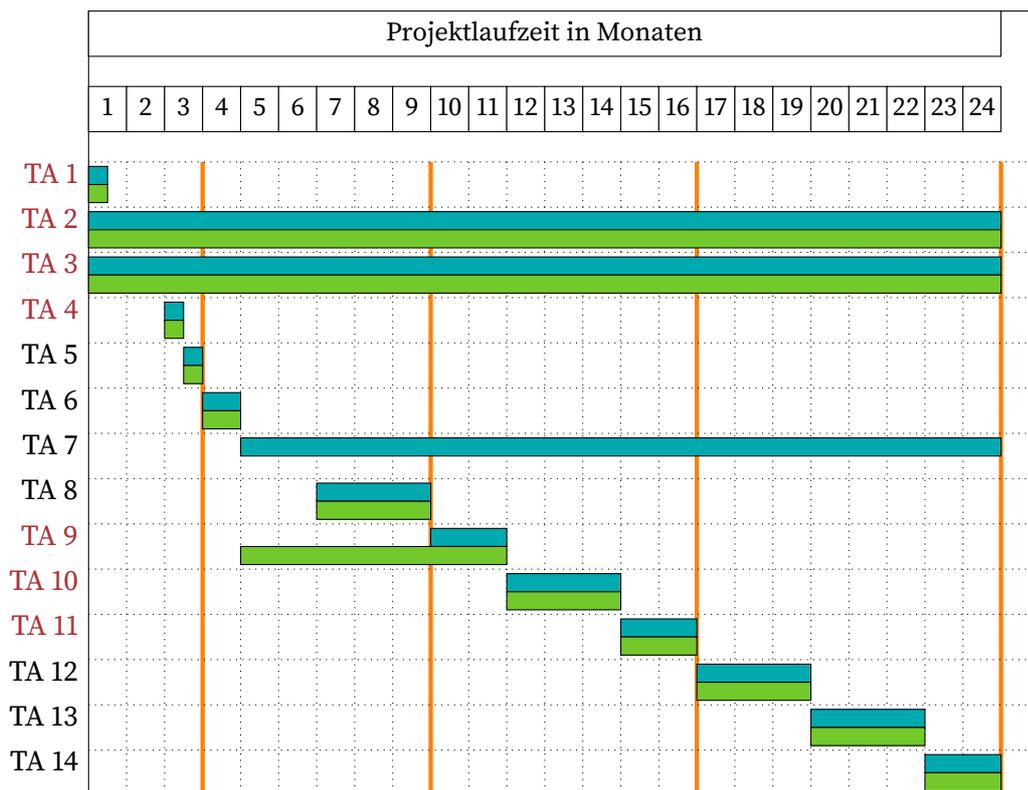


Abbildung 2.1.: Projektzeitplan aus Projektantrag. Aufgabenzuteilung HTW [■] und Beuth [■]

Zur Verifikation der Simulationsergebnisse sollten diese mit gemessenen Daten des HeatMap-Forschungsprojektes¹ verglichen werden. Die Beschaffung der HeatMap-Daten war bis zuletzt immer wieder organisatorischen Schwierigkeiten unterworfen. Im Laufe des Jahres 2016 ist es zu erheblichen Verzögerungen bei der Datenbeschaffung gekommen. Obwohl die Datelage an der HTW bezüglich dieses Projekts vielversprechend war, musste die technische Umsetzung der Datenverteilung neu angestoßen werden, da diese nach Ablauf der Projektlaufzeit von HeatMap nicht ausreichend vorgesehen war. Von den ehemaligen Projektverantwortlichen wurde eine Cloud-Lösung des Messinfrastrukturherstellers bevorzugt, deren Installation und Zugriffsmöglichkeit sich weiter verzögerte. Eine generelle Nutzung der Daten konnte mit nicht näher genanntem Nutzungszeitpunkt zugesichert werden. Unglücklicherweise ist die Bereit-

¹<http://www.ifaf-berlin.de/projekte/heatmap/>

stellung der HeatMap-Daten bis zum Abschluss des Projektes nicht erfolgt. Ein Vergleich der Simulationsergebnisse mit Messdaten entfällt.

An der Beuth Hochschule gestaltete sich der generelle Zugang zu den HeatMap-Daten als politisch schwierig. Nach Gewährung eines Datenzugangs wurde festgestellt, dass die zeitliche Auflösung der an der Beuth Hochschule gesammelten Daten für die angesetzten Simulationsuntersuchungen unzureichend war.

Im Rahmen eines anschließenden Gesprächs mit den Projektpartnern wurden Räumlichkeiten des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt in Adlershof in den Fokus gerückt. Mit der Gewinnung des Gebäudeautomationsherstellers Kieback&Peter als zusätzlicher Projektpartner konnte das en:key-System² in zwei vergleichbaren Heizsträngen eines Bürogebäudes am Standort Berlin-Adlershof installiert werden. Durch manuelle, wöchentliche Auslesung der Daten und der Ausarbeitung einer Auswertestrategie entstand eine neue Datengrundlage für das Projekt.

Die TA 9 und TA 10 bauen iterativ aufeinander auf und wurden aufgrund der zeitlichen Verzögerungen bei der Datenbeschaffung parallel zu den Auswertestrategien durchgeführt. Auf je einer internen (19. Oktober 2015) und externen (26. Oktober 2015) Kickoff-Veranstaltung (M 1) wurden die TA 3 bis TA 5 behandelt, insbesondere Termine abgesprochen und über das zu untersuchende Gebäudeportfolio diskutiert.

Durch einen Gutachterhinweis zum Innovationsgrad des Projekts angeregt, wurden zur Vorbereitung der Kickoff-Veranstaltung zielführende interne Gespräche hinsichtlich Neuheit und Nachvollziehbarkeit des Ansatzes geführt. Dabei stellte sich insbesondere die Gewinnung und Einbindung realer Nutzerprofile als wesentliche Neuerung heraus.

Im Rahmen des Projekttreffens beim Zentralen Immobilien Ausschuss am 13. Dezember 2016 wurde der aktuelle Projektstatus vorgestellt sowie der Projektbericht des Vorgängerprojekts FEEL überreicht.

2.1. Pilotobjekt Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin

Als eines der Pilotobjekte wurde das Gebäude C auf dem Campus Wilhelminenhof der Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin ausgewählt. Dies hat mehrere Gründe: Zum einen stehen für dieses Objekt alle Daten zur Verfügung, die für eine energetische Gebäudeerfassung notwendig sind. Zum anderen sind die vorhandenen Daten über die Bauabteilung der Hochschule barrierefrei akquirierbar.

²<https://www.kieback-peter.de/at-de/produkte/enkey/>

Des Weiteren sollten über das bereits ausgelaufene Forschungsprojekt HeatMap dessen reale Messdaten mit den Simulationsergebnissen verglichen werden. Wie bereits in Abschnitt 2 beschrieben, konnten die Messdaten nicht eingesehen und ein Vergleich nicht durchgeführt werden. Durch die geplante Verwendung der Daten wurde das Pilotobjekt Gebäude C auf das dritte Obergeschoss eingeschränkt. Dort sind neben Professoren- und Verwaltungsbüros auch Seminarräume vorhanden.

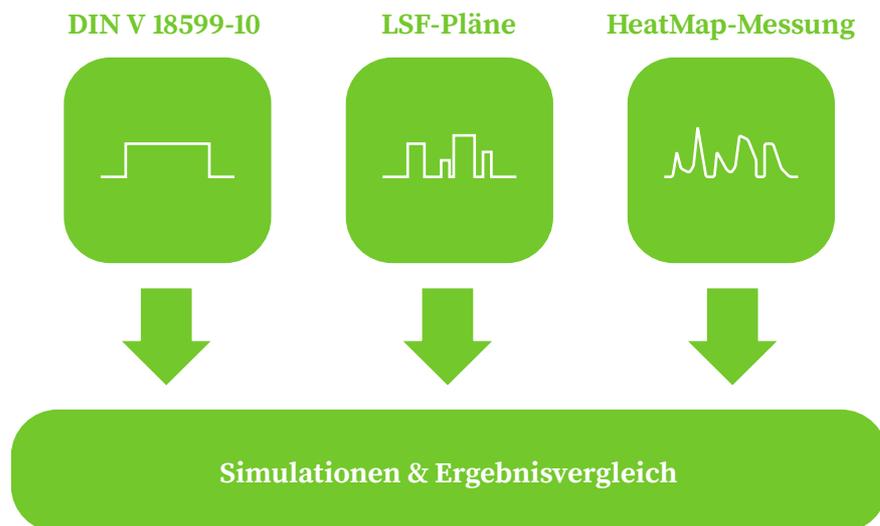


Abbildung 2.2.: Methodischer Ansatz der Simulationen

Da sich im Laufe des Projekts der Untersuchungsfokus an der Beuth Hochschule für Technik auf Büroräume am DLR verschoben hat, wurde die Betrachtung im Pilotobjekt der HTW auf Räumlichkeiten mit einer hohen Anzahl an Nutzern gelenkt. In Abbildung 2.2 ist der methodische Ansatz der Vergleichssimulationen dargestellt, wie er zu Beginn des Projekts angesetzt war. Der Vergleich mit Eingangsdaten des Projekts HeatMap konnte nicht durchgeführt werden.

2.1.1. Simulation des energetischen Nutzereinflusses mit IDA/ICE

2.1.1.1. Gebäudegeometrien

Für eine energetische Gebäudesimulation sind grundlegend die Gebäudegeometrien notwendig, die in der Simulationssoftware hinterlegt werden müssen. Die benötigten Daten wurden den technischen Zeichnungen der Bauabteilung entnommen. Anschließend wurden die statischen Parameter für Wand-, Decken- und Bodenaufbauten, Fensterparameter und Sonnenschutz definiert, sofern diese vorhanden waren. Waren keine Werte bekannt, wurden diese geschätzt. IDA/ICE erleichtert das Einfügen der Gebäudegeometrie dadurch, dass CAD-Pläne importiert und nachgezeichnet werden können.

2.1.1.3. Lastgänge

Mit Hilfe von Nutzungsplänen wird in IDA/ICE definiert, mit welchen Randbedingungen die jeweiligen Zonen parametrisiert werden. Über das hochschulinterne LSF-System³ werden unter anderem Stundenpläne koordiniert und darauf aufbauend Raumpläne erstellt. Über die Raumpläne lassen sich die für ein Semester eingetragenen Veranstaltungen extrahieren, mit Hilfe derer variable Raumbelagungen in IDA/ICE als Lastgänge des Nutzungsgrades eingepflegt werden können. Für die Verwendung von beliebigen Lastprofilen innerhalb der Eingabemaske von

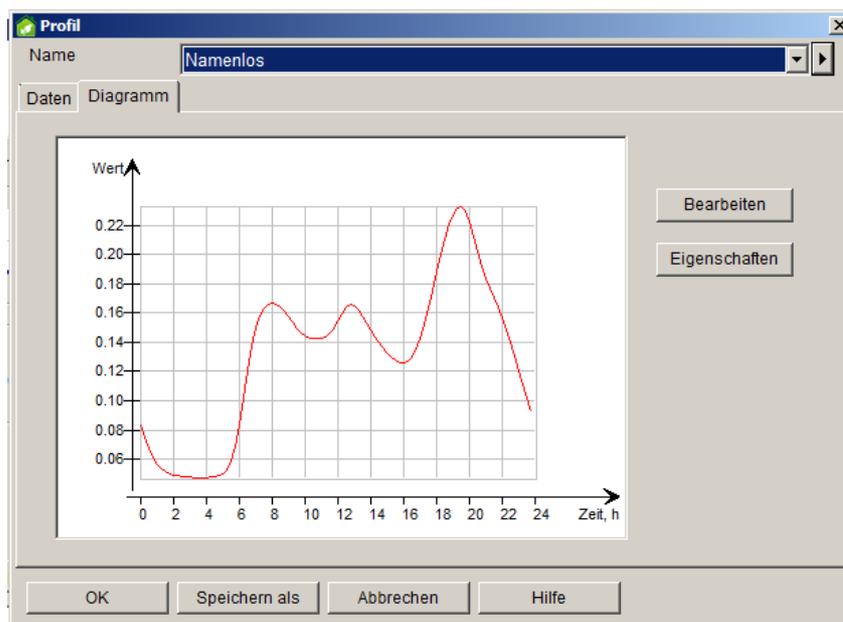


Abbildung 2.5.: Tageslastgang eines Standardprofils, nachdem es in IDA/ICE importiert wurde

IDA/ICE wurde ein Perl-Skript angefertigt, welches die Rohdaten konvertiert (Anhang ?? auf Seite ??). Anschließend stehen diese zur Profilauswahl zur Verfügung. In Abbildung 2.5 ist beispielhaft ein Tagesverlauf des Standardlastprofils H0 nach Import in IDA/ICE dargestellt. Dieses Standardlastprofil H0 nach VDEW stellt das gemittelte, repräsentative Verbrauchsverhalten aller Strom-Haushaltskunden an Wochentagen oder am Wochenende und zu unterschiedlichen Jahreszeiten dar.

2.1.1.4. Nutzerdaten

Daten des Nutzerverhaltens können innerhalb der Software in gleicher Weise zur Verfügung gestellt werden wie Lastgänge. Zum einen sollen die in der [Ne16] festgelegten Nutzungszeiten

³LSF: Lehre Studium Forschung (<https://lsf.htw-berlin.de/>)

und -arten simuliert werden. Zum anderen sollen die laut den Veranstaltungsplänen detailliert vorhandenen Nutzungszeiten hinterlegt werden.

2.1.2. Simulation verschiedener Ansätze

Als Simulationszeitraum wurde das Wintersemester 2016/2017 gewählt, da zum Projektzeitraum die Veranstaltungspläne für dieses Semester vorlagen.

2.1.2.1. Simulation mit Nutzungszeiten laut DIN V 18599-10

In [Ne16, S. 23 und 26] sind die Nutzungszeiten für Räumlichkeiten der Nutzungsart „Seminar“ festgehalten. Außerdem sind weitere Informationen wie zusätzliche Wärmeeinträge und die relative Abwesenheit der Nutzer vorgegeben. Diese können in IDA/ICE entweder direkt hinterlegt oder über Näherungen eingepflegt werden. Tabelle 2.2 listet beispielhaft Informationen

Tabelle 2.2.: Auswahl von in [Ne16] vorgegebenen Werten für die Hinterlegung in IDA/ICE

Parameter	Wert
Nutzung Beginn	07:00 Uhr
Nutzung Ende	18:00 Uhr
Tägliche Nutzungsstunden	11
Jährliche Nutzungstage	250
Raum-Solltemperatur Heizung	21 °C
Raum-Solltemperatur Kühlung	24 °C
Temperaturabsenkung reduzierter Betrieb	4 K
Relative Abwesenheit	0,5

aus der Norm DIN V 18599-10 auf, die in IDA/ICE hinterlegt werden, um Nutzungsart und -zeiten zu berücksichtigen.

In Abbildung 2.6⁴ ist die Wärmebilanz des Raums C357 zum Beginn des Wintersemesters Anfang Oktober 2016 visualisiert. Der zusätzliche Wärmeeintrag durch Personen kann zu einer Reduzierung des notwendigen Heizwärmeeintrags führen. Bei Raum C357 handelt es sich um einen Seminarraum mit einer Kapazität von 44 Plätzen. Um die relative Abwesenheit der Nutzer laut Norm zu berücksichtigen, wurde ein Faktor der maximalen Besetzung mit 0,5 angesetzt.

⁴Ungenauigkeiten in der graphischen Bilanzierung entstehen durch die aus IDA/ICE exportierten viertelstündlichen Ergebnismittelwerte.

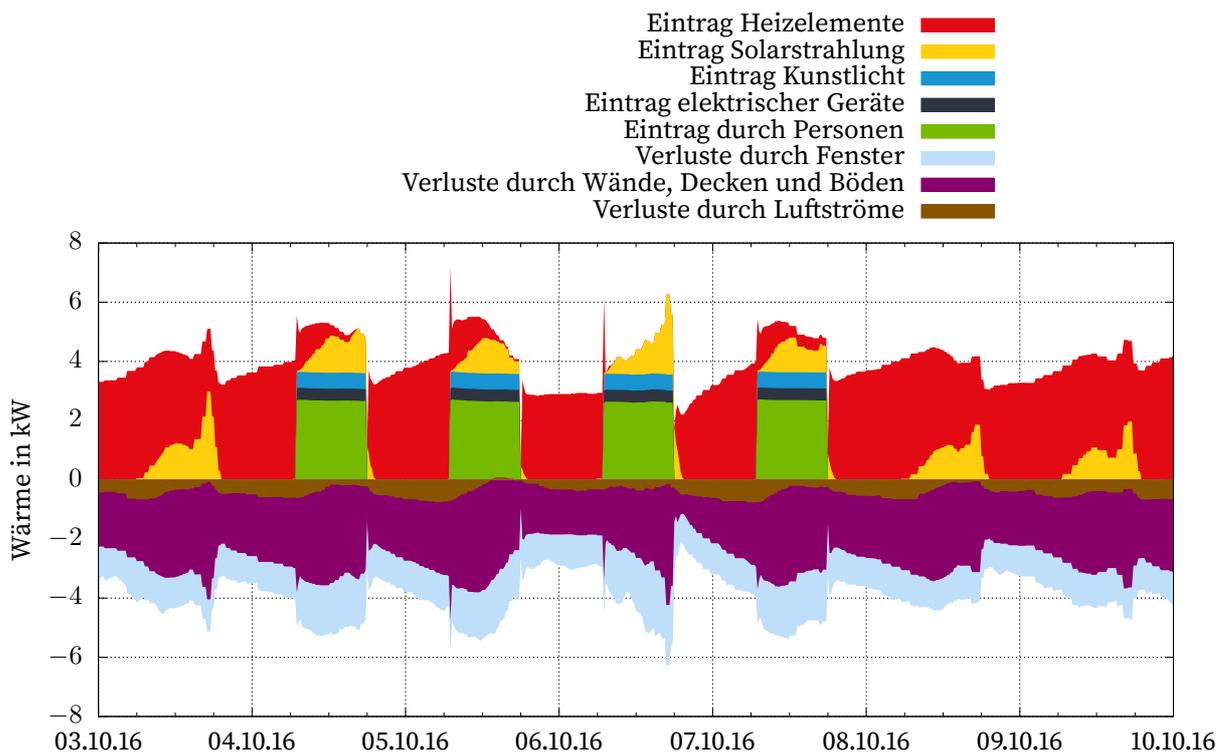


Abbildung 2.6.: Wärmebilanz des Raums C357 für KW40/2016 bei Simulation mit DIN V 18599-10

2.1.2.2. Simulation mit Nutzungszeiten laut DIN V 18599-10

Das Hochschulportal „Lehre, Studium, Forschung“ (LSF) wird an der Hochschule für Technik und Wirtschaft genutzt, um Veranstaltungen und Raumpläne zu koordinieren, den Studierenden eine Anmelde-möglichkeit für Veranstaltungen und Prüfungen zu bieten und weiteres. Diese Plattform ist öffentlich einsehbar und es ist möglich, sich Veranstaltungspläne im Format iCalendar für einzelne Räume zu exportieren. Aus diesen Dateien werden Profile erzeugt, die in IDA/ICE als Nutzungsprofile hinterlegt werden können. In Abbildung 2.7 ist die gleiche Woche wie in Abbildung 2.6 dargestellt, dieses Mal mit den Nutzungszeiten, wie sie durch das LSF für den Raum C357 vorgegeben sind. Der Heizwärmebedarf kann aufgrund der Nutzung zu den Veranstaltungszeiten stärker reduziert werden. Die Integration einer Absenkung der Raumtemperaturen in Zeiten, in denen keine Veranstaltungen durchgeführt werden, kann als sinnvoll betrachtet und zum Beispiel durch ein Smart-Heating-System wie en:key realisiert werden. Ein Vergleich der Abbildungen zeigt, dass die per Norm angesetzten Nutzungszeiten des Beispielraumes nicht der realen Nutzung entsprechen, da dieser am Dienstag, den 04. Oktober von keinen Veranstaltungen gebucht wurde. Eine Absenkung der Raumtemperatur für genau solche Ereignisse stellt ein mögliches Einsparpotenzial dar. Außerhalb der Veranstaltungszeiten können Räume – sofern diese nicht verschlossen sind – den Studierenden zu Lernzwecken zur

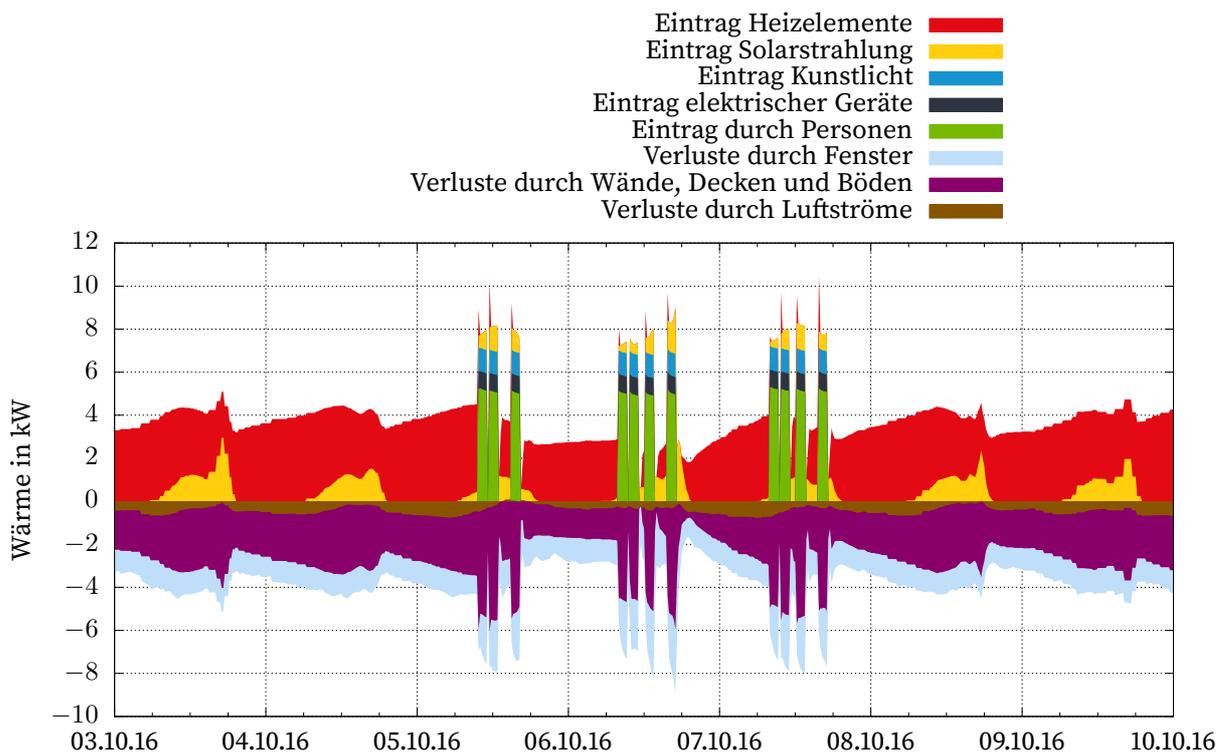


Abbildung 2.7.: Wärmebilanz des Raums C357 für KW40/2016 bei Simulation mit dem LSF entnommenen Veranstaltungszeiten.

Verfügung gestellt werden. Anwesenheitssensoren würden in diesem Fall dafür Sorge tragen, dass neben dem angesetzten Zeitplan dennoch eine ausreichende Beheizung der Räumlichkeiten statt findet.

Mögliche Differenzen sich wöchentlich unterscheidender Veranstaltungen würden mit der selbstlernenden Funktionsweise des Systems nicht abgedeckt. Eine Erweiterung des en:key-Systems mit hinterlegbaren Nutzungszeiten könnte in diesem Fall Abhilfe schaffen.

2.1.3. Ergebnisse der Simulationen

Für das Gebäude C am Campus Wilhelminenhof der Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin wurde ein zoniertes Gebäudemodell innerhalb der Simulationssoftware IDA/ICE erstellt. Es wurden Werkzeuge programmiert, die eine Einbindung von Last- und Nutzerprofilen in der Simulationsumgebung ermöglichen. Es ist eine Grundlage geschaffen worden, weitere Simulationen zur Untersuchung des energetischen Nutzereinflusses und dessen quantitativer Bewertung in Bezug auf ein Unter- oder Übersteuern der Räumlichkeiten durchzuführen. In weiteren, hochschulinternen Projekten sind Simulationsvergleiche mit tatsächlich gemessenen Anwesenheiten über die Messdaten des Projekts HeatMap möglich, nachdem dieser Datenzugang

erneuert und ermöglicht wird.

2.2. Pilotobjekt Beuth Hochschule für Technik

Wie bereits dargelegt wurde, gab es erhebliche Probleme im Austausch von Kommunikation und Daten bezüglich des beuthseitigen HeatMap-Projektes und seiner Ansprechpartner, die es leider unmöglich machten, das Haus Beuth im Projekt angemessen energetisch abzubilden und zu simulieren. Es wurde deshalb auf die Analyse dieses Pilotobjektes verzichtet und stattdessen der Fokus auf die Analyse des energetischen Nutzerverhaltens in einem Objekt des Kooperationspartners DLR gerichtet. In Abbildung 2.24 ist beispielhaft die Art der Daten der

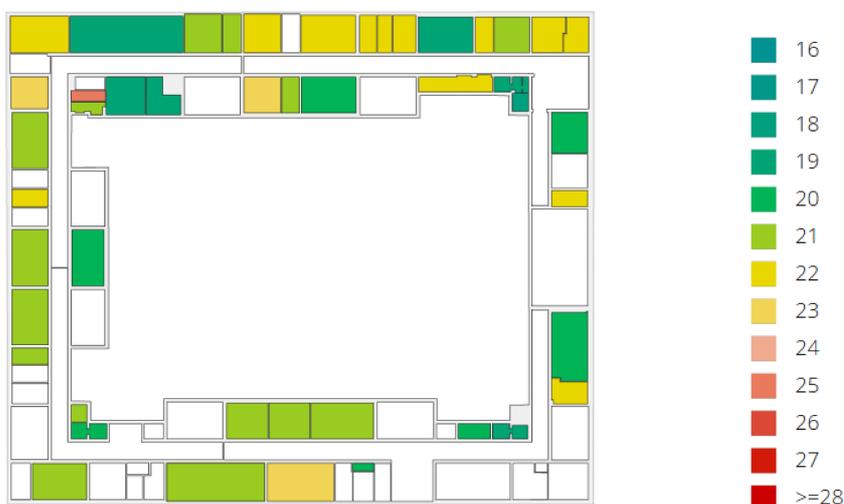


Abbildung 2.8.: Beispielhafte HeatMap-Daten für das 1. Obergeschoss des Verwaltungsgebäudes der Beuth Hochschule für Technik Berlin. (Screenshot des Webportals, welches die Daten der HeatMap-Datenbank der Beuth Hochschule für Technik Berlin aufbereitet visualisiert.)

HeatMap-Messungen dargestellt. Anhand eines Etagengrundrisses werden Temperaturdaten den entsprechenden Räumlichkeiten zugeordnet und sollen so Räume mit zu hohen Temperaturen leicht sichtbar machen.

Die vorhandenen Daten wurden nicht mit fest installierter Messtechnik in regelmäßigen Abständen aufgezeichnet, sondern händisch akquiriert. Diese stichprobenartig gemessenen Daten konnten im Projekt nicht verwendet werden.

2.3. Verwaltungsgebäude des DLR in Berlin Adlershof

Während der Heizperiode 2016/2017 konnte in einem Gebäude des DLR das Smart Heating System en:key in einem Strang-Vergleichstest untersucht werden. Ein unbelasteter (unkontrollierter) Referenzstrang wurde genauso wärmemengenmäßig vermessen wie ein gesteuerter (kontrollierter) Anwendungsstrang. Der genaue Versuchsaufbau ist in [Bet17, S. 19–20] beschrieben.

2.3.1. Vorgeschichte

An der HTW war das en:key-System in vereinzelt Räumlichkeiten zu Testzwecken bereits im Einsatz, weshalb eine umfangreichere Installation des Systems im Forschungsprojekt in Betracht gezogen wurde.

2.3.2. Überblick

Im Herbst 2016 wurde die Möglichkeit wahrgenommen, mit dem Berliner Unternehmen Kieback&Peter GmbH und Co. KG (Kieback&Peter) einen weiteren Kompetenzpartner in das Forschungsprojekt aufzunehmen.

Kieback&Peter hat mit dem en:key-System ein Smart-Heating-Produkt auf dem Markt etabliert, mit dem das Nutzerverhalten über eine raumweise Temperaturabsenkung berücksichtigt werden kann. Es handelt sich um ein beschränkt lernfähiges, nachrüstbares Heizkörperregelsystem, das nutzungsbasierte Temperaturabsenkungen im Heizprofil umsetzt. Durch den Lerneffekt des Systems können gemäß Herstellerinformation erhebliche Einsparungen des Heizenergieverbrauchs erzielt werden. Das System bietet sich für eine raumweise, automatisierte Thermostatregelung an und könnte eine Zentralregelung und -infrastruktur ersetzen.

Als interessierter und engagierter Projektpartner stellte das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt in Adlershof die Flächen für einen Feldversuch mit anschließender Untersuchung der gewonnenen en:key-Daten zur Verfügung. Die Untersuchung der strangweisen Wärmemengen diente weiterführend als Potentialanalyse für eine großflächigere Nutzung des en:key-Systems am Standort Adlershof. Die Messkampagne fand während der Heizperiode 2016/2017 statt.

2.3.3. Technische Informationen en:key

Das en:key-System ist ein nachrüstbares, raumweise installierbares Smart-Heating-System, das nach Einstellen einer Komforttemperatur mit Hilfe der angelernten Profile autark auf einen Absenkbetrieb umstellen kann, bei dem die gewünschte Temperatur um ca. 4 K abgesenkt wird. In Abbildung 2.9 ist ein Raumsensor und ein Ventilregler abgebildet. Ein Raumsensor

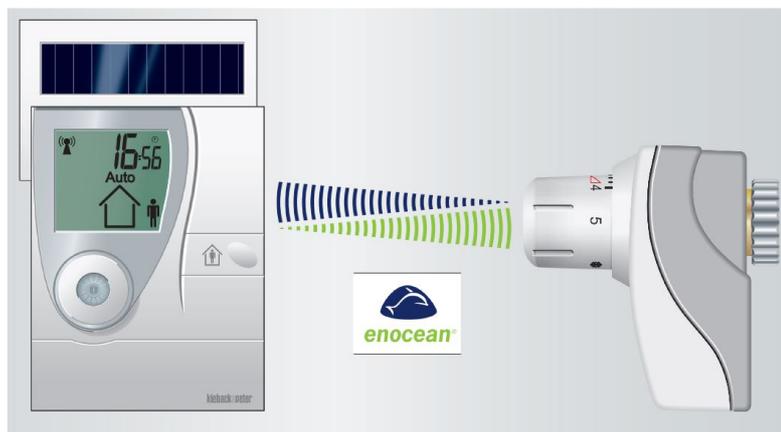


Abbildung 2.9.: Raumsensor und Ventilregler des en:key-Systems.
[Bet17, S. 30]

kann bis zu vier Ventilregler per Funkverbindung ansteuern. Der Raumsensor wird über eine Photovoltaikzelle und eine Batterie versorgt, der Ventilregler erhält die notwendige Energie von einem Peltier-Element, das über den Heizungsvorlauf mit Wärme versorgt wird. Fünfminütlich wird für die Dauer von einer Minute die Anwesenheit von Personen überprüft. Je nach Messergebnis wird die Anwesenheitswahrscheinlichkeit der entsprechenden Viertelstunde erhöht oder abgesenkt. Hierfür reicht es aus, wenn mindestens eine der drei Messungen je Viertelstunde positiv ausfällt. Funktioniert die automatische Anwesenheitsregistrierung nicht, kann diese per Taster ausgelöst werden. Weitere Details können [Bet17, S. 30–33] entnommen werden. Mit den Anwesenheitswahrscheinlichkeiten und einem Schwellwert werden die Heizprofile für die nächste Woche erstellt. Um längere Abwesenheiten zu berücksichtigen, ist der Schwellwert variabel gehalten. Unzusammenhängende als positiv registrierte Viertelstunden außerhalb der Hauptzeiten und einzelne Lücken innerhalb der Hauptzeiten werden mit Hilfe eines Glättungsalgorithmus heraus gefiltert. Damit wird eine unnötige Oszillation der Raumtemperatur verhindert.

2.3.4. Technische Informationen Wärmemengenzähler

Zur Messung der Wärmemengen wurden je Strang Ultraschall-Wärmemengenzähler „Ultramess H“ der Firma WDV/Molliné GmbH installiert [Bet17, S. 33–36]. Die Geräte wurden zentral

mit stündlichem Messintervall über die Gebäudeleittechnik abgefragt.

2.3.5. Versuchsaufbau

Durch die Untersuchung von 16 Büroräumen eines Verwaltungsgebäudes auf dem Gelände des DLR in Berlin Adlershof sollte der Einfluss des Nutzerverhaltens auf den Heizenergieverbrauch bestimmt und bewertet werden. Hierfür wurden zwei energetisch hinreichend äquivalente Teilbereiche des Gebäudes mit den jeweils zugeordneten Heizsträngen als Anwendungs- und Referenzstrang ausgewählt. Die beiden betrachteten Stränge versorgen jeweils acht Räume.

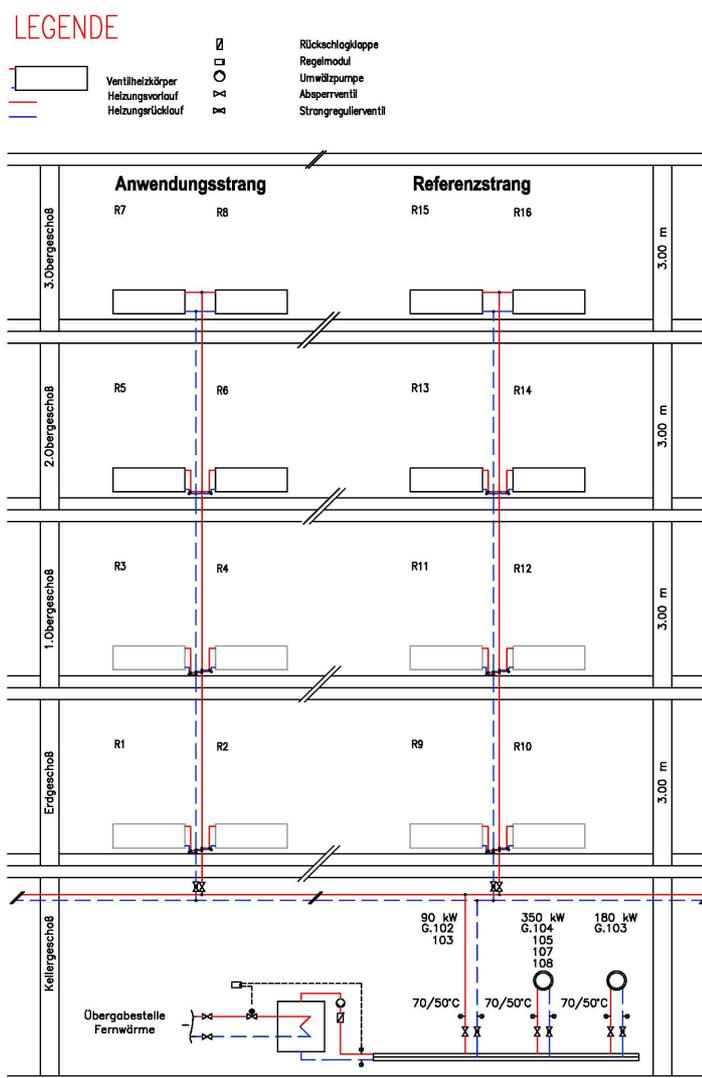


Abbildung 2.10.: Strangschema der Heizanlage für den Anwendungs- und Referenzstrang. [Bet17, S. 27]

Die energetische Äquivalenz beruht auf bauphysikalischer Äquivalenz (gleiche Gebäudehülle, gleiche Fenstertypen, gleiche Ausrichtung, etc.), anlagentechnischer Äquivalenz (gleiche Heizungsanlage, gleiche Vorlauftemperaturen, etc) sowie Äquivalenz der Nutzungsart (Bürräume

gleichartiger Nutzungsflächen, etc.). In Abbildung 2.10 ist das Strangschema des Versuchsaufbaus dargestellt. Während im Anwendungsstrang die prognostizierten Heizprofile zum Einstellen der Radiatoren verwendet wurden, diente der Referenzstrang lediglich zur Aufzeichnung der Heizwahrscheinlichkeiten. Mit Hilfe eines Wärmemengenzählers pro Strang sollte (insbesondere akkumuliert am Ende der Heizperiode) ein möglicher Einfluss des en:key-Systems auf den Heizenergieverbrauch untersucht werden. Bei der angenommenen Äquivalenz der Randbedingungen sollte ein eventueller Effekt keine baulichen oder technischen sondern ausschließlich nutzungsbedingte Ursachen aufweisen. Die zu beheizenden Flächen der Stränge weichen voneinander ab. Der Referenzstrang weist eine Fläche von $187,92 \text{ m}^2$ auf, der Anwen-

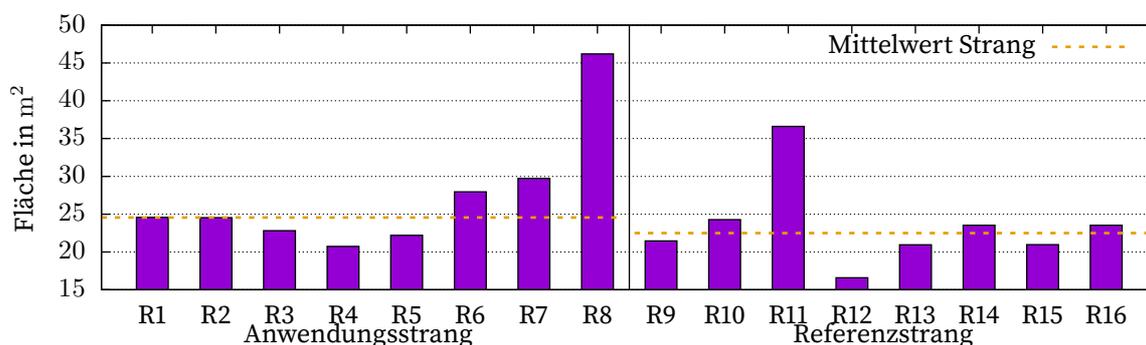


Abbildung 2.11.: Raumweise Nutzflächenverteilung des Referenz- und Anwendungsstranges.

ungsstrang eine Fläche von $218,73 \text{ m}^2$. Die Differenz von $30,81 \text{ m}^2$ bedeutet für den Referenzstrang eine um etwa 14 % kleinere zu beheizende Fläche. Die Flächenverteilung der einzelnen Räume ist in Abbildung 2.11 dargestellt. Im Anwendungsstrang ist Raum R8 (Besprechungsraum) deutlich größer als die anderen Räume des Stranges, im Referenzstrang trifft dies für Raum R11 zu.

2.3.6. Inbetriebnahme

Die Installation des en:Key-Systems erfolgte in der letzten Oktoberwoche 2016. Die Installation der Wärmemengenzähler wurde Anfang November vorgenommen. Im weiteren Verlauf wurden die Wärmemengenzähler auf die Gebäudeleittechnik des DLR aufgeschaltet. Die en:Key-Daten wurden im wöchentlichen Rhythmus zur Verfügung gestellt. Bis auf die Weihnachtszeit 2016 standen für den gesamten Messzeitraum Daten zur Verfügung. Eine weitere Verarbeitung der Daten wurde im Rahmen des Projekts durchgeführt. In Abbildung 2.12 ist der zeitliche Verlauf der Inbetriebnahme als Zeitstrahl visualisiert.

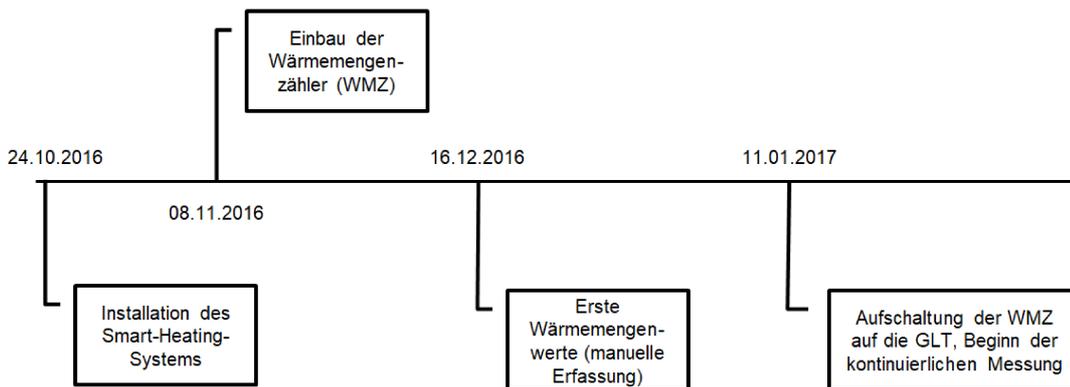


Abbildung 2.12.: Zeitlicher Verlauf der Inbetriebnahme des en:Key-Systems am DLR. [Bet17, S. 37]

2.3.7. Messergebnisse

2.3.7.1. Wärmemengen

Während eines Großteils der Heizperiode 2016/2017 konnten in beiden Strängen die verbrauchten Wärmemengen gemessen werden. Digitale Messwerte stehen seit dem Anschluss an die GLT stündlich zur Verfügung. Der Verlauf vor dem 11.01.2017 wurde in [Bet17] geschätzt. Für

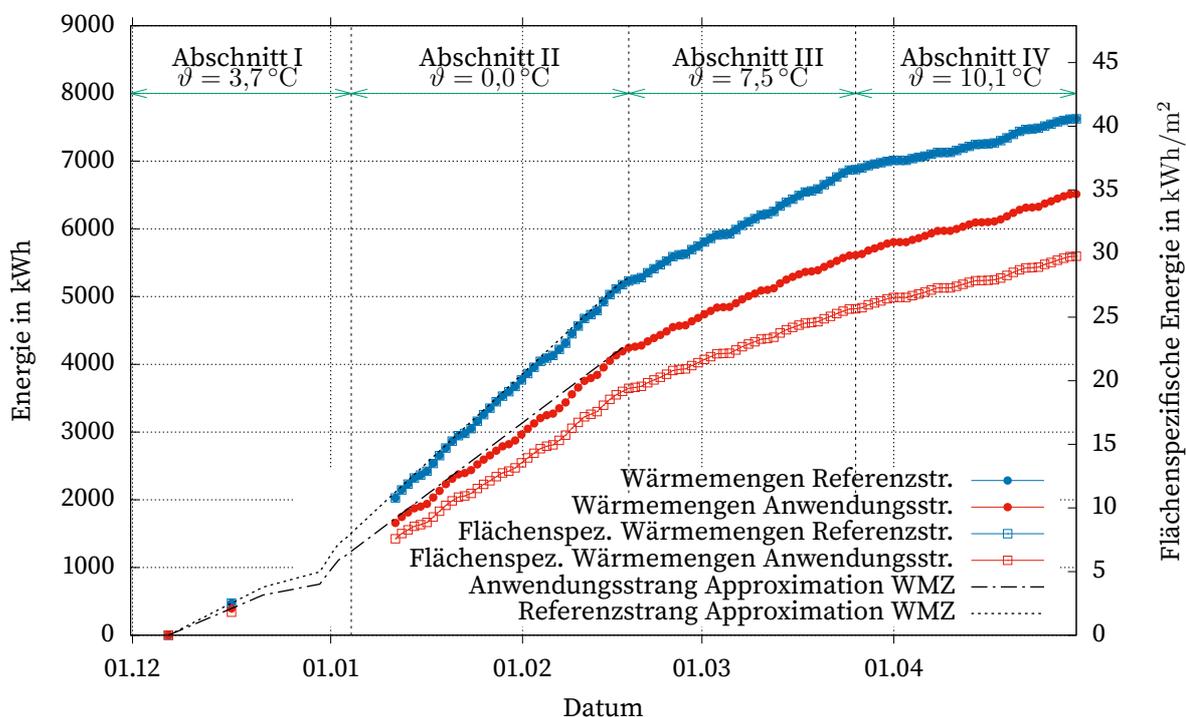


Abbildung 2.13.: Akkumulierte und flächenspezifische Wärmemengen der beiden Heizungsstränge über den Messzeitraum.

das Jahr 2016 liegt pro Strang je ein durch den Hausmeister am 17. Dezember 2016 abgelese-

ner Messwert vor. In Abbildung 2.13 sind die akkumulierten Wärmemengen dargestellt, die im Laufe der Messperiode in beiden Strängen verbraucht wurden. In den Räumen des Referenzstranges wurde stets mehr Heizenergie benötigt als in den Räumen des Anwendungsstranges. Am Ende der Messung wies der Referenzstrang mit 7634 kWh gegenüber den 6522 kWh des Anwendungsstranges einen Mehrverbrauch von 17 % auf. Die flächenspezifische Darstellung ermöglicht eine entzerrte Betrachtung. Die verbrauchte Wärmemenge pro Quadratmeter ist beim Referenzstrang zum Ende des Messzeitraumes etwa 36 % höher als im Anwendungsstrang. Die aktive Temperaturabsenkung des en:key-Systems scheint die Nachtabsenkung des zentralen Heizungssystems gut zu unterstützen.

In Abbildung 2.14 ist das Verhältnis der Strangverbräuche dargestellt, indem für jeden Tag des Messzeitraums das Verhältnis der Verbräuche von Referenzstrang zu Anwendungsstrang (Wärmemengenratio) aufgetragen wurde. Der Referenzstrang verbraucht zu Beginn der Messung

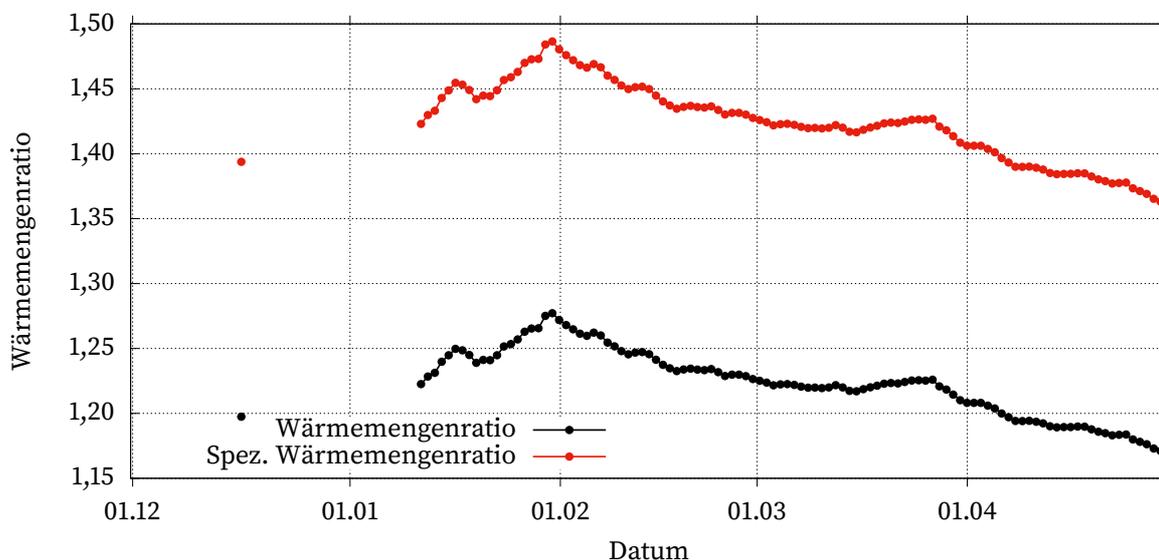


Abbildung 2.14.: Wärmemengenverhältnis der beiden vermessenen Stränge über den gesamten Messzeitraum.

22 % mehr Heizenergie als der Anwendungsstrang, steigert sich auf 28 % und verringert dann seinen Mehrverbrauch im Verlauf des Jahres 2017 kontinuierlich auf den bereits oben erwähnten Endstand von 17 %. Die flächenspezifische Darstellung liegt entsprechend höher.

In Abbildung 2.15 sind die flächenspezifischen Tageswärmemengen der beiden Stränge dargestellt. Zum Ende der Heizperiode ist aufgrund steigender Außentemperaturen ein geringerer Heizenergiebedarf erkennbar. Anhand des Verlaufs lassen sich Wochentage und Wochenenden erkennen. Der Energiebedarf des Referenzstranges liegt bis Ende März 2017 oberhalb der Werte des Anwendungsstranges, anschließend nähern sich die Werte an. Die Messdaten zu den

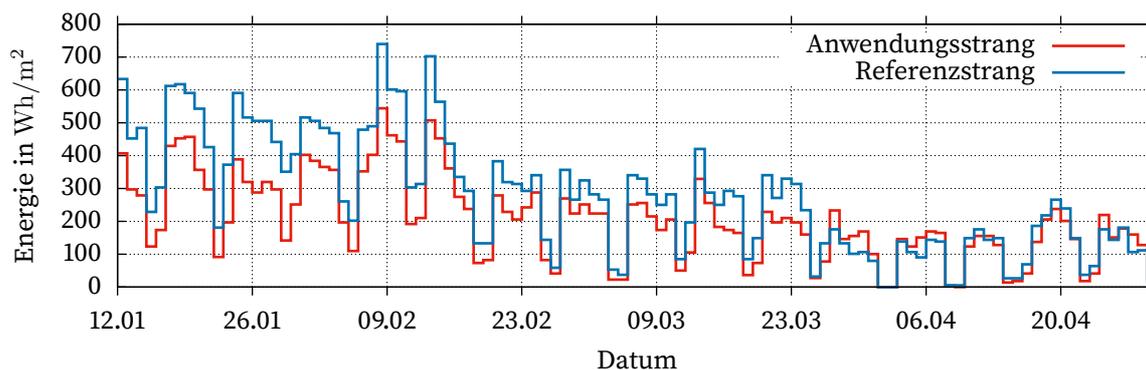


Abbildung 2.15.: Flächenspez. Wärmemengenverbräuche pro Tag

Wärmemengen ergeben also folgendes Bild: Die Performanz des durch en:key gesteuerten Anwendungsstranges ist bis Ende März besser als die des Referenzstranges. Es ist anzunehmen, dass das en:key-System das energiekritische Nutzerverhalten reduziert hat. Die Absenkezeiten des zentralen Heizungssystems konnten um eine raumweise, zusätzliche Absenkung erweitert werden.

2.3.7.2. Wochenprofile

Das en:key-System generiert zwei Arten von Wochenprofilen: Zum einen Profile der Heizwahrscheinlichkeiten, zum anderen Profile des prognostizierten Heiz- bzw. Absenkbetriebs (im weiteren bezeichnet mit: Heizprofile).

Im Folgenden werden für einen konkreten Raum sowohl die Heizwahrscheinlichkeit als auch das Heizprofil in Form eines Carpetplots visualisiert. In Abbildung 2.16 sind die durch das en:key-System für den Raum R4 prognostizierten Heizwahrscheinlichkeiten dargestellt. Auf der Abszissenachse ist der Messzeitraum in Tagesschritten, auf der Ordinatenachse die Tageszeit in Viertelstundenschritten aufgetragen. Die prognostizierte Heizwahrscheinlichkeit des en:key-Systems liegt zwischen 0% und 100%. Im Carpetplot ist das Ende eines Wochenprofils besonders gut an den unveränderten Werten des Samstags und Sonntags erkennbar. Das en:key-System wurde so konfiguriert, dass es in den Büroräumen an Wochenenden keine Werte aufzeichnet, da die Räume nicht genutzt werden. Die entsprechenden Werte liegen unverändert bei der voreingestellten Heizwahrscheinlichkeit zwischen 6 Uhr und 20 Uhr. Vor der Weihnachtswoche, in der keine Werte ausgelesen wurden, entwickelt sich ein klarer Arbeitszeitbeginn heraus: 9 Uhr. Auch eine Mittagspause ist klar erkennbar. Interessant ist, dass in Raum R4 vor Weihnachten nachmittags ab 16:30 Uhr zwischen Dienstag und Donnerstag Anwesenheitswahrscheinlichkeit vorhergesagt wurde, danach von Montag bis Donnerstag.

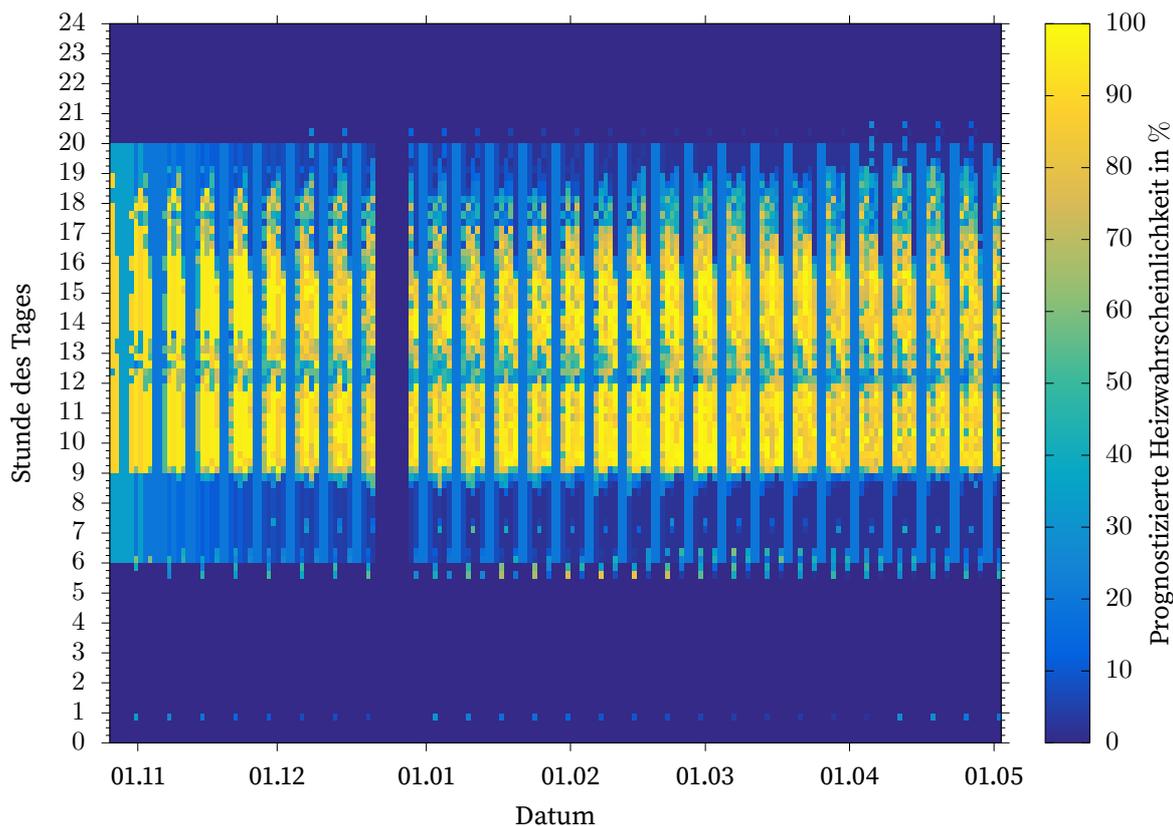


Abbildung 2.16.: Heizwahrscheinlichkeit des Raumes R4

In Abbildung 2.17 ist dargestellt, welches Heizprofil das en:key-System aus dem Heizwahrscheinlichkeitsprofil erstellt. Rot bedeutet normaler Heizbetrieb, weiß bedeutet Absenkbetrieb. Anhand der im Gerät vordefinierten Heizschwelle wird das Heizwahrscheinlichkeitsprofil in den Absenk- oder Heizbetrieb aufgeteilt. Zu kurze Heizbetriebsintervalle und zu kurze Absenkeintervalle werden mittels eines Glättungsalgorithmus aus den Profilen entfernt. Durch diese Glättung wird vermieden, dass während einer halbstündigen Mittagspause die Temperatur abgesenkt wird um anschließend wieder erhöht werden zu müssen. Außerdem wird verhindert, dass durch sicherheitsrelevante Kontrollgänge oder Reinigungskräfte nachts aus dem Absenkbetrieb hochgefahren wird. Die Heizschwelle der einzelnen Sensoren wird bei längerer Abwesenheit herunter gesetzt, um bei zunehmender Nutzung eines Raumes bereits bei geringen Heizwahrscheinlichkeiten einen Komfortbetrieb zu gewährleisten.

In Abbildung 2.18 sind die Veränderungen der Heizwahrscheinlichkeiten dargestellt. Es handelt sich hierbei um die Differenzen der wochenweise aufeinanderfolgenden Viertelstundenwerte. Nach einer ersten Anlernphase wird sichtbar, dass sich die Anwesenheitswahrscheinlichkeiten zu den Arbeitszeitblöcken vormittags und am frühen Nachmittag wenig ändern. Die vermuteten Ankunftszeiten verändern sich nicht so stark wie die Zeiten zum Feierabend. Es ist zu erkennen, dass in den frühen Morgenstunden vor 6 Uhr und den Abendstunden nach 19 Uhr

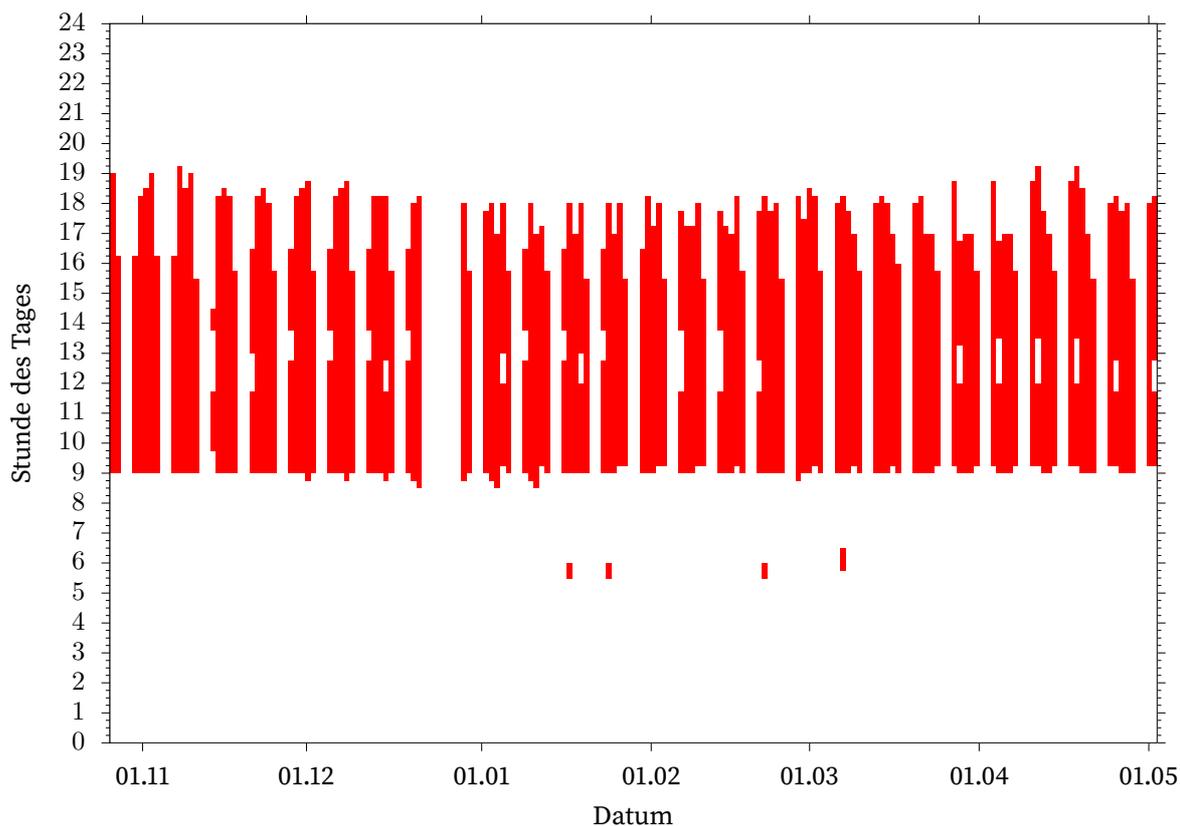


Abbildung 2.17.: Heizprofil des Raumes R4

sehr wenig Veränderung statt findet. Die für eine nähere Betrachtung interessanten Zeitbereiche verteilen sich hingegen mehr oder weniger stochastisch über die Arbeitszeiten. Da dieser Sachverhalt für alle 16 Räume gilt, wird auf die Darstellung wenig informativer und damit irrelevanter Zeiträume verzichtet. Die weiteren Darstellungen werden entsprechend mit verkürzter Tageszeitspanne visualisiert. In Abbildung 2.19 sind die Heizwahrscheinlichkeiten für alle 16 Räume im praxisrelevanten Zeitbereich von 6 Uhr bis 19 Uhr über den Messzeitraum dargestellt. Auf der linken Seite sind die Räume R1 bis R8 des Anwendungsstranges angeordnet, auf der rechten Seite die Räume R9 bis R16 des Referenzstranges. Diese Übersicht verdeutlicht die Problematik, Räume mit gleichen Nutzungsarten hinsichtlich des Heizverhaltens als vergleichbar zu betrachten. Die sehr unterschiedlichen Nutzungszeiten bestätigen, dass Räume gleicher Nutzungsart schwer vergleichbar sind. Zusätzlich zu tageweise unterschiedlichen Nutzungszeiträumen werden langfristige Änderungen in der Raumnutzung erkennbar. Beispielsweise ändert sich in Raum 12 zum Ende des Messzeitraums der Tagesverlauf. Dieser scheint nur noch vormittags genutzt zu werden. Auf der anderen Seite sind Einschwingvorgänge ersichtlich. Die Nutzungszeiten von Raum 3 werden zum Ende des Messzeitraumes immer konstanter.

In Abbildung 2.20 sind die Heizprofile für alle 16 Räume im praxisrelevanten Zeitbereich von 6 Uhr bis 19 Uhr über die Messperiode abgebildet. Auf der linken Seite sind die Räume R1 bis

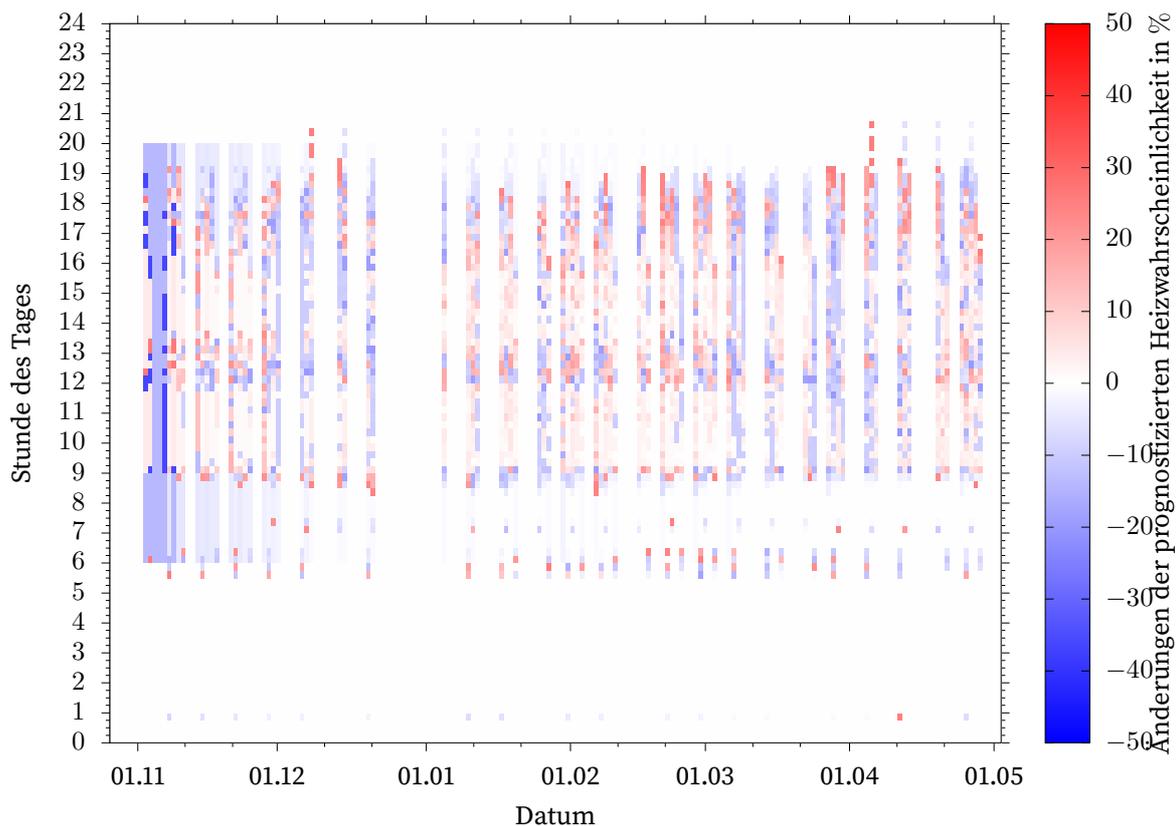


Abbildung 2.18.: Profildifferenzen der Heizwahrscheinlichkeiten für den Raum R4

R8 des Anwendungsstranges angeordnet, auf der rechten Seite die Räume R9 bis R16 des Referenzstranges. Anhand der Gegenüberstellung aller Heizprofile zeigt sich erneut, dass gleiche Nutzungsart keineswegs eine Vergleichbarkeit der raumweisen Heizzeiten bedingt.

In den folgenden zwei Abbildungen wird eine strangweise Betrachtung der Wochenprofile vorgenommen. Der obere Teil von Abbildung 2.21 stellt die Heizwahrscheinlichkeiten des Anwendungsstranges dar. Die Werte wurden nicht gewichtet, sodass die Daten eines Raumes zu einem Achtel in die Gesamtgraphik einfließen. Die Kernzeiten des Stranges liegen gut sichtbar zwischen 08:00 Uhr und 17:30 Uhr. Im unteren Teil der Abbildung ist das zugehörige Heizprofil des Stranges abgebildet. Dabei wurde eine eigene Art der Darstellung gewählt: Ist einer der Räume für den jeweiligen Viertelstundenwert im Komfortbetrieb, wird der Komfortbetrieb für den gesamten Strang als gültig gewertet.

In Abbildung 2.22 ist zum Vergleich die mittlere Heizwahrscheinlichkeit des Referenzstranges dargestellt. Wie auch beim Anwendungsstrang wurde eine flächenunabhängige Gewichtung vorgenommen. Die Kernzeit liegt in einem ähnlichen Fenster, allerdings ist erkennbar, dass die Werte der Heizwahrscheinlichkeiten deutlich unter denen des Anwendungsstranges liegen. Dies betrifft nicht nur die absoluten Werte, sondern auch die zeitliche Verteilung. Direkt

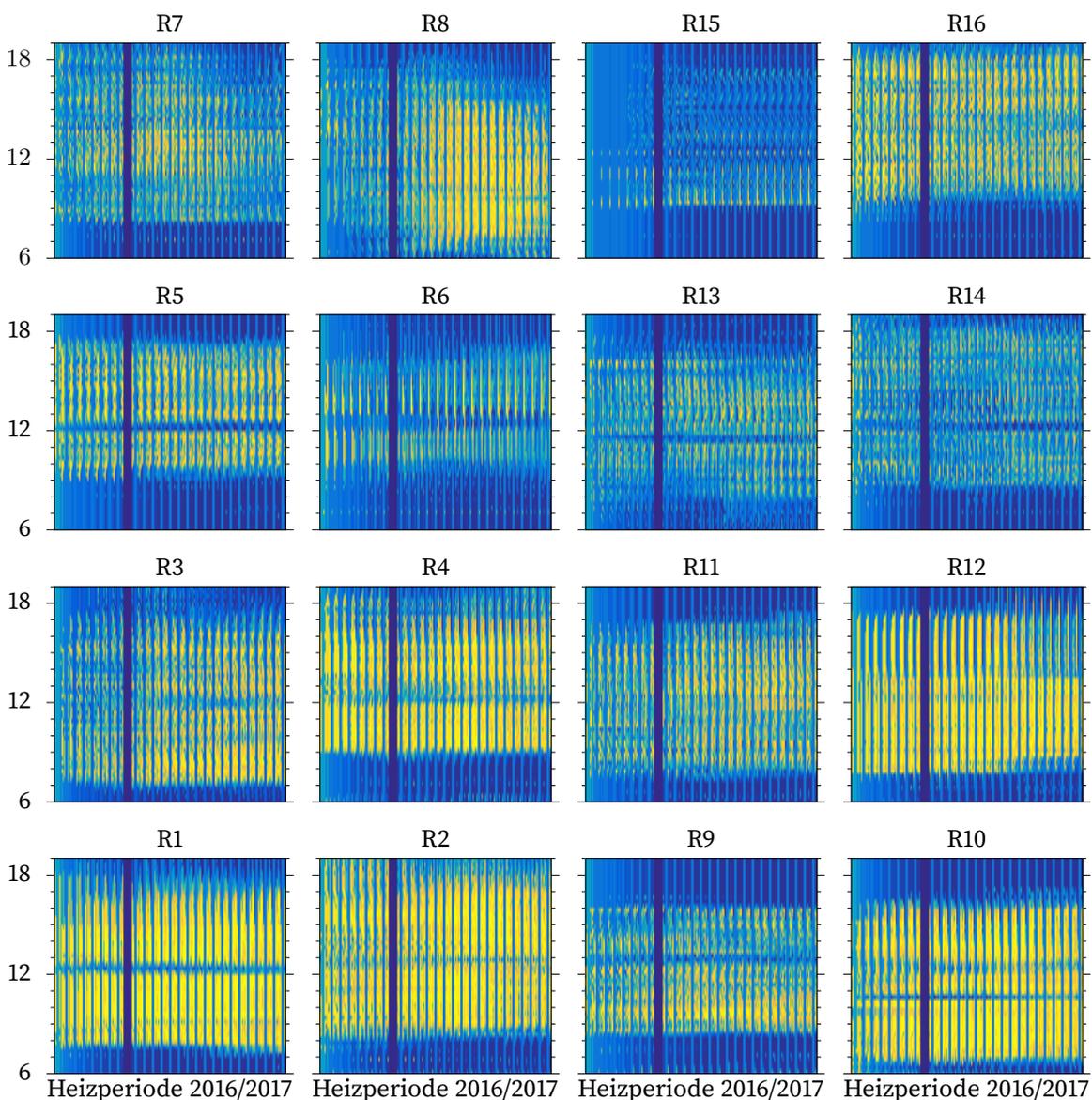


Abbildung 2.19.: Übersicht Heizwahrscheinlichkeiten aller Räume

darunter findet sich wie in Abbildung 2.21 das nach eigenem Verfahren erstellte, theoretische Heizprofil des Stranges.

Anhand der Heizwahrscheinlichkeiten und der theoretischen Heizprofile der Stränge wird deutlich, dass eine Überlagerung der Profile in den Nutzungszeiten resultiert, wie sie laut der Norm [Ne16] mit Hilfe von festen Zeitplänen anzusetzen sind. Diese nutzungsartspezifische Vorgabe berücksichtigt nicht das energiekritische Nutzerverhalten in einzelnen Räumlichkeiten.

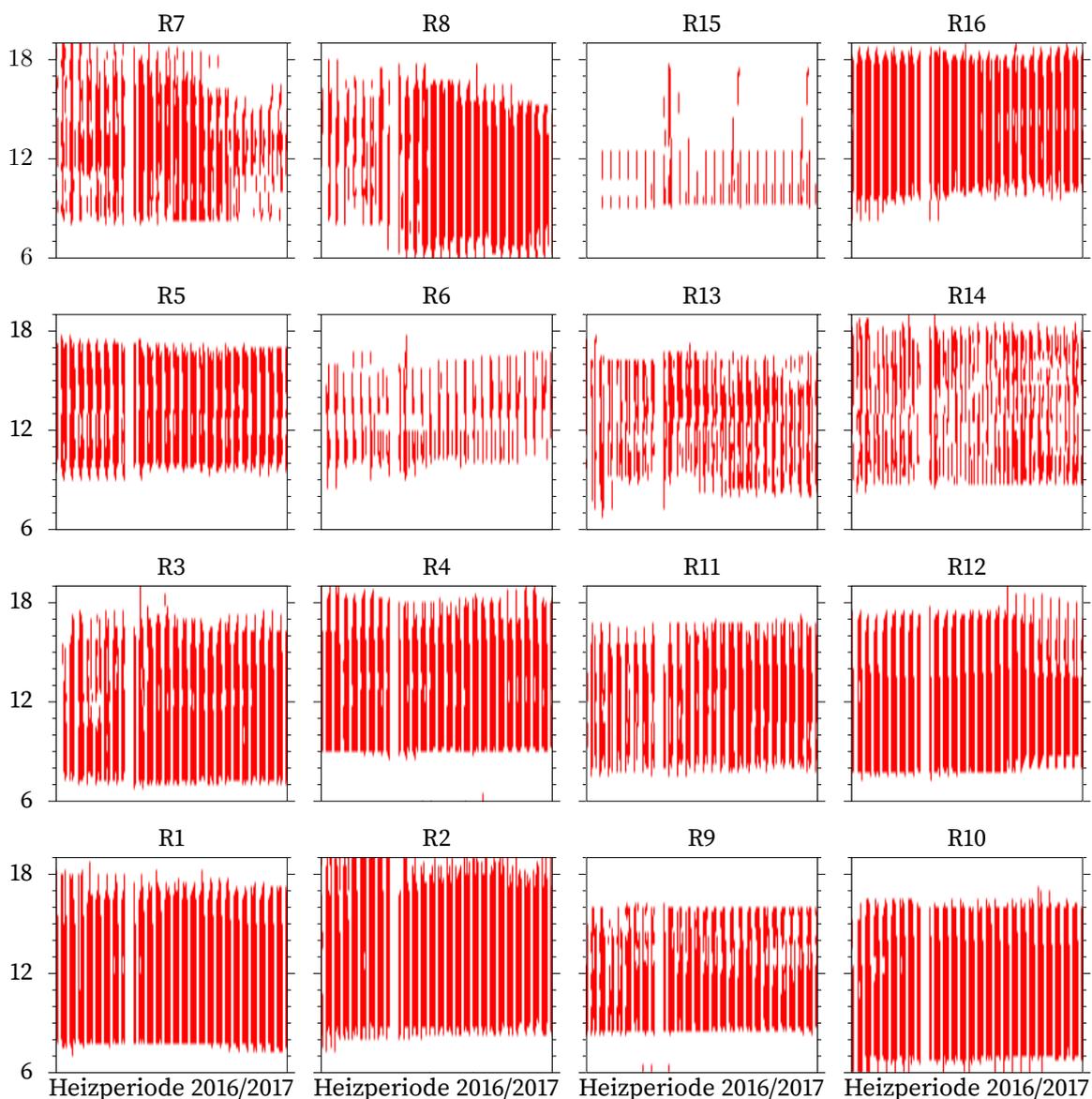


Abbildung 2.20.: Übersicht Heizprofile aller Räume

2.3.7.3. Energetisches Nutzerverhalten

Nach den Betrachtungen der ausgelesenen Heizwahrscheinlichkeiten des en:key-Systems konnte ein Einschwingvorgang und damit der Lerneffekt beobachtet werden. Anfängliche Standardwerte des Systems werden durch die Nutzer beeinflusst und fließen in zukünftige Heizwahrscheinlichkeiten ein. Kommt es zu Regelmäßigkeiten in der Nutzung, so ist dies aus den Heizwahrscheinlichkeiten indirekt ersichtlich.

Um diese sich aus rein optischer Analyse ergebende Behauptung in Teilen zu erweitern, wurde ein Ansatz verfolgt, der die Unterschiedlichkeit der Wochenprofile aufzeigt. Hierfür wurden die euklidischen Distanzen der wochenweisen Vektoren gebildet und visualisiert.

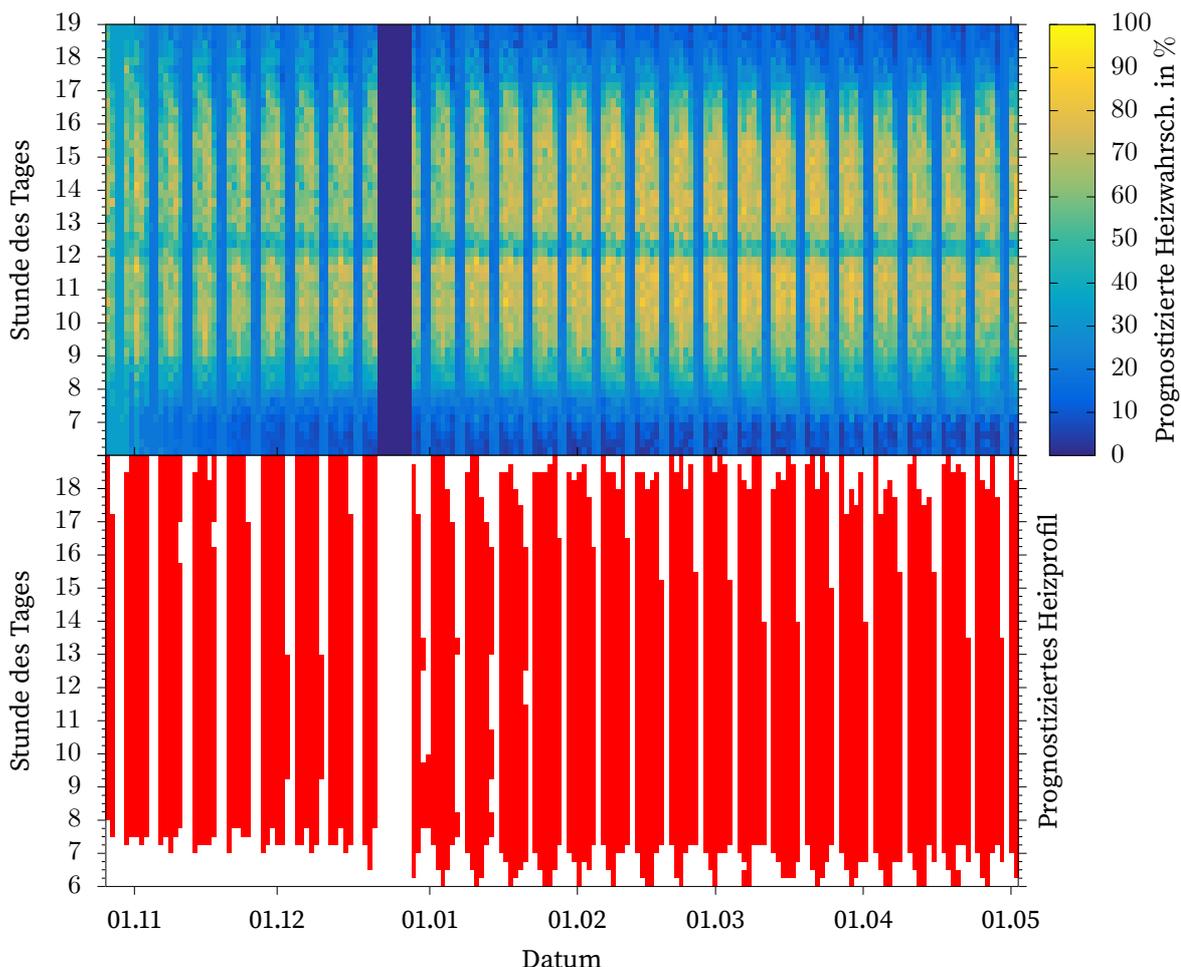


Abbildung 2.21.: Prognostizierte Heizwahrscheinlichkeit und Heizprofil der Räume des Anwendungsstranges

Sind die Punkte x und y durch die Koordinaten $x = (x_1, \dots, x_n)$ und $y = (y_1, \dots, y_n)$ gegeben, so gilt:

$$d(x, y) = \sqrt{(x_1 - y_1)^2 + \dots + (x_n - y_n)^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \tag{2.1}$$

Dies wenden wir auf die Wochenvektoren an. Es ergeben sich 672-dimensionale Vektoren, von denen die euklidische Distanz bestimmt werden kann.

Wird dies im Zusammenhang mit den Heizwahrscheinlichkeiten und den Änderungen der Heizwahrscheinlichkeiten dargestellt, ergibt sich für Raum R2 die Abbildung 2.23. Die euklidische Distanz ist wochenweise als ein dimensionsloser Wert abgebildet und dient als Maßstab und optische Erfassung für die Veränderungen der Vektoren. Es lässt sich erkennen, dass nach einer anfänglichen Phase mit höherer euklidischer Distanz, in der das en:key-System das Profil erlernt eine weitere Phase folgt, in der ein niedrigerer Wert auf relativ konstantem Niveau herrscht.

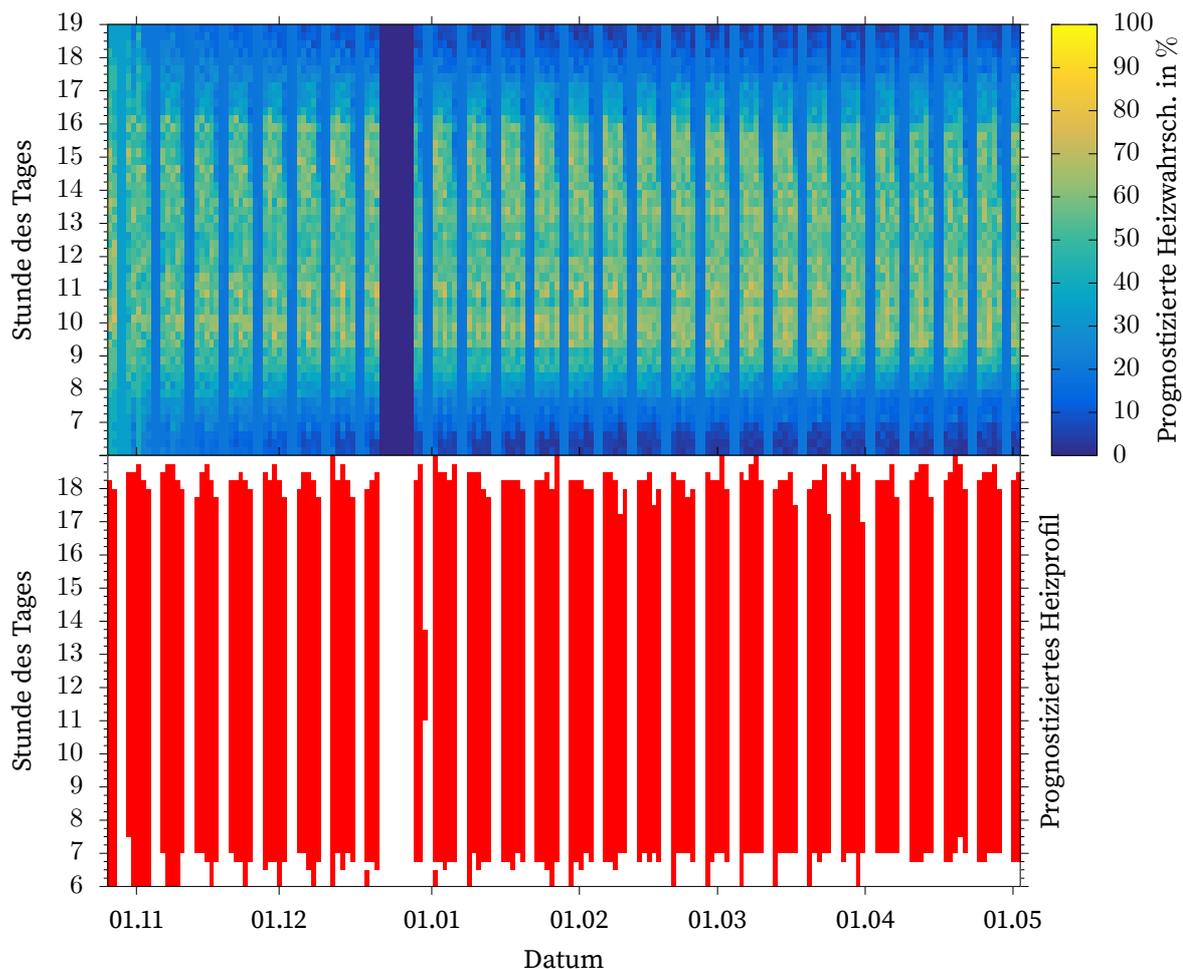


Abbildung 2.22.: Prognostizierte Heizwahrscheinlichkeit und Heizprofil der Räume des Referenzstranges

Umfassende Graphiken aller 16 Räume der am DLR vermessenen Räumlichkeiten sind in Anhang A zu finden. Neben den Heizwahrscheinlichkeiten und -änderungen enthalten die Graphiken die euklidische Distanz, die Heizprofile und die Heizschwelle, die sich über den Messzeitraum bei einigen Räumen ändert. In Abbildung A.17 in Anhang A ist eine Übersichtsmatrix aller Räume dargestellt. Es werden die Heizwahrscheinlichkeiten und Heizprofile aller Räume untereinander verglichen, um die vielfältigen Nutzerprofile zu verdeutlichen.

In der im Rahmen des Forschungsprojekts entstandenen Abschlussarbeit „Untersuchung des energetischen Nutzerverhaltens in einem Verwaltungsgebäude mit Hilfe einer selbstlernenden Heizungssteuerung“ nimmt Herr Torsten Betz eine Interpretation der Datenauswertung vor und schließt mit einem Fazit. **Die folgenden Abschnitte 2.4, 2.5 und 2.6 sind aus dieser Arbeit übernommen worden** ([Bet17, S. 71–77]):

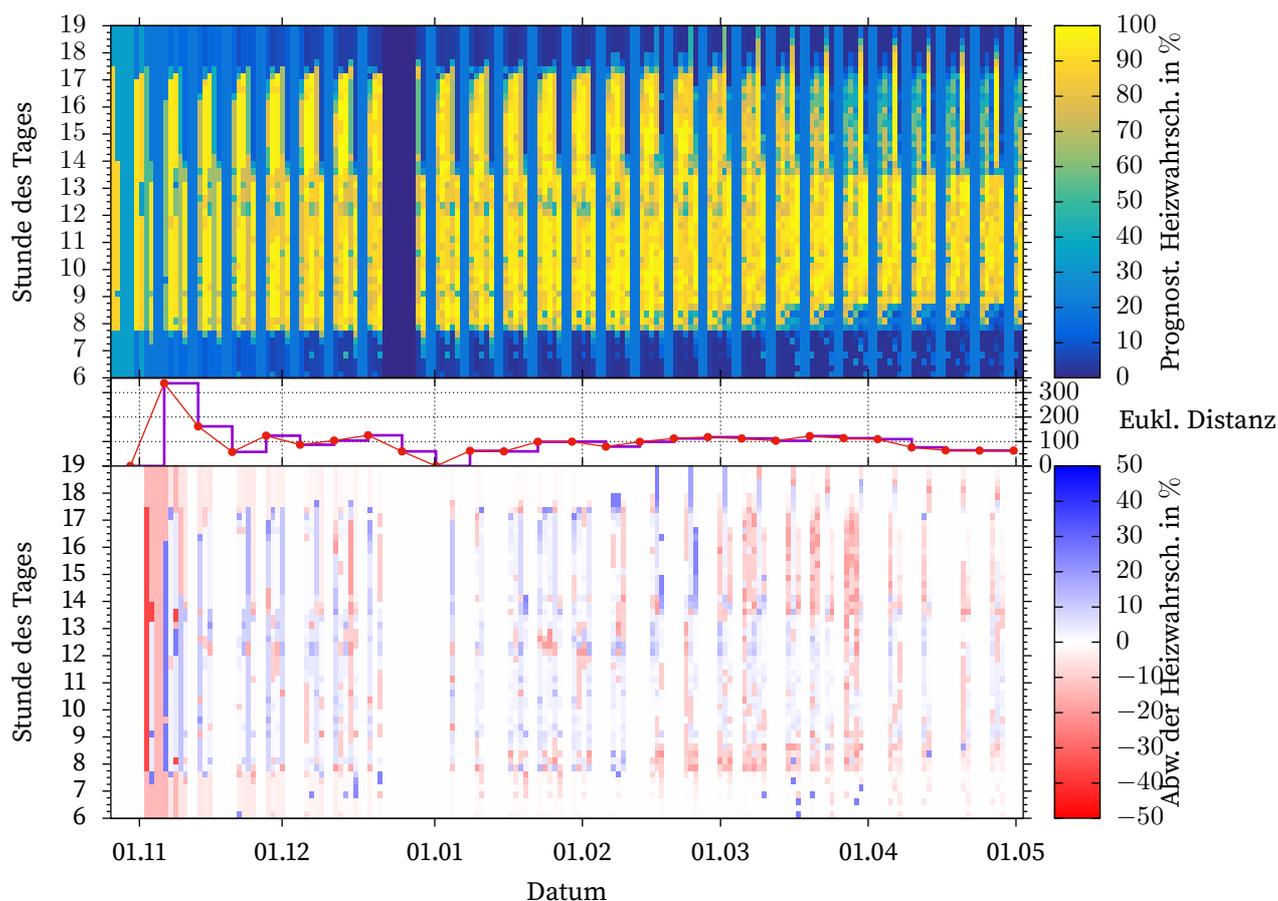


Abbildung 2.23.: Raum R12 mit euklidischen Distanzen zur Aufzeichnung eines konvergierenden Verhaltens

2.4. Zusammenfassende Interpretation der Datenauswertungen

Die Analyse der verbrauchten Wärmemengen hat einen durchschnittlichen Mehrverbrauch des Referenzstranges in Höhe von ca. 22 % ergeben und einen absoluten Mehrverbrauch zum Ende des Messzeitraums in Höhe von ca. 15 %. Die Ursachen für diesen offensichtlichen Verbrauchsunterschied können trotz der beschriebenen bauphysikalischen und anlagentechnischen Äquivalenzen sowie der Äquivalenz der Nutzungsart nicht eindeutig in den unterschiedlichen Steuerungsverfahren (Technik vs. Nutzer) der Heizkörperventile vermutet werden. Dies begründet sich überwiegend aus dem dargestellten unterschiedlichen Ausmaß der Raumnutzung selbst. Der direkte Vergleich der untersuchten Stränge ergibt eine um ca. 15 % höhere Nutzungsintensität der Räume am Anwendungsstrang und einen 14 % höheren Anteil an zu beheizender Fläche als am Referenzstrang. Gerade auch aus diesem Blickwinkel wird die Relevanz des Verbrauchsunterschiedes verdeutlicht, denn diese Unterschiede lassen auf den ersten Blick ein gegenteiliges Ergebnis des Wärmemengenverbrauches erwarten. Zudem bieten sie einen Grund für die Vermutung, dass die theoretische Ursache für die Verbrauchsunter-

schiede in dem energetischen bzw. energiekritischen Nutzerverhalten liegen könnte. Als ein erstes Ergebnis kann festgehalten werden, dass das Smart-Heating-System einen deutlich positiven Effekt auf den Wärmeenergieverbrauch hat.

Weiterhin konnte durch das lineare Analyse-Modell ein Zusammenhang zwischen den Verläufen der Außentemperatur und der akkumulierten Wärmemengenverbräuche hergeleitet werden. Der Verlauf des akkumulierten Wärmemengenverbrauches am Anwendungsstrang zeigt dabei eine zu erwartende Entwicklung auf und scheint überwiegend durch die Außentemperatur beeinflusst zu sein. Am Referenzstrang wiederum tritt eine unerwartete Veränderung zum Ende des Messzeitraums auf, welche durch nachfolgende Untersuchungen der Wochenprofile des Smart-Heating-Systems und der Raumtemperaturen hinsichtlich ihrer Ursache weiter untersucht wurde. Die Gegenüberstellung der verbrauchten Tagesmengen an Wärmeenergie zeigte auf, dass es am Referenzstrang zu einer rapiden Verbrauchssenkung ab dem 27.03.2017 gekommen ist. Es wurde vermutet, dass sich ursächlich die Nutzungsintensität von mindestens einem Raum am Referenzstrang schlagartig verändert haben müsste und damit einhergehend das betreffende Heizkörperventil „abgedreht“ wurde. Da es sich um einen sehr kleinen Untersuchungsrahmen handelt und lediglich jeweils acht Räume durch einen der untersuchten Heizungsstränge versorgt werden, könnte ein solches Ergebnis eine deutliche Veränderung hinsichtlich des Wärmemengenverbrauchs des Stranges verursachen.

Die Untersuchung der Wochenprofile hat ergeben, dass trotz der gleichen Nutzungsart „Büro-nutzung“ grundsätzliche Unterschiede in der Nutzungsintensität der einzelnen Räume vorliegen. Dies erscheint im Hinblick auf die Energiebedarfsberechnungen für energetisch sanierte oder neugebaute Gebäude ein relevanter Aspekt zu sein, welcher mit einer üblichen Berücksichtigung der Flächenbelegungen (Belegungsdichte) vermutlich nicht hinreichend Rechnung getragen wird. Das in Kapitel 2.2 vorgestellte Programm Annex 66 könnte im Ergebnis eine Optimierung diesbezüglich hervorbringen.

Auch konnte eine plötzliche Veränderung der Raumnutzung des Raumes R12 am Referenzstrang mit Hilfe der Heizwahrscheinlichkeiten identifiziert werden. Dieses Ergebnis konnte als ein erstes Indiz zur Stützung der oben beschriebenen Vermutung angenommen werden. Da jedoch die Prognose der Wochenprofile durch das Smart-Heating-System unabhängig der Einstellung des Heizkörperventils bzw. Ventilreglers erfolgt, ist dieses Indiz nicht aussagekräftig genug, um ein abschließendes Urteil zuzulassen. Mit Hilfe der Raumtemperaturanalyse sollte versucht werden, die Vermutung weiter zu stützen, denn ein abgedrehter Ventilregler müsste sich tendenziell in der Raumtemperatur widerspiegeln.

Die Analyse der Raumtemperaturen aller Räume hat ergeben, dass die gemittelten Raumtem-

peraturen beider Stränge im Vergleich einen unterschiedlich großen Temperaturbereich aufweisen. Die gemittelten Raumtemperaturen des Anwendungsstranges verlaufen innerhalb des Zeitraumes 11.01.2017–30.04.2017 in einem Temperaturbereich zwischen $19,7 \dots 21,7 \text{ }^\circ\text{C}$ ($\Delta 2 \text{ K}$), der Verlauf des Referenzstranges zwischen $21,2 \dots 22,4 \text{ }^\circ\text{C}$ ($\Delta 1,2 \text{ K}$). Resultierend aus der Annahme, dass ein steigender Grad der Steuerung der Ventilregler in den Räumen ein ebenso größeres Delta in den genannten Temperaturbereichen erzeugt, wurde der Rückschluss gezogen, dass das Smart-Heating-System einen höheren Grad der Ventilsteuerung aufweist, als die Steuerung durch den Nutzer. Diese Schlussfolgerung erscheint auf Grundlage der generellen Funktion des Smart-Heating-Systems als logisch. Auch kann festgestellt werden, dass die Räume am Referenzstrang im Durchschnitt eine höhere Raumtemperatur aufweisen, als die Räume am Anwendungsstrang. Der Mehrverbrauch des Referenzstranges steht hierbei mit hoher Wahrscheinlichkeit in einem kausalen Zusammenhang zu dieser Feststellung.

Bezogen auf die Vermutung einer gravierenden Veränderung am Referenzstrang konnte diese These durch die Verläufe der Raumtemperaturen nicht gestützt werden. Ferner hatte die Analyse zum Ergebnis, dass es eher einen Anstieg der Raumtemperaturen zum Ende des Messzeitraums am Anwendungsstrang gegeben haben könnte. Dies würde sich gegenteilig der ursprünglichen Vermutung auswirken, widerspricht jedoch auch den Ergebnissen der linearen Analyse. Hier zeigte der Anwendungsstrang einen erwarteten Verbrauchsverlauf.

Auf Grundlage der kritischen Betrachtung der Raumtemperaturwerte und der Erhebungsmethodik sind die Werte hinsichtlich ihrer Aussagekraft als nicht verlässlich eingeordnet worden. Für eine verlässlichere Aussage sind bedeutend mehr Raumtemperatur-Messwerte notwendig.

Abschließend konnte durch die Analyse der vorhandenen Daten keine abschließende Antwort hinsichtlich der Ursachen der Veränderungen am Referenzstrang gefunden werden. Naheliegender wäre zum Beispiel auch ein systematischer Fehler, welcher durch eine unvorhergesehene fehlerhafte Messung des Wärmemengenzählers oder einen Fehler in der GLT hervorgerufen wurde. Dies kann ebenfalls nicht aufgeklärt werden, da dafür eine detaillierte Untersuchung des Wärmemengenzählers bzw. der GLT notwendig wäre, was im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht möglich war.

Ist aus der erfolgten Untersuchung ein Rückschluss auf das Ausmaß des energetischen bzw. energiekritischen Nutzerverhaltens möglich (Forschungsfrage)?

Eine absolute und verlässliche Aussage kann durch die erfolgte Untersuchung nicht getroffen werden, jedoch sind Tendenzen erkennbar. Wie bereits dargelegt, liegt eine solche Tendenz zum einen in dem Unterschied der verbrauchten Wärmemengen. Hier könnte das Ausmaß in

einem Bereich zwischen 15...22 % angegeben werden. Zum anderen könnte eine Tendenz für das Ausmaß des energetischen Nutzerverhaltens aus der Fragestellung abgeleitet werden, wie hoch der Unterschied zwischen dem gemessenen und dem theoretischen Wärmemengenverbrauch des Referenzstranges ist, sofern die Räume ebenfalls das vollständige Smart-Heating-System erhalten hätten. Um diese Fragestellung beantworten zu können, wird die folgende, selbst entwickelte Berechnung herangezogen.

Gegeben sind folgende Werte:

$$Q_{\text{Anw.}} = 6522 \text{ kWh} \quad (\text{verbrauchte Wärmemenge am Anwendungsstrang})$$

$$Q_{\text{Ref. real}} = 7634 \text{ kWh} \quad (\text{verbrauchte Wärmemenge am Referenzstrang})$$

$$E_{\text{Anw.}} = 28\,930 \text{ Stck} \quad (\text{Ausmaß des Komfortbetriebs Anwendungsstr., Tab. 9})$$

$$E_{\text{Ref.}} = 24\,624 \text{ Stck} \quad (\text{Ausmaß des theor. Komfortbetriebs Referenzstr., Tab. 9})$$

$$F_{\text{Anw.}} = 218,73 \text{ m}^2 \quad (\text{Fläche des Anwendungsstranges, Tab. 1})$$

$$F_{\text{Ref.}} = 187,92 \text{ m}^2 \quad (\text{Fläche des Referenzstranges, Tab. 1})$$

Gesucht ist der theoretische, flächen- und nutzungsbereinigte Wärmemengenverbrauch des Referenzstranges bei Nutzung des vollständigen Smart-Heating-Systems (Raumsensor und Ventilregler):

$Q_{\text{Ref.theor.}}$ in kWh

Folgende, selbst entwickelte Verhältnisgleichung wird aufgestellt:

$$\begin{aligned} \frac{Q_{\text{Ref.theor.}}}{F_{\text{Ref.}}} &= \frac{Q_{\text{Anw.}}}{F_{\text{Anw.}}} \\ E_{\text{Ref.}} &= \frac{E_{\text{Anw.}}}{E_{\text{Ref.}}} \\ \frac{Q_{\text{Ref.theor.}}}{F_{\text{Ref.}}} &= \frac{Q_{\text{Anw.}}}{F_{\text{Anw.}}} \cdot \frac{E_{\text{Ref.}}}{E_{\text{Anw.}}} \\ Q_{\text{Ref.theor.}} &= \frac{Q_{\text{Anw.}} \cdot E_{\text{Ref.}} \cdot F_{\text{Ref.}}}{E_{\text{Anw.}}} \\ Q_{\text{Ref.theor.}} &= \frac{6522 \text{ kWh}}{218,73 \text{ m}^2} \cdot 24\,624 \text{ Stck} \cdot 187,92 \text{ m}^2 \\ Q_{\text{Ref.theor.}} &= 4769 \text{ kWh} \end{aligned}$$

Der soeben ermittelte theoretische Wärmemengenverbrauch des Referenzstranges kann nun in das Verhältnis zu dem tatsächlich gemessenen Wärmemengenverbrauch des Referenzstran-

ges gesetzt werden.

$$x = \frac{Q_{\text{Ref.real}}}{Q_{\text{Ref.theor.}}} = \frac{7634 \text{ kWh}}{4769 \text{ kWh}} = 1,6$$

Das Verhältnis aus dem realen und dem berechneten theoretischen Wärmemengenverbrauch des Referenzstranges beträgt 1,6. Es wäre entsprechend der Berechnungen also eine theoretische Einsparung in Höhe von 60 % möglich gewesen, sofern das Smart-Heating-System am Referenzstrang vollständig eingesetzt worden wäre. Wird dieses Ergebnis auf die Systematik der ursprünglichen Grafik zur Darstellung des hypothetischen Resultats der erfolgten Untersuchung übertragen, ergibt sich folgende Abbildung:

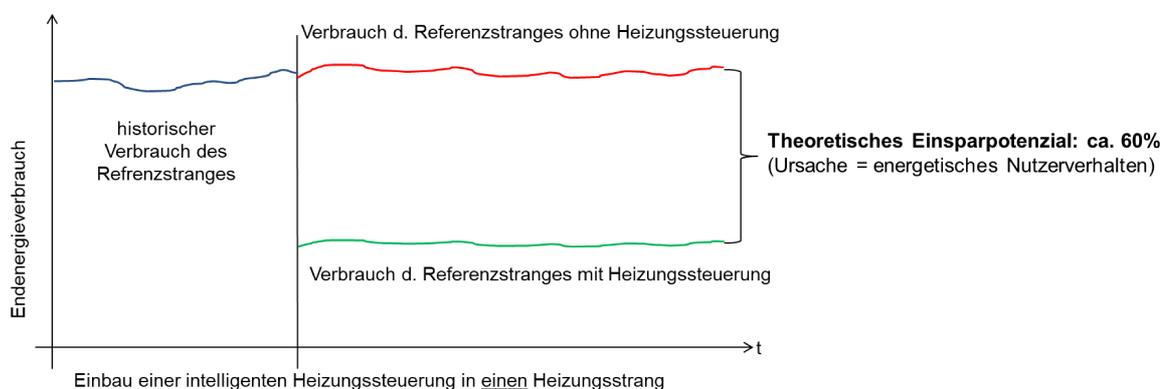


Abbildung 2.24.: Theoretisches Einsparpotenzial am Referenzstrang als Resultat der Untersuchung⁹⁶

Diese 60 % können ebenso als eine Tendenz für das Ausmaß des energetischen bzw. energiekritischen Nutzerverhaltens angesehen werden. Dabei wird jedoch auf die Notwendigkeit einer umfangreichen Evaluation durch Folgeuntersuchungen zur Bestätigung dieses Wertes hingewiesen.

2.5. Kritische Betrachtung des Untersuchungsaufbaus und der Messwerte

Für die Untersuchung konnte ein Versuchsaufbau gewählt werden, welcher ein hohes Maß an Äquivalenz der Rahmenbedingungen aufweist. Dennoch handelt es sich um einen relativ kleinen Versuchsaufbau mit der Gegenüberstellung von lediglich zwei Heizungssträngen. Aussagen aus der Untersuchung sind hierbei möglich, jedoch wird für eine Folgeuntersuchung empfohlen, den Versuchsaufbau zum Beispiel durch die Gegenüberstellung von Heizungsstrang-Clustern zu vergrößern, um die Gültigkeit der Aussagen zu validieren bzw. zu falsifizieren.

Weiterhin konnten durch fehlende Daten bezüglich des energetischen Nutzerverhaltens, wie zum Beispiel thermische Raumattribute im Kontext zu dem spezifischen thermischen Behaglichkeitsempfinden des jeweiligen Raumnutzers, nur tendenzielle Ergebnisse abgeleitet werden. Nutzerspezifische Verhaltensmuster aufgrund der subjektiven thermischen Behaglichkeit sind in der Untersuchung nicht identifizierbar gewesen. Das Nutzerverhalten wurde deshalb nur durch eingegrenzte, vorher definierte Verhaltensweisen angegeben. Für eine fundierte Aussage wird empfohlen, zukünftig einen Versuchsaufbau zu wählen, welcher einen direkten und zeitaktuellen Abgleich der thermischen Raumattribute mit dem spezifischen thermischen Behaglichkeitsempfinden des jeweiligen Raumnutzers sowie seines daraus resultierenden energetischen Verhaltens zulässt. In der Literaturrecherche konnte hierzu das Verfahren „Spot-Monitoring zum thermischen Komfort in Bürogebäuden“ identifiziert werden, welches von Ernesto Kuchen im Rahmen seiner Dissertation entwickelt wurde (Vgl. Kapitel 2.1.2).

Eine Abweichung vom erwarteten Verlauf der akkumulierten Wärmemengen am Referenzstrang wurde versucht, durch weitere Untersuchungen der Wochenprofile des Smart-Heating-Systems hinsichtlich seiner Ursache zu untersuchen. In den Wochenprofilen konnte dabei im Raum R12 eine plötzliche Abweichung in der prognostizierten Heizwahrscheinlichkeit identifiziert werden, jedoch war es nicht möglich, diese mit entsprechenden Raumtemperaturen zu untermauern. Da die Wochenprofile unabhängig der Einstellung am Ventilregler des Heizkörpers erstellt werden, kann durch die alleinige Verwendung der Wochenprofile keine eindeutige Aussage zum Heizverhalten getroffen werden. Hierzu ist ein Abgleich mit den Raumtemperaturen unerlässlich. Deshalb wird für Folgeuntersuchungen grundsätzlich empfohlen, in allen untersuchten Räumen Raumtemperaturlogger zu installieren, welche in einem geeigneten Zyklus, z.B. alle 15 Minuten, die Raumtemperaturen zu speichern.

Während der Untersuchung konnte zudem keine kritische Begleituntersuchung der Messinstrumente (z.B. der WMZ und der GLT) erfolgen. Für zukünftige Untersuchungen wird empfohlen, diese Begleituntersuchungen durchzuführen, um systematische Fehlerquellen möglichst zu eliminieren.

Grundsätzlich muss hervorgehoben werden, dass für den Versuchsaufbau sowohl DLR-intern mehrere Abteilungen, wie zum Beispiel das Bau- und Objektmanagement, aber auch generell alle beteiligten Projektpartner koordiniert werden mussten. Die erforderlichen Abstimmungs- und Freigabeprozesse sind hierbei sehr effektiv und zügig verlaufen. Dennoch zeigt der Zeitstrahl auf (Vgl. Kapitel 3.7), dass durch die notwendigen Prozesse Lücken in der Datenerhebung entstanden sind. Referenzwerte zu der Anlernphase des Smart-Heating-Systems mit entsprechenden Wärmemengenwerten wären beispielsweise wünschenswert gewesen, um die Auswirkungen dieser Phase auf den Wärmeenergieverbrauch besser beschreiben zu können.

2.6. Zwischenfazit und -ausblick

Die Untersuchung am DLR hat überwiegend nicht erwartete Ergebnisse gebracht. Bezogen auf das Thema der vorliegenden Abschlussarbeit kann festgehalten werden, dass es ein energetisches bzw. energiekritisches Nutzerverhalten gegeben hat. Auch wenn nicht abschließend geklärt werden konnte, wie und wann genau sich dieses Verhalten in welcher Form ausprägt, so konnte dennoch vereinfacht das Ausmaß des Nutzerverhaltens beziffert werden. Das Ausmaß dieses energiekritischen Nutzerverhaltens im Sinne einer theoretisch möglichen Wärmeenergieersparnis durch Nutzung eines Smart-Heating-Systems wird durch eine einfache Verhältnisgleichung mit ca. 60 % beziffert. Daraus folgt, dass anscheinend enorme Einsparpotenziale in der energetischen Einzelraumregelung mit Hilfe eines Smart-Heating-Systems, wie es in der Untersuchung verwendet wurde, bestehen. Im Sinne des Eckpfeilers „Energieeffizienz“, wie es die Bundesregierung im Klimaschutzplan 2050 für das Handlungsfeld des Gebäudebestandes beschrieben hat, gibt dies Grund zur Hoffnung für das Facility Management in Deutschland. Energieautarke, geringinvestive und leicht zu installierende Smart-Heating-Systeme mit Fokus der Einzelraumregelung bilden hierbei neben energetischen Fassadensanierungen sowie effizienteren Heizungsanlagen einen sehr wichtigen Baustein zur Zielerreichung.

Weiterhin hat der Vergleich der beiden untersuchten Heizungsstränge ergeben, dass diese trotz der vorliegenden starken Äquivalenz der Rahmenbedingungen nicht vergleichbar sind. Neben den unterschiedlichen zu beheizenden Flächen/Raumvolumen begründet sich dies überwiegend in der unterschiedlichen Nutzungsintensität der Räume, trotz derselben Nutzungsart. Bezogen auf die Energieeffizienzlücke kann hierin eine Ursache liegen. Die aktuellen Methoden zur Energiebedarfsberechnung von Gebäuden, wie z.B. in der DIN V 18599 beschrieben, berücksichtigen bereits Nutzungsarten und prognostizierte Belegungsdichten sowie grobe Klassifizierungen der Nutzungszeiten der Gebäudeflächen.⁹⁷ Jedoch berücksichtigen die Klassifizierungen der Nutzungszeiten vermutlich nicht in ausreichendem Maße die tatsächlichen Nutzungsintensitäten der Flächen, wie sie durch die erfolgte Untersuchung aufgezeigt wurden. In der Prognose dieser Intensitäten liegt eine große Herausforderung, denn die Datenlage ist vermutlich oft unzureichend, wodurch Programme wie Annex 66 entstanden sind. Ebenso liegt hierin ein großes Potenzial, denn die Auslegungen der gebäudetechnischen Anlagen können mit Hilfe dieser Vorhersagen noch besser erfolgen. Über- und Unterkapazitäten sowie oft damit einhergehende technische Regulierungsschwierigkeiten an den Anlagen können somit verringert werden. Dies wiederum kann energetische Effizienzgewinne wie auch wirtschaftliche Vorteile im Lebenszyklus von Gebäuden bringen.

⁹⁷Vgl. DIN V 18599-10:2011-12, Kapitel 6, S. 18 ff

Grundsätzlich wird empfohlen, durch gleichartige, jedoch verfeinerte Untersuchungen die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit zu validieren. Ein möglicher Fokus wäre hierbei zum Beispiel die Untersuchung der Auswirkungen auf den hydraulischen Abgleich der Heizungsanlage im Falle der Installation des Smart-Heating-Systems in allen geeigneten Räumen des Gebäudes bzw. des Standortes des DLR.

3. Kooperation

3.1. Aufgabenverteilung zwischen den Partnern

Die Zusammenarbeit unserer beiden Forschungsstellen erfolgte inhaltlich gemäß Antrag und wurde vorangebracht durch intensiven und zielführenden Austausch von Ideen und Daten.

Beim Kickoff kamen folgende Erwartungen der TeilnehmerInnen zum Ausdruck: Die Akteure BLB und DLR der Feldebene waren bereit, eigene Objekte für Untersuchungen zur Verfügung zu stellen und benötigten hierfür konkrete Anforderungen an die Objektdaten. Im Zuge einer Bereitstellung wollten BLB und DLR bezüglich des Nutzerverhaltens den Datenschutz berücksichtigt wissen, insbesondere Anwendung von Anonymisierungsverfahren und eine Überbrückung dieser Hürden durch offene Kommunikation mit Beteiligten und Fokus auf explizite Freiwilligkeit. Mehr Informationen zu einer zweckgemäßen Zählerstruktur zur Erfassung von Wärme- und Elektroenergie wurden gewünscht. Die Kooperationspartner b.i.g. und deZem wünschten Mechanismen zur software-gestützten Rückmeldung über energetisches Nutzerverhalten an die Nutzer. Alle Kooperationspartner wünschten sich Hinweise zur Nachweissführung von Energiekampagnen.

Zur Kickoff-Veranstaltung befanden sich ein Gebäude der Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin sowie ein Verwaltungsgebäude der Beuth Hochschule für Technik Berlin in der ersten Erfassungsphase. Mit diesem Fokus wurde eine Untersuchung von Hotels und Schulen hinten angestellt. Diese Erfassung sollte sich aufgrund der Datenlage als unmöglich darstellen, diese Objekte hätten durch die ZIA und deZem bereit gestellt werden können.

3.2. Effekte der Kooperation

Das auf Datenerfassung, -visualisierung und -analyse spezialisierte Berliner Unternehmen de-Zem GmbH führt am Campus Wilhelminenhof Messungen zu Wärme- und Stromlast erfassung durch. Für das als Pilotobjekt ausgewählte Gebäude C liegen Daten vor. Diese hätten für einen Vergleich des tatsächlichen Gebäudeenergiebedarfs mit einem zu erwartenden Wert verwendet werden können. Nach Festlegung auf die konkret zu betrachtenden Zonen des dritten Obergeschosses gestaltete sich die Verwendung dieser Daten als nicht möglich, da diese lediglich eine Auftrennung in Heizstränge und Elektrozähler bietet, aus denen die Daten für das zu untersuchende Geschoss nicht ermittelt werden konnten.

3.3. Erfahrungen mit fachübergreifender Zusammenarbeit

Als besonders vielversprechend wurde eine Nutzung von Messdaten bewertet, die im Rahmen des ebenfalls durch das IFAF geförderte Projekt HeatMap erhoben wurden. Das 3. Obergeschoss des als Pilotgebäude untersuchten Gebäudes C am HTW-Campus Wilhelminenhof wurde im Rahmen von HeatMap umfangreich messtechnisch untersucht und hätte wertvolle Erkenntnisse zum Nutzerverhalten in Verwaltungs- und Professorenbüros sowie Seminarräumen liefern können.

4. Ergebnisse

Das Projekt FEEL Real Estate (Forschung EnergieEffizienzLücke Real Estate) befasste sich mit den Abweichungen des planerisch erwarteten Energiebedarfs vom später im Betrieb gemessenen Energieverbrauch von Nichtwohngebäuden mit Fokus auf das energetische Nutzerverhalten. Eine solche Abweichung – im Projekt „Energieeffizienzlücke“ genannt, in der Literatur aktuell auch unter der Bezeichnung „Energie Performanz Lücke“ firmierend – tritt bei vielen verschiedenen Objekten auf, ohne dass eine allgemein akzeptierte Erklärung für den Mehrverbrauch existiert. Kann davon ausgegangen werden, dass ein korrekter Anlagenbetrieb erfolgt, so wird die Lücke immer öfter dem energetischen Nutzerverhalten zugeschrieben, ohne dass dessen genauer Einfluss bisher abschätzbar wäre. Weiterhin bestand das zentrale Ziel des Projektes darin, diesen menschlichen Faktor qualitativ und quantitativ zu erfassen.

Am Campus Wilhelminenhof der Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin wurde ein zoniertes Gebäudesimulationsmodell für die Planungssoftware IDA/ICE erstellt. Zusätzlich wurden auf Basis von Skripten Werkzeuge programmiert, die eine Einbindung von Last- und Nutzerprofilen in die Simulationsumgebung ermöglichen. Eine quantitative Bewertung in Hinsicht einer eventuellen, energetischen Über- oder Untersteuerung der Räumlichkeiten kann auf dieser Grundlage durchgeführt werden. Zusätzlich sind künftige Simulationsvergleiche mit gemessenen, tatsächlichen Anwesenheiten durch das Projekt HeatMap möglich, sobald der Datenzugang erneuert wird.

Wie in Abschnitt 2.2 dargelegt wurde, konnten die Daten für eine Untersuchung des Pilotobjekts an der Beuth Hochschule für Technik Berlin nicht akquiriert werden. Es konnte keine weitere Untersuchung durchgeführt werden, weshalb sich auf die Analyse der Daten des Pilotobjekts DLR konzentriert wurde.

In Abschnitt 2.3 wurde der Versuchsaufbau innerhalb des Pilotobjekts am DLR in Berlin Adlershof beschrieben. Die gewonnenen Messwerte wurden dargestellt und analysiert. Die Untersuchungen des Smart-Heating-Systems en:key am DLR führten zu mehreren Ergebnissen. Zum einen konnte anhand der Messdaten gezeigt werden, dass per Norm definierte Nutzungsarten der Räumlichkeiten auf Raumebene starke Abweichungen zur realen Nutzung aufweisen

und sich unter einer Nutzungsbezeichnung wie beispielsweise „Büronutzung“ Einzelräume mit nur einer Profilarart nicht erfassen lassen. Dies hat mehrere Gründe: Zum einen unterscheiden sich die generellen Ankunfts- und Abschlusszeiten der einzelnen Räume sehr stark voneinander. Des Weiteren ergeben sich im Laufe eines über Jahre andauernden Nutzungszeitraumes große Unterschiede. Die Gründe hierfür sind neben organisatorischen Veränderungen oftmals persönliche Ereignisse im Leben der Nutzer selbst. Dies können Elternzeit, Krankheit, Gleitzeit, Urlaub und viele weitere Dinge sein. Des Weiteren konnten mit Hilfe des en:key-Systems Einsparpotentiale der Heizenergie demonstriert werden, indem die Absenkezeiten des zentralen Heizungssystem durch raumweise aufgelöste, zusätzliche Absenkungen in Abhängigkeit der realen Nutzungszeiten unterstützt wurden¹. Die These, dass ein energiekritisches Nutzerverhalten hauptsächlich für die „Energieeffizienzlücke“ verantwortlich ist, konnte anhand der en:key-Messkampagne nicht vollends geklärt werden. Allerdings wurden Werkzeuge und Auswertungsmethoden erstellt, die weiteren Messungen der gleichen Art einen einfacheren Einstieg bieten kann. Ein Lerneffekt ist, dass für zukünftige Messkampagnen dieser Art eine detailliertere Vorbereitung und Planung notwendig ist. Eine umfangreichere Untersuchung – zum Beispiel raumweise aufgelöste Messungen der Wärmemengen – war im zeitlichen Projektrahmen nicht möglich und wird für Projekte ähnlichen Messkonzepts empfohlen.

¹vgl. [Bet17]

5. Transfermöglichkeiten und -aktivitäten

Die Ergebnisse des Forschungsprojekts „FEEL Real Estate“ bieten interessante Aspekte, die es sich lohnt, auch in Zukunft weiter zu betrachten.

Für einige Gebäude der HTW Berlin wird derzeit eine Potentialanalyse des en:key-Systems erstellt. Die im Forschungsprojekt gewonnenen Daten können möglicherweise unterstützend genutzt werden. Sollte das en:key-System an der HTW Berlin zum Einsatz kommen, kann auf die im Forschungsprojekt entwickelten Werkzeuge zur Datenverarbeitung und -analyse zurück gegriffen werden. Mit zukünftigen Daten ließen sich weitere Erkenntnisse über den Heizenergieverbrauch und das Heizverhalten gewinnen. Mit Hilfe der Simulationen, die auf den LSF-Plänen beruhen, kann ein mögliches Einsparpotential die Potentialanalyse unterstützen.

Die zur Projektlaufzeit nicht verfügbaren HeatMap-Daten könnten im weiteren Verlauf mit in die Untersuchungen eingehen. Es ist angestrebt, die Ergebnisse des Forschungsprojektes in Verbindung mit den HeatMap-Daten erneut zu nutzen.

Werkzeuge und Erfahrungen in Bezug auf die Simulationssoftware IDA/ICE könnten in die Lehre mit einfließen. Für das Einbinden nutzungsbezogener Daten in die Simulation wurden die Eingangsdateien untersucht. Zusätzlich sind Skripte entstanden, die einzubindende Daten in Formate umwandelt, die von IDA/ICE verwendet werden können.

6. Resonanz in der Öffentlichkeit

6.1. Publikationen

- Kai Kummert, Frank Scheffler, Jonathan Schulze; Den Energieeffizienzlücken in Nichtwohngebäuden auf der Spur; Ernst & Sohn, Februar 2016, Special Industrie- und Gewerbebauten. [KSS16]
- Kai Kummert, Frank Scheffler, Jonathan Schulze; Analyse von Energieeffizienzlücken in Nichtwohngebäuden – Ziele, Determinanten und Wirkungsweisen; ecomed – Handbuch Facility Management 50. Erg.-Lfg. 09/2016.

6.2. Veranstaltungen

bautech: Internationale Fachmesse für Bauen und Gebäudetechnik (18. Februar 2016, Präsentation und Diskussion Messegelände Berlin). Von der Beuth Hochschule für Technik waren Frank Scheffler, Jonathan Schulze, Jan Lehmann und Alexander Pensenstadler anwesend.

Lange Nacht der Wissenschaften: 11. Juni 2016, Infostand und IFAF-Poster. An der Beuth Hochschule waren Kai Kummert und Jan Lehmann vertreten. An der HTW wurde ein Informationsposter des Projektes ausgestellt.

Forschungstreffen ZIA: 13. Dezember 2016. Anwesend waren Vertreter der Beuth Hochschule, der b.i.g.-Gruppe, des BLB, des DLR, der Hochschule für Technik und Wirtschaft und des ZIA.

6.3. Websites

HTW: (Die Zugriffszahlen sind nicht bekannt) <https://www.htw-berlin.de/forschung/online-forschungskatalog/projekte/projekt/?eid=2179>

6.4. Abschlussarbeiten

Bachelorarbeit: Energetische Nutzerbeeinflussung durch eine Energieeffizienzkampagne (A. Pensenstadler)

Masterarbeit: Allgemeines Energiedatenmanagement unseres Kooperationspartners BLB (N. Hähnel)

Bachelorarbeit: zum Beleuchtungsenergieverbrauch der Polizeiinspektion Barnim in Bernau (A. de la Torre, D. Esche)

Bachelorarbeit: zur Realisierung und Beurteilung einer Energieeffizienzkampagne im Land Brandenburg (S. Bergmann)

Masterarbeit: zu Energieeffizienzkampagnen in öffentlichen Verwaltungen (D. Stechow)

Masterarbeit: zum Einfluss des Nutzers auf die Stromverbräuche in einem Laborgebäude (J. Lehmann)

Bachelorarbeiten: zum Einfluss des Nutzerverhaltens auf den Heizenergieverbrauch eines Laborgebäudes (M. Lück, T. Seifert)

Masterarbeit: Untersuchung des energetischen Nutzerverhaltens in einem Verwaltungsgebäude mit Hilfe einer selbstlernenden Heizungssteuerung. (T. Betz) [Bet17]

6.5. Medienecho

- Pressemitteilung in „Facility Management“ vom 12. November 2015, verfügbar unter: http://www.facility-management.de/artikel/fm_Forschungsprojekt_FEEL_Real_Estate_gestartet_2459167.html
- Interview von Christoph Berger mit Frank Scheffler, Beuth Hochschule für Technik Berlin; „Das Rätsel der Energieeffizienzlücke ist da“, Springer Professional vom 17. Januar 2017, verfügbar unter: <https://www.springerprofessional.de/energieeffizienz/buerobau/-das-raetsel-der-energieeffizienzluecke-ist-da-/12002306>

6.6. Stimmen der Kooperationspartner

Im Anschluss an das Forschungstreffen beim Zentralen Immobilien Ausschuss am 13. Dezember 2016 interviewte Christoph Berger die Vertreter der Kooperationspartner zum Forschungsprojekt, insbesondere zu deren Erwartungen und den gewonnenen Erkenntnissen.

6.6.1. Interview mit Lutz Grunicke, BLB

Interview mit Lutz Grunicke, Verantwortlicher für Energiemanagement Brandenburgischer Landesbetrieb für Liegenschaften und Bauen (BLB):

Was waren für Sie Gründe, sich an dem Forschungsprojekt zu beteiligen?

Die Motivation des Landesbetriebes für Liegenschaften und Bauen (BLB) sich an dem Forschungsprojekt zu beteiligen, resultierte vor allem aus den Erkenntnissen, dass die energetischen Modernisierungen von Fassaden, Fenstern und Heizungssystemen häufig nicht den kalkulierten Einsparungen entsprechen. Wir wollten den Widersprüchen zwischen den theoretisch berechneten und real gemessenen Werten auf den Grund gehen.

Sie setzten lange Zeit auf Hardware, um die Energieeffizienz zu erhöhen. Welche Probleme tauchten dabei auf?

Das Nutzerverhalten war und ist nicht homogen. Der Mensch als „Störgröße“ ist nicht zu 100 Prozent berechenbar. Ein zu viel an Technik führt dazu, dass der Nutzer und/oder Betreiber zum Teil überfordert wird und auch vorhandene Technik nicht genutzt wird. Gleichzeitig führen die vielen Anforderungen an den Nutzer zum Raumklima zu einer allgemeinen Unzufriedenheit mit den Gebäuden.

Wie homogen ist ihr Gebäudebestand, lassen sich die Erkenntnisse aus dem Forschungsprojekt auf andere Ihrer Gebäude übertragen?

Der Gebäudebestand des BLB ist hinsichtlich des Zustandes, Alters oder Sanierungsgrades sehr differenziert. Das wichtige Ergebnis des Forschungsprojekts „ForschungEnergieEffizienzLücke Real Estate“, dass das Nutzerverhalten unbedingt in den energetischen Fokus einbezogen werden muss, ist dennoch ohne Weiteres auf andere Gebäude des BLB übertragbar und allgemein anwendbar, da nicht zuletzt die Gruppe unserer Nutzer – Bedienstete der öffentlichen Verwaltung – relativ homogen ist.

6.6.2. Interview mit Daniel Feser, ZIA

Interview mit Dr. Daniel Feser, Referent Energie- und Klimaschutzpolitik, Gebäudetechnik, vom ZIA Zentraler Immobilien Ausschuss e.V.

Welchen Stellenwert hat das Thema Energieeffizienz im Nichtwohnbereich für den ZIA?

Zur Erreichung der im Klimavertrag von Paris vereinbarten CO₂-Reduktionsziele ist die Energieeffizienz eine wesentliche Stellschraube, um einen nahezu klimaneutralen Gebäudebestand zu erreichen. Ein großer Teil des deutschen Immobilienbestandes besteht aus Nichtwohngebäuden. Für den ZIA hat die Erhöhung der Energieeffizienz einen hohen Stellenwert, da die Nutzung der Nichtwohngebäude einen größeren Einfluss auf den Energieverbrauch hat als bei Wohngebäuden. Beispielsweise gibt es zahlreiche Gebäudenutzungsklassen, z.B. Handelsimmobilien oder Rechenzentren, in denen nicht das Heizen, sondern vielmehr das Kühlen und die Beleuchtung (die wiederum die Kühlung bedingt) einen Großteil des Energieverbrauchs darstellen. Hier liegen Einsparpotentiale also in anderen Bereichen als der Wärmeversorgung, da ein höherer Aufwand zur Kühlung notwendig ist und bestimmte Maßnahmen, wie z.B. das Dämmen sogar kontraproduktiv wirken können.

Bisher ging es vor allem immer nur darum, Gebäude energetisch zu optimieren. Warum rücken die Nutzer erst jetzt in den Fokus der Untersuchungen?

Der Grundsatz der Bundesregierung des „Efficiency First“ wurde in der Vergangenheit im Wesentlichen auf die energetische Ertüchtigung der Gebäude angewendet. Das bedeutet, dass in der Vergangenheit die Anforderungen an den baulichen Wärmeschutz und Anlagen- bzw. Gebäudetechnik immer weiter erhöht wurden. Mit dem aktuell gültigen Energieeinsparrecht (EnEV 2016 + EEWärmeG) wurde hier schon ein qualitativ sehr anspruchsvolles Niveau erreicht. Es zeigt sich, dass durch Verschärfungen der Regulierungen der theoretische Energiebedarf sinkt, allerdings der reale Energieverbrauch nicht notwendigerweise im gleichen Maße abnimmt. Hier hat das Nutzerverhalten einen wesentlichen Einfluss auf die Energiebilanz.

Ist die Regulierung im Gebäudebereich endlich?

Die aktuellen Anforderungen im Energieeinsparrecht sind bereits an den Grenzen des technisch Machbaren bzw. des wirtschaftlich Sinnvollen. Je höher die Anforderungen, desto stärker steigt der Einfluss des Nutzers. Das bedeutet, die Optimierung des Gebäudebetriebs mit Fokus auf den Nutzer wird zukünftig die relevante

Stellschraube zur Steigerung der Energieeffizienz, insbesondere bei Nichtwohngebäuden, darstellen.

6.6.3. Interview mit Torsten Betz, DLR

Interview mit Torsten Betz, Stabsabteilung der Technischen Infrastruktur am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) in Berlin

Welche Maßnahmen und Instrumente setzen Sie bisher ein, um die Energieeffizienz Ihres Gebäudebestands zu ermitteln?

Bei Neubauten werden Energieausweise erstellt, auf denen erste, sehr grobe Indikationen hinsichtlich der Energieeffizienz des Gebäudes ersichtlich sind. Weiterhin stellen wir Neubauten mit einer festgelegten Mindest-Energiezählerstruktur aus.

Für die Gebäude ermitteln wir Zähl- und Messwerte bezüglich der Medien Strom und Wärme.

Im Jahr 2015 haben wir ein Energieaudit nach DIN EN 16247-1 durchgeführt, welches ebenfalls Optimierungsmaßnahmen hervorbrachte, die sich zum Teil in der Umsetzung befinden.

Welche Ressourcen wären aber tatsächlich notwendig, um die Energieeffizienz von Gebäuden zu ermitteln – rechnet sich dieser Aufwand am Ende?

Grundsätzlich möchten wir in einem ersten Schritt eine vollständige Transparenz zu den Verbräuchen der Medien Strom, Wärme und Kälte bis auf Gebäudeebene herstellen. Dafür ist es erforderlich, diverse Zähl- und Messstellen verbunden mit einem softwaregestützten Energiecontrolling in den Bestandsgebäuden sukzessive nachzurüsten. Parallel dazu implementieren wir ein Energiemanagementsystem nach DIN EN ISO 50001 im Unternehmen, um das Energiemanagement einem nachvollziehbaren, systematischen Ansatz zu unterziehen.

Innerhalb des Systems wird die Energieeffizienz der Gebäude ermittelt und systematisch optimiert. Diverse Erfahrungsberichte zeigen, dass sich dieser oben beschriebene Ansatz und der damit verbundene hohe Ressourcenaufwand am Ende in einem nachhaltigen Sinne lohnen kann.

Sind die Erkenntnisse aus dem Forschungsprojekt auch auf andere Immobilien in Ihrem Bestand übertragbar oder muss letztlich immer wieder jedes Gebäude einzeln betrachtet werden?

Die Untersuchungen in dem Gebäude am Standort Berlin-Adlershof haben gezeigt,

dass im Bereich der Wärmeenergie hohe Optimierungspotenziale in unserem Gebäudebestand schlummern. Erfreulich ist dabei weiterhin die Erkenntnis, dass diese Potenziale nicht ausschließlich mit der Dämmung der Gebäude verbunden sind, sondern allein aus der optimierten Heizungssteuerung große Einsparungen der Wärmeenergie resultieren.

Grundsätzlich wären die Erkenntnisse aus derzeitiger Sicht auf alle Gebäude mit einer gleichwertigen Nutzungsart (Verwaltungsgebäude) übertragbar, denn die angewendete technische Optimierung bezieht sich nicht auf die Gebäudehülle, sondern auf das energetische Nutzerverhalten in den Gebäuden. Es ist davon auszugehen, dass dieses energetische Nutzerverhalten sich vermutlich nicht stark von Gebäude zu Gebäude unterscheidet. Dies hilft vor allem bei der ersten Identifizierung geeigneter Gebäude. Anschließend müssen jedoch die technischen Voraussetzungen in den jeweiligen Gebäuden – bei technischen Optimierungen – eine Berücksichtigung finden, wodurch im gewissen Sinne eine Einzelbetrachtung erfolgt.

7. Perspektiven für weitere Kooperationen und Forschung

Es wurden keine weiteren Kooperationen im Projektrahmen in Betracht gezogen. Eine Akquise von Folgeprojekten im Rahmen der EnOB-Förderung wurde anvisiert.

8. Ausblick

8.1. Forschungsbedarf

Es gilt weiterhin der im Projektantrag ausgewiesene und unter ?? skizzierte Forschungsbedarf. Ergebnisse von uns oder von Seiten Dritter, die diesen Bedarf obsolet machen würden, liegen nicht vor. Unsere Forschungsthese bleibt aktuell.

8.2. Langfristige Auswirkungen

Die Klärung der Forschungsthese würde weitreichende Auswirkungen haben, sowohl bei den Kooperationspartnern als auch beim Entwurf zukünftiger Forschungsprojekte.

8.3. Geplante weitere Verwertung

Es gibt seitens der Beuth Hochschule aktuell keine Pläne zur weiteren Verwertung der Zwischen- und Endresultate.

An der Hochschule für Technik und Wirtschaft wird die Verwendung der Zwischen- und Endresultate diskutiert. Zum Zeitpunkt des Abschlussberichts steht nicht fest, ob diese in der Lehre oder in weiteren Projekten verwendet werden. Die während des Forschungsprojektes entwickelten Methoden zur Verwendung von Nutzerdaten und weiteren Profilen in der Simulationssoftware IDA/ICE erwiesen sich als sinnvoll. Zur Zeit wird eine Potentialanalyse des en:key-Systems von Kieback&Peter an der HTW durchgeführt. Die im Forschungsprojekt in Bezug auf das en:key-System entwickelten Darstellungs- und Bewertungsmethoden lassen sich konkret anwenden.

9. Kurzzusammenfassung und Ergebnisse

Das Projekt FEEL Real Estate (Forschung EnergieEffizienzLücke Real Estate) befasste sich mit den Abweichungen des planerisch erwarteten Energiebedarfs vom später im Betrieb gemessenen Energieverbrauch von Nichtwohngebäuden mit Fokus auf das energetische Nutzerverhalten. Eine solche Abweichung – im Projekt „Energieeffizienzlücke“ genannt, in der Literatur aktuell auch unter der Bezeichnung „Energie Performanz Lücke“ firmierend – tritt bei vielen verschiedenen Objekten auf, ohne dass eine allgemein akzeptierte Erklärung für den Mehrverbrauch existiert. Kann davon ausgegangen werden, dass ein korrekter Anlagenbetrieb erfolgt, so wird die Lücke immer öfter dem energetischen Nutzerverhalten zugeschrieben, ohne dass dessen genauer Einfluss bisher abschätzbar wäre. Weiterhin bestand das zentrale Ziel des Projektes darin, diesen menschlichen Faktor qualitativ und quantitativ zu erfassen.

An der HTW Berlin wurde ein zoniertes Gebäudesimulationsmodell für das Gebäude C erstellt. Zusätzlich wurden Werkzeuge programmiert, die eine Einbindung von Last- und Nutzerprofilen in die Simulationsumgebung IDA/ICE ermöglichen. Eine quantitative Bewertung in Hinsicht einer eventuellen, energetischen Über- oder Untersteuerung der Räumlichkeiten kann auf dieser Grundlage zukünftig durchgeführt werden.

In Abschnitt 2.3 wurde der Versuchsaufbau am DLR beschrieben. Die gewonnenen Messwerte wurden dargestellt und analysiert. Es konnte gezeigt werden, dass Nutzungsarten der Räumlichkeiten auf Raumebene starke Abweichungen zur realen Nutzung aufweisen. Einsparpotentiale der Heizenergie, indem unterstützend zur zentralen Absenkung je Raum abgesenkt wird, wurde demonstriert. Die These, dass ein energiekritisches Nutzerverhalten hauptsächlich für die „Energieeffizienzlücke“ verantwortlich ist, konnte anhand der en:key-Messkampagne nicht vollends geklärt werden.

A. en:key

A.1. Umfassende Graphiken

An dieser Stelle sind alle Graphiken, die bei der Auswertung der en:key-Daten des DLR entstanden sind, aber im Projektbericht aus Redundanz- und Platzgründen nicht dargestellt wurden, visualisiert.

Dabei werden folgende Konventionen eingehalten: Je Seite werden die Graphiken eines Raumes abgebildet. Es sind enthalten:

Heizschwelle: Die Heizschwelle des en:key-Systems gibt vor, für welchen Wert der Heizwahrscheinlichkeiten zwischen Heiz- und Absenkbetrieb unterschieden und das Heizprofil erstellt wird. Dieser kann in Zeiten geringer Heizwahrscheinlichkeit abnehmen, um einen erneuten Heizbetrieb schon bei geringerer Heizwahrscheinlichkeit wieder aufnehmen zu können.

Heizwahrscheinlichkeit: Die Heizwahrscheinlichkeit, die durch das en:key-System aufgrund von Messungen berechnet wurde.

Euklidische Distanz der Heizwahrscheinlichkeiten: Bildet den euklidischen Abstand und damit die Gesamtänderung eines Wochenvektors zum nächsten ab.

Änderung der Heizwahrscheinlichkeit: Bildet die absoluten Änderungen der Viertelstundenwerte zu den vorhergehenden Werten ab.

Heizprofil: Die letzte Graphik bildet das resultierende Heizprofil eines Raumes, wie es en:key als Vorlage für den Heiz- und Absenkbetrieb dient. Abweichungen von den Vorhersagen sind möglich.

A.2. Anwendungsstrang

Im Anwendungsstrang kam das en:key-System vollständig zum Einsatz. Die Messungen des Raumsensors führten zu der Erstellung der Heizprofile. Diese wurden an die Ventilregler des jeweiligen Raumes übertragen und steuerten den Absenkbetrieb des Systems.

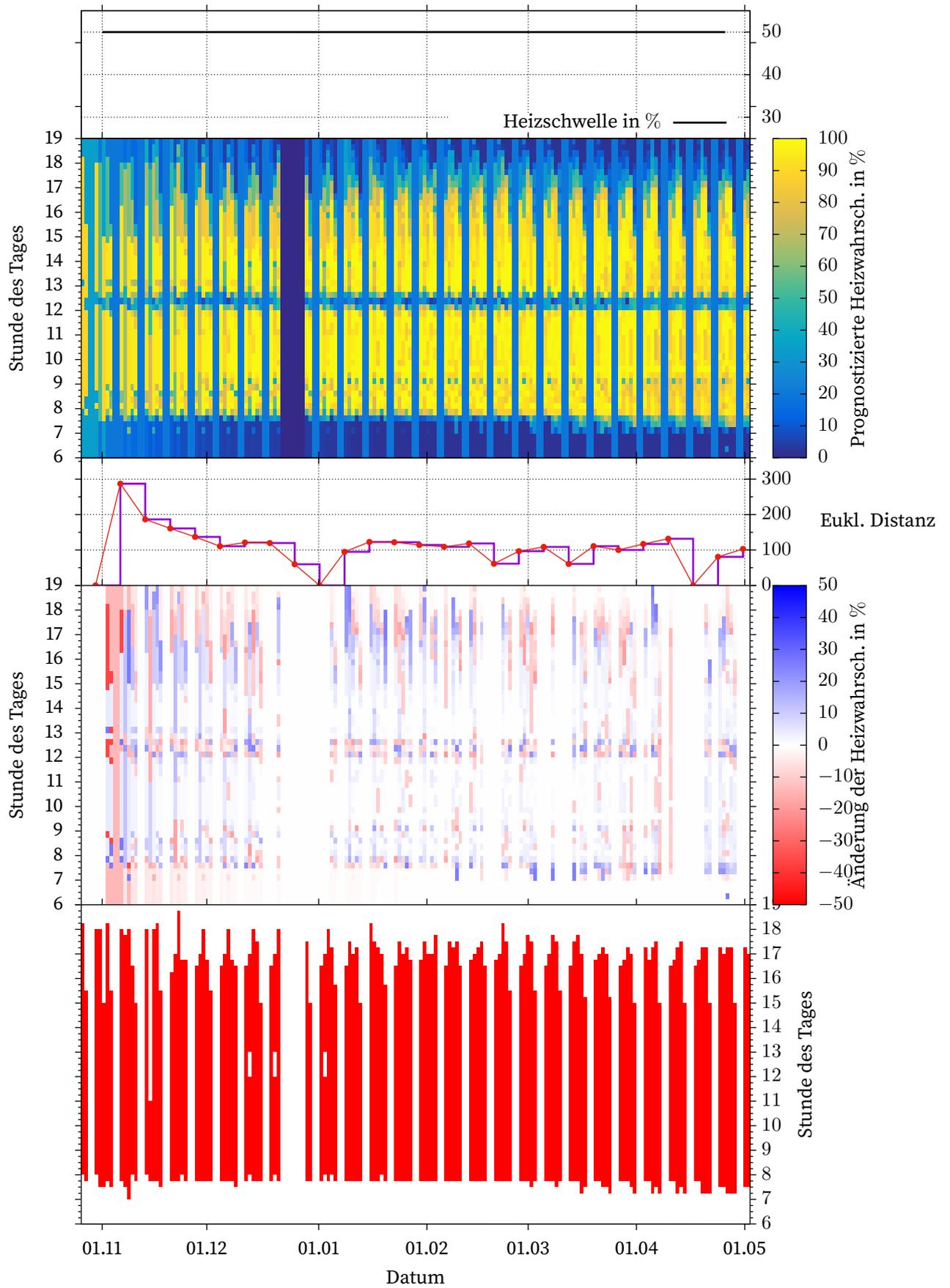


Abbildung A.1.: Daten des Raums R1 (Anwendungsstrang)

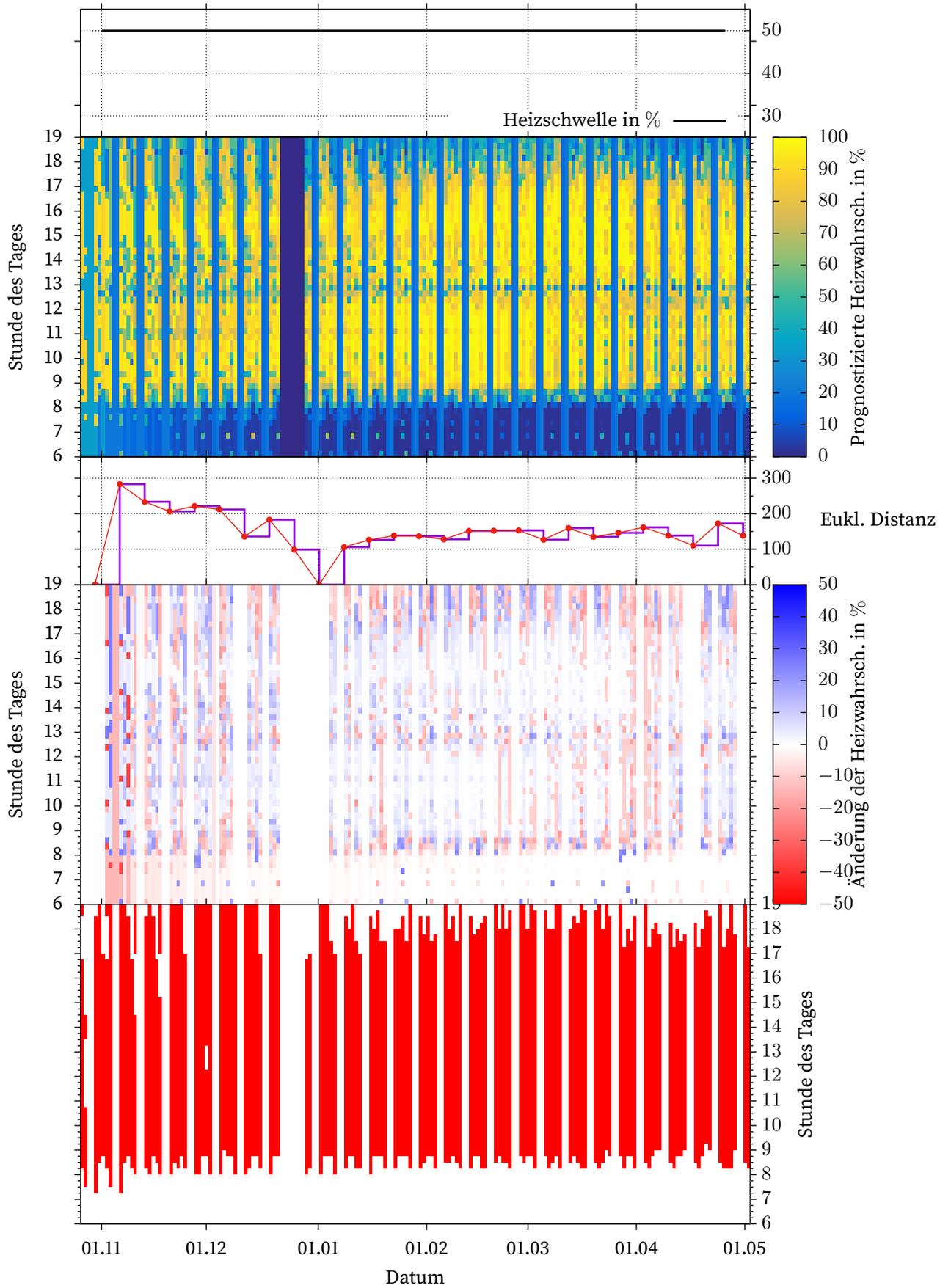


Abbildung A.2.: Daten des Raums R2 (Anwendungsstrang)

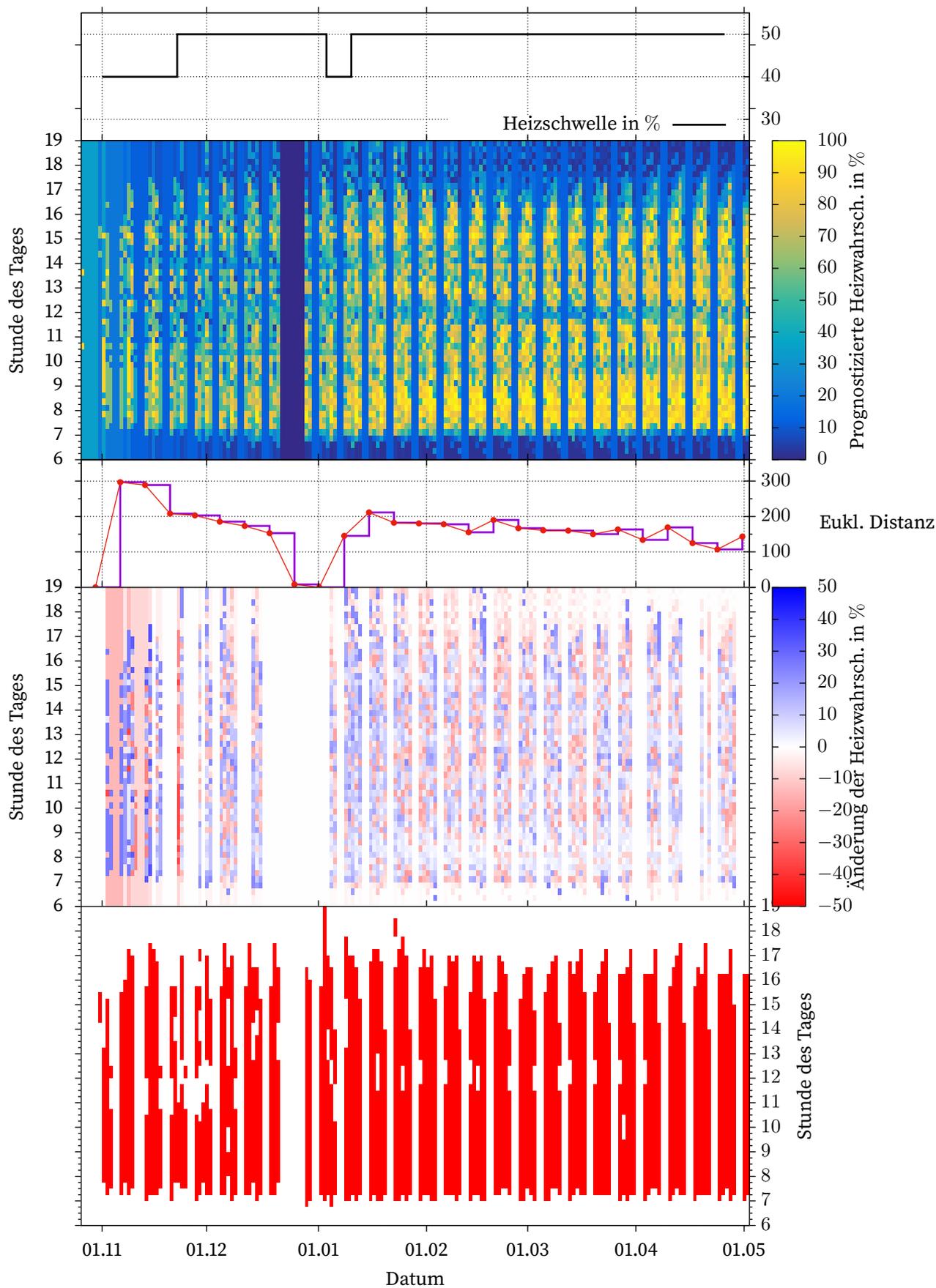


Abbildung A.3.: Daten des Raums R3 (Anwendungsstrang)

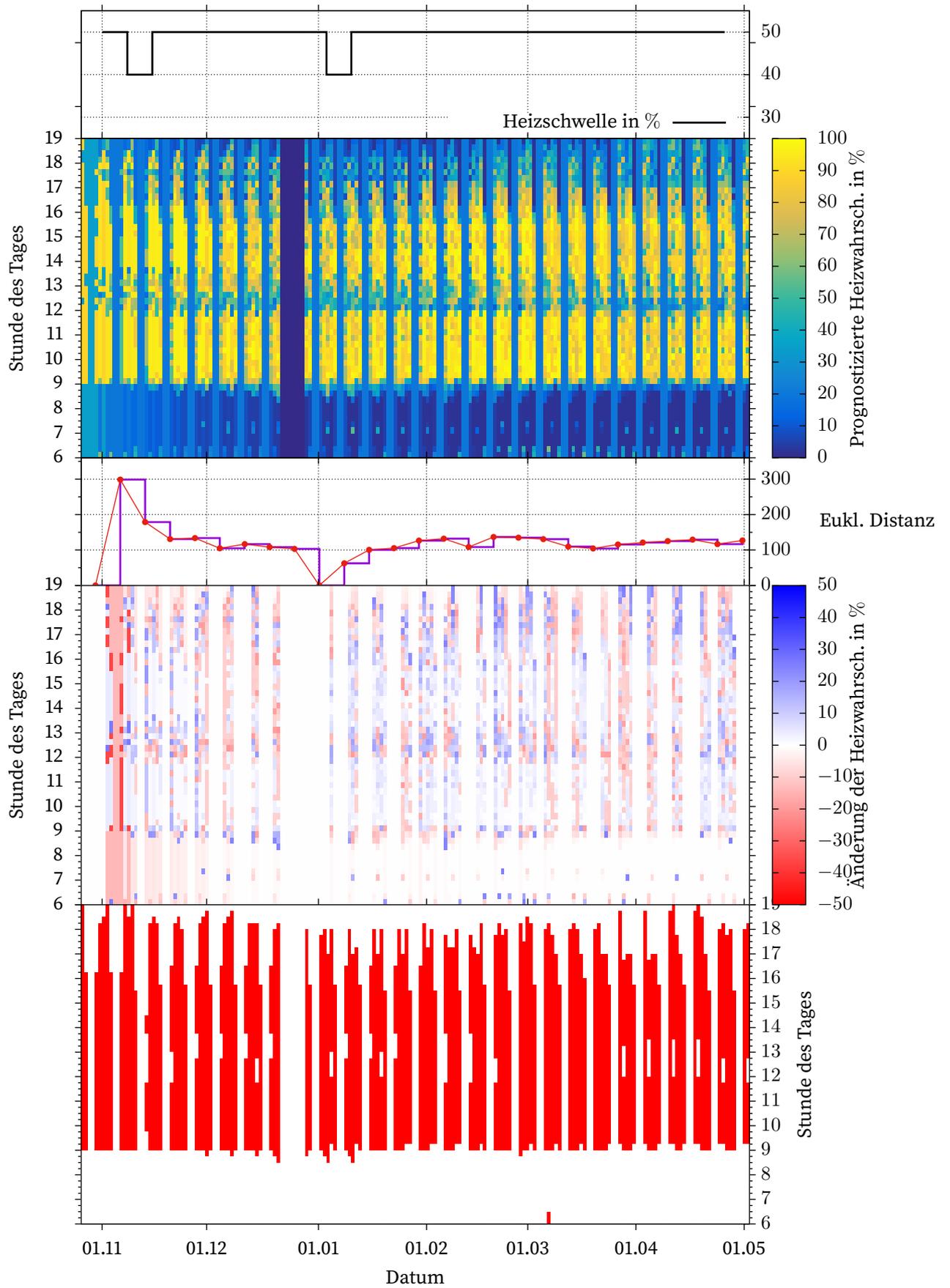


Abbildung A.4.: Daten des Raums R4 (Anwendungsstrang)

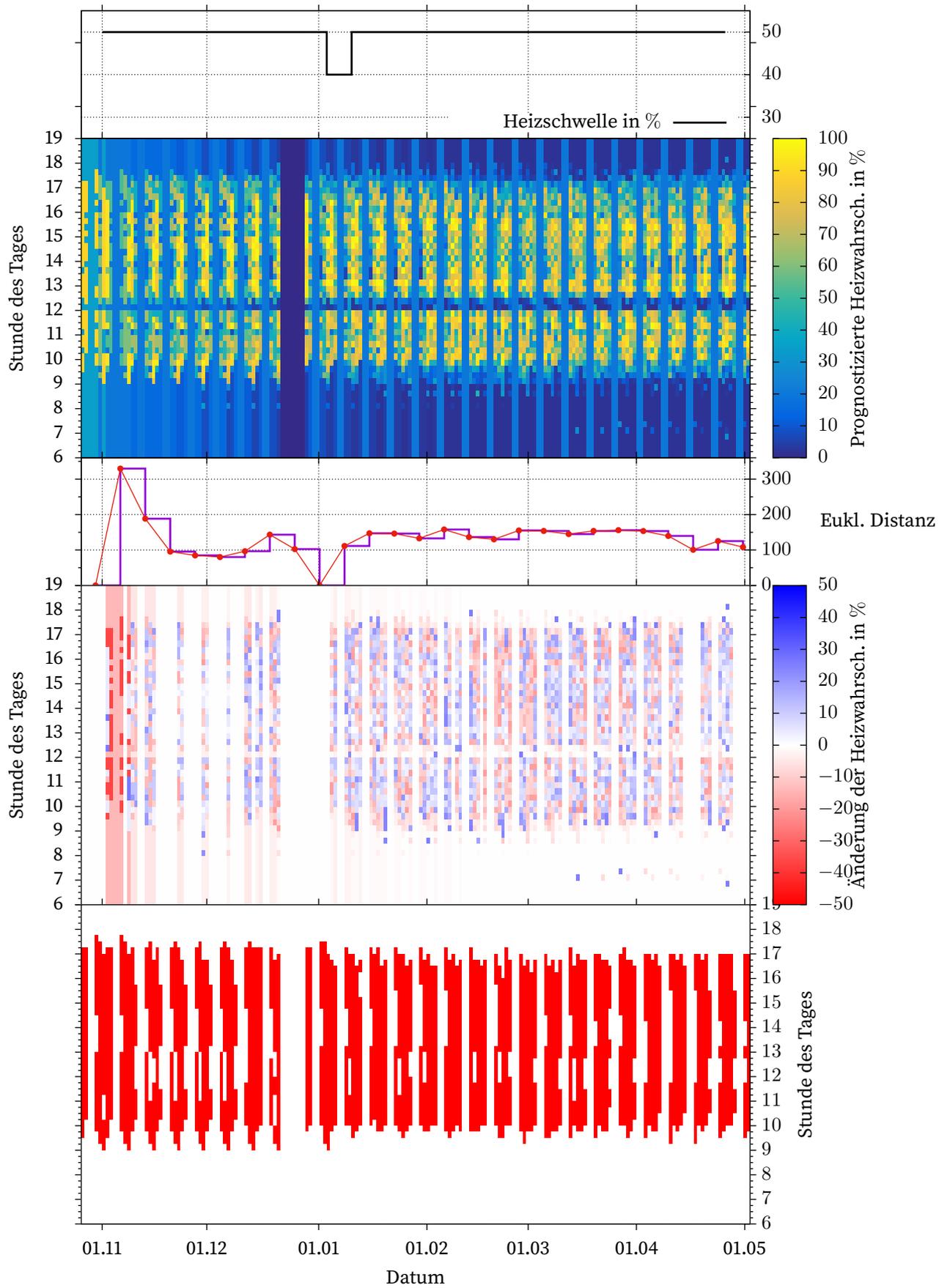


Abbildung A.5.: Daten des Raums R5 (Anwendungsstrang)

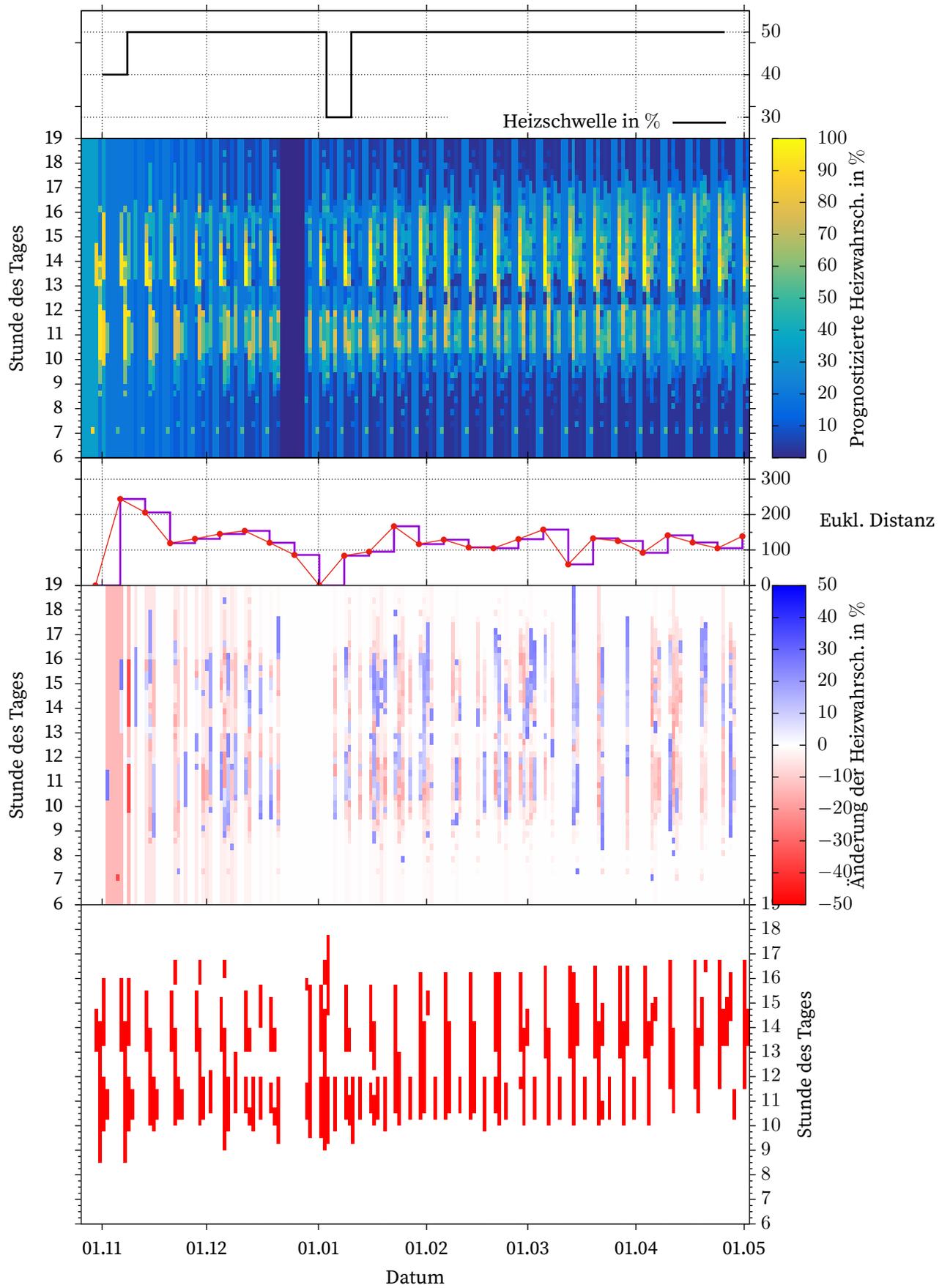


Abbildung A.6.: Daten des Raums R6 (Anwendungsstrang)

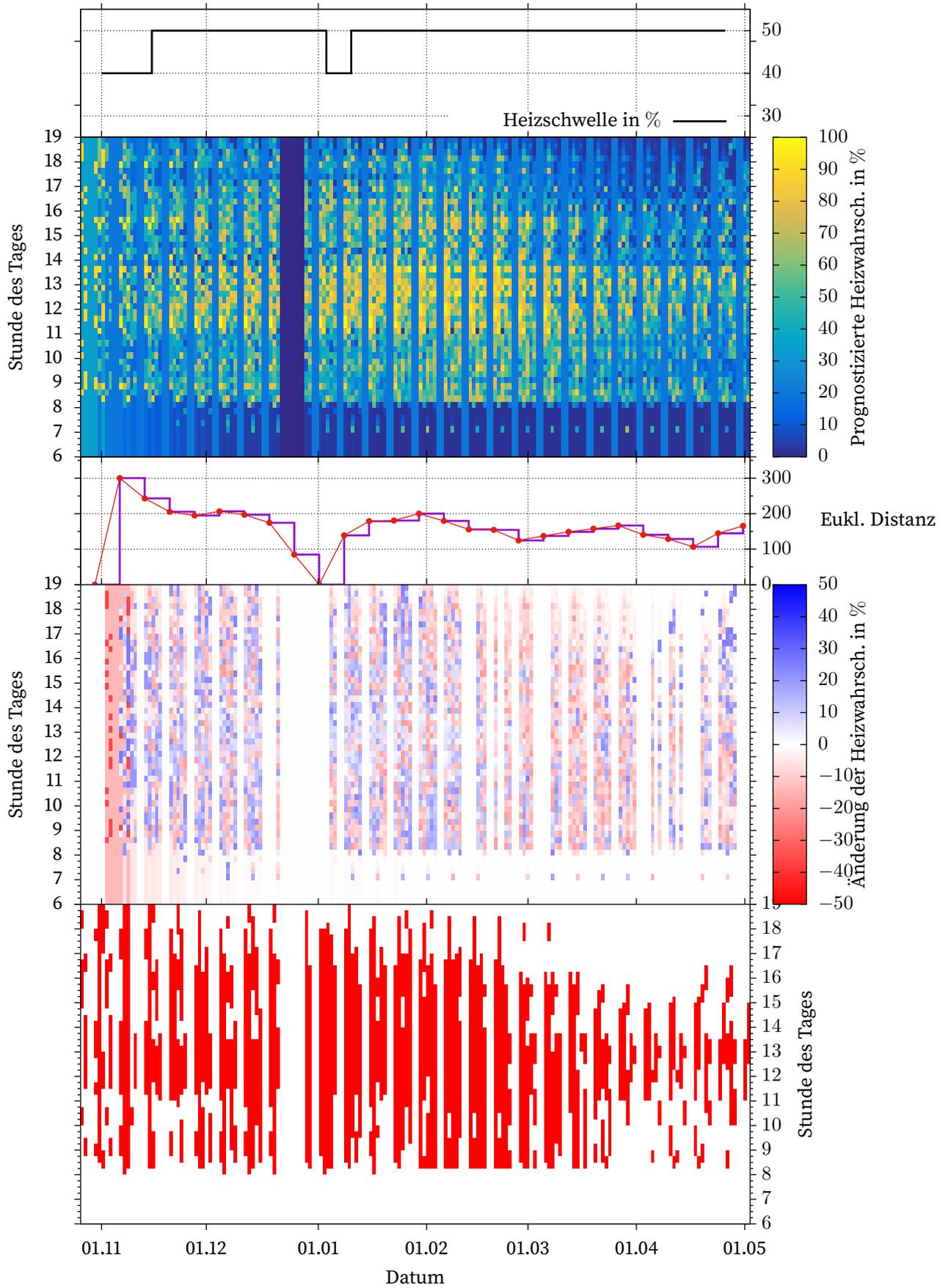


Abbildung A.7.: Daten des Raums R7 (Anwendungsstrang)

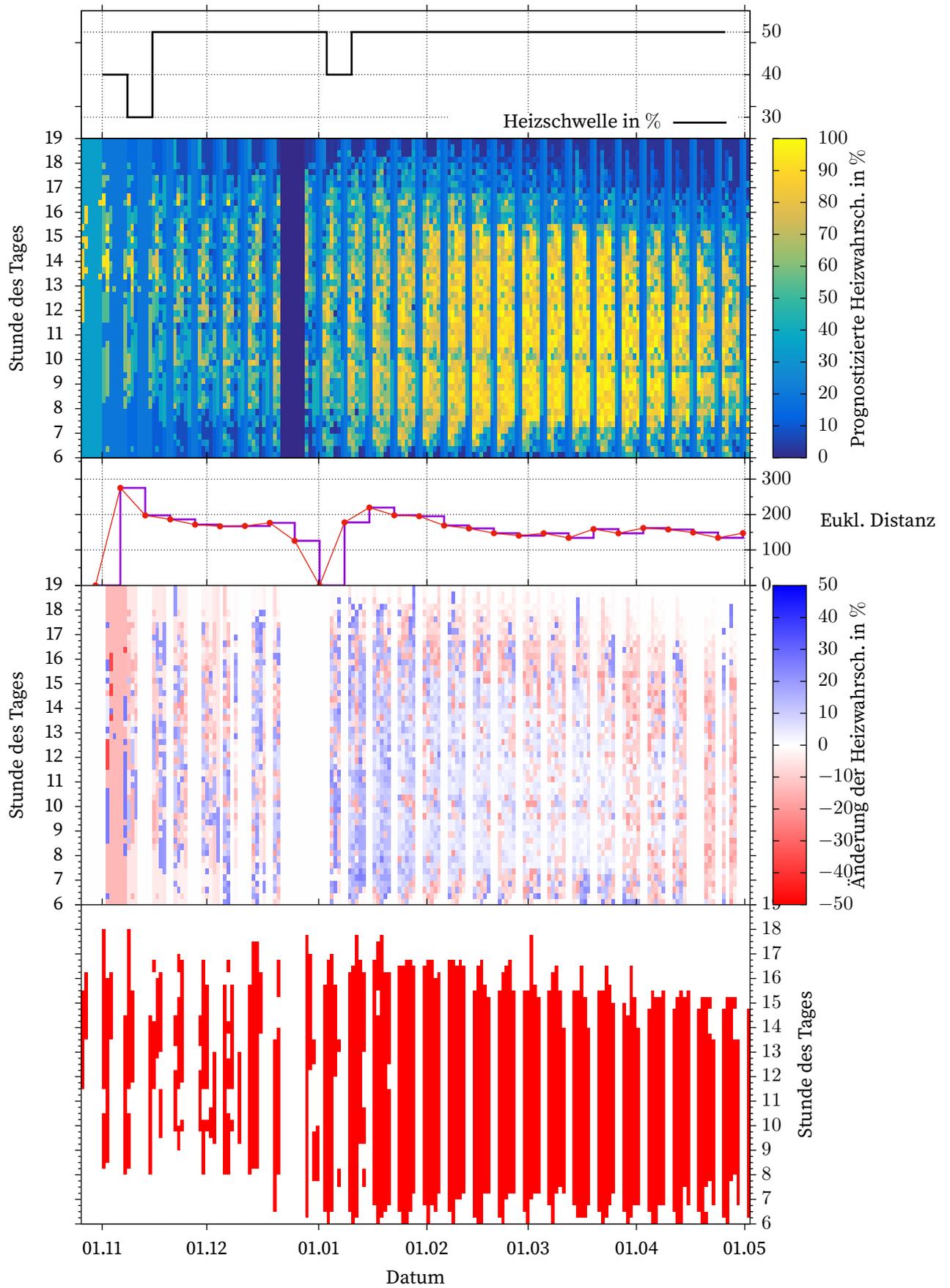


Abbildung A.8.: Daten des Raums R8 (Anwendungsstrang)

A.3. Referenzstrang

Im Referenzstrang wurden lediglich die Raumsensoren zur Bestimmung der Anwesenheitswahrscheinlichkeiten installiert. Die weitere Verwendung des resultierenden Heizprofils wurde unterlassen.

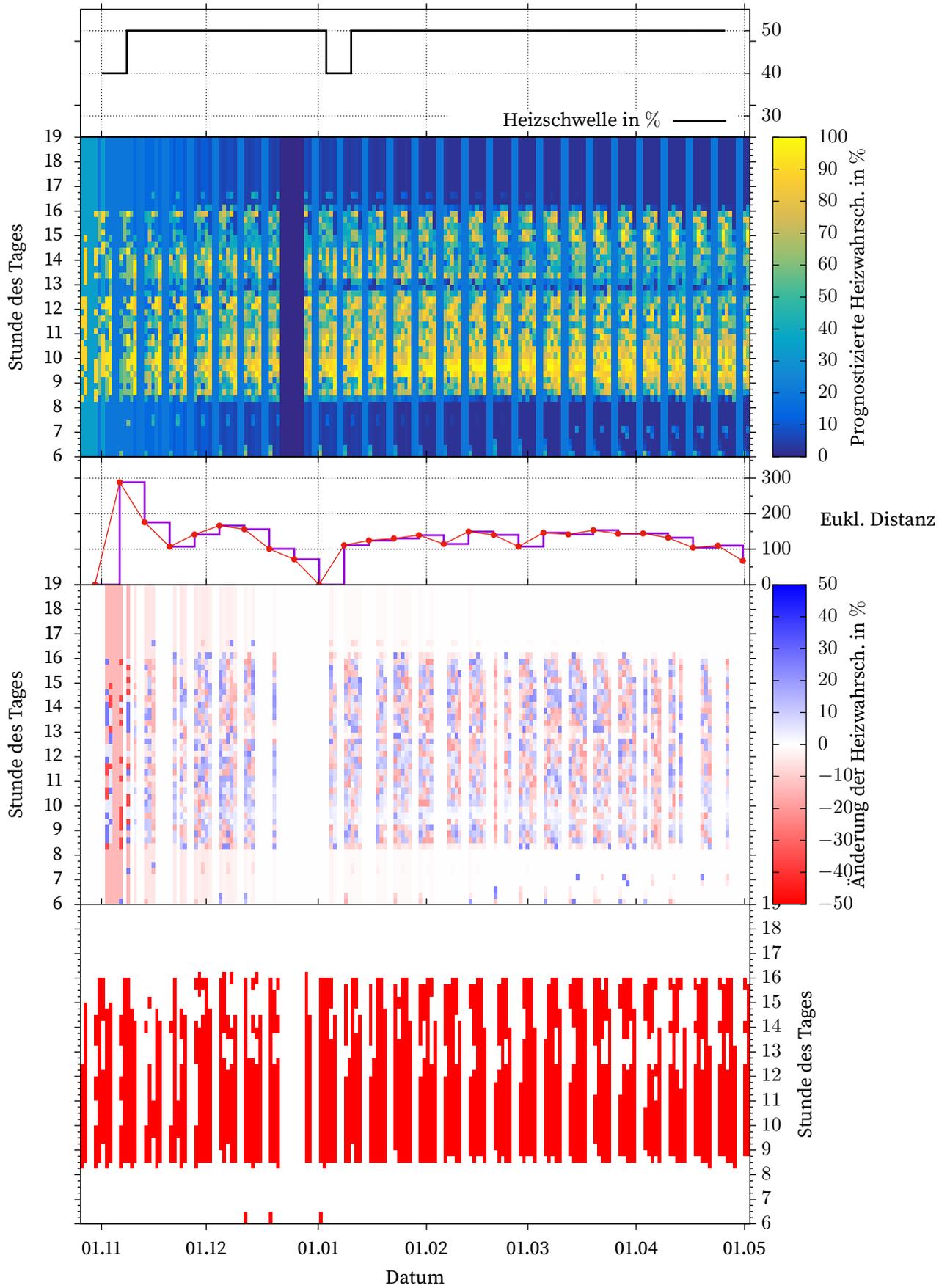


Abbildung A.9.: Daten des Raums R9 (Referenzstrang)

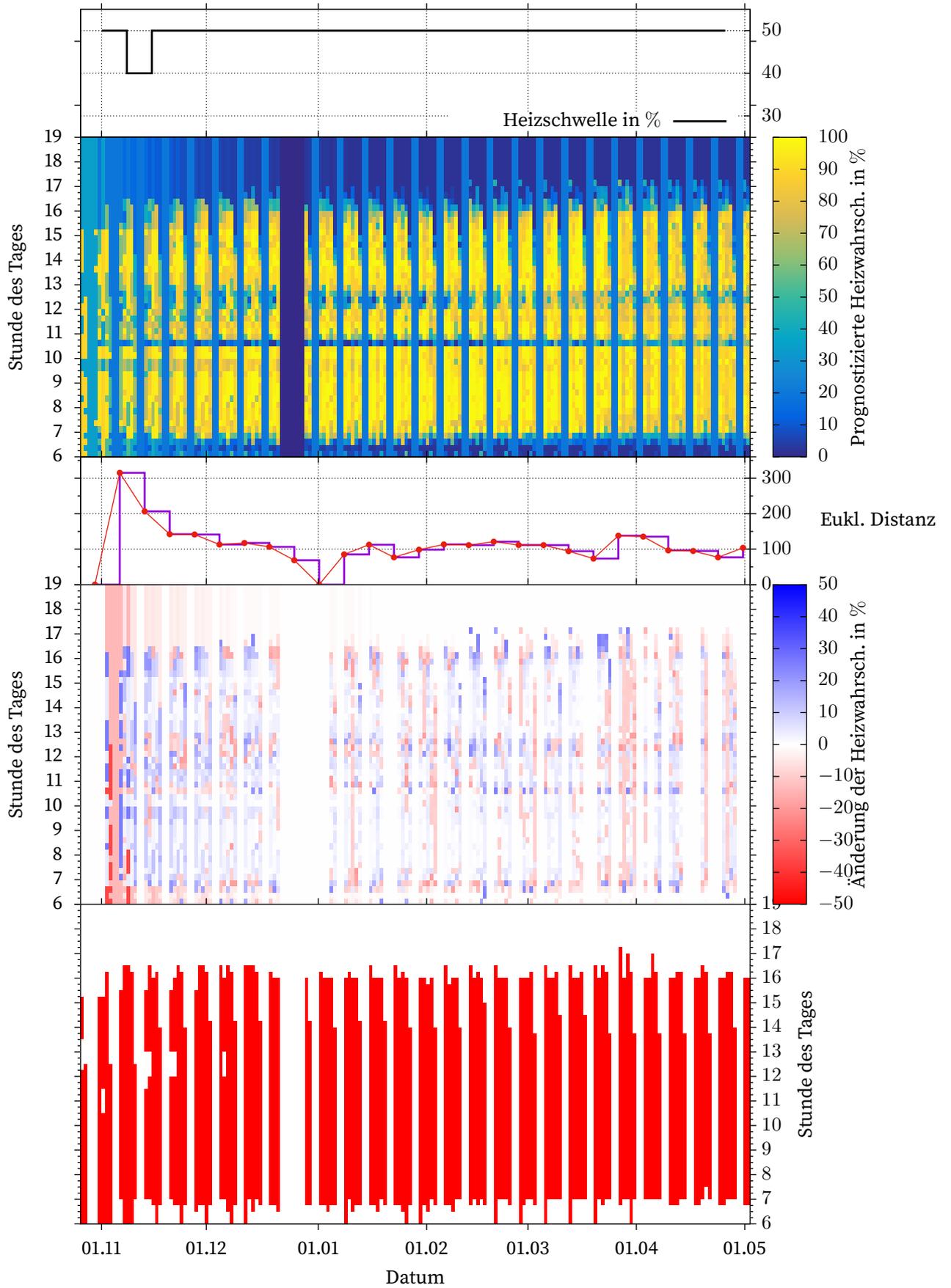


Abbildung A.10.: Daten des Raums R10 (Referenzstrang)

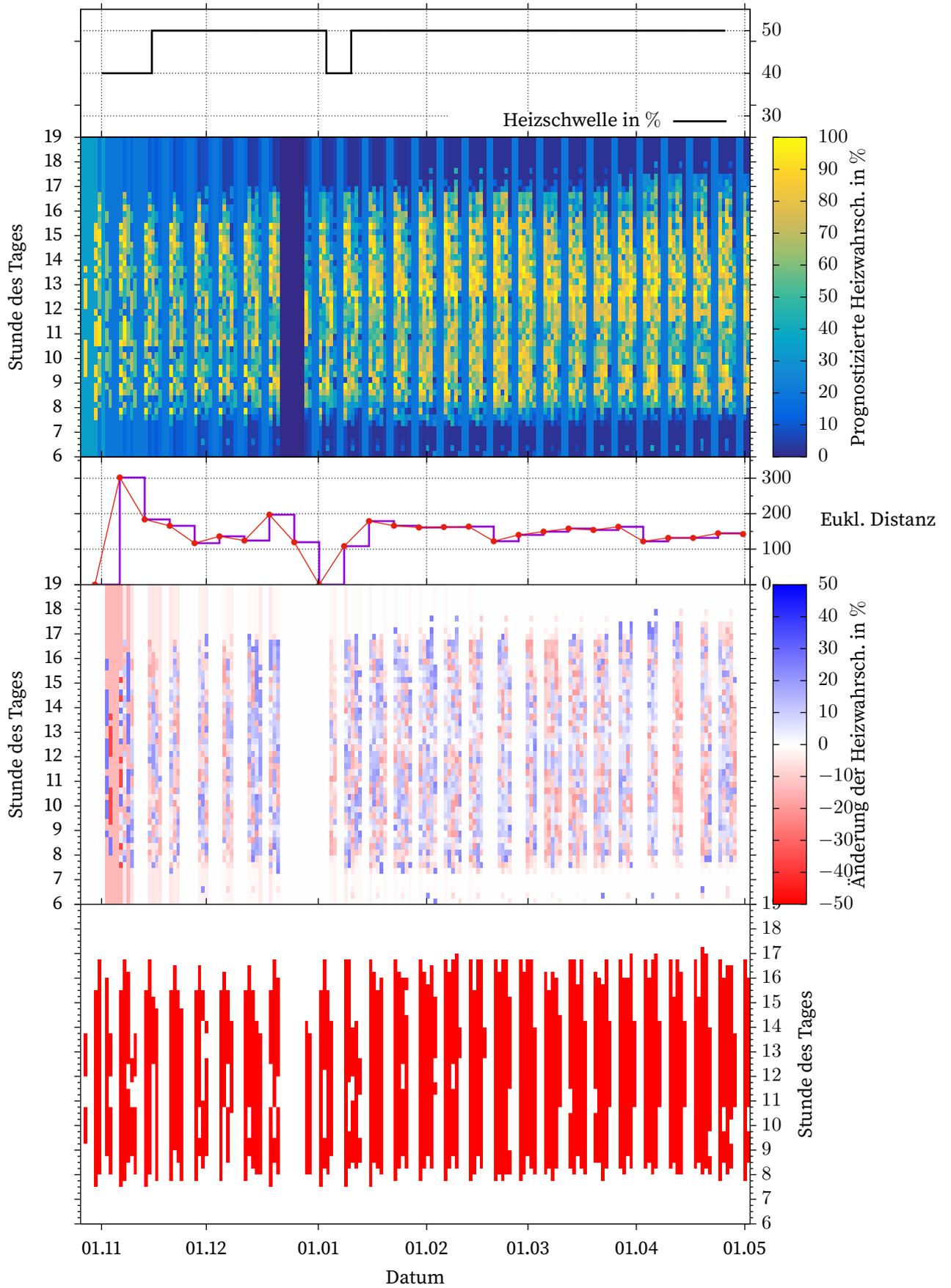


Abbildung A.11.: Daten des Raums R11 (Referenzstrang)

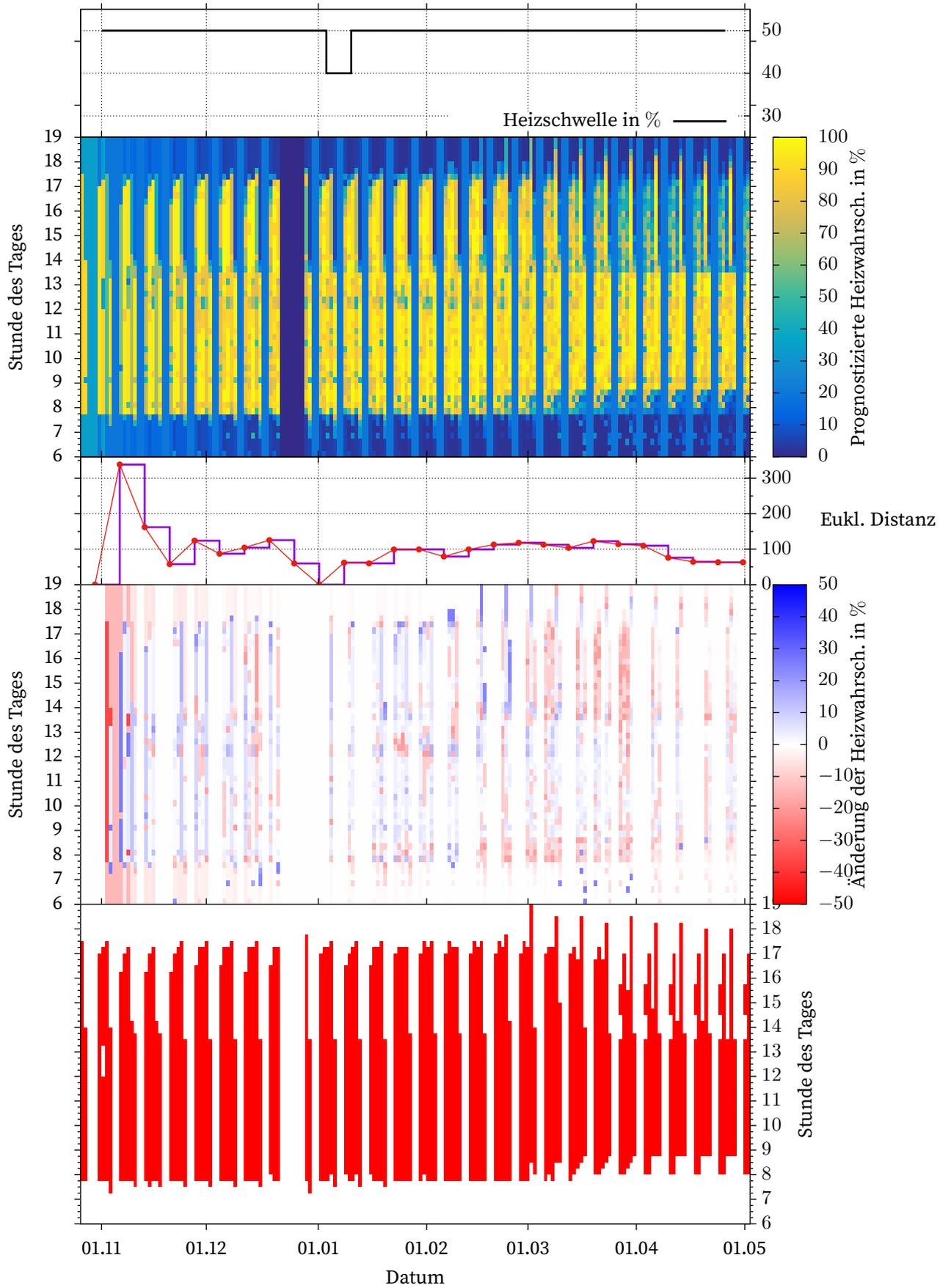


Abbildung A.12.: Daten des Raums R12 (Referenzstrang)

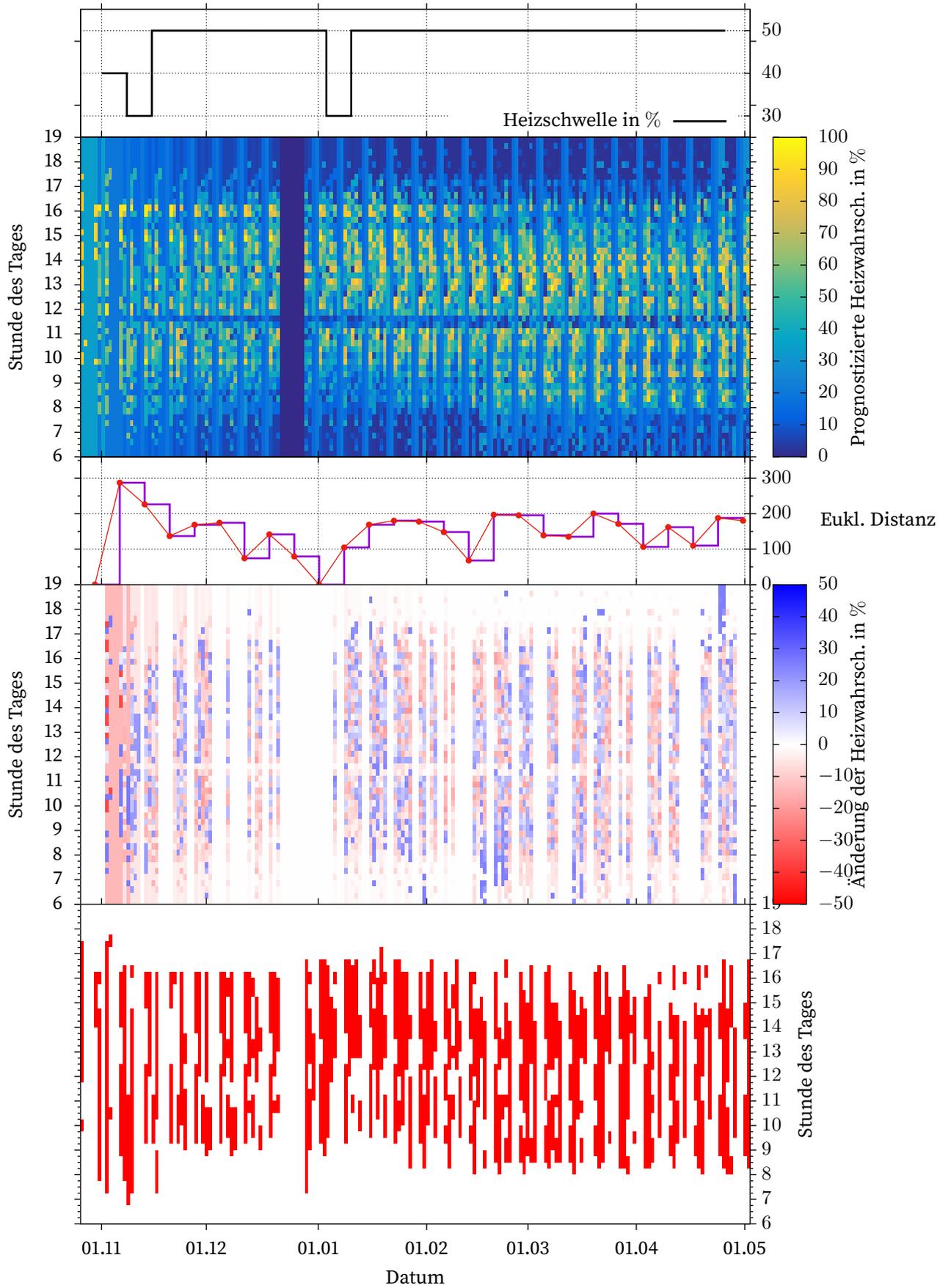


Abbildung A.13.: Daten des Raums R13 (Referenzstrang)

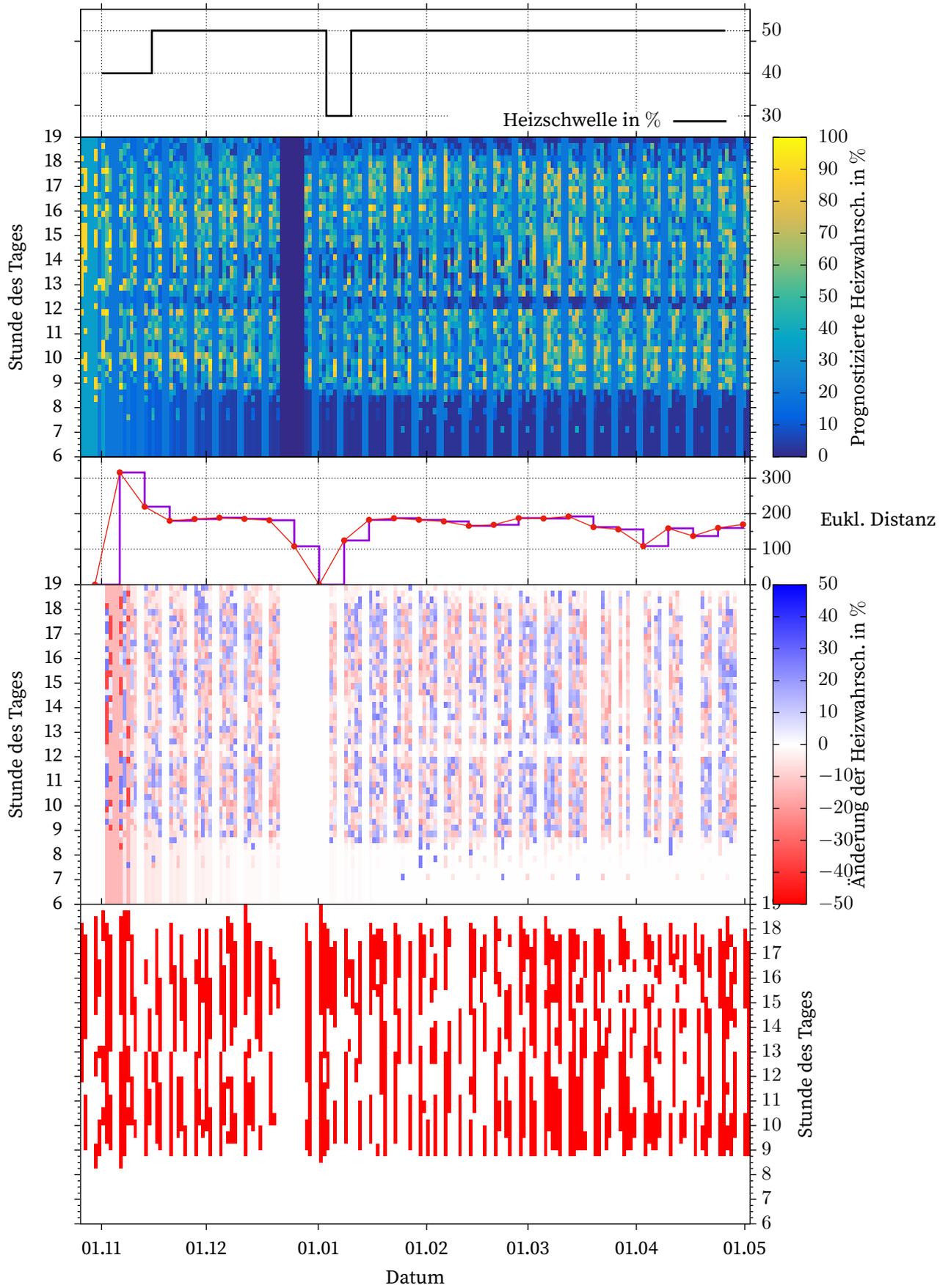


Abbildung A.14.: Daten des Raums R14 (Referenzstrang)

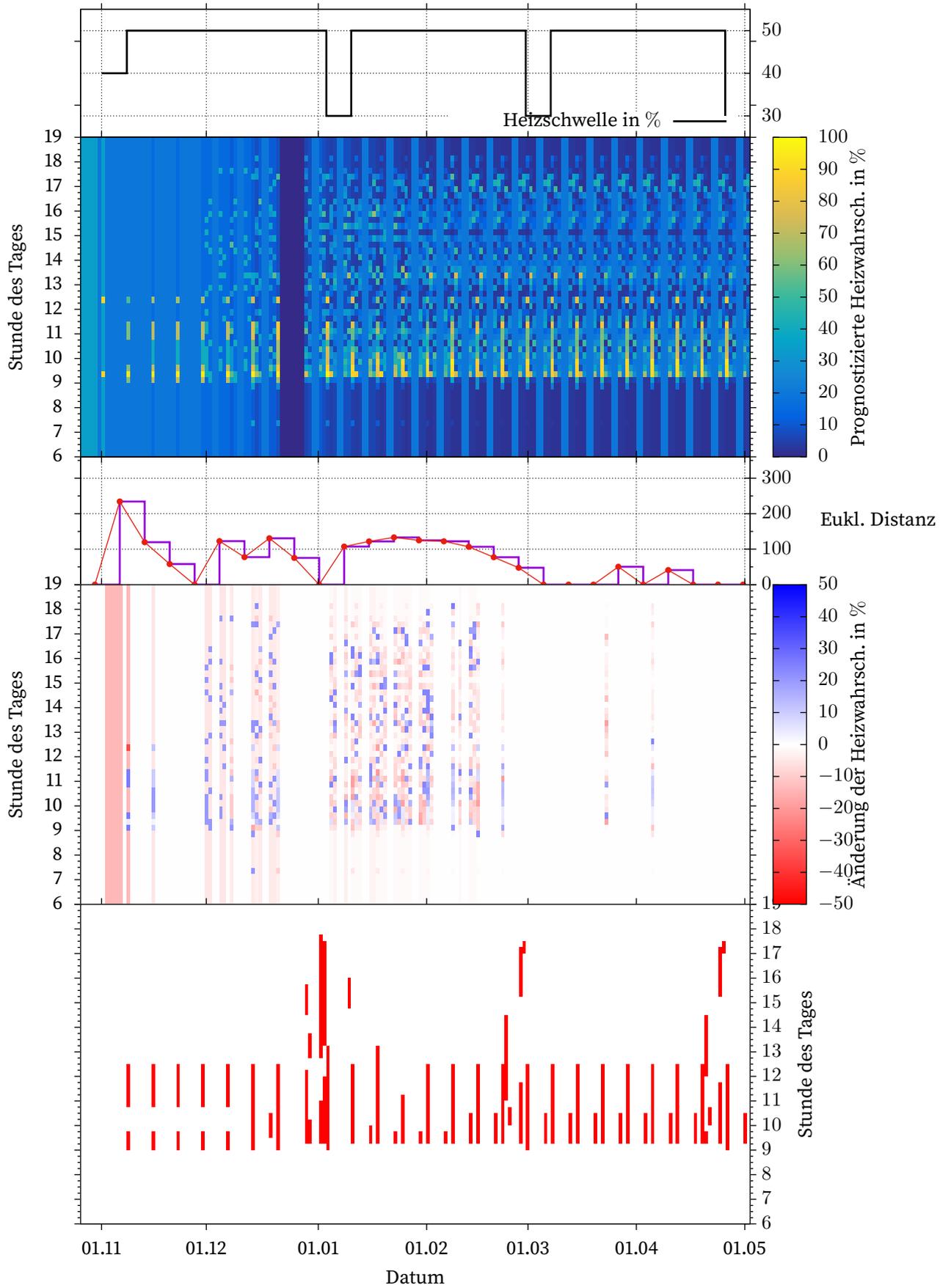


Abbildung A.15.: Daten des Raums R15 (Referenzstrang)

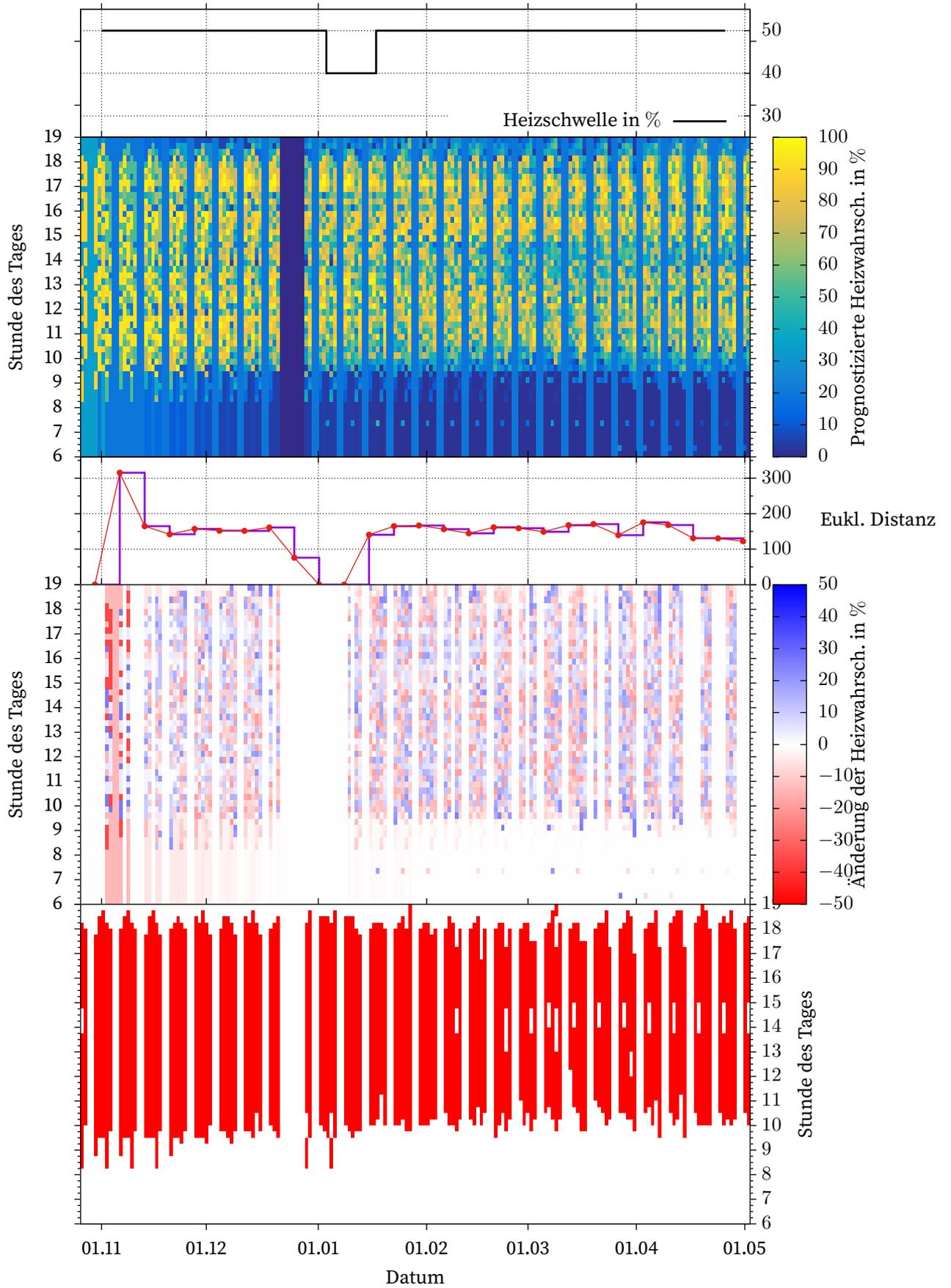


Abbildung A.16.: Daten des Raums R16 (Referenzstrang)

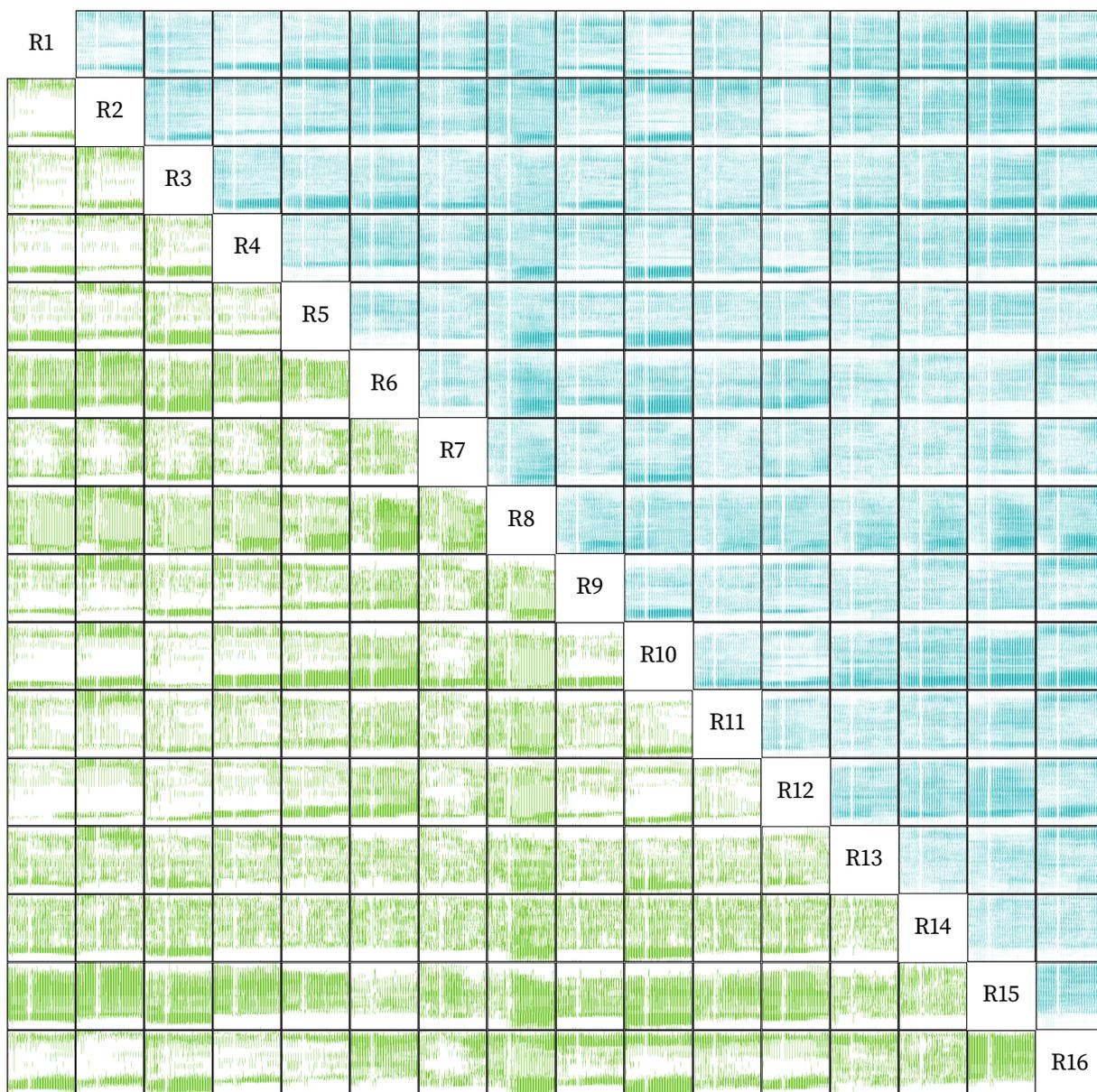


Abbildung A.17.: Matrix-Vergleichs-Plot von allen sechzehn Räumlichkeiten im Tageszeitfenster 06:00...19:00 Uhr über die gesamte Messperiode (vgl. Darstellungen aus vorherigen Abschnitten A.2 und A.3). Oberhalb und rechts der Beschriftungsdiagonale werden die Heizwahrscheinlichkeiten der Räume miteinander verglichen (Skala stufenlos von 0 % (weiß) bis 100 % (türkis)). Unterhalb und links der Beschriftungsdiagonale findet sich der Vergleich der Heizprofile (Skala mit den distinkten Werten 0 (weiß) und 1 (grün)).

In Abbildung A.17 ist eine Übersicht der Heizwahrscheinlichkeiten und Heizprofile für alle Räumlichkeiten als Matrix-Plot visualisiert. Diese Darstellung ermöglicht den Vergleich der einzelnen Räume untereinander. Im oberen Bereich lässt sich erkennen, wie stark sich die Heizwahrscheinlichkeiten der einzelnen Räume ähneln. Es lässt sich beispielsweise für das Raumpaar R1/R10 erkennen, dass die Heizwahrscheinlichkeiten vormittags, zur Mittagspause

und nachmittags in einem sehr ähnlichen Bereich liegen, wodurch sich weiße Bereiche ergeben, die eine kleine Unterschiedlichkeit bedeuten. Sieht man sich parallel dazu den Vergleich der Heizprofile dieses Raumpaars an, so wird das Abbild der Heizwahrscheinlichkeit bestätigt.

Mit dieser Raumübersicht zur Kernarbeitszeit – die zum ausgiebigen Vergleich einlädt – soll vor allem eine Aussage getroffen werden: Allein anhand der Nutzungsart eines Raumes lässt sich keine Aussage zu Nutzungszeiten und daraus resultierenden Heizzeiten generieren.

A.4. Inhalt LOG-Dateien

Die ASCII-Dateien, die aus den Raumsensoren des en:key-Systems ausgelesen werden können, sind folgendermaßen aufgebaut:

```

1 DiAna-Dateilog
2 RPW V0.11.6
3 kompiliert: Oct  7 2015 11:35:56
4 Uhrzeit(intern) :    Mi,18.01.2017 06:25:58          # Uhrzeit zum Auslesezeitpunkt
5 Uhrzeit(RTC)   :    Mi,18.01.2017 06:25:58
6 Fehlermeldung  : 0x02
7 RPW Reset      : Mo,24.10.2016 09:57
8 Profil-Init    : Mo,24.10.2016 09:57
9 Dolphin-App    : K&P_Gateway_ZSV
10 Version       : 0025
11 Enoclean-ID: 00852E3A                               # ID zur Zuordnung
12 Isttemp. : 23.4 C: 22.0 E: 18.0 DC:3
13 MD10 Status   : 0xF011
14 MD10-Slaves  ID      Data
15 Slave 0 : 0x018582ED 0x00000000
16 Slave 1 : 0xFFFFFFFF 0x00000000
17 Slave 2 : 0xFFFFFFFF 0x00000000
18 Slave 3 : 0xFFFFFFFF 0x00000000
19 Profilstatusbyte:0x00-00-50 U00
20 Profilspeicher :                                     RAM:
21 00:00 Mo:00 Di:02 Mi:00 Do:00 Fr:00 Sa:00 So:00 Mi:00 # Datenblock der vorherigen Woche
22 00:15 Mo:00 Di:00 Mi:00 Do:00 Fr:00 Sa:00 So:00 Mi:00
23 00:30 Mo:00 Di:02 Mi:00 Do:00 Fr:00 Sa:00 So:00 Mi:00
24 00:45 Mo:00 Di:00 Mi:00 Do:00 Fr:08 Sa:00 So:00 Mi:00
25 01:00 Mo:00 Di:00 Mi:00 Do:00 Fr:00 Sa:00 So:00 Mi:00
26 01:15 Mo:00 Di:00 Mi:00 Do:00 Fr:00 Sa:00 So:00 Mi:00
27 01:30 Mo:00 Di:00 Mi:00 Do:00 Fr:00 Sa:00 So:00 Mi:00
28 01:45 Mo:00 Di:00 Mi:00 Do:00 Fr:00 Sa:00 So:00 Mi:00
29 02:00 Mo:00 Di:00 Mi:00 Do:00 Fr:00 Sa:00 So:00 Mi:00
30 02:15 Mo:00 Di:00 Mi:00 Do:00 Fr:00 Sa:00 So:00 Mi:00
31 02:30 Mo:00 Di:00 Mi:00 Do:00 Fr:00 Sa:00 So:00 Mi:00
32 02:45 Mo:00 Di:00 Mi:00 Do:00 Fr:00 Sa:00 So:00 Mi:00
33 03:00 Mo:00 Di:00 Mi:00 Do:00 Fr:00 Sa:00 So:00 Mi:00

```

34	03:15	Mo:00	Di:00	Mi:00	Do:00	Fr:00	Sa:00	So:00	Mi:00
35	03:30	Mo:00	Di:00	Mi:00	Do:00	Fr:00	Sa:00	So:00	Mi:00
36	03:45	Mo:00	Di:00	Mi:00	Do:00	Fr:00	Sa:00	So:00	Mi:00
37	04:00	Mo:00	Di:00	Mi:00	Do:00	Fr:10	Sa:00	So:00	Mi:00
38	04:15	Mo:00	Di:00	Mi:00	Do:00	Fr:00	Sa:00	So:00	Mi:00
39	04:30	Mo:00	Di:00	Mi:00	Do:00	Fr:00	Sa:00	So:00	Mi:00
40	04:45	Mo:11	Di:47	Mi:00	Do:00	Fr:00	Sa:00	So:00	Mi:00
41	05:00	Mo:00	Di:26	Mi:00	Do:00	Fr:00	Sa:00	So:00	Mi:00
42	05:15	Mo:00	Di:41	Mi:00	Do:00	Fr:33	Sa:00	So:00	Mi:00
43	05:30	Mo:00	Di:10	Mi:00	Do:00	Fr:00	Sa:00	So:00	Mi:00
44	05:45	Mo:00	Di:04	Mi:00	Do:00	Fr:00	Sa:00	So:00	Mi:00
45	06:00	Mo:06	Di:02	Mi:02	Do:02	Fr:05	Sa:20	So:20	Mi:02
46	06:15	Mo:06	Di:02	Mi:16	Do:02	Fr:05	Sa:20	So:20	Mi:16
47	06:30	Mo:06	Di:02	Mi:06	Do:02	Fr:05	Sa:20	So:20	Mi:06
48	06:45	Mo:06	Di:02	Mi:02	Do:02	Fr:05	Sa:20	So:20	Mi:02
49	07:00	Mo:06	Di:02	Mi:02	Do:02	Fr:05	Sa:20	So:20	Mi:02
50	07:15	Mo:17	Di:02	Mi:13	Do:02	Fr:05	Sa:20	So:20	Mi:13
51	07:30	Mo:50	Di:20	Mi:15	Do:06	Fr:05	Sa:20	So:20	Mi:15
52	07:45	Mo:83	Di:25	Mi:45	Do:10	Fr:05	Sa:20	So:20	Mi:45
53	08:00	Mo:39	Di:25	Mi:23	Do:36	Fr:25	Sa:20	So:20	Mi:23
54	08:15	Mo:47	Di:45	Mi:54	Do:58	Fr:25	Sa:20	So:20	Mi:54
55	08:30	Mo:74	Di:80	Mi:43	Do:60	Fr:50	Sa:20	So:20	Mi:43
56	08:45	Mo:98	Di:48	Mi:73	Do:63	Fr:30	Sa:20	So:20	Mi:73
57	09:00	Mo:06	Di:80	Mi:86	Do:42	Fr:05	Sa:20	So:20	Mi:86
58	09:15	Mo:83	Di:72	Mi:40	Do:45	Fr:67	Sa:20	So:20	Mi:40
59	09:30	Mo:77	Di:38	Mi:86	Do:50	Fr:38	Sa:20	So:20	Mi:86
60	09:45	Mo:64	Di:27	Mi:81	Do:78	Fr:23	Sa:20	So:20	Mi:81
61	10:00	Mo:88	Di:33	Mi:53	Do:45	Fr:48	Sa:20	So:20	Mi:53
62	10:15	Mo:76	Di:50	Mi:34	Do:38	Fr:48	Sa:20	So:20	Mi:34
63	10:30	Mo:59	Di:43	Mi:77	Do:56	Fr:38	Sa:20	So:20	Mi:77
64	10:45	Mo:47	Di:54	Mi:50	Do:59	Fr:05	Sa:20	So:20	Mi:50
65	11:00	Mo:53	Di:47	Mi:58	Do:69	Fr:38	Sa:20	So:20	Mi:58
66	11:15	Mo:72	Di:47	Mi:40	Do:93	Fr:54	Sa:20	So:20	Mi:40
67	11:30	Mo:61	Di:62	Mi:57	Do:81	Fr:29	Sa:20	So:20	Mi:57
68	11:45	Mo:72	Di:66	Mi:60	Do:78	Fr:54	Sa:20	So:20	Mi:60
69	12:00	Mo:61	Di:66	Mi:65	Do:96	Fr:48	Sa:20	So:20	Mi:65
70	12:15	Mo:50	Di:90	Mi:29	Do:76	Fr:23	Sa:20	So:20	Mi:29
71	12:30	Mo:88	Di:51	Mi:95	Do:93	Fr:67	Sa:20	So:20	Mi:95
72	12:45	Mo:98	Di:66	Mi:80	Do:44	Fr:48	Sa:20	So:20	Mi:80
73	13:00	Mo:93	Di:70	Mi:80	Do:70	Fr:38	Sa:20	So:20	Mi:80
74	13:15	Mo:88	Di:88	Mi:80	Do:63	Fr:15	Sa:20	So:20	Mi:80
75	13:30	Mo:87	Di:86	Mi:60	Do:47	Fr:48	Sa:20	So:20	Mi:60
76	13:45	Mo:69	Di:75	Mi:68	Do:48	Fr:30	Sa:20	So:20	Mi:68
77	14:00	Mo:90	Di:47	Mi:49	Do:75	Fr:15	Sa:20	So:20	Mi:49
78	14:15	Mo:53	Di:95	Mi:54	Do:17	Fr:40	Sa:20	So:20	Mi:54
79	14:30	Mo:88	Di:90	Mi:54	Do:45	Fr:15	Sa:20	So:20	Mi:54
80	14:45	Mo:93	Di:88	Mi:40	Do:38	Fr:05	Sa:20	So:20	Mi:40
81	15:00	Mo:72	Di:50	Mi:23	Do:38	Fr:15	Sa:20	So:20	Mi:23
82	15:15	Mo:98	Di:77	Mi:54	Do:38	Fr:30	Sa:20	So:20	Mi:54
83	15:30	Mo:64	Di:54	Mi:47	Do:17	Fr:15	Sa:20	So:20	Mi:47
84	15:45	Mo:20	Di:49	Mi:47	Do:42	Fr:05	Sa:20	So:20	Mi:47

85	16:00	Mo:64	Di:73	Mi:15	Do:44	Fr:05	Sa:20	So:20	Mi:15
86	16:15	Mo:64	Di:30	Mi:20	Do:38	Fr:05	Sa:20	So:20	Mi:20
87	16:30	Mo:64	Di:43	Mi:13	Do:44	Fr:05	Sa:20	So:20	Mi:13
88	16:45	Mo:06	Di:35	Mi:02	Do:33	Fr:05	Sa:20	So:20	Mi:02
89	17:00	Mo:06	Di:02	Mi:02	Do:02	Fr:05	Sa:20	So:20	Mi:02
90	17:15	Mo:06	Di:02	Mi:02	Do:02	Fr:05	Sa:20	So:20	Mi:02
91	17:30	Mo:06	Di:02	Mi:02	Do:02	Fr:05	Sa:20	So:20	Mi:02
92	17:45	Mo:06	Di:02	Mi:02	Do:02	Fr:05	Sa:20	So:20	Mi:02
93	18:00	Mo:06	Di:02	Mi:02	Do:02	Fr:05	Sa:20	So:20	Mi:02
94	18:15	Mo:06	Di:02	Mi:02	Do:02	Fr:05	Sa:20	So:20	Mi:02
95	18:30	Mo:06	Di:02	Mi:02	Do:02	Fr:05	Sa:20	So:20	Mi:02
96	18:45	Mo:06	Di:02	Mi:02	Do:02	Fr:05	Sa:20	So:20	Mi:02
97	19:00	Mo:06	Di:02	Mi:02	Do:02	Fr:05	Sa:20	So:20	Mi:02
98	19:15	Mo:06	Di:02	Mi:02	Do:02	Fr:05	Sa:20	So:20	Mi:02
99	19:30	Mo:06	Di:02	Mi:02	Do:02	Fr:05	Sa:20	So:20	Mi:02
100	19:45	Mo:06	Di:02	Mi:02	Do:02	Fr:05	Sa:20	So:20	Mi:02
101	20:00	Mo:00	Di:00	Mi:00	Do:00	Fr:00	Sa:00	So:00	Mi:00
102	20:15	Mo:00	Di:00	Mi:00	Do:00	Fr:00	Sa:00	So:00	Mi:00
103	20:30	Mo:00	Di:00	Mi:00	Do:00	Fr:00	Sa:00	So:00	Mi:00
104	20:45	Mo:00	Di:00	Mi:00	Do:00	Fr:00	Sa:00	So:00	Mi:00
105	21:00	Mo:00	Di:00	Mi:00	Do:00	Fr:00	Sa:00	So:00	Mi:00
106	21:15	Mo:00	Di:00	Mi:00	Do:00	Fr:00	Sa:00	So:00	Mi:00
107	21:30	Mo:00	Di:00	Mi:00	Do:00	Fr:00	Sa:00	So:00	Mi:00
108	21:45	Mo:00	Di:00	Mi:00	Do:00	Fr:00	Sa:00	So:00	Mi:00
109	22:00	Mo:00	Di:00	Mi:00	Do:00	Fr:00	Sa:00	So:00	Mi:00
110	22:15	Mo:00	Di:00	Mi:00	Do:00	Fr:00	Sa:00	So:00	Mi:00
111	22:30	Mo:00	Di:00	Mi:00	Do:00	Fr:00	Sa:00	So:00	Mi:00
112	22:45	Mo:00	Di:00	Mi:00	Do:00	Fr:00	Sa:00	So:00	Mi:00
113	23:00	Mo:00	Di:00	Mi:00	Do:00	Fr:00	Sa:00	So:00	Mi:00
114	23:15	Mo:00	Di:00	Mi:00	Do:00	Fr:00	Sa:00	So:00	Mi:00
115	23:30	Mo:00	Di:00	Mi:00	Do:00	Fr:00	Sa:00	So:00	Mi:00
116	23:45	Mo:00	Di:00	Mi:00	Do:00	Fr:00	Sa:00	So:00	Mi:00

Literaturverzeichnis

- [AM12] Azar, Elie ; Menassa, Carol C.: A comprehensive analysis of the impact of occupancy parameters in energy simulation of office buildings. In: Energy and Buildings 55 (2012), Dezember, 841–853. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.10.002>. – DOI 10.1016/j.enbuild.2012.10.002. – ISSN 03787788
- [Bet17] Betz, Torsten: Untersuchung des energetischen Nutzerverhaltens in einem Verwaltungsgebäude mit Hilfe einer selbstlernenden Heizungssteuerung. Berlin, Hochschule Wismar, Masterarbeit, 2017
- [BS14] Ben, Hui ; Steemers, Koen: Energy retrofit and occupant behaviour in protected housing: A case study of the Brunswick Centre in London. In: Energy and Buildings 80 (2014), September, 120–130. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.05.019>. – DOI 10.1016/j.enbuild.2014.05.019. – ISSN 03787788
- [FACO12] Fabi, Valentina ; Andersen, Rune V. ; Corgnati, Stefano ; Olesen, Bjarne W.: Occupants' window opening behaviour: A literature review of factors influencing occupant behaviour and models. In: Building and Environment 58 (2012), Dezember, 188–198. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.07.009>. – DOI 10.1016/j.buildenv.2012.07.009. – ISSN 03601323
- [FW11] Frontczak, Monika ; Wargocki, Pawel: Literature survey on how different factors influence human comfort in indoor environments. In: Building and Environment 46 (2011), April, Nr. 4, 922–937. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.10.021>. – DOI 10.1016/j.buildenv.2010.10.021. – ISSN 03601323
- [Gra14] Grabe, Jörn von: Mensch-Gebäude-Interaktion im Kontext des energierelevanten Handelns von Gebäudenutzern. In: Bauphysik 36 (2014), August, Nr. 4, 200–208. <http://dx.doi.org/10.1002/bapi.201410028>. – DOI 10.1002/bapi.201410028. – ISSN 1437–0980
- [HHL⁺09] Hoes, P. ; Hensen, J.L.M. ; Loomans, M.G.L.C. ; Vries, B. de ; Bourgeois, D.: User behavior in whole building simulation. In: Energy and Buildings 41 (2009), März,

- Nr. 3, 295–302. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.09.008>. – DOI 10.1016/j.enbuild.2008.09.008. – ISSN 03787788
- [HJC15] Hörner, Michael ; Jedek, Christoph ; Cischinsky, Holger: Die Diskrepanz zwischen Energiebedarf und -verbrauch bei Nichtwohngebäuden – ein empirischer Ansatz. In: Bauphysik 37 (2015), Oktober, Nr. 5, 284–295. <http://dx.doi.org/10.1002/bapi.2015110033>. – DOI 10.1002/bapi.2015110033. – ISSN 1437–0980
- [HKP08] Herkel, Sebastian ; Knapp, Ulla ; Pfafferott, Jens: Towards a model of user behaviour regarding the manual control of windows in office buildings. In: Building and Environment 43 (2008), April, Nr. 4, 588–600. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.06.031>. – DOI 10.1016/j.buildenv.2006.06.031. – ISSN 03601323
- [HPF⁺15] Henze, Gregor P. ; Pavlak, Gregory S. ; Florita, Anthony R. ; Dodier, Robert H. ; Hirsch, Adam I.: An energy signal tool for decision support in building energy systems. In: Applied Energy 138 (2015), Januar, 51–70. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.10.029>. – DOI 10.1016/j.apenergy.2014.10.029. – ISSN 03062619
- [JGTC13] Jain, Rishie K. ; Gulbinas, Rimas ; Taylor, John E. ; Culligan, Patricia J.: Can social influence drive energy savings? Detecting the impact of social influence on the energy consumption behavior of networked users exposed to normative eco-feedback. In: Energy and Buildings 66 (2013), November, 119–127. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.06.029>. – DOI 10.1016/j.enbuild.2013.06.029. – ISSN 03787788
- [KSS16] Kummert, Kai ; Scheffler, Frank ; Schulze, Jonathan: Den Energieeffizienzlücken in Nichtwohngebäuden auf der Spur. In: Ernst&Sohn Spezial 2016 - Industrie- und Gewerbebauten (2016), S. S. 54–58
- [LPK12] Lo, Siu H. ; Peters, Gjalte-Jorn Y. ; Kok, Gerjo: Energy-Related Behaviors in Office Buildings: A Qualitative Study on Individual and Organisational Determinants: OFFICE ENERGY-RELATED BEHAVIORS. In: Applied Psychology 61 (2012), April, Nr. 2, 227–249. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1464-0597.2011.00464.x>. – DOI 10.1111/j.1464-0597.2011.00464.x. – ISSN 0269994X
- [MCBB12] Menezes, Anna C. ; Cripps, Andrew ; Bouchlaghem, Dino ; Buswell, Richard: Predicted vs. actual energy performance of non-domestic buildings: Using post-occupancy evaluation data to reduce the performance gap. In: Applied Energy 97 (2012), September, 355–364. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.11.075>. – DOI 10.1016/j.apenergy.2011.11.075. – ISSN 03062619

- [MG10] Masoso, O.T. ; Grobler, L.J.: The dark side of occupants' behaviour on building energy use. In: Energy and Buildings 42 (2010), Februar, Nr. 2, 173–177. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.08.009>. – DOI 10.1016/j.enbuild.2009.08.009. – ISSN 03787788
- [MKG⁺14] Meerbeek, Bernt ; Kulve, Marije te ; Gritti, Tommaso ; Aarts, Mariëlle ; Loenen, Evert van ; Aarts, Emile: Building automation and perceived control: A field study on motorized exterior blinds in Dutch offices. In: Building and Environment 79 (2014), September, 66–77. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.04.023>. – DOI 10.1016/j.buildenv.2014.04.023. – ISSN 03601323
- [Ne16] Normung e.V., DIN Deutsches I.: DIN V 18599-10: Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung - Teil 10: Nutzungsrandbedingungen, Klimadaten. In: DIN V 18599. Berlin : Beuth Verlag, 2016, S. 105
- [OG14] O'Brien, William ; Gunay, H. B.: The contextual factors contributing to occupants' adaptive comfort behaviors in offices – A review and proposed modeling framework. In: Building and Environment 77 (2014), Juli, 77–87. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.03.024>. – DOI 10.1016/j.buildenv.2014.03.024. – ISSN 03601323
- [PSH11] Parys, Wout ; Saelens, Dirk ; Hens, Hugo: Coupling of dynamic building simulation with stochastic modelling of occupant behaviour in offices – a review-based integrated methodology. In: Journal of Building Performance Simulation 4 (2011), Dezember, Nr. 4, 339–358. <http://dx.doi.org/10.1080/19401493.2010.524711>. – DOI 10.1080/19401493.2010.524711. – ISSN 1940–1493, 1940–1507
- [TBEC14] Tetlow, Richard M. ; Beaman, C. P. ; Elmualim, Abbas A. ; Couling, Kevin: Simple prompts reduce inadvertent energy consumption from lighting in office buildings. In: Building and Environment 81 (2014), November, 234–242. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.07.003>. – DOI 10.1016/j.buildenv.2014.07.003. – ISSN 03601323
- [THS08] Tanimoto, Jun ; Hagishima, Aya ; Sagara, Hiroki: A methodology for peak energy requirement considering actual variation of occupants' behavior schedules. In: Building and Environment 43 (2008), April, Nr. 4, 610–619. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.06.034>. – DOI 10.1016/j.buildenv.2006.06.034. – ISSN 03601323

- [YBG14] Yang, Zheng ; Becerik-Gerber, Burcin: Modeling personalized occupancy profiles for representing long term patterns by using ambient context. In: Building and Environment 78 (2014), August, 23–35. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.04.003>. – DOI 10.1016/j.buildenv.2014.04.003. – ISSN 03601323
- [YFH⁺11] Yu, Zhun ; Fung, Benjamin C. ; Haghghat, Fariborz ; Yoshino, Hiroshi ; Morofsky, Edward: A systematic procedure to study the influence of occupant behavior on building energy consumption. In: Energy and Buildings 43 (2011), Juni, Nr. 6, 1409–1417. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.02.002>. – DOI 10.1016/j.enbuild.2011.02.002. – ISSN 03787788
- [YTS09] Yun, Geun Y. ; Tuohy, Paul ; Steemers, Koen: Thermal performance of a naturally ventilated building using a combined algorithm of probabilistic occupant behaviour and deterministic heat and mass balance models. In: Energy and Buildings 41 (2009), Mai, Nr. 5, 489–499. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.11.013>. – DOI 10.1016/j.enbuild.2008.11.013. – ISSN 03787788