

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Verbundvorhaben SUSTAIN2

EnEff:Stadt: SUSTAIN2: Sanierung eines Stadtquartiers mit einer integrierten Netzinfrastruktur Phase 2 ' Umsetzung und Demonstration

Abschlussbericht

Förderkennzeichen: 03ET1629 (A-D)

Projektlaufzeit: 04/2019 – 07/2023



Verbundpartner:

RWTH Aachen



**Stadt Bottrop Fachbereich Im-
mobilienvirtschaft (65)**



Emscher Lippe Energie GmbH



E.ON Energy Solutions GmbH



Univ. Prof. Dr.-Ing. Dirk Müller

RWTH Aachen University
E.ON Energieforschungszentrum
Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik
Mathieustr. 10
D-52074 Aachen

Gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages.

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Vorbemerkung und Danksagung

Das Forschungsprojekt **SUSTAIN2** wurde in der Zeit vom 01.04.2019 bis zum 30.06.2023 durch den Projektträger Jülich (PTJ) unter dem Förderkennzeichen 03ET1629A-D betreut. Die Finanzierung erfolgte aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, wofür wir uns herzlich bedanken.

Die Bearbeitung erfolgte gemeinsam durch die vier Partner Stadt Bottrop Fachbereich Immobilienwirtschaft, Emscher Lippe Energie GmbH, E.ON Energy Solutions GmbH und die RWTH Aachen University.

Wir möchten uns recht herzlich für die gelungene Zusammenarbeit im Rahmen des Projektes bedanken.

Dieser Projektbericht bezieht sich auf die Arbeit an den Teilprojekten aller vier Partner. Das Dokument enthält zunächst allgemeine Informationen über das Projekt als Ganzes und geht dann detailliert auf die in den einzelnen Maßnahmen durchgeführten Arbeiten und die daraus resultierenden Ergebnisse ein.

Die Verantwortung für den Inhalt dieses Dokuments liegt bei den Autoren.

Autoren:

Thomas Schreiber, RWTH Aachen University

Verena Dannapfel, RWTH Aachen University

Patrick Henkel, RWTH Aachen University

Ivelina Stoyanova, RWTH Aachen University

Sebastian Uerlich, RWTH Aachen University

Thomas Kuhlmann, E.ON Energy Solutions

Florian Sass, E.ON Energy Solutions

Dr. Thomas Schröder, E.ON Grid Solutions

Patrick Drost, Stadt Bottrop

Sebastian Piehl, Emscher-Lippe-Energie

Jörg Vengels, Emscher-Lippe-Energie

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. type of document (e.g. report, publication) report	
3. title EnEff:Stadt: SUSTAIN2: Sanierung eines Stadtquartiers mit einer integrierten Netzinfrastruktur Phase 2 ' Umsetzung und Demonstration		
4. author(s) (family name, first name(s)) Thomas Schreiber, RWTH Aachen University Verena Dannapfel, RWTH Aachen University Patrick Henkel, RWTH Aachen University Ivelina Stoyanova, RWTH Aachen University Sebastian Uerlich, RWTH Aachen University Thomas Kuhlmann, E.ON Energy Solutions Florian Sass, E.ON Energy Solutions Dr. Thomas Schröder, E.ON Grid Solutions Patrick Drost, Stadt Bottrop Sebastian Piehl, Emscher-Lippe-Energie Jörg Vengels, Emscher-Lippe-Energie	5. end of project 30.06.2023	6. publication date
	7. form of publication	
	8. performing organization(s) (name, address) RWTH Aachen University E.ON Energy Research Center Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik Mathieustraße 10 52074 Aachen	9. originator's report no
11. no. of pages 65		
13. sponsoring agency (name, address)		12. no. of references 15
	15. no. of figures 56	
	16. supplementary notes	
17. presented at (title, place, date)		
18. abstract Within the scope of SUSTAIN2, the building energy systems of 25 municipal non-residential buildings in the city of Bottrop were modernized using various digitalization strategies. The buildings included administrative buildings, schools, sports facilities and special-use buildings. The partners, E.ON, Emscher-Lippe-Energie, the city of Bottrop and RWTH Aachen University, brought together their expertise in this field and implemented different cloud architectures and sensor networks in the buildings. The aim was to demonstrate the added value of new digitalization technologies for municipal building portfolios and to compare several commercial and freely available systems. Significant savings potentials were identified through the structured analysis of the data and the added value of cloud-based monitoring systems for the utilization of energy data was demonstrated. Commercial and open source options come with their respective advantages and disadvantages, which were prepared and published in a guide during the course of the project. In addition, particularly relevant sensors and particularly promising sensor technologies were identified and specific recommendations for action were derived.		

19. keywords

SmartCity, cloud technologies, municipal buildings, LoRaWAN, energy management, fault detection

20. publisher

21. price

BMWi-Vordr. 3832/03.07_1

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht	
3. Titel EnEff:Stadt: SUSTAIN2: Sanierung eines Stadtquartiers mit einer integrierten Netzinfrastruktur Phase 2 ' Umsetzung und Demonstration		
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Thomas Schreiber, RWTH Aachen University Verena Dannapfel, RWTH Aachen University Patrick Henkel, RWTH Aachen University Ivelina Stoyanova, RWTH Aachen University Sebastian Uerlich, RWTH Aachen University Thomas Kuhlmann, E.ON Energy Solutions Florian Sass, E.ON Energy Solutions Dr. Thomas Schröder, E.ON Grid Solutions Patrick Drost, Stadt Bottrop Sebastian Piehl, Emscher-Lippe-Energie Jörg Vengels, Emscher-Lippe-Energie	5. Abschlussdatum des Vorhabens 30.06.2023	6. Veröffentlichungsdatum
	7. Form der Publikation	
	8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) RWTH Aachen University E.ON Energy Research Center Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik Mathieustraße 10 52074 Aachen	9. Ber. Nr. Durchführende Institution
11. Seitenzahl 65		
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action Scharnhorststr. 34-37 10115 Berlin		13. Literaturangaben 15
	15. Abbildungen 56	
	16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)		
18. Kurzfassung Im Rahmen von SUSTAIN2 wurden die Gebäudeenergiesysteme 25 kommunaler Nichtwohngebäude der Stadt Bottrop mit unterschiedlichen Digitalisierungsstrategien modernisiert. Die Gebäude umfassten Verwaltungsgebäude, Schulen, Sportstätten sowie Sondernutzungsgebäude. Hierfür brachten die Partner, E.ON, Emscher-Lippe-Energie, die Stadt Bottrop und die RWTH Aachen University ihre Expertise auf diesem Gebiet zusammen und implementierten unterschiedliche Cloud-Architekturen und Sensornetzwerke in den Gebäuden. Ziel war es hierdurch den Mehrwert neuartiger Digitalisierungstechnologien für kommunale Gebäudeportfolios aufzuzeigen und dabei mehrere kommerzielle und frei verfügbare Systeme vergleichen zu können. Es wurden erhebliche Einsparpotentiale durch die strukturierte Analyse der Daten aufgezeigt und der Mehrwert von cloudbasierten Monitoringsysteme für die Verwertung von Energiedaten aufgezeigt. Kommerzielle und Open-Source Optionen kommen mit jeweiligen Vor- und Nachteilen, die im Projektverlauf in einem Leitfaden aufbereitet und publiziert wurden. Darüber hinaus wurden besonders relevante Sensoren und besonders vielversprechende Sensortechnologien ermittelt und konkrete Handlungsempfehlungen abgeleitet.		

19. Schlagwörter

SmartCity, Cloudtechnologien, Kommunale Gebäude, LoRaWAN, Energiemanagement, Fehlererkennung

20. Verlag

21. Preis

BMWi-Vordr. 3831/03.07_2

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	xi
Tabellenverzeichnis.....	xiii
1 Kurze Darstellung.....	1
1.1 Aufgabenstellung.....	1
1.2 Voraussetzungen.....	2
1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens.....	2
1.4 Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	3
1.5 Notwendigkeit und Angemessenheit der Arbeit.....	4
1.6 Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des fortgeschrittenen Verwertungsplans.....	4
1.7 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen.....	4
2 Darstellung der wissenschaftlichen Arbeit.....	6
2.1 Arbeitspaket 1 (AP 1): Erfassung kommunaler Gebäude in Bottrop.....	6
2.2 Arbeitspaket 2 (AP 2): Auswahl repräsentativer Gebäude für den Cloud-Feldtest.....	9
2.3 Arbeitspaket 3 (AP 3): Technische Ausrüstung der ausgewählten Gebäude.....	11
2.3.1 Datenübertragung von zusätzlicher Sensorik aus von der E.ON betreuten Liegenschaften.....	11
2.3.2 Datenübertragung von zusätzlicher Sensorik aus von der ELE betreuten Liegenschaften	15
2.3.3 Datenübertragung aus der Gebäudeleittechnik (GLT) der von der RWTH betreuten Liegenschaften.....	16
2.3.4 Datenübertragung von zusätzlicher Sensorik aus von der RWTH betreuten Liegenschaften.....	17
2.3.5 Zusammenfassende Übersicht und gemeinsame Dokumentation.....	18
2.3.6 Vergleich von kalkulatorischen Bedarfen und gemessenen Verbräuchen.....	20
2.4 Arbeitspaket 4 (AP 4): Anbindung und Weiterentwicklung Cloud.....	23
2.4.1 Architektur und Entwicklung der SUSTAIN2-Cloud.....	23
2.4.2 Lessons Learned bei der Arbeit mit den ausgewählten Technologien.....	29
2.5 Arbeitspaket 5 (AP 5): Mensch-Maschine-Interaktion im Energiemanagement.....	30
2.5.1 Dashboards und visuelle Auswertungen.....	31
2.5.2 Alarmfunktionen.....	36
2.5.3 Befragung von Nutzern und Betreibern.....	37
2.5.4 Analyseergebnisse: Suboptimale Außentempersensoren-Einbindung.....	39
2.5.5 Analyseergebnisse: Nahwärmenetz-Zentrale Kirchhellen.....	39
2.5.6 Analyseergebnisse: Fernwärmeverbrauch Rathaus und Katasteramt.....	47
2.5.7 Analyseergebnisse: Solltemperaturen Heizsystem.....	50

2.5.8	Analyseergebnisse: Lüftungsanlage und elektrische Verbraucher	51
2.5.9	Analyseergebnisse: Wasserversorgung	52
2.5.10	Weitere betriebliche Empfehlungen	53
2.5.11	Kosten-Nutzen-Analyse	55
2.6	Arbeitspaket 6 (AP 6): Automatisierte Betriebsoptimierung im Energiemanagement	58
2.6.1	Gebäudemodellierung	58
2.6.2	Regelung am Beispiel der Ludgerusschule	62
2.7	Arbeitspaket 7 (AP 7): Analyse der eingesetzten Cloud-Systeme	63

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Die SUSTAIN2 Lösung.....	2
Abbildung 2: Einheitliche Gebäude-Steckbriefe in SUSTAIN2, hier für die Sekundarschule Kirchhellen	7
Abbildung 3: Exemplarische realisierte Einsparungen aus Vorgängerprojekt der E.ON.....	8
Abbildung 4: Verwendete Datenquellen in den Liegenschaften (teilweise anteilig)	9
Abbildung 5: Installationsbeispiel Smart Data Hub (SDH) von E.ON.....	12
Abbildung 6: Datenfluss bei der eingesetzten Hard- und Software in von der E.ON betreuten Liegenschaften	12
Abbildung 7: Installierte Zähler und Sensoren über das Gelände der Matthias-Claudius- und Johannes-Schule	14
Abbildung 8: Funktionsumfang gemäß gewählter E.ON Optimum Version	15
Abbildung 9: Erreichbarkeit und Netzbereiche der speicherprogrammierbaren Steuerungen im Automationsnetz der Stadt Bottrop (Stand Januar 2022).....	16
Abbildung 10: Aufgenommene GLT-Datenpunkte in den von der RWTH betreuten Liegenschaften (MW – Messwerte).....	17
Abbildung 11: Eindrücke von der Installation von Zählern und Sensorik sowie der Implementierung der Datenübertragung.....	18
Abbildung 12: Einheitliche Darstellung von Verbrauchswerten in Balkendiagrammen, hier: Stromverbrauch Lohnhalle.....	20
Abbildung 13: Charakteristik G1, Quelle: VDEW	21
Abbildung 14: Stromverbrauch Rathaus 2021, kalkulierter Bedarf und gemessener Verbrauch.....	21
Abbildung 15: Heizenergieverbrauch Rathaus 22/23, kalkulierter Bedarf und gemessener Verbrauch	22
Abbildung 16: Datenfluss von der Datenaufnahme bis zur SUSTAIN2 Cloud of Clouds und den dort geplanten Funktionsbereichen.....	24
Abbildung 17: Funktionale Darstellung der SUSTAIN2 (Cloud of Clouds) Plattformarchitektur.....	25
Abbildung 18: Umsetzung der SUSTAIN2 Cloud mit konkreten Softwaremodulen.....	26
Abbildung 19: Energiedaten Dashboard für der Dieter-Renz-Sporthalle.....	32
Abbildung 20: Beispiel einer visuellen Heatmap-Analyse, hier: Fernwärmeverbrauch Katasteramt...	32
Abbildung 21 : Livedaten in Auszüge aus Anlagenplänen eingebettet und historische Daten als Zeitreihen, Heizkreise der Sekundarschule Kirchhellen	33
Abbildung 22: Livedaten und historische Daten vom Betrieb der RLT Anlagen in der Sekundarschule Kirchhellen.....	33
Abbildung 23: Anomalie-Erkennung in Zeitreihen der GLT-Daten, RLT-Anlage des Rathauses.....	34
Abbildung 24: Unterschiedlicher saisonaler Verlauf mit Wechseln der Betriebsmodi, Heizungsanlage Rathaus.....	34
Abbildung 25: Info-Monitor im Showroom des Rathauses	34
Abbildung 26: Vergleich von Gas-Verbräuchen in verschiedenen Zeitabschnitten an der Konradsschule, auch darstellbar als Balkendiagramm im Zoom	35
Abbildung 27: Darstellung der 18 Stromzähler der Lohnhalle und einem Vergleich über verschiedene Zeiträume	35
Abbildung 28: Implementierung Daily Alert Summary mit Node-Red	36
Abbildung 29: Daily Alert Summary	36
Abbildung 30: Individuelle Komfortpräferenzen, Exemplarische Angaben im Akteurs-Fragebogen ...	37
Abbildung 31: Umsetzungsprozess für eine Zeitprofilanpassung (erstellt in Zusammenarbeit mit der Stadt Bottrop).....	38
Abbildung 32: Verschiedene Temperaturverläufe von Außentemperatursensoren	39

Abbildung 33: Witterungsbereinigter Verbrauch der Nahwärmezentrale Kirchhellen nach Jahren	40
Abbildung 34: Witterungsbereinigter Verbrauch der Nahwärmezentrale Kirchhellen nach Heizperiode	41
Abbildung 35: Anteile am Gesamtverbrauch der Nahwärmezentrale Kirchhellen	42
Abbildung 36: Durchschnittliche Leistung der Wärmeerzeugung des BHKWs der Nahwärmezentrale Kirchhellen	43
Abbildung 37: Vor- und Rücklauf der Fernleitung der Nahwärmezentrale Kirchhellen. Die Vorlauftemperatur ist konstant auf einem hohen Niveau.	44
Abbildung 38: Vor- und Rücklauf des Kessel 1 der Nahwärmezentrale Kirchhellen. Der Kessel ist vorwiegend im Zeitraum von Ende Dezember 2021 bis Mitte August 2022 in Betrieb. Ab dem 24.02.2023 deckt der Kessel vermehrt einzelne Spitzen von ein paar Stunden.	44
Abbildung 39: Vor- und Rücklauf des Kessel 2 der Nahwärmezentrale Kirchhellen. Der Kessel ist ab Mitte Juni 2022 nahezu dauerhaft in Betrieb. Im Zeitraum vom 15.11.2023 bis 11.06.2022 deckt der Kessel vorwiegend Spitzenlasten.	45
Abbildung 40: Betriebsweise von Kessel 2 der Nahwärmezentrale Kirchhellen vom 10.01.2022 bis 30.01.2022. Der Kessel unterstützt vorwiegend während der Nutzungszeiten.	45
Abbildung 41: Vor- und Rücklauftemperaturen am 06.03.2023, Nahwärmezentrale Kirchhellen	46
Abbildung 42: Automationsdaten der Übergabestation Sekundarschule Kirchhellen am 06.03.2023	47
Abbildung 43: Fernwärmeverbrauch des Rathauses und Katasteramts	48
Abbildung 44: Fernwärmeverbrauch des Rathauses über die Außentemperatur	49
Abbildung 45: Fernwärmeverbrauch des Katasteramts über die Außentemperatur	50
Abbildung 46: Verlauf Soll- und Ist-Temperatur des Vorlaufs des Heizkreises Ost im Rathaus	51
Abbildung 47: CO ₂ -Konzentrationen in maschinell belüfteten Räumen nach und während der Covid-Pandemie	52
Abbildung 48: Unterschied zwischen Schulbetrieb vor Ort und teilweisen Online-Unterricht in der Corona-Zeit	52
Abbildung 49: Strom-Verbrauchswerte auf Wochenbasis, es sind auch detailliertere Zeiträume möglich	53
Abbildung 50: Datenquellen kommunaler Gebäude	55
Abbildung 51: Grundlagen für die Bildung von Raumtemperatur-Komfortklassen im Heizfall (Büro und Schule)	57
Abbildung 52 Qualitativer Strafkostenansatz für nicht ideale Komfort-Raumtemperaturen	57
Abbildung 53: Qualitativer Strafkostenansatz für nicht ideale Komfort-Luftqualitäten	58
Abbildung 54 Struktur des LSTM-Framework	60
Abbildung 55 Anwendungsfall 18.08.2020	61
Abbildung 56: Mögliche Einsatzbereiche von Funksensorik aus dem neonpulse Produktportfolio	65

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Zuordnung der Gebäude nach Partnern.....	10
Tabelle 2: Übersicht der zusätzlich implementierten Sensoren in den SUSTAIN2 Liegenschaften	19
Tabelle 3: Handlungsempfehlungen zur Digitalisierung von Bestandsgebäuden	64

1 Kurze Darstellung

1.1 Aufgabenstellung

SUSTAIN2, oder auch SUSTAIN Phase 2, setzt unmittelbar an den Vorarbeiten aus dem abgeschlossenen Projekt SUSTAIN Phase 1 (O3ET1381A) an und setzt die Forschungsarbeiten dabei konsequent fort. In Phase 1 stand die Entwicklung von Energiemanagement- und Optimierungssystemen sowie die Simulation von Gebäuden der Stadt Bottrop im Fokus der Untersuchungen. Hierbei konnte gezeigt werden, dass eine intelligente Vernetzung der Gebäude einen wesentlichen Beitrag zu einem intelligenten Betrieb der Energiesysteme im Quartier leisten kann.

SUSTAIN Phase 2 hat an diesen Vorarbeiten angesetzt um 25 öffentliche Gebäude der Stadt Bottrop mit heterogenen Gebäudeenergiesystemen zu digitalisieren und unterschiedliche Monitoringsysteme zu erproben. Das Projektkonsortium bestehend aus RWTH Aachen, Stadt Bottrop, ELE und E.ON hat sich hierbei das Ziel gesetzt unterschiedliche, heterogene Dateninfrastrukturen zu bewerten, zu erproben und die betrachteten Gebäude hierdurch zu modernisieren. Hierfür war eine Cloudplattform zu entwickeln, welche für drei vorhandene Cloud-Systeme als Datensinke dienen sollte, um zu demonstrieren wie mehrere Cloud-Systeme zu einer Cloud-of-Clouds vernetzt werden können, mit dem Ziel eine übergeordnete Betreiberplattform zu demonstrieren. Die drei zu integrierenden Gebäude-Monitoringsysteme wurden darüber hinaus in diesem Zuge in einem Feldtest angewendet, getestet und verglichen. Hierfür sollten unterschiedliche Gebäude mit unterschiedlichen technischen Voraussetzungen und mit unterschiedlichen Systemen ausgestattet werden, um diese unmittelbar und objektiv vergleichen zu können. Die Cloud-of-Clouds sollte hierbei neben der Funktion der übergeordneten Datensinke so entwickelt werden, dass sie von anderen Kommunen leicht als übertragbares und kostengünstiges Energiemonitoringkonzept kopiert und übernommen werden kann. Die Betreiber sollen hierdurch mittels Mensch-Maschine-Interaktionen in die Lage versetzt werden den Gebäudebetrieb durch gesteigerte Betriebstransparenz zu verbessern und darüber hinaus die Integration des Nutzers in Energiemanagement- und Betriebsoptimierungsanwendungen ermöglichen. Im nächsten Schritt wurden die entwickelten Methoden aus SUSTAIN Phase 1 zur automatisierten Betriebsoptimierung kommunaler Gebäude weiterentwickelt und in weiteren Anwendungsszenarien erprobt. Zuletzt sollten die betrachteten Cloud-Systeme genutzt werden, um während der Projektlaufzeit umgesetzte Maßnahmen zur Energieeinsparung energetisch und wirtschaftlich zu bewerten. Hierbei wurden nicht nur die Gebäudeenergiesysteme, sondern auch die notwendige Messtechnik sowie die Cloud-Systeme kritisch mit Blick auf Kosten und Nutzbarkeit diskutiert.

Der Mehrwert für die Einführung von Energiemanagementsystemen und Digitalisierungswerkzeugen liegt in der Identifikation von Energieeinsparpotentialen, Reduzierung der Energiekosten, Einhaltung von Klimaschutzziele und im nachhaltigen Wirtschaften. Im Rahmen von SUSTAIN2 wurde demonstriert, wie gesteigerte Systemtransparenz durch das Überwachen und Zuordnen von Energieverbräuchen, das Ableiten geeigneter Maßnahmen (wie Anpassung der Heizungseinstellungen oder Fehlerbehebung) und das Optimieren und Minimieren von Energieverbräuchen, -kosten und CO₂-Emissionen gelingen kann. Das Vorgehen im Projekt, ist in Abbildung 1 dargestellt.

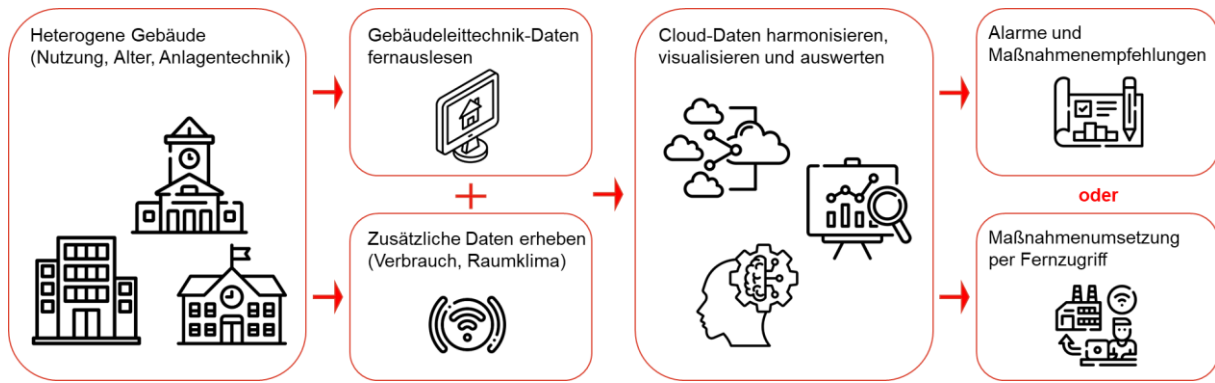


Abbildung 1: Die SUSTAIN2 Lösung

1.2 Voraussetzungen

SUSTAIN2 schließt an das Vorgängerprojekt SUSTAIN Phase 1 (03ET1381A), welches von dem Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimotechnik und dem ACS (Automation of Complex Power Systems) der RWTH Aachen in Kooperation mit der Stadt Bottrop durchgeführt wurde, an. In diesem Projekt wurde bereits eine Cloud-Architektur für das Energiemonitoring und die Optimierung von Energiesystemen in kommunalen Gebäuden, konzeptionell entwickelt und anhand von Simulationen validiert. Es wurden Maßnahmen zur energetischen Optimierung ausgewählter Quartiere abgeleitet und vorgeschlagen. Damit war eine gute theoretische Basis für das Vorhaben gegeben.

Parallel entwickelte sich in den letzten Jahren ein Markt für kostengünstige Funksensoren unterschiedlicher Protokolle, insbesondere aber auf LoRaWAN Basis. Diese Entwicklung bildete auf Seite der notwendigen Sensorik eine gute Voraussetzung, um die Konzepte aus SUSTAIN Phase 1 an realen Gebäuden zu erproben und den sehr diversen Gebäudebestand, geprägt durch unterschiedlichste Eigenschaften wie Alter, Nutzung und Ausrüstung, kostengünstig und effizient zu digitalisieren.

Eine weitere Schlüsseltechnologie für die effiziente Digitalisierung von Bestandsgebäuden sind Cloud-Systeme, welche als Datensinke für die Sensorik, als Ausführumgebung von Optimierungslogik und als Visualisierungswerkzeug für Betreiberinnen und Nutzer dienen. Hier zeichneten sich zur Beantragung von SUSTAIN 2 vielversprechende Entwicklungen ab. Auf akademischer Seite wurde die Entwicklung mit der N5GEH Projektreihe vorangetrieben und wertvolle Grundlagenarbeit geleistet. Parallel platzierten sich auch immer mehr kommerzielle Produkte am Markt. Die Möglichkeiten eigene Cloud-dienste aufzubauen werden beispielsweise durch Azure und AWS stark begünstigt und für den Anwendungsfall des energetischen Monitorings trieben die Partner ELE und E.ON kommerzielle Lösungen voran.

Die Stadt Bottrop hat in der digitalen Erfassung und Bereitstellung geographischer Daten über das InnovationCity Ruhr Informationssystem (ICRIS) bereits eine Vorreiterrolle eingenommen. Die skizzierten Voraussetzungen zusammen mit dem Willen der Stadt Bottrop innovative Monitoring- und Optimierungs-Methoden an ihrem Gebäudeportfolio zu demonstrieren führten zu SUSTAIN 2.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Der ursprüngliche Projektplan sah eine Projektdauer von drei Jahren von Q1 2019 bis Q1 2022 vor, wobei im ersten Projektjahr die Analyse des Bottroper Gebäudebestands (AP1) sowie die Auswahl der Gebäude und die Aufteilung unter den Partnern (AP2) im Vordergrund stand. Die technische Ausrüstung der ausgewählten Gebäude (AP3) lief Ende des ersten Projektjahres an und wurde von konzeptionellen Arbeiten im Bereich der Cloud-Entwicklung (AP4), der Mensch-Maschinen-Interaktion (AP5)

und der Optimierungslogik (AP6) begleitet. Im zweiten Projektjahr sollte dann die intensive Arbeitsphase in den APs 4-6 anschließen und nur noch wenige nachträgliche Arbeiten bei der Gebäudeausrüstung (AP3) erfolgen.

Die Corona-Pandemie hat den Projektverlauf stark beeinflusst. Die Gebäudenutzung war extrem atypisch und die Möglichkeiten für Begehungen und Vor-Ort-Termine waren sehr stark eingeschränkt. Um trotzdem einen repräsentativen Datensatz aus den betrachteten Gebäuden zu erhalten, reduzierte das Konsortium die Aktivitäten teilweise etwas, um den finanziellen Spielraum für eine Laufzeitverlängerung um 15 Monate (bis Q2 2023) zu schaffen. Hierdurch wurden die Arbeiten in den APs 4-6 auf zwei Jahre aufgeteilt und liefen dann im letzten Projektjahr schrittweise aus.

Im letzten Jahr wurde neben der Datenauswertung ein Fokus auf den Vergleich und die Diskussion der eingesetzten Sensorik und Cloud-Systeme (AP7) gelegt. Der hierbei entstandene Leitfaden wurde in den letzten Projektmonaten erstellt.

1.4 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Rahmen von SUSTAIN 2 wurde mit zahlreichen Partnern außerhalb des Projektkonsortiums kooperiert. Die Zusammenarbeit teilte sich hierbei in Unterschiedliche Bereiche auf:

- Die STEAG und die ELE Verteilnetz GmbH (EVNG) unterstützte bei der Digitalisierung von Fernwärme und Stromzählern.
- Bei der Arbeit mit Automationsnetzdaten unterstützte der Automatisierer Kieback&Peter GmbH & Co. KG sowie die Firma aedifion GmbH durch Anpassungen auf der implementierten GLT-Software sowie dem Installieren und Betreiben eines Datenloggers für die Automationsdaten.
- Die innogy GmbH und stefan badur electronic GmbH & Co. KG waren für bit.B Soft- und Hardware verantwortlich. Das System wurde nach der Übernahme von innogy durch E.ON eingestellt.
- Das Amt 12 der Stadt Bottrop unterstützte bei allen Themen rund um die Netzwerktechnik in den Gebäuden und Elektro Balgar GmbH & EPL GmbH bei der Installation von Zählern und Verkabelung.
- Schließlich unterstützte die Innovation City Management GmbH mit Öffentlichkeitsarbeit und Erfahrungsaustausch

1.5 Notwendigkeit und Angemessenheit der Arbeit

Zum Erreichen der ambitionierten Klimaschutzziele im Gebäudebereich müssen technische Innovationen in die alltägliche Arbeit von Planern und Betreiberinnen überführt werden. Insbesondere im Bereich der Digitalisierung und Harmonisierung von Gebäudeenergiesystemdaten, kann dieser Prozess, vor dem Hintergrund diverser Gebäudeeigenschaften nicht ausschließlich von der Industrie geleistet werden. Es braucht Leuchtturm-Vorhaben die von der Komponenten-Sensorik bis hin zur Datenaufnahme- und Verarbeitungsinfrastruktur, die gesamte Wertschöpfungskette evaluieren und demonstrieren. Vor diesem Hintergrund leistete SUSTAIN2 einen wertvollen Beitrag, indem eine Technologieauswahl in einem Umfang analysiert, bewertet und demonstriert wurde, wie es einem rein wirtschaftlich agierenden Akteur nicht möglich gewesen wäre. Neben open-source Entwicklerinnen wurden kommerzielle Energie-Cloud- und Sensorik-Betreiber im Konsortium zusammengebracht, wodurch Expertise aus beiden Perspektiven eingebracht werden konnte. Die Stadt Bottrop war als Fördermittelpfänger, Anwender und langfristiger Betreiber solcher Infrastruktur ebenfalls ein unerlässlicher Partner bei der praxisnahen Erprobung der Technologien.

1.6 Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des fortgeschrittenen Verwertungsplans

Durch die im Projekt entwickelten und angewandten Methoden konnte Expertise im Bereich der cloud-basierten Energiemonitoring- und Betriebssysteme aufgebaut werden. Kurz- bis mittelfristig kann das aufgebaute Wissen für weitergehende Entwicklungen und Innovation genutzt werden. Darüber hinaus kann durch die Arbeiten im Projekt ein effizienter Betrieb der betrachteten kommunalen Gebäude erreicht werden. Mittel- bis langfristig ließen sich die Auswertungen auf weitere Systeme übertragen und deren Betriebsweise verbessern.

Die erlangten Erkenntnisse und Entwicklungen im Bereich des Monitorings können kurzfristig für weitere Projekte der RWTH Aachen genutzt werden. Hier sind z.B. die Projekte OOM4ABDO oder Trans-Urban.NRW zu nennen, wo ebenfalls die Energieeffizienz verschiedener Komponenten und Betriebsstrategien auf Quartiersebene analysiert werden. Darüber hinaus ist mittelfristig geplant, die Verwendbarkeit der eingesetzten Softwarebausteine in anderen Umgebungen zu erproben. Hier ist insbesondere das N5GEH Serviceprojekt zu nennen, in dem ebenfalls ein übertragbares Energiedatensystem aufgebaut und in mehreren Satellitenprojekten erprobt wird, zu nennen.

Ansätze zu Kosten-Nutzen-Analyse sowie zu sozioökonomischen Hemmnissen wurden im Rahmen des zeitweise parallellaufenden Mikroprojektes KlaDat¹ wieder aufgegriffen und vertieft. Für die Anwendung der in KlaDat ausgearbeiteten Methoden durften mit Zustimmung der Stadt Bottrop Daten und Erkenntnisse zu Gebäuden des SUSTAIN2 Portfolios verwendet werden.

1.7 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen

- Dannapfel, Verena et al. „Die SUSTAIN 2 Cloud of Clouds - Datentransparenz schafft Betriebsverbesserungen in einem kommunalen Liegenschaftsportfolio“, TGA-Kongress 2023, Berlin, Germany, S. 76-77 des Tagungsbandes, Hrsg: Fachverband Gebäude-Klima e. V. Ludwigsburg (2023)
- SUSTAIN 2-Leitfaden: Digitalisierung kommunaler Liegenschaften mittels Energie-Cloud-Systemen. Zugänglich auf der Bibliothekswebsite der RWTH Aachen University.

¹ Klassifizierungssystematik für Dateninfrastruktur zum Abbau von initialen Hemmnissen in der datengestützten Optimierung des Wärmeverbrauchs von Bestandsgebäuden – KlaDat, Förderkennzeichen 03ENM0009, Projektlaufzeit 01.04.2023-30.09.2023

- Zahlreiche Veranstaltungen zur Öffentlichkeitsarbeit in Bottrop;
<https://www.bottrop.de/klima-umwelt-natur/innovation-city/aktuelles/sustainzwei.php>

2 Darstellung der wissenschaftlichen Arbeit

Die Methodik, Anwendung und Ergebnisse in allen Arbeitspaketen wurden gemeinschaftlich formuliert. Die in den einzelnen Arbeitspaketen eingesetzten Personalkapazitäten am Anfang der AP-Berichte dienen einer erleichterten inhaltlichen Zuordnung.

2.1 Arbeitspaket 1 (AP 1): Erfassung kommunaler Gebäude in Bottrop

RWTH Aachen (PMs: 13,5); Stadt Bottrop (PMs: 8,25); ELE (PMs: 7,5); E.ON (PMs: 2,8)

Ziel dieses Arbeitspaketes war die Erfassung und Dokumentation des Stadt Bottrop Gebäudebestands inklusive der vorhandenen Messtechnik. Um dieses Ziel zu erreichen, wurde in mehreren aufeinander aufbauenden Schritten vorgegangen. Zunächst wurden die bereits bei der Stadt Bottrop vorhandenen Verbrauchs- und Planungsdaten gesichtet und eine Dokumentation vorhandener und möglicherweise zu ergänzender Messtechnik erstellt. Anschließend konnten die Informationen durch Vor-Ort Begehungen abgeglichen und ergänzt werden. Abschließend folgte eine erste Analyse zur möglichen Anbindung der lokalen Messtechnik in die untersuchten Cloud-Systeme. Dieses Arbeitspaket bildet die Vorbereitung zu AP2 (Auswahl repräsentativer Gebäude für den Cloud-Feldtest).

Im Zuge der Konsolidierung der Gebäudeerfassung wurde festgestellt, dass die historisch gewachsenen Liegenschaften und Gebäudeenergiesysteme zu einer sehr heterogenen Dokumentation der Systeme geführt haben. Bei den Begehungen wurden daher neben der Sichtung der schriftlichen Dokumentation, Fotos von Energiesystemen, Zählern und Zählerständen angefertigt und somit eine nachhaltige und wiederverwendbare Dokumentation schrittweise aufgebaut.

Die erhobenen Informationen wurden in einem einheitlichen Gebäudesteckbrief zusammengeführt, der neben allgemeinen Informationen wie Baujahr, Nutzungstyp, Sanierungsstand und Adresse, auch Informationen über Versorgungstyp und Energiesysteme enthält (s. Abbildung 2). Darüber hinaus fand auf dieser Grundlage bereits eine Klassifikation der Gebäude statt. In demselben Dokument wurden die verfügbare Zählerstruktur und historische Verbrauchsdaten notiert. Im weiteren Projektverlauf wurden sie mit weiteren Messwerten fortgeschrieben sowie witterungsbereinigt. Auf die Verbrauchswerte wird ebenfalls in Arbeitspaket 3, spezifisch Kapitel **Fehler! Textmarke nicht definiert.Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**, näher eingegangen.

Begleitend zu der Erfassung der Gebäudedaten wurde nach einem Datenmodell gesucht, welches die zu untersuchenden Gebäude umfassend beschreiben und gleichzeitig die Heterogenität der Gebäude berücksichtigen kann. Als Ergebnis der Recherche wurde das Brick Schema² als besonders vielversprechend bewertet. Das Brick Schema ist ein Open Source Projekt mit dem Ziel eine systematische Beschreibung sämtlicher physischer, logischer und virtueller Eigenschaften eines Gebäudes sowie deren Beziehungen untereinander darstellen zu können. Das Ergebnis dieser Beschreibungsform ist ein flexibles Datenmodell, was heterogene Datenströme aus einem Gebäude in Beziehung setzen und damit innerhalb einer Datenbank logisch miteinander verknüpfen kann. Hieraus resultiert eine gute Integrierbarkeit der Datenpunkte in Services und nachgelagerte Anwendungen. Aus diesen Gründen wurde das Brick Schema im Rahmen von SUSTAIN2 weiter untersucht und die Integration in die zu entwickelnde Cloud-Architektur erprobt.

² <https://brickschema.org/>



			
Gebäudename	Sekundarschule Kirchhellen		
Adresse	Kirchhellener Ring 18 46244 Bottrop		
Hauptnutzung / Gebäudekategorie	Weiterführende Schule		
Nettogrundfläche in m ²	-		
Bruttofläche in m ²	Altbau Teil 1 und Aula: 3467m ² ; Altbau Teil 2: 1138m ² ; Neubau:		
Baujahr Gebäude	Altbau Teil 1 und Aula: 1990; Altbau Teil 2: 1995; Neubau: 2018		
Informationen zur Sanierung der Gebäudehülle	Das Gebäude besteht aus mehreren Gebäudeteilen mit unterschiedlichem Baualter.		
Energiesysteme und Wasser			
Informationen zum Wärmeerzeuger	Nahwärmeversorgung Energieträger: Biogas und Erdgas		
Baujahr Wärmeerzeuger	Biogas-BHKW: 1990, Erdgaskessel: 2017		
Informationen zur Lüftungsanlage	Der Neubau verfügt über eine Zu- und Abluftanlage mit WRG. Im Rahmen der Neubau-Arbeiten wurde auch die Aula an die neue maschinelle Lüftung angeschlossen.		
Baujahr Lüftungsanlage	2018		
Informationen zur Trinkwarmwassererzeugung	elektrische dezentrale Durchlauferhitzer kein Warmwasser: WCs und Handwaschbecken mit Warmwasser: Behinderten-WCs und Teeküche		
Zähler	Anzahl	Zählernummer	Digital ablesbar?
Strom	1	1ITR0055382085 (bis 2020 1ITR0054741069)	Ja
Gas	-	-	-
Biogas	-	-	-
Fernwärme	-	-	-
Wasser	1	13050000232	Nein
andere: Nahwärmezentrale	-	-	-
Zählerübersicht			
			

Abbildung 2: Einheitliche Gebäude-Steckbriefe in SUSTAIN2, hier für die Sekundarschule Kirchhellen

Vorplanungen zu Datenpunkten und Messintervalle

Die Erfahrungen aus anderen Projekten zeigen das mittels Visualisierung, Überwachung und Analysen des Betriebsverhaltens verhältnismäßig hohe Einspareffekte im Bereich der Wärme- und Stromversorgung von Gebäuden erzielt werden können. Bei einem, in der Anfangsphase des Projektes SUSTAIN2, abgeschlossen Energieeffizienz-Projektes der E.ON am Hauptsitz eines großen deutschen Versorgers wurden beispielsweise über drei Jahre, Wärme-, Strom- und damit CO₂-Einsparungen im Bereich von insgesamt 20 % erzielt. Das Diagramm in Abbildung 3 zeigt, dass die erzielten Einsparungen sich auch nachhaltig in den Folgejahren eingestellt haben. Bemerkenswert ist auch die Kostenreduktion für die Energieversorgung des Gebäudes über die Projektlaufzeit. Die Einsparungen von etwa 240.000 € wurden dabei ohne größere Investitionen erzielt.

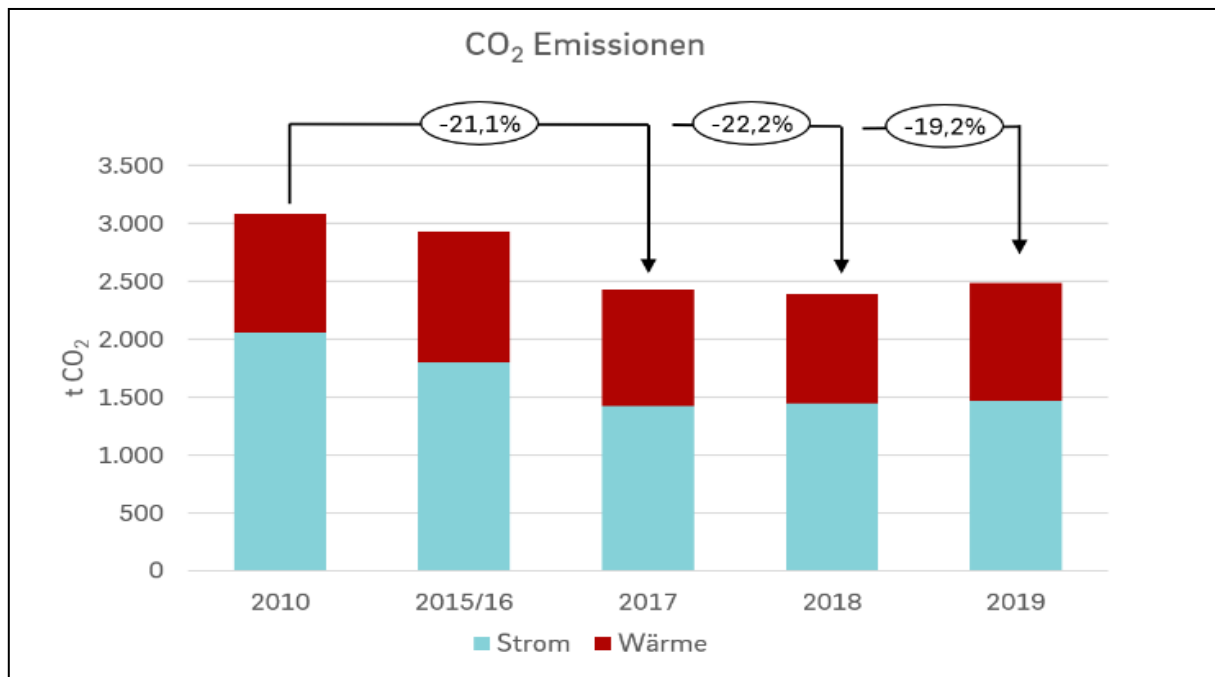


Abbildung 3: Exemplarische realisierte Einsparungen aus Vorgängerprojekt der E.ON

Basierend auf den Erfahrungen aus solchen Projekten entschloss sich das Projektkonsortium in SUSTAIN2 die Anzahl der Zähler und Messpunkte umfassend zu gestalten. Gegenüber der ursprünglichen Planung dieses Forschungsprojektes wurden die Wasserzähler in allen Gebäuden sowie einige Dutzend Sensoren zur Messung der Außen-, Raum- und Medientemperaturen und Luftqualität ergänzt. Die Übertragung der Daten über den Funkstandard LoRaWAN³ ist hierbei sehr hilfreich, da kaum Installationsaufwand entsteht. Einschränkungen sind allein durch die Reichweite sowie eine mögliche Abschirmung durch schwere Bauweise (z.B. Keller im Kulturzentrum) entstanden, konnten in der Regel aber durch die Einbringung weiterer Gateways ausgeräumt werden.

Darüber hinaus sollte ebenfalls die Einbindung von Betriebsdaten aus der Gebäudeleittechnik erfolgen. Von den 255 Liegenschaften der Stadt Bottrop verfügen 80 über eine Gebäudeleittechnik, von denen wiederum nur 9 einen Fernzugriff ermöglichen. Gemeinsam mit der Fa. Kieback&Peter und der Stadt Bottrop wurde im Rahmen des Arbeitspaketes eine mögliche Schnittstelle zur Cloud vorgeplant.

Somit wurden im Rahmen von SUSTAIN2 verschiedene Daten aus unterschiedlichen Quellen (vgl. Abbildung 4) zusammengeführt und analysiert. Die Datenaufnahme erfolgte teilweise anteilig in den 25 ausgewählten Gebäude.

³ LoRa (aus dem Hause Semtech) steht für Long Range, LoRa devices kommunizieren kabellos, LoRaWAN ist ein Low Power Wide Network (LPWAN) Standard

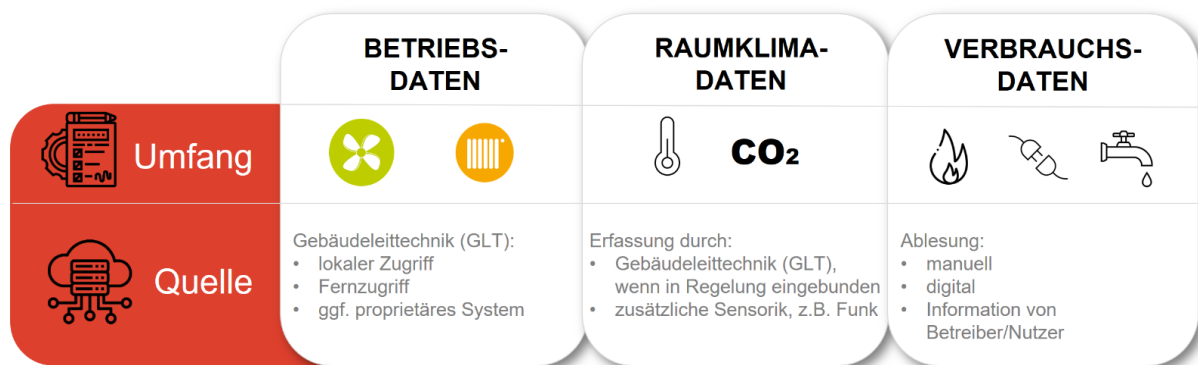


Abbildung 4: Verwendete Datenquellen in den Liegenschaften (teilweise anteilig)

Bei dem Zeitintervall der Datenaufnahme aus zusätzlicher Sensorik wurde (basierend auf Erfahrungen aus Vorprojekten und Standards) ein Intervall von ideal 15 Minuten minimal einer Stunde vorgesehen. Die Betriebsdaten der Gebäudeleittechnik werden eventbasiert, hochaufgelöst aufgenommen.

2.2 Arbeitspaket 2 (AP 2): Auswahl repräsentativer Gebäude für den Cloud-Feldtest

RWTH Aachen (PMs: 4,25); Stadt Bottrop (PMs: 0,75); ELE (PMs: 1,5); E.ON (PMs: 1,5)

Ziel dieses Arbeitspakets war die Auswahl von 25 repräsentativen Gebäuden der Stadt Bottrop, die Reihenfolge der Ausrüstung der Gebäude mit der benötigten Messtechnik sowie der Anbindung an die jeweiligen Cloud-Systeme. Hierfür wurden die Gebäude aus AP1 nach unterschiedlichen Kriterien gruppiert und ihre Eigenschaften mit den technischen Anforderungen der Gruppe der infrage kommenden Cloud-Systeme abgeglichen. Hierbei waren die vorhandene Gebäudeausrüstung, Gebäudeleittechnik sowie die bereits installierte Messtechnik von besonderer Relevanz. Entscheidend war hierbei, dass die Gebäude zwar einerseits ein möglichst breites Spektrum von Gebäudetypen abdecken, aber andererseits auch grundsätzliche Anbindungsmöglichkeiten an die bestehenden Cloud-Systeme ermöglichen. Die Auswahl sollte divers sein, um sowohl unterschiedliche repräsentative Datensätze zu erlangen als auch Installations-, und Modernisierungserfahrungen bei verschiedenen Gebäudetypen zu gewinnen. Die Heterogenität der Gebäude zeigt sich in der Nutzungsart, Baualter, Größe, Anlagentechnik und Dateninfrastruktur.

Im Zuge dieses Arbeitspaketes fanden zahlreiche Workshops statt, bei denen im Austausch zwischen den Cloud-System-Betreibern ELE, E.ON, RWTH und der Stadt Bottrop die technische Ausrüstung der Gebäude diskutiert und analysiert wurde. Hierbei wurde erarbeitet, dass die sinnvollste Aufteilung der Gebäude vorsieht, dass die RWTH die Gebäude der Vorauswahl übernimmt, die mit einem vorhandenen Automationsnetz und einem GLT-Fernzugriff ausgestattet sind. Das technische Monitoring von Automationsnetzdaten ist ein Forschungszweig, der seit vielen Jahren am Lehrstuhl für Gebäude- und Raumklimatechnik der RWTH vorangetrieben wird und schließlich in die Ausgründung „aedifion GmbH“ mündete. Die technischen Mindestanforderungen an die Gebäude bei der Erfassung von Betriebsdaten sind hierbei:

- Dass die Gebäude über standardisierte Netzwerkverbindungen (Ethernet) verfügen
- und das auf der Feldebene der Gebäudeautomation, offene und standardisierte Kommunikationsprotokolle (wie BACnet) verwendet werden.

Gemeinsam wurde schließlich eine Aufteilung der Gebäude in die drei in Tabelle 1 dargestellten Gruppen beschlossen. 10 Gebäude wurden durch E.ON mit einem Gateway zu der E.ON-Optimum Cloud

versehen, 10 Gebäude wurden durch die ELE mit einem Gateway zum bit.B System versehen und 5 Gebäude wurden durch die RWTH mit einem Datenlogger für die Gebäudeleittechnik versehen. Das bit.B System wurde während der Projektlaufzeit eingestellt, wodurch sich nachträgliche Änderungen an dem eingesetzten Cloud-System ergeben haben.

Tabelle 1: Zuordnung der Gebäude nach Partnern

E.ON
- Verwaltung (Bezirksverwaltungsstelle Kirchhellen, Kirchhellener Ring 86)
- Verwaltung (Lohnhalle, Im Blankenfeld 4)
- Verwaltung (Kulturzentrum, Blumenstr. 12)
- Kindergarten (Kinderhaus Montessori, Tappenhof 7)
- Schule (Matthias-Claudius-Schule/ Johannesschule, Gartenstr. 32)
- Schule (Astrid-Lindgren-Schule, Maybachweg 5)
- Schule (Konradschule, Fernewaldstr. 280)
- Schule (Rheinbabenschule, Aegidistr. 185)
- Schule (Welheim-Nebenstandort, Blankenstr. 15)
ELE
- Verwaltung (Fachbereich Immobilienwirtschaft, Ernst-Wilczok-Platz 2 (EWP 2))
- Verwaltung (Museum „Quadrat“, Anni-Albers-Platz 1)
- Schule (Marienschule, Hövekesweg 8)
- Schule (Heinrich-Heine-Gymnasium, Gustav-Ohm-Str. 65)
- Schule (Berufskolleg der Stadt Bottrop, An der Berufsschule 20)
- Schule (Josef-Albers-Gymnasium, Zeppelinstr. 20)
- Sportstätte (Sporthalle Kirchhellen, Loewenfeldst. 33)
- Sportstätte (Dieter-Renz-Sporthalle, Hans-Böckler-Str. 60)
- Sportstätte (Hallenbad im Sportpark, Parkstr. 41)
- Sportstätte (Hallenbad Kirchhellen, Kirchhellener Ring 30)
RWTH Aachen
- Verwaltung (Rathaus Ernst-Wilczok-Platz 1 (EWP 1))
- Verwaltung (Vermessungs- und Katasteramt, Am Eickholtshof 24)
- Nahwärmenetz-Zentrale Kirchhellen (Auf der Bredde 4)
- Schule (Sekundarschule Kirchhellen, Kirchhellener Ring 18)
- Schule (Ludgerusschule, Birkenstr. 34)

Während gemeinsamer Begehungen der ausgewählten Gebäude mit den Projektpartnern wurden die Gebäude kontrolliert und weitere gemeinsame Planungen des Projektes konkretisiert. Ein Teil der ausgewählten Gebäude wird mittels Fernwärme durch die STEAG versorgt. Angrenzend an die nächsten Projektschritte, zeigte sich teilweise Inkompatibilität zwischen den zu installierenden Systemen und den vorhandenen Energiezählmessgeräten (z.B. Fernwärmehähler = STEAG und Gaszähler = EVNG) im

Bestand auf. Die STEAG wiederum plante einige Übergabestationen in der Stadt Bottrop zu digitalisieren. Ein Austausch von weiteren Gaszählern der EVNG war ebenfalls notwendig. Aus diesem Grund wurden anstehende Modernisierungsarbeiten der Energieversorger bei der Auswahl der Gebäude mitberücksichtigt. Die im Rahmen des Forschungsprojektes SUSTAIN2 in den vorgesehenen Gebäuden eingesetzte Messtechnik besteht aus Zählern oder Aufsatzmodulen für Zähler, die die Funk-basierten Kommunikationstechnologien wireless M-BUS und LoRaWAN unterstützen. Im Austausch mit der STEAG und der EVNG konnte für die in Frage kommenden Fernwärme- bzw. Gaszähler die passende Digitalisierungsstrategie (Nachrüstung oder Umrüstung) identifiziert werden.

Für den Einbau der Sensorik wurde in AP2 in enger Zusammenarbeit mit der Stadt Bottrop eine Installationsreihenfolge erstellt. Dazu wurde, unter Berücksichtigung des festgelegten Investitionsrahmens, für jede Liegenschaft geplant, welche Daten sinnvoll erfasst werden können und dann anhand einer Priorisierungsreihenfolge der umzusetzende Umfang bestimmt. Dies war insbesondere in komplexen Gebäuden mit mehreren Bauteilen und entsprechenden Unterverteilungen eine methodische Stütze.

Bei einer ersten Installation des bit.B-Systems an der Berufsschule in Bottrop konnte höheres Systemverständnis für die weiteren Installationen geschaffen werden. Dabei wurde der Fokus im ersten Schritt auf das Energieverbrauchsverhalten auf der Makroebene gelegt. Dafür wurden die Gebäudeteile der Schule durch eine geringe Anzahl an Sensoren des Systems untersucht. Über die Analyse dieser Makroebene konnten erste Einsparpotentiale identifiziert bzw. erschlossen und im späteren Verlauf des Projektes um eine Mikroebene (Anschluss weitere Sensoren) mit detaillierteren Analysen und Maßnahmen ergänzt werden.

2.3 Arbeitspaket 3 (AP 3): Technische Ausrüstung der ausgewählten Gebäude

RWTH Aachen (PMs: 12,5); Stadt Bottrop (PMs: 14,75); ELE (PMs: 9); E.ON (PMs: 7,4)

Gegenstand dieses Arbeitspaketes war die technische Ausrüstung der in AP 2 ausgewählten Gebäude, mit dem Ziel diese für die Anbindung an die ausgewählten Cloud-Systeme in AP 4 zu ertüchtigen. Die notwendige Mess- und Kommunikationstechnik sowie die nötigen Ertüchtigungsmaßnahmen wurden hierfür in Zusammenarbeit zwischen den Cloud-Systemanbietern und der Stadt Bottrop detailliert geplant. Die Maßnahmen teilten sich hierbei in die zwei Bereiche Anbindung vorhandener Messtechnik und Installation und Anbindung neuer Messtechnik auf. Mit Unterstützung der anderen Partner wurden die notwendigen Maßnahmen durch den Fachbereich Immobilienwirtschaft der Stadt Bottrop umgesetzt. Im Ergebnis sollten sämtliche Projektdaten aus allen Gebäuden zwischen allen Partner Cloud-Systemen über standardisierte REST-APIs⁴ austauschbar sein.

2.3.1 Datenübertragung von zusätzlicher Sensorik aus von der E.ON betreuten Liegenschaften

In den von der E.ON betreuten Liegenschaften wurde ein neu entwickeltes System für die Nachrüstung zusätzlicher Sensorik erprobt. Neonpulse stellt ein skalierbares IoT-Ökosystem bereit, das auf der E.ON- Infrastruktur aufsetzt. Das Ökosystem ist eine Kombination von am Markt verfügbarer Hardware (Sensoren und Gateways), der e.IoT Plattform sowie verschiedenen Backend- und Frontend-komponenten. Die Gateways verfügen über ein selbst entwickeltes Betriebssystem, das speziell für Connectivity-Services der vernetzten Welt der Dinge entwickelt wurde und zudem allen Anforderungen der E.ON-IT-Sicherheit entsprechen. Ein wichtiger Bestandteil des Betriebssystems ist ein leistungsfähiges

⁴ https://de.wikipedia.org/wiki/Representational_State_Transfer

Device Management, das hardwareunabhängig u.a. regelmäßige Softwareupdates aller oder nur einzelner Gateways ermöglicht und eine effiziente Möglichkeit zur Fernwartung der eingesetzten Hardware bietet. Abbildung 5 zeigt beispielhaft die Installation eines kompletten Systems.

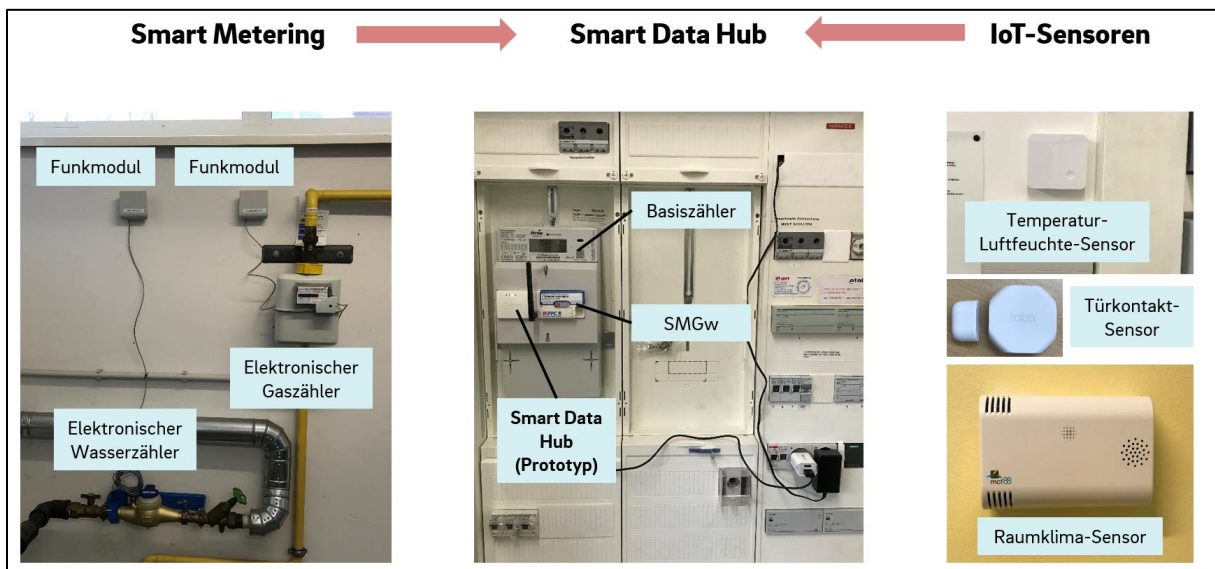


Abbildung 5: Installationsbeispiel Smart Data Hub (SDH) von E.ON

Das Ökosystem ist auf offene Protokollstandards ausgelegt, sodass jegliche Hardware, die dem Protokollstandard der LoRa-Alliance oder dem wMBUS-Protokoll folgt, angebunden werden kann. Die Kommunikation vom Sensor zum Gateway erfolgt über LoRaWAN bzw. wMBUS. Die auf dem Gateway verarbeiteten Daten werden mittels Mobilfunkstandard LTE bzw. 4G in die e.IoT Plattform übermittelt. Abbildung 6 zeigt den Datenfluss noch einmal in der Übersicht.

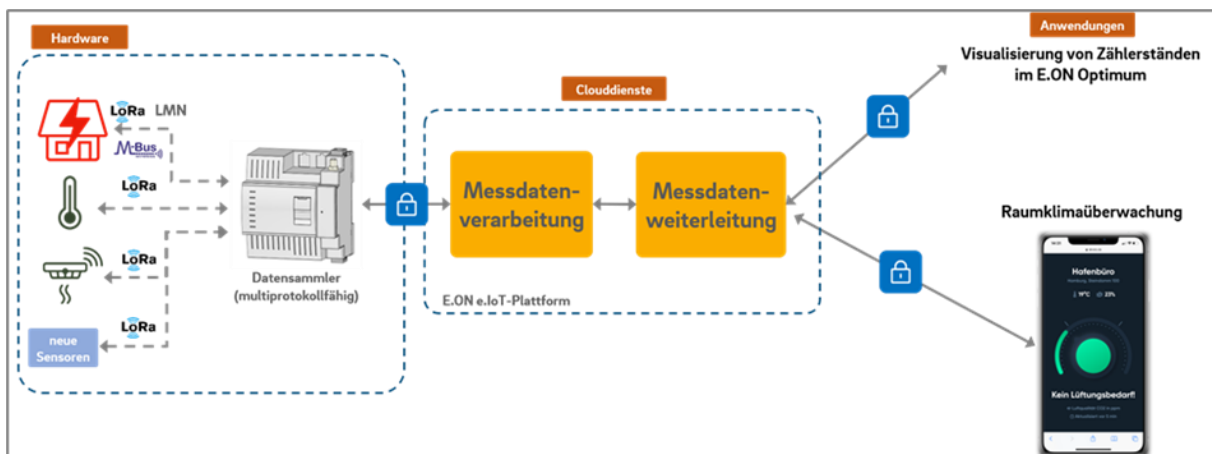


Abbildung 6: Datenfluss bei der eingesetzten Hard- und Software in von der E.ON betreuten Liegenschaften

Beschreibung des Systems:

- Auf LoRaWAN-Technologie basierende Aufsatzmodule zur Auslesung der Strom-, Gas-, Wärme- und Wasserzähler
- IoT-Sensoren zur Erfassung von Temperaturen und CO₂-Werten, ebenfalls auf LoRaWAN-Technologie basierend
- Datensammler (Gateway) Smart Data Hub zur Auslesung und zum Empfang bzw. zur Datenweiterleitung
- Nutzung der E.ON e.IoT-Plattform zur Messdatenverarbeitung und -weiterleitung

- Visualisierung der Messdaten im E.ON-Optimum als erste Datensenke, mit Visualisierungs- und Analysemöglichkeit
- Harmonisierung mit anderen cloudbasierten Messkonzepten in der SUSTAIN 2 Cloud of Clouds zur gemeinsamen homogenen Visualisierung und Analyse

Die Bandbreite an Zählern/Aufsatzmodulen erstreckt sich von Stromzähler (Hauptstrom- und Unterzähler mit LORAWAN-Sender) über Gaszähler (direktes Auslesen von Gaszählern mit Absolut-Encoderzählerwerk oder per Aufsatzmodul für mechanische Zählwerke) und Wärmezähler (Einsteckmodul) bis zu Wasserzähler (direktes Auslesen von Wasserzählern mit Multiprotokoll-Schnittstelle oder per Aufsatzmodul bei mechanischen Zählwerken). In den Gebäuden der Stadt Bottrop, die E.ON im Rahmen von SUSTAIN2 messtechnisch betreut, wurden somit die Daten der Stromzähler, die Gaszähler und bei einer Versorgung mit Fernwärme, die Wärmemengenzähler und wenn technisch möglich auch die Wasserzähler erfasst. Die Anbindung aller Zähler erfolgte, bis auf den Hausanschluss-Stromzähler im Kinderhaus Montessori, kabellos mittels der Funktechnologie LoRaWAN.

Die eingesetzten IoT-Sensoren beschränken sich hauptsächlich auf die Messung von Temperaturen. Wobei zwischen der Messung der Vor- und Rücklauftemperaturen der in den Gebäuden befindlichen Heizungen, Fernwärmestationen und Wärmepumpen und der Komfortbedingungen, namentlich Raumtemperaturen und CO₂-Konzentration unterschieden werden muss. Die erfassten Temperaturen in den Referenzräumen dienen später zur Analyse und zur Änderung der Steuerung mit dem Ziel, den Strom- und Wärmeverbrauch zu senken.

Als Empfänger der Daten von Zählern, Aufsatzmodulen und zusätzlicher Sensorik vor Ort in den Gebäuden wurde ein selbst entwickeltes Gateway, auch Smart Data Hub genannt, und ein am Markt verfügbares LORAWAN-Gateway (Tektelic Kona Micro) verwendet. Die komplette Kommunikation per Datenmobilfunk erfolgt auf TLS-gesicherten Kanälen. Die Gateways sind in der Lage, die von den Zählern oder Aufsatzmodulen versendeten Datenpakete zu verarbeiten (Paket entschlüsseln, Messwerte in physikalische Messwerte umwandeln) und mittels Mobilfunkverbindung an ein eigenes Backend-System weiterzuleiten. Dabei verarbeiten die Gateways nur Daten von vorher dem Gateway mittels eindeutiger Schlüssel bekanntgemachten Zählern bzw. Modulen. Im Cloud-basierten Backend werden die einzelnen Messwerte dann gespeichert und per Datenschnittstelle (REST-API) an die entsprechende Applikation weitergeleitet.

Die Entwicklung des Gateways und die notwendige CE-Zulassung gestaltete sich unter Corona-Bedingungen schwierig, sodass sich der Beginn der Messreihen verzögerte. Mit der erfolgreich abgeschlossenen CE-Zertifizierung der eigenen Hardware (IoT-Gateway) Ende Mai 2021 konnte im Rahmen des Projektes SUSTAIN 2 die technische Ausrüstung aller zugewiesenen Gebäude für Juli 2021 geplant und umgesetzt werden.

Die Installation des E.ON-eigenen Systems Smart Data Hub (IoT-Gateway) erfolgte in den Sommerferien in der KW 29 (20.07. - 22.07.) im Jahr 2021, da dies die Installation in den Schulen vereinfacht. Hierbei konnten alle der E.ON zugewiesenen Gebäude nahezu komplett ausgerüstet und in Betrieb genommen werden. Der große Vorteil des sich noch in der Weiterentwicklung befindlichen Produktes ist die sehr einfache Installation und Inbetriebnahme vor Ort. Aufgrund der größtenteils funkbasiert stattfindenden Datenübertragung beschränken sich die Aufwände für die Installation auf den Wechsel von Zählern, das Aufsetzen von Modulen auf die Zähler oder das Anbringen weiterer IoT-Sensorik. Die Konfiguration bzw. Anbindung der Zähler/Module/Sensoren an das Gateway erfolgt bereits vor Inbetriebnahme. Zusätzliche Kabel für die Datenauslesung oder zur Spannungsversorgung sind nicht notwendig.

Die beiden Liegenschaften Matthias-Claudius-Schule und Johanneschule wurden im weiteren Projektverlauf als eine gemeinsame Liegenschaft betrachtet, da es gelungen ist, diese beiden Schulen mit insgesamt 5 Gebäuden über ein Gateway zu erfassen (siehe Abbildung 7).

Es zeigten sich von Gebäude zu Gebäude große Unterschiede in der Anzahl der installierten Zähler und Sensoren. Die Bandbreite reichte hier von nur sieben Zählern/Sensoren in der Rheinbabenschule und der BVST-Kirchellen bis zu 24 Zähler/Sensoren in der Lohnhalle. Eine detaillierte Übersicht dazu liefert Tabelle 2 in Kapitel 2.3.5.

Nach der Installation der Hardware lag der Fokus der weiteren Arbeiten auf dem Herstellen der Übertragungsstabilität der Gateways. Im Laufe der Installation hatte sich die Datenübertragung an die Cloud mittels Mobilfunk als eine der möglichen Schwachstellen herausgestellt. Eine schlechte Netzabdeckung innerhalb der Gebäude und gelegentliche Verbindungsabbrüche zum Server erschwerten eine stabile und langfristige Datenübertragung der Messdaten in die Serversysteme. Auch die Qualität der Datenübertragung vom Sensor zum Gateway war ein weiterer Fokus. Hierbei geht es hauptsächlich um das Beheben von Softwarefehlern, die mit der Übertragung der richtigen Daten und dem automatischen Wiederverbinden des Sensors am Gateway zu tun hatten.



Abbildung 7: Installierte Zähler und Sensoren über das Gelände der Matthias-Claudius- und Johannes-Schule

Zur ersten Darstellung der Messergebnisse wurde die Energiemanagement-Lösung E.ON-Optimum eingesetzt. In den Vorgänger-Projekten der E.ON kam noch die Anwendung Smart View zum Einsatz, dass zu Optimum weiterentwickelt wurde.

E.ON-Optimum ist eine Cloud-basierte modulare Anwendung, die echte Energieintelligenz bietet und Nutzer in die Lage versetzt, ihren Verbrauch und ihre Kosten zu senken. Optimum verfügt über mehrere vorgefertigte Dashboards und Diagramme, um die Verbrauchsdaten pro Energieart zu analysieren, vergleichen und zu bewerten. Dabei hängt der Funktionsumfang von Optimum davon ab, welche Version man einsetzt. Vier Versionen stehen je nach gewünschter Informationstiefe und Analysemöglichkeiten zur Wahl: Entry, Plus, Advanced und Professional. Die Funktionsübersicht ist in Abbildung 8 je Version dargestellt. Im Projektes SUSTAIN2 wurde eine erweiterte Version von Optimum Plus eingesetzt, um auch die Alarmierung bei außergewöhnlichen Betriebszuständen und abweichenden Verbräuchen zu testen. Zurzeit wird geprüft, ob eine Version entwickelt wird, die speziell die Bedürfnisse und das notwendige Berichtswesen von Kommunen abdeckt.

Funktionsübersicht				
Funktionen:	Optimum Entry	Optimum Plus	Optimum Advanced	Optimum Professional
Verbrauchsübersicht	✓	✓	✓	✓
Kostenübersicht	✓	✓	✓	✓
Tägliche Verbrauchsanalyse	✓	✓	✓	✓
Tägliche Kostenanalyse	✓	✓	✓	✓
Tägliche CO ₂ Analyse	✓	✓	✓	✓
Wöchentliche Verbrauchsanalyse	✓	✓	✓	✓
Wöchentliche Kostenanalyse	✓	✓	✓	✓
Wöchentliche CO ₂ Analyse	✓	✓	✓	✓
Monatliche Verbrauchsanalyse	✓	✓	✓	✓
Monatliche Kostenanalyse	✓	✓	✓	✓
Monatliche CO ₂ Analyse	✓	✓	✓	✓
Jährliche Verbrauchsanalyse	✓	✓	✓	✓
Jährliche Kostenanalyse	✓	✓	✓	✓
Jährliche CO ₂ Analyse	✓	✓	✓	✓
Unbegrenzte Nutzeranzahl	✓	✓	✓	✓
Standortbenchmarking (kwh/m ²)		✓	✓	✓
Historischer Vergleich von Verbrauchsdaten		✓	✓	✓
Individuelle Lastganganalyse		✓	✓	✓
Konfigurierung der minimalen Grundlast		✓	✓	✓
Konfigurierung der maximalen Grundlast		✓	✓	✓
Analyse mehrerer Lastgänge in einer Ansicht		✓	✓	✓
Vorkonfigurierte Berichte		✓	✓	✓
Vergleich auf Zähler-/Standortebene		✓	✓	✓
Individuell konfigurierbare Dashboards			✓	✓
Portfolio-Analyse			✓	✓
Heatmap			✓	✓
Wochentagsanalyse			✓	✓
Saisondatenanalyse			✓	✓
Wetterdatenanalyse			✓	✓
Energieprognose				✓
Energieeffizienzprojekt-Tracking und KPI-Tracking				✓
Tracking mehrerer Energieeffizienzprojekte				✓
Automatische Erkennung von Anomalien				✓
Manuelle Erkennung von Anomalien				✓

Abbildung 8: Funktionsumfang gemäß gewählter E.ON Optimum Version

2.3.2 Datenübertragung von zusätzlicher Sensorik aus von der ELE betreuten Liegenschaften

Zu Beginn von SUSTAIN 2 wurde durch die ELE ein weiteres System (bit.B) eingesetzt, welches ein Produkt der Innogy war und auf der proprietären Funktechnologie „lemonbeat radio“ basierte. Durch die Übernahme von Innogy durch E.ON wurde das bit.B System eingestellt. Um die mittels bit.B erhobenen Daten im Projekt weiter nutzen zu können, wurde im Backend von Optimum eine entsprechende Datenbankbindung implementiert, wodurch nun sämtliche relevante Daten der von E.ON und ELE betreuten 20 Gebäude zunächst in einer Cloud zusammenlaufen.

Im Zuge der gemeinsamen Begehungen der Liegenschaften, zeigte sich, dass teilweise komplexe Gebäudeinstallationen und weitere räumlichere Trennungen der Messpunkte als bei üblichen Gebäudeinstallationen in der Ausstattung mit Sensorik beachtet werden mussten. Um alle Gebäude in der gleichen Granularität zu überwachen und das Gesamtbudget nicht zu überschreiten, wurde der Schwerpunkt bei der Sensorik bei allen von der ELE betreuten Gebäuden auf das Strommonitoring gelegt. Das System bit.B misst den aktuellen Stromverbrauch in „Echtzeit“. Schon nach den ersten Messungen konnten Fehlfunktionen von elektrischen Anlagen (u.a. Lüftung in der Kfz-Lehrwerkstatt identifiziert und behoben werden).

Zudem wurde Sensorik für das Wassermonitoring angeschlossen werden. Aufgrund der Leseinkompatibilität der thermischen Zähler wurden diese zudem teilweise durch digitale Zähler ersetzt.

2.3.3 Datenübertragung aus der Gebäudeleittechnik (GLT) der von der RWTH betreuten Liegenschaften

Für die Übertragung der Gebäudeleittechnik-Daten der fünf der RWTH zugeordneten Gebäude wurde nach einer öffentlichen Ausschreibung ein Automationsnetzdaten-Monitoring der Firma aedifion beauftragt. In Zusammenarbeit mit diesem Unterauftragnehmer wurde ein Datenlogger in das Automationsnetz der Gebäude eingebracht.

Es hat sich gezeigt, dass für die zusätzliche Digitalisierung von älteren GLT Systemen in gewachsenen Strukturen weitere Schritte gegenüber der üblichen aedifion Lösung notwendig sind. Dies bezieht sich insbesondere auf die Zuordnung der einzelnen Netzwerke und IP-Bereiche der Stadt Bottrop. Abbildung 9 zeigt die Erreichbarkeiten der Speicherprogrammierbaren-Steuerungen (SPS) im Automationsnetz der Stadt Bottrop. Die Konfiguration des Netzes und des Loggers benötigte eine enge Zusammenarbeit mit der IT-Abteilung der Stadt Bottrop. Nach mehreren Arbeitstreffen konnten die entsprechenden Freigaben so eingerichtet werden, dass der Datenlogger die SPS erreichen konnte. So konnten sämtliche im Automationsnetz vorliegenden Datenpunkte, wie Temperaturen, Drücke, Ventilstellungen, Zustandsmeldungen und weitere, eventbasiert aufgezeichnet werden. Die erhobenen Daten wurden bereits auf dem Datenlogger aus dem BACnet Protokoll in das IoT Protokoll MQTT übersetzt und über das Internet in die aedifion-Cloud übertragen, von welcher sie über eine Adapterschnittstelle in die SUSTAIN2 Cloud of Clouds (AP4) eingelesen werden können. Der in diesem Fall komplexe Digitalisierungsprozess zeigt den teilweise hohen Aufwand bei wenig standardisierten Bestands-Lösungen auf.

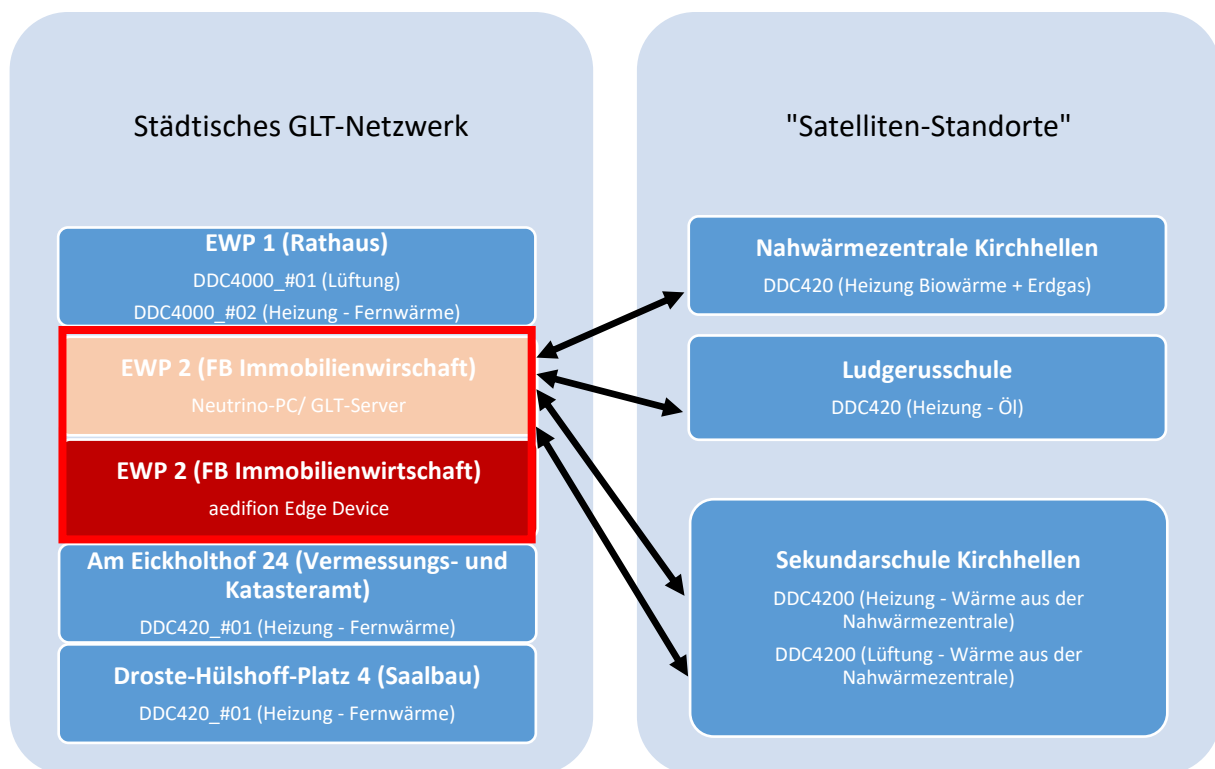


Abbildung 9: Erreichbarkeit und Netzbereiche der speicherprogrammierbaren Steuerungen im Automationsnetz der Stadt Bottrop (Stand Januar 2022)

Insgesamt wurden 1506 Datenpunkte von der lokalen Gebäudeleittechnik in die Cloud übertragen. Nur etwa 10 % davon umfassen Messwerte (MW) (vgl. Abbildung 10), hauptsächlich Temperaturen und Ventilstellungen. Die sonstigen Datenpunkte zeigen Betriebszustände (An/Aus), Störungen, Sollwerte und weitere Informationen.

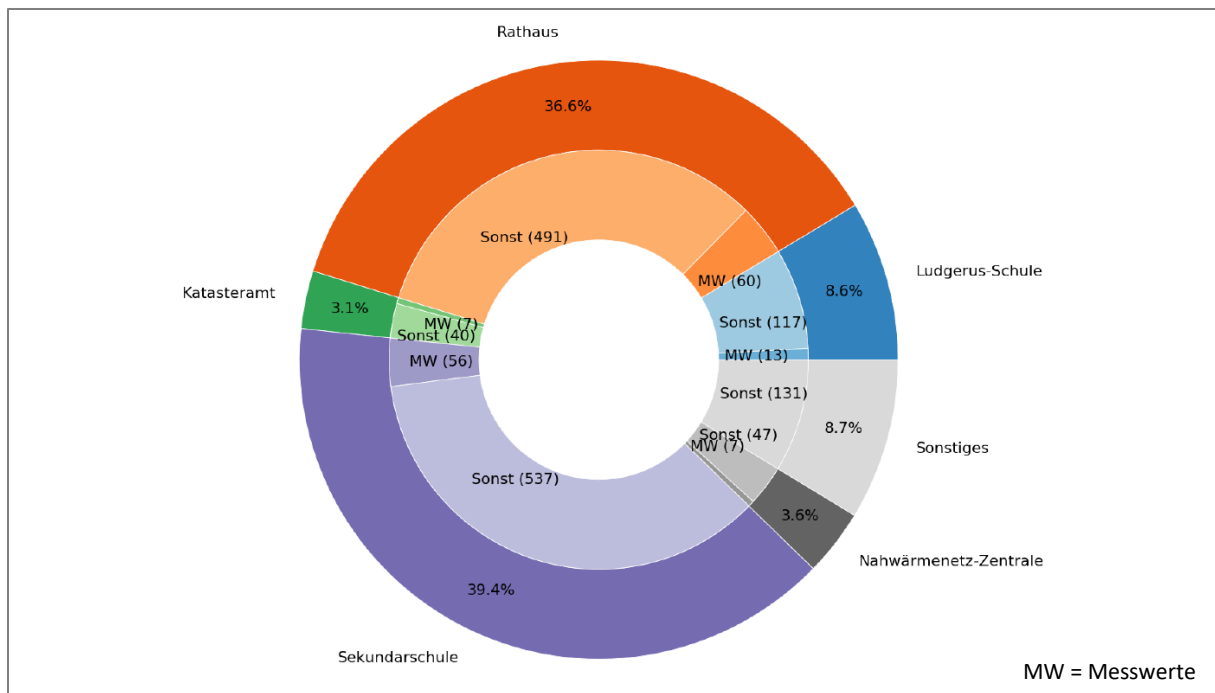


Abbildung 10: Aufgenommene GLT-Datenpunkte in den von der RWTH betreuten Liegenschaften (MW – Messwerte)

2.3.4 Datenübertragung von zusätzlicher Sensorik aus von der RWTH betreuten Liegenschaften

Neben der Erhebung der Gebäudeleittechnikdaten wurden durch die RWTH noch weitere Sensoren in die oben genannten Gebäude eingebracht. Die Gebäudeleittechnikdaten gewähren zwar einen tiefen Einblick in die Funktionsweise und Regelung der betrachteten Gebäude, beinhalten aber keine Energieverbrauchsdaten und auch keine Raumklimadaten. Ziel war es hierbei, die Daten der Sensoren auf eine Weise in die Cloud zu übermitteln, die eine möglichst kostengünstige und langfristige Übertragung durch einmalige Installationen ermöglicht. Für diesen Anwendungsfall haben sich die LoRaWAN Technologien als geeignet erwiesen. Deutliche Vorteile dieser Technologie sind eine nahezu nicht-invasive Installation, eine übliche Batterielaufzeit von zwei Jahren und eine kostengünstige Erweiterbarkeit. Ein Nachteil ist, dass ein nichtexistierendes Funknetz mit entsprechender Netzwerkverwaltungssoftware aufgebaut werden muss.

LoRaWAN-Gateways an jedem Standort dienen als Netzwerkknotenpunkte und Datensammelstellen für die installierte, dezentrale Sensorik. Das Gateway leitet die Messwerte zum Server des kostenfreien The Things Network⁵ (TTN) weiter. Die Messwerte wurden ab August 2020 täglich von TTN heruntergeladen und in der zentralen Datenbank gespeichert. Der resultierende Datensatz enthält Messwerte in 5-Minuten-Intervallen. Für die Auswertung wurden 15-Minuten-Intervalle zusammengefasst. Der Sensortyp ERS Lite misst Feuchtigkeit (%) und Temperatur (°C). Der Sensortyp ERS misst zusätzlich Licht (Lux) und Bewegung (Zähler der Anzahl der erkannten Bewegungen) sowie CO₂ (in parts per million, ppm). Die einzelnen Sensoren befinden sich in repräsentativen Räumen, die über die Gebäude verteilt sind. Die teureren CO₂-Sensoren wurden in Räumen angebracht, die stärker frequentiert werden, wie z.B. das Bürgerbüro im Rathaus und Klassenräume in der Ludgerusschule sowie schlecht belüftete Spielbereiche im Keller der Ludgerusschule. Auch die LoRa-basierten Messdaten von neu ausgerüsteten Strom- und Fernwärmezählern konnten hier integriert werden. Die RWTH hat bei der technischen

⁵ <https://www.thethingsnetwork.org/>

sowie regulatorischen Umsetzung beim Zähleraustausch koordinierend unterstützt und weitere Sensoren in den Gebäuden der Partner installiert.

2.3.5 Zusammenfassende Übersicht und gemeinsame Dokumentation

Abbildung 11 zeigt exemplarisch die Installation verschiedener Hardware für alle Partner gemeinsam.



Abbildung 11: Eindrücke von der Installation von Zählern und Sensorik sowie der Implementierung der Datenübertragung

Die nachfolgende Tabelle 2 beinhaltet eine zusammenfassende Übersicht aller zusätzlich implementierter Sensoren einschließlich Zähler. Die GLT-Datenpunkte sind in dieser Übersicht nicht aufgeführt.

Tabelle 2: Übersicht der zusätzlich implementierten Sensoren in den SUSTAIN2 Liegenschaften

	Strom	Gas/ Wärme	Wasser	VL-/RL- Temperatur	Komfort
Von E.ON betreute Liegenschaften					
Kinderhaus Montessori	2		1	3	2
Bezirksverwaltungsstelle Kirchhellen	2	1	1	2	2
Konrad-Grundschule	1	3	1	4	2
Astrid-Lindgren-Schule	2	3	1	3	1
Matthias-Claudius & Johannesschule	4	2	3	2	3
Rheinbabenschule	1	2	1	2	1
Kulturzentrum	3	2	1	3	
Lohnhalle	18	2	1	2	1
Nebenstandort Welheim	2	1	2	2	1
Von ELE betreute Liegenschaften					
Berufskolleg der Stadt Bottrop	13				
Dieter-Renz-Sporthalle	5	1	1		
Hallenbad im Stadtgarten	1	1	1		
Heinrich-Heine-Gymnasium	1	2			
Josef-Albers-Gymnasium	3				
Marienschule	1		1		
Museum Bottrop	1	3	1		
Schwimmhalle Kirchhellen	4		1		
Sporthalle Kirchhellen	5		1		
Verwaltung (EWP 2)	1		1		
Von RWTH betreute Liegenschaften					
Rathaus (EWP 1)		1	1		15
Vermessungs- und Katasteramt	1	1	1		12
Nahwärmenetz-Zentrale Kirchhellen					
Sekundarschule Kirchhellen	1				
Ludgerusschule	1				14

Um der Vielfalt sowohl von Gebäudetypen als auch von eingesetzter Technik im Dokumentationsprozess gerecht zu werden, wurden die in AP1 erstellten Gebäudesteckbriefe um Daten zu den vorhandenen Zählern und deren Positionen ergänzt (bereits exemplarisch in Abbildung 2 bei AP1 dargestellt). Messinformationen können so übersichtlich dokumentiert werden. Zudem wurden Verbrauchsdaten nach Energieträgern sortiert, in den Arbeitsmappen notiert und in Balkendiagrammen dargestellt (siehe Beispiel in Abbildung 12).

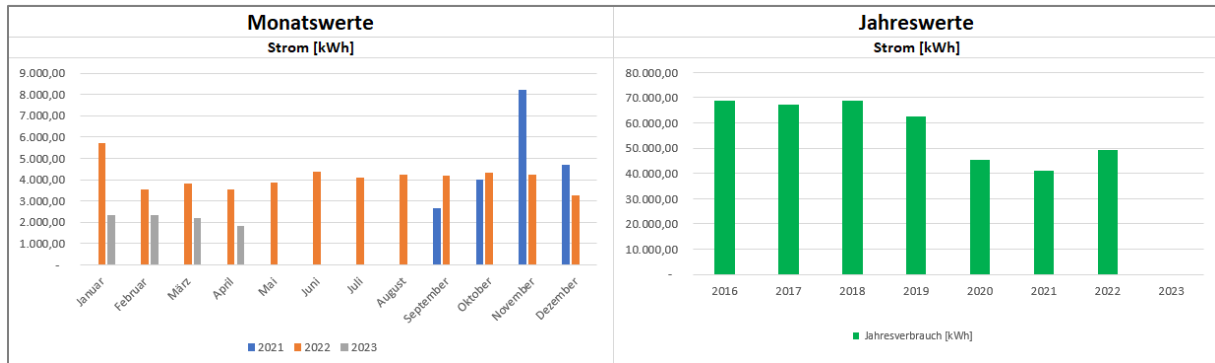


Abbildung 12: Einheitliche Darstellung von Verbrauchswerten in Balkendiagrammen, hier: Stromverbrauch Lohnhalle

Thermische Verbräuche wurden in einheitlicher Weise mit Bezug auf die lokalen monatlichen Gradtagzahlen der vergangenen fünf Jahre witterungsbereinigt. Die Informations- und Kalkulationsvorlagen auf Excel-Basis erlauben die Wiederverwendbarkeit und Fortschreibung der Ergebnisse sowie eine zukünftige einfache Integration weiterer Gebäude.

2.3.6 Vergleich von kalkulatorischen Bedarfen und gemessenen Verbräuchen

Im Projekt SUSTAIN2 wurden Strom- und Heizenergieverbräuche von verschiedenen Gebäuden fortlaufend aufgezeichnet. Im Falle historischer, geringer aufgelöster Daten (z.B. jährliche Verbrauchsabrechnungen) oder Übertragungsstörungen fehlen möglicherweise passende Vergleichswerte für die nachfolgenden Analysen. Um potenzielle Datenlücken zu schließen, wurde ein Excel-Tool entwickelt, das die monatlichen Lastgänge der Strom- und Heizenergieverbräuche seit 2016 durch einen kalkulatorischen Ansatz abbildet.

Als Eingangsgrößen werden der Gebäudetyp, das Baujahr, die Postleitzahl, die Art der Trinkwassererwärmung und die Nettogrundfläche des Gebäudes abgefragt. Bei Bürogebäuden wird zusätzlich das Baujahr benötigt. Die Grundlage für die Berechnung der Verteilung sind die jährlichen Strom- und Heizenergieverbräuche, welche aus Abrechnungsgründen vorliegen.

Stromlastgang

Die Kalkulation bezieht sich auf Stromlastgänge mit Standardlastprofil, bei registrierender Leistungsmessung wird von vorliegenden detaillierten Daten ausgegangen.

Zur Kalkulation der monatlichen Stromlastganglinien werden die Standardlastprofile (SLP) des VDEW⁶ verwendet. Die Lastprofile sind abhängig von der Gebäudenutzung und werden unterschieden in Haushaltskunden, Landwirtschaftskunden und Gewerbekunden. Diese Gruppen werden weiter unterteilt, wobei die in SUSTAIN2 enthaltenen Gebäudekategorien in die Untergruppe G1 (Abbildung 13) fallen.

G1 Gewerbe werktags 8-18

Dieses Profil repräsentiert Abnahmestellen, die typischerweise einen Verbrauch zwischen etwa 8 und 18 Uhr an den Werktagen, und keinen oder einen allenfalls geringen Verbrauch an den Wochenenden erwarten lassen (sonst siehe G4). Hierzu gehören u.a. Büros, Arzt- und Rechtsanwalts-Praxen, Werkstätten, Druckereien, Schulen, Kindergärten und Tagesstätten, Verwaltungseinrichtungen, Bank- und Sparkassenfilialen, ...

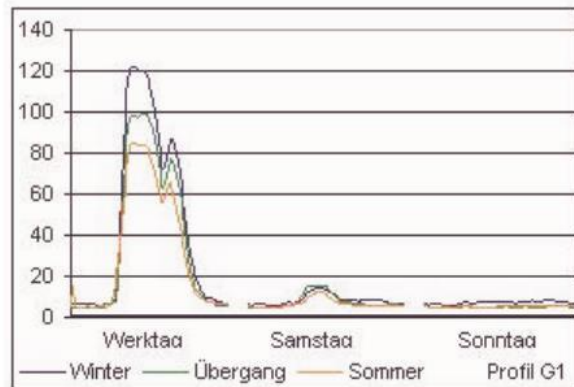


Abbildung 13: Charakteristik G1, Quelle: VDEW⁶

In den Lastprofilen enthalten sind viertelstündliche Werte der Stromlasten für charakteristische Profiltage – Werktag, Samstag und Sonntag. Diese Profiltage sind unterteilt in Sommertage, Wintertage und Tage in der Übergangszeit. Feiertage werden wie Sonntage behandelt.

In Abbildung 14 werden exemplarisch die gemessenen Stromverbräuche und kalkulatorischen Bedarfe für das Rathaus im Jahr 2021 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die kalkulierten Bedarfe und gemessenen Stromverbräuche ähnlich verlaufen. Im Sommer wird stetig mehr, im Winter weniger Strom verbraucht als kalkuliert. Die Ursache für die abweichenden realen Stromverbräuche könnte auf zum herangezogenen Profil abweichenden Nutzungsbedingungen zurückzuführen sein. Im Falle des Rathauses zum Beispiel bei effizienteren elektrischen Verbrauchern (Computer, Beleuchtung) aber zusätzlich Wochenendnutzung oder zusätzlichen Verbrauchern im Sommer (Ventilatoren). Die in der Abbildung dargestellte Tendenz zeigt sich in allen betrachteten Jahren und könnte gebäudespezifisch über Korrekturfaktoren aufgegriffen werden. Unter bekannten, annähernd unveränderten Randbedingungen stellen die kalkulierten Lastgänge insgesamt allerdings eine gute Möglichkeit dar, eventuelle Datenlücken zu füllen.

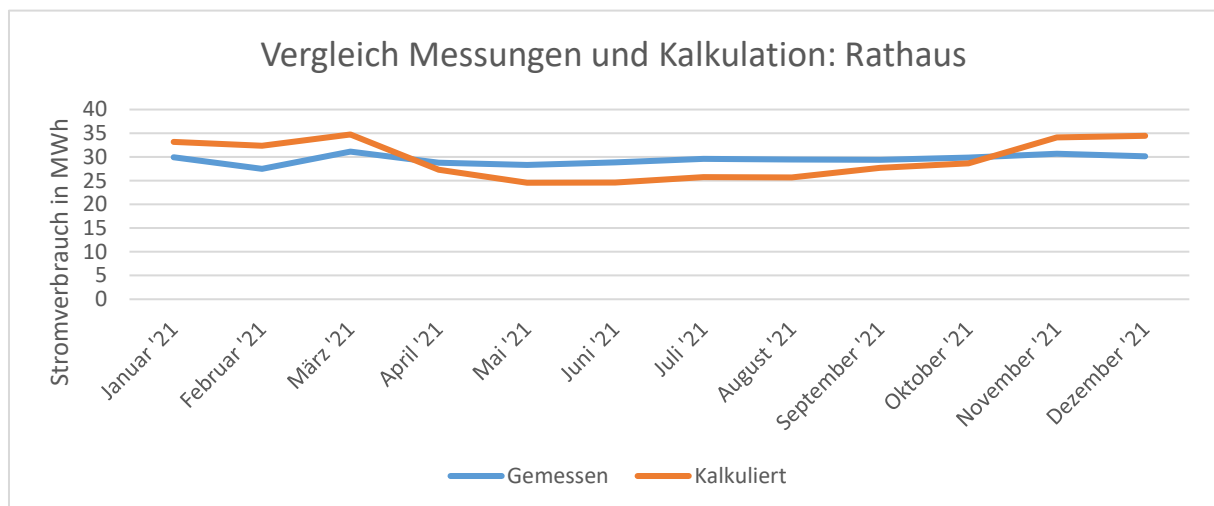


Abbildung 14: Stromverbrauch Rathaus 2021, kalkulierter Bedarf und gemessener Verbrauch

⁶ Repräsentative VDEW-Lastprofile, 1999, <https://www.bdew.de/energie/standardlastprofile-strom/>

Heizenergielastgang

Zur Kalkulation der monatlichen Verteilung der Heizenergieverbräuche werden die monatlichen Gradtagzahlen der Jahre 2016-2022 zur Kalkulation hinzugezogen. Diese werden zwei Mal im Jahr durch das Institut Wohnen und Umwelt⁷ öffentlich bereitgestellt. Die Gradtagzahlen stellen den Zusammenhang zwischen Raumtemperatur und der Außenlufttemperatur für die Heiztage eines Bemessungszeitraums dar. Sie sind abhängig vom Gebäudestandort und unterscheiden sich nach Postleitzahlen.

Wenn das Trinkwarmwasser in Kombination mit der Raumwärme erzeugt wird, wird dies im Heizlastverlauf berücksichtigt. Die für die Trinkwassererwärmung benötigte Wärme wird über das Jahr verteilt als konstant angenommen und anhand des „Leitfaden Energienutzungsplan“ ermittelt, welcher 2011 unter anderem vom Bayerischen Staatsministerium für Umwelt und Gesundheit⁸ herausgegeben wurde. In diesem befinden sich Werte für Wohngebäude, aber auch für Nicht-Wohngebäude. Die Nicht-Wohngebäude sind unterteilt in 10 Verbraucherklassen, beispielsweise Schulen, Büros und Krankenhäuser, welche teilweise noch weiter unterteilt sind. Da in den Gebäuden, die durch die RWTH betreut werden, eine elektrische Trinkwassererwärmung mittels Untertischgeräten vorliegt, wurde die Trinkwassererwärmung in diesen Fällen nicht mit einberechnet.

Als Innenraumtemperatur wurde für alle Gebäude 20°C angesetzt, während die Heizgrenztemperatur bei 15°C liegt. Als beheizte Fläche wird die Nettogrundfläche angenommen. Mithilfe dieser Daten wird der monatliche Bedarf kalkuliert. Der Anteil eines Monatsverbrauchs am Jahresgesamtverbrauch wird durch die jeweiligen Gradtagzahlen ermittelt. Hierzu wird folgende Gleichung verwendet:

$$\text{Monatsverbrauch} = \frac{\text{Gradtagzahl des Monats [Kd]}}{\text{Summe Gradtagzahlen des Jahres [Kh]}} * 24 \frac{\text{h}}{\text{d}} * \text{Jahresheizenergie in kWh}$$

In Abbildung 15 werden die gemessenen Heizenergieverbräuche und kalkulatorischen Bedarfe für das Rathaus in der Heizperiode 2022/2023 dargestellt.

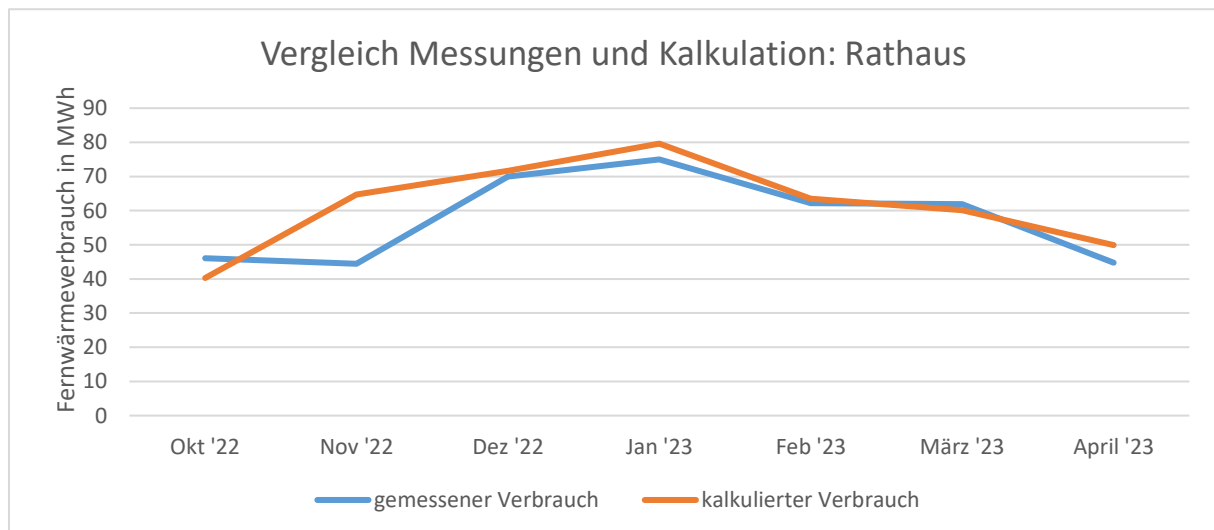


Abbildung 15: Heizenergieverbrauch Rathaus 22/23, kalkulierter Bedarf und gemessener Verbrauch

⁷ Gradtagzahlen, Institut Wohnen und Umwelt GmbH, <https://www.iwu.de/publikationen/fachinformationen/energiebilanzen/#c205>

⁸ Leitfaden Energienutzungsplan, Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Gesundheit, 2011, [https://www.bestellen.bayern.de/application/applstarter?APPL=eshop&DIR=eshop&AC-TIONxSETVAL\(artdtl.htm,APGxNODENR:1325,AARTxNR:stmug_klima_00003,AARTxNODENR:17783,USERxBODYURL:artdtl.htm,KATALOG:StMUG,AKATxNAME:StMUG,ALLE:x\)=X](https://www.bestellen.bayern.de/application/applstarter?APPL=eshop&DIR=eshop&AC-TIONxSETVAL(artdtl.htm,APGxNODENR:1325,AARTxNR:stmug_klima_00003,AARTxNODENR:17783,USERxBODYURL:artdtl.htm,KATALOG:StMUG,AKATxNAME:StMUG,ALLE:x)=X)

Es ist erkennbar, dass die kalkulierten Bedarfe und gemessenen Heizverbräuche ähnlich verlaufen. Die Abweichungen liegen zwischen 1 % und 46 %. Die größten Abweichungen treten im November 2022 auf. Dies kann darin begründet sein, dass in diesen Monaten die Verordnung zur Sicherung der Energieversorgung über kurzfristig wirksame Maßnahmen (EnSikuMaV) umgesetzt wurde. Dadurch durften öffentliche Gebäude nur bis 19°C geheizt werden, wodurch der Heizenergieverbrauch und die Heizlasten sanken. Nach einer Anpassungsphase nähern sich die Kurven ab Dezember 2022 wieder an.

Die realen Heizenergieverbräuche können unter Umständen aufgrund geänderter Nutzungsbedingungen oder auftretenden Fehlern im Heizungssystem zeitweise stärker abweichen. Bei Schulen werden die Schließtage in den Gradtagzahlen nicht berücksichtigt, wodurch es ggf. zu größeren Abweichungen kommt. Unter bekannten, unveränderten Bedingungen stellen die kalkulierten Heizlastbedarfe insgesamt allerdings eine gute Möglichkeit dar, eventuelle Datenlücken zu füllen, um eine lückenlose Analyse der Daten zu erreichen.

2.4 Arbeitspaket 4 (AP 4): Anbindung und Weiterentwicklung Cloud

RWTH Aachen (PMs: 25,75)

Ziel dieses Arbeitspakets war die Entwicklung einer übergeordneten Cloud of Clouds, welche als zentrale Datenlenke für die unterschiedlichen Cloud-Systeme diente, welche in SUSTAIN2 erprobt wurden. Um dieses Ziel zu erreichen, wurden mehrere Entwicklungen in einer übergeordneten Cloud-Architektur zusammengeführt. Die Arbeiten umfassten die Entwicklung von Schnittstellen, zu den eingesetzten Cloud-Systemen sowie die Anpassung, Weiterentwicklung und Erweiterung der SUSTAIN-Cloud an neue Anforderungen. Darüber hinaus wurden implementierte Funktionalitäten und Analysefunktionen mit Felddaten getestet und eine Web-basierte Schnittstelle für die Stadt Bottrop entwickelt. Dieses Arbeitspaket war abhängig von AP3 (Technische Ausrüstung der ausgewählten Gebäude) und bildete die Basis für AP5 (Mensch-Maschine-Interaktion im Energiemanagement).

2.4.1 Architektur und Entwicklung der SUSTAIN2-Cloud

Die entwickelten Schnittstellen umfassen Adapter an bit.B⁹ (ein System welches während der Projektlaufzeit eingestellt wurde und durch E.ON Optimum¹⁰ ersetzt wurde), die E.ON e.IoT-Cloud mit E.ON Optimum, das aedifion GLT Monitoring¹¹ und dem The Things Network¹² (eine offene IoT Plattform, insbesondere für die Anbindung von Open Source LoRaWAN Sensoren). Abbildung 16 zeigt den geplanten Datenfluss als Grundlage für die Spezifizierung der SUSTAIN2 Plattform-Architektur.

Für die Entwicklung der übergeordneten Cloud-Architektur war es demnach notwendig, die vielen heterogenen Datenströme aus den unterschiedlichen Quellen zu vereinheitlichen, um diese dann nachfolgend in der Zeitreihendatenbank der Cloud of Clouds verarbeiten zu können. Neben der technischen Verarbeitung der Datenströme bestand ebenfalls eine Herausforderung darin, die Datenströme den jeweiligen Gebäuden und Messgrößen zuzuordnen, da jedes System mit individuellen Datenpunktbezeichnungen operiert. Schließlich musste ein Nutzermanagement mit eigenem Berechtigungssystem und eine Visualisierung zur Darstellung der Daten für die Verwendung der Plattform in AP5 implementiert werden.

⁹ <https://www.bitb.innogy.com/>

¹⁰ <https://eon-optimium.com/>

¹¹ <https://www.aedifion.com/>

¹² <https://www.thethingsnetwork.org/>

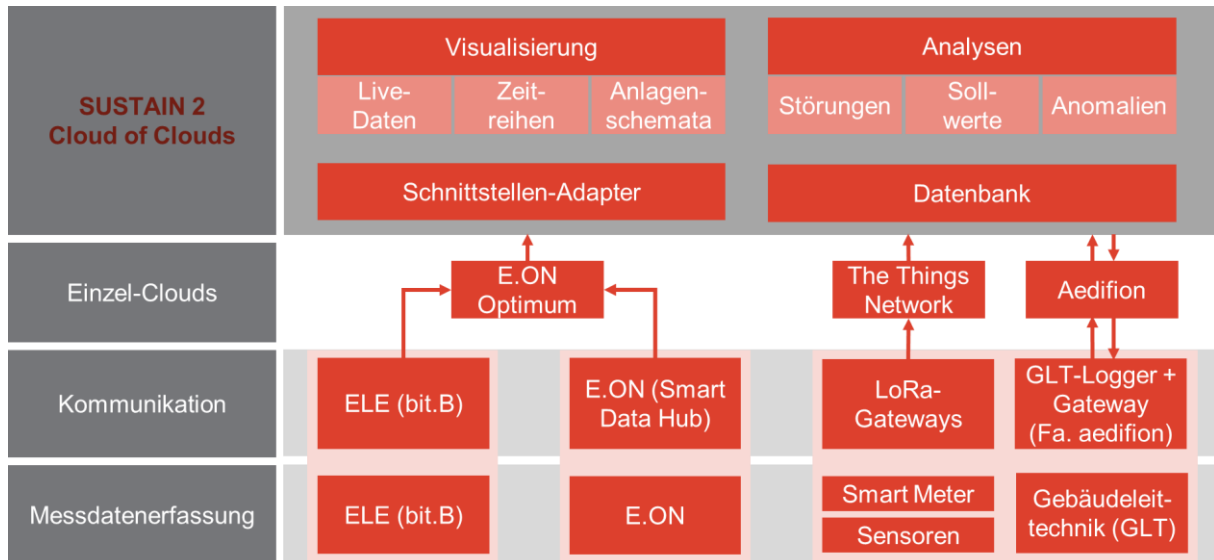


Abbildung 16: Datenfluss von der Datenaufnahme bis zur SUSTAIN2 Cloud of Clouds und den dort geplanten Funktionsbereichen

Abbildung 17 stellt die entwickelte Plattformarchitektur auf funktionaler Ebene dar. Die oben beschriebenen Anforderungen werden durch die Entwicklung von spezifischen Adaptern adressiert, welche die Datenströme vereinheitlichen und an den „Message Broker“ weiterleiten. Diese Datenströme werden über den „Broker Topic Manager“ mit Kontext (Topics) versehen und über den „Message Listener and Router“ in eine performante „Time Series Data Base“ geschrieben. In dieser Zeitreihendatenbank stehen sie dann für unterschiedliche Services, Auswertungs- und Visualisierungsroutinen zur Verfügung. Der Kontext wird über den „Building Meta Datamanager“ durch einen Systemadministrator verwaltet. Von der Datenverarbeitung und -verwaltung losgelöst ist ein Usermanagement, welches über die „User Database“ unterschiedliche Nutzergruppen, Zugangsrechte und Funktionalitäten verwaltet. Der Gebäudebetreiber „End User“ interagiert mit der SUSTAIN2 Plattform über das „SUSTAIN2 User Dashboard“. Diese Architektur ermöglicht es die heterogenen Datenströme zu vereinheitlichen, mit sinnvollen Metadaten zu versehen, performant zu verarbeiten und unterschiedlichen Nutzergruppen für individuelle Analyse Services nutzbar zu machen.

Bei der Implementierung der Plattformarchitektur mit konkreten Softwarebausteinen, mussten einige Randbedingungen berücksichtigt werden. Die verwendeten Komponenten sollten flexibel konfigurierbar sein, um die heterogenen Datenströme aus den unterschiedlichen Cloud-Systemen zu verarbeiten und auf die zu Projektbeginn nicht abschließend vorhersehbaren Anforderungen eingehen zu können. Darüber hinaus sollten die Komponenten frei verfügbar (bestenfalls Open Source) sein, damit die entwickelte Architektur leicht von anderen Kommunen kopiert und für die individuellen Bedürfnisse angepasst werden kann. Schließlich sollten die laufenden Kosten (selbst bei gemieteten Ressourcen) im Verhältnis zu den möglichen Energieeinsparungen stehen und die Architektur (wenn gewünscht) ebenfalls auf eigenen (lokalen) Servern zu betreiben sein.

Um die beschriebenen Anforderungen zu erfüllen wurden umfangreiche Recherchen und Tests durchgeführt, um die vielversprechendsten Open Source Projekte auszuwählen, welche die skizzierten Funktionalitäten erfüllen. Darüber hinaus wurden einige Software Module selbst entwickelt, insbesondere wenn die Anforderungen aus dem Projekt zu speziell waren, um durch Standardkomponenten abgedeckt werden zu können.

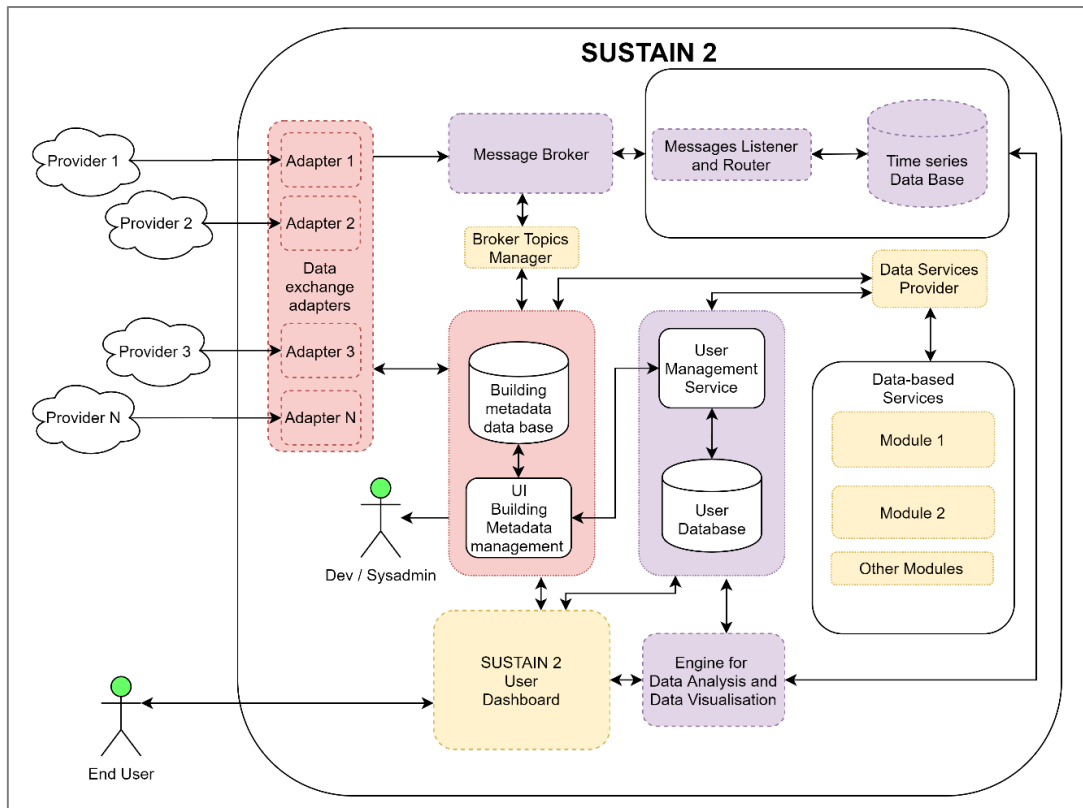


Abbildung 17: Funktionale Darstellung der SUSTAIN2 (Cloud of Clouds) Plattformarchitektur

Die SUSTAIN2-Cloud wurde so konzipiert, dass sie sowohl auf eigenen Servern, betrieben durch Städte und Kommunen, als auch auf Servern von Public Cloud Providern aufgesetzt werden kann. Zum Testen der entwickelten Lösung und um eine maximale Erreichbarkeit der Cloud über das Internet zu erzielen wurde die SUSTAIN2 Cloud auf Microsoft Azure Cloud Servern in Frankfurt am Main aufgesetzt. Hierüber wurde ein guter Kompromiss aus einer entwicklerfreundlichen Umgebung, mit integrierten Werkzeugen und Dienstleistungen und dem Datenschutz gefunden. Eine wichtige Projekterkenntnis war der Vergleich zwischen Public Cloud Providern und selbstorganisierten Rechenkapazitäten. Im Bereich Flexibilität und Skalierbarkeit haben die Public Cloud Lösungen integrierte Werkzeuge angeboten, die die Entwicklung und Umsetzung der Infrastruktur vereinfacht haben. Ein Beispiel ist hier die Möglichkeit verfügbare/zugewiesene Rechenressourcen jederzeit anpassen zu können. Dies hat sich als sehr nützlich erwiesen, als die Zwischenspeicherkapazitäten nachträglich erhöht werden mussten, um die eingehenden Datenflüsse zu stabilisieren.

Die Architektur der SUSTAIN2-Cloud wurde in Form von sogenannten Microservices entwickelt, das heißt, kleine, unabhängige Funktionsblöcke, die zusammen innerhalb der Cloud agieren. Auf das abstrakte Lösungskonzept der Cloud-Architektur folgte eine Umsetzungsphase für eine Produktivumgebung.

Nachdem die funktionelle Architektur festgelegt wurde, musste die konkrete Technologie ausgewählt und implementiert werden, welche diese Funktionalität mit Produktionsstandards gewährleisten kann. Die Bereitstellung einer Cloudplattform mit Produktionskriterien erfordert reife, getestete, belastbare, sichere und industrietaugliche Software-Komponente. Eine Recherche und eine Testphase der existierenden Technologien wurden durchgeführt.

Während der Recherche waren zwei kritische Punkten zu erkennen. Erstens, dass die Industrie der Gebäudeautomation keine einheitlichen standardisierten Digitalisierungslösungen besitzt und aus die-

sem Grund die Möglichkeit einer Integration von mehreren Gebäudedaten, Systemen und Technologien sehr begrenzt ist. Zweitens, dass eine semantische Integration, das heißt, alle Messdaten strukturiert und standardisiert geordnet zu haben, deutliche Vorteile in der Datenanalysenphase bringt.

Mit den oben genannten Kriterien, sowie dem Ansatz Open-Source Technologien zu verwenden, wurden verschiedenen Technologien getestet und verglichen. Eine Darstellung der SUSTAIN2-Cloud auf der softwaretechnischen Ebene ist in Abbildung 18 zu sehen.

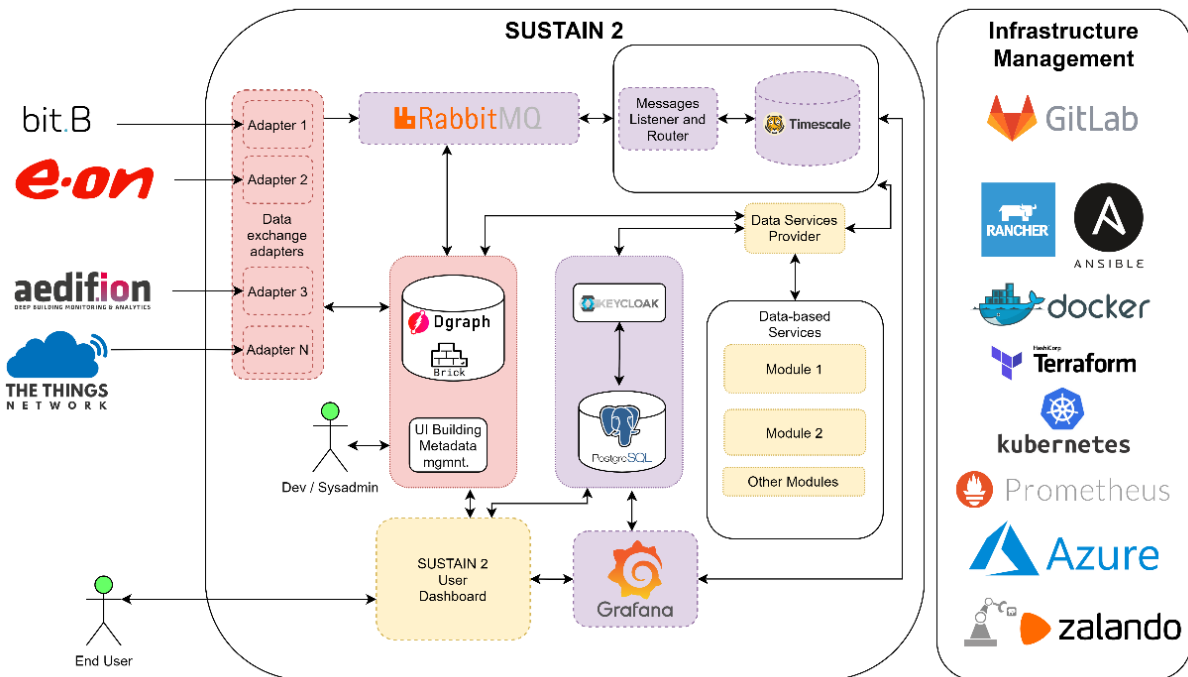


Abbildung 18: Umsetzung der SUSTAIN2 Cloud mit konkreten Softwaremodulen

Im nachfolgenden werden die relevantesten verwendeten Technologien eingeführt und beschrieben:

LoRa & LoRaWAN

Das Internet der Dinge bzw. Internet Of Things ist ein allgemeiner Begriff und meint grundsätzlich die Vernetzung von physischen Objekten mit dem Internet. Dies soll ermöglichen, dass diese Gegenstände mittels des Internets kontrolliert werden oder selbstständig Aktionen durchführen können. Beispielsweise soll dadurch ermöglicht werden, dass man die Zeitreihendaten eines Temperatursensors über das Internet auslesen kann.

LoRaWAN wurde speziell für das Internet der Dinge entwickelt und ist eine Abkürzung für Long Range Wide Area Network. LoRaWAN umfasst den gesamten Netzwerkaufbau, sowie die Kommunikation der einzelnen Komponenten des Netzwerks untereinander.

Die Komponenten des Netzwerks sind dadurch gekennzeichnet, dass sie drahtlos, strahlungsarm und energieeffizient Daten über lange Strecken übertragen können. Es ist möglich mehrere hundert Sensoren innerhalb eines Netzwerkes zu verwalten und Sensordaten zu verarbeiten. Ist ein Gerät LoRaWAN-fähig, so kann es ohne Weiteres in ein schon existierendes Netzwerk eingebunden werden.

Mioty, NB-IoT oder Sigfox sind beispielhafte Alternativen zu LoRaWAN. LoRaWAN ist seit über zehn Jahren auf dem Markt und daher eine etablierte Technik. Es besteht ein umfassendes Ökosystem um die Technik herum. Die Alternative Mioty ist relativ neu dagegen, bietet gegenüber LoRaWAN jedoch

eine höhere Robustheit und bessere Energieeffizienz, sodass Zähler mit einer ähnlichen Batterie eine längere Laufzeit (bis zu 20 Jahre) erzielen.

The Things Network

Das "The Things Network" (TTN) ist ein offenes und dezentralisiertes Netzwerk, das aus LoRaWAN-Gateways besteht und von Freiwilligen betrieben wird. Es ist die größte LoRaWAN-Gemeinschaft und steht jedem offen, der beitragen möchte. Die LoRaWAN-Gateways leiten Funksignale von LoRa-Sensoren über das Internet an einen LoRa-Server weiter, wo die Daten weiterverarbeitet und ausgewertet werden können. Der Vorteil von TTN liegt darin, dass es offen und dezentral ist, was bedeutet, dass es nicht von einem einzigen Anbieter abhängig ist, der die Kostenstruktur ändern oder den Support einstellen könnte. Um das Netzwerk sinnvoll nutzen zu können, benötigt es jedoch eine große Anzahl von LoRaWAN-Gateways als Datenempfänger, die von Freiwilligen betrieben werden. Je mehr Netzwerker beteiligt sind, desto besser ist die Netzabdeckung im Land. Eine geringe Anzahl von Gateways führt hingegen zu einer schlechten Netzabdeckung.

Als Alternative zum TTN gibt es Helium, ein Netzwerk, das ebenfalls das LoRaWAN-Protokoll nutzt und jedem offensteht. Helium ist dem TTN in Bezug auf die Abdeckung überlegen, da die Helium-Gateway-Betreiber darauf bedacht sind, eine gute Abdeckung zu bieten, um durch das Schürfen der Kryptowährung HNT Geld zu verdienen. Die Nutzung von Helium ist jedoch nicht kostenlos und es wird nach übertragenen Daten abgerechnet.

Grafana

Grafana ist eine Open-Source-Software zur Visualisierung von Zeitreihendaten mit einer webbasierten Nutzeroberfläche. Es kann Daten aus verschiedenen Datenquellen auslesen, wie z.B. InfluxDB, MySQL, PostgreSQL, Prometheus und Graphite, und bietet eine Vielzahl von Visualisierungsmöglichkeiten. Es bietet auch die Möglichkeit, Warnungen zu generieren, z.B. wenn ein vorgegebener Temperaturschwellenwert überschritten wird, und kann den Nutzer per E-Mail über den Zustand der Temperatur benachrichtigen. Der Funktionsumfang von Grafana kann durch Plugins erweitert werden, und die verschiedenen Visualisierungsmöglichkeiten werden in Dashboards gesammelt und dargestellt. Mehrere Dashboards können innerhalb einer Ordnerstruktur organisiert werden.

Obwohl es zahlreiche Alternativen zu Grafana gibt, die je nach Anwendungsfall mehr oder weniger sinnvoll sind, lassen sich hier einige Beispiele hervorheben: Datadog bietet Alarme basierend auf maschinellem Lernen und detaillierte Protokollverwaltung mit Anomalieerkennung. Holistics ermöglicht Drag-and-Drop-Berichterstellung für nichttechnische Benutzer. Kibana bietet ähnliche Funktionen wie Grafana.

RabbitMQ

RabbitMQ ist ein Open-Source-Message-Broker, der es verschiedenen Anwendungen ermöglicht, miteinander zu kommunizieren, indem er Nachrichten zwischen ihnen übermittelt. RabbitMQ kann große Mengen an Nachrichten schnell und effizient verarbeiten und unterstützt mehrere Nachrichtenprotokolle (z. B. AMQP, MQTT und STOMP). Es gibt mehrere Nachrichtentypen, die übermittelt werden können, wie zum Beispiel reine Textnachrichten, Binärdaten, JSON oder Anweisungen an andere Programme. RabbitMQ bietet auch eine flexible Architektur, die die Erstellung von kundenspezifischen Plugins und Erweiterungen ermöglicht.

Die grundlegende Idee hinter RabbitMQ ist, dass sich zwischen dem Sender und Empfänger eine Warteschlange befindet, in der die Nachrichten zwischengespeichert werden. Die Nachricht wird vom Message-Broker abgeholt, und der Sender kann eine neue Aufgabe beginnen, während die Nachricht in

der Warteschlange auf den Empfänger wartet. Da sich die Nachricht in der Warteschlange befindet, können Sender und Empfänger unabhängig voneinander agieren, was eine asynchrone Kommunikation ermöglicht.

Ein Nachteil von RabbitMQ ist, dass es für fortgeschrittene Anwendungsfälle komplex einzurichten und zu konfigurieren sein kann. Außerdem erfordert es möglicherweise eine spezielle Infrastruktur, um effizient zu arbeiten, insbesondere in Umgebungen mit hohem Datenverkehr. Es gibt mehrere Alternativen zu RabbitMQ, die eine ähnliche Nachrichtenfunktion bieten, wie: Amazon Simple Queue Service (SQS), Microsoft Azure Service Bus, Apache ActiveMQ, Apache Kafka oder Redis.

PostgreSQL

PostgreSQL zählt zu den führenden relationalen Datenbankmanagementsystemen (RDBMS) und ist bekannt für seine Erweiterbarkeit und SQL-Konformität. Als Open-Source-Software unterstützt es eine Vielzahl von Programmiersprachen, Datentypen und Indizierungsmethoden. PostgreSQL ist für den Einsatz in großen Anwendungen optimiert und bietet robuste Funktionen für Datenbankmanagement, wie etwa Transaktionen, Sicherheit und Skalierbarkeit.

PostgreSQL lässt sich mithilfe einer Vielzahl von Erweiterungen und Plug-ins leicht anpassen und erweitern. Es unterstützt auch JSON- und XML-Datentypen und kann nahtlos in andere Tools und Frameworks integriert werden.

Einige Alternativen zu PostgreSQL, die ähnliche RDBMS-Funktionen bieten, sind:

- MySQL: Ein Open-Source-RDBMS, das insbesondere für Webanwendungen geeignet ist. Es unterstützt Funktionen wie Transaktionen, Indexierung und Replikation und ist mit mehreren Programmiersprachen kompatibel.
- MariaDB: Ein Fork von MySQL, der zusätzliche Funktionen und Leistungsverbesserungen bietet und vollständig mit MySQL kompatibel ist.
- Microsoft SQL Server: Ein kommerzielles RDBMS mit erweiterten Funktionen wie Hochverfügbarkeit, Sicherheit und Business Intelligence. Es wird häufig in Unternehmensanwendungen eingesetzt und ist gut mit Microsoft-Technologien integrierbar.
- Amazon Aurora: Ein Cloud-basiertes RDBMS, das mit MySQL und PostgreSQL kompatibel ist und hohe Verfügbarkeit, Skalierbarkeit und Leistung bietet. Es ist eine gute Wahl für Cloud-basierte Anwendungen.

Timescale DB

TimescaleDB ist eine leistungsstarke Erweiterung von PostgreSQL, die speziell für die Arbeit mit Zeitreihendaten entwickelt wurde. Im Vergleich zu herkömmlichen relationalen Datenbanken bietet TimescaleDB höhere Aufnahmeleistungen von großen Datenmengen und erbt gleichzeitig alle Vorteile ausgereifter relationaler Datenbanken mit jahrzehntelanger Entwicklung. TimescaleDB ist also kompatibel mit bestehenden PostgreSQL-Tools und -Bibliotheken, hat eine hohe Zuverlässigkeit und Sicherheit und unterstützt Standard-SQL-Abfragen. Es ist jedoch wichtig zu beachten, dass TimescaleDB zusätzliche Konfigurations- und Abstimmungsarbeiten erfordern kann und sich möglicherweise nicht für Anwendungen eignet, die eine allgemeinere Datenspeicherung und Abfragefunktionen benötigen.

Neben TimescaleDB gibt es auch andere Datenbanksysteme, die speziell für die Verarbeitung von Zeitreihendaten entwickelt wurden oder für diesen Zweck verwendet werden können. Zum Beispiel ist InfluxDB eine Open-Source-Zeitreihendatenbank, die für eine hohe Schreib- und Abfrageleistung optimiert ist und Funktionen wie automatisches Downsampling, kontinuierliche Abfragen und

Aufbewahrungsrichtlinien bietet. Prometheus wurde für die Erfassung und Verarbeitung von Daten aus verteilten Systemen konzipiert und umfasst eine Abfragesprache und eine grafische Schnittstelle zur Datenvisualisierung. Graphite ist eine weitere Open-Source-Zeitreihendatenbank, die Funktionen wie Roll-ups, Datenaufbewahrungsrichtlinien und eine Abfragesprache umfasst.

Keycloak

Keycloak ist eine robuste Open-Source-Lösung für das Identitäts- und Zugriffsmanagement von Web- und mobilen Anwendungen. Dank Single Sign-On müssen sich Benutzer nur einmal bei Keycloak anmelden, um auf verschiedene Anwendungen zuzugreifen, ohne sich erneut authentifizieren zu müssen. Keycloak ist benutzerfreundlich und flexibel und bietet eine webbasierte Administrationskonsole zur einfachen Konfiguration von Benutzern, Rollen und Berechtigungen sowie eine REST API für die Automatisierung der Integration mit anderen Systemen.

Neben Keycloak gibt es mehrere Alternativen für Identitäts- und Zugriffsmanagement-Lösungen mit ähnlichem Funktionsumfang. Okta ist eine Cloud-basierte Lösung, die Single Sign-On, Multifaktor-Authentifizierung und Benutzerbereitstellung bietet und eine breite Palette von Anwendungen und Diensten unterstützt. Auth0 bietet Funktionen wie Social Login, passwortlose Authentifizierung und Multifaktor-Authentifizierung, während Gluu als Open-Source-Plattform für Identitäts- und Zugriffsverwaltung auch Single Sign-On, Multifaktor-Authentifizierung und Benutzerprovisionierung bereitstellt.

Die RWTH hat die Wege der Datenübertagung in SUSTAIN2 mit den beteiligten Partnern koordiniert. Hierfür wurden in mehreren bilateralen Workshops, ideale Cloud-zu-Cloud Datenverbindungen abgestimmt. Ein Kernergebnis war die Einigung auf die Technologien REST API, MQTT sowie gRPC basierten APIs. Aufbauend auf den herausgearbeiteten Designentscheidungen wurden die Adapter zu den beteiligten Cloud-System-Betreibern entwickelt.

2.4.2 Lessons Learned bei der Arbeit mit den ausgewählten Technologien

Im Projektverlauf hat sich gezeigt, dass die bisherige, selbstverwaltete Kubernetes-basierte Implementierung ein Fachwissen erfordert, welches in kommunalen Verwaltungen nach jetzigem Kenntnisstand selten zu finden ist. Deswegen wurde die Architektur der SUSTAIN2-Cloud Docker-Compose-basiert umstrukturiert. Die neue Plattform wurde zunächst parallel in Betrieb genommen, um anschließend die vorherige Lösung zu ersetzen. Die Datenflüsse und Quellen konnten störungsfrei in Betrieb bleiben. Die Wiederverwertbarkeit nach Projektabschluss ist somit erhöht.

Erfahrungen – SUSTAIN2 Cloud-Deployment

Zu Beginn ist die SUSTAIN2 Cloud mehrfach kurzzeitig ausgefallen. Die Störungen konnten zeitnah behoben werden. Die Ursachen wurden untersucht und soweit möglich ausgeräumt.

Insgesamt ist das Deployment nach der Umstellung auf Docker-Compose robuster und deutlich einfacher zu verwalten. Einige Schwierigkeiten bestehen jedoch auch nach der Umstrukturierung weiter.

Im Folgenden werden die kritischen Plattformkomponenten und die gewonnenen Erkenntnisse aufgeführt:

Data Adapter The Things Network (TTN)

Einige Anwendungen in TTN versenden ihre Daten in großen Zeitabständen, manche werden erst nach mehr als einem Tag veröffentlicht. Man sollte sich dessen bewusst sein, wenn man Funktionstests oder

Regelungsoptimierungen durchführt. Es wurde geprüft, ob es möglich ist historische Daten aus TTN abzurufen. Aber die Cloud kann die Daten nur über einen maximalen Zeitraum von bis zu sieben Tage speichern, sofern man ihre kommerzielle Version nutzt.

RabbitMQ

Der Grund für Ausfälle des Brokers ist immer eine Speicherüberschreitung, wofür es zwei mögliche Ursachen gibt:

1. Fehlerhaft formatierte Nachrichten bleiben in der Warteschlange stecken und verhindern, dass andere Nachrichten übertragen werden können.
2. Im historischen Modus, in dem Adapter viele historische Daten abrufen und in RabbitMQ einspeisen, ist RabbitMQ zu langsam, wodurch das System schließlich zum Erliegen kommt.

Es wurde eine Warteschlange pro Adapter implementiert, welche beim Empfang von Fehlermeldungen jedoch sensibel reagieren.

Message Listener and Router (MLR)

MLR ist darauf angewiesen, dass sowohl RabbitMQ als auch TimescaleDB funktionieren: Wenn eine der beiden Komponenten keine Verbindung aufbauen kann, wird MLR beendet. In der Praxis kann es jedoch vorkommen, dass man beide Komponenten neu starten muss, daher ist es besser, diesen Dienst unabhängig zu gestalten.

Eine der Kernfunktionen von MLR ist das Dekodieren/Parse von Nachrichten, aber in der Produktivumgebung zeigte sich mehrmals, dass nicht alle Datenstromvarianten adressiert wurden. Anstatt nicht erwartete Varianten zu ignorieren oder eine Warnung zu erzeugen, wurde MLR dann abgebrochen. Entsprechend sorgfältig ist mit der Kodierung/Dekodierung von Nachrichten umzugehen. Es wäre besser, einen eigenen Dienst innerhalb des Clusters nur für diesen Zweck zu entwickeln. Im Zuge der Umstrukturierung wurde für die Migration historischer Daten die Möglichkeit eröffnet, 10 Instanzen parallel zu starten, um große Mengen von Bestandsdaten aus der aedifion Cloud zu migrieren.

TimescaleDB

Nach mehreren Abstürzen wurde versucht, eine neue Instanz zu erstellen. Da viele der Konfigurationsdateien in TimescaleDB gespeichert sind und nur schwer separat abgerufen und aktiviert werden können, erforderte dies viel manuelle Arbeiten. Die Erkenntnis daraus ist, dass die Speicherung von Konfigurationsdateien in der Datenbank durchaus sinnvoll ist. Zusätzlich sollten diese aber auch in anderen Diensten in Formaten gespeichert werden, die für eine Wiederherstellung im Notfall geeignet sind.

2.5 Arbeitspaket 5 (AP 5): Mensch-Maschine-Interaktion im Energiemanagement

RWTH Aachen (PMs: 24,75); Stadt Bottrop (PMs: 7); ELE (PMs: 2,5); E.ON (PMs: 16,4)

Ziel dieses Arbeitspakets war die Entwicklung von Schnittstellen und Strategien für die Mensch-Maschinen-Interaktion zwischen den eingesetzten Cloud-Systemen, der SUSTAIN2-Cloud und den Gebäudebetreibern sowie Nutzern; mit dem Zwecke Energieeinsparungen zu erzielen. Hierauf aufbauend wurden die Gebäudemessdaten ausgewertet und Potentiale für Energieeinsparungen ermittelt. Im Rahmen von mehreren Workshops wurden die Rahmenbedingungen der Gebäudenutzung erfasst und diese Informationsbasis durch Vor-Ort Begehungen und den Einsatz mobiler Messtechnik sowie Nutzerinterviews angereichert. In enger Absprache mit den Gebäudebetreibern wurden Alarmfunktionen implementiert, welche automatisiert Fehlverhalten in den Gebäuden detektierten und so die Betreiber

bei der Vermeidung ungewöhnlich hoher Energieverbräuche unterstützten. Es wurden für die unterschiedlichen Cloud-Systeme, Informationssysteme implementiert, welche die nutzerfreundliche Interaktion mit den gespeicherten Daten ermöglichen. Laufende Auswertungen der Daten im Zuge von kontinuierlich berechneten Kennzahlen, trugen zu einer hohen Energieverbrauchstransparenz und damit zur Einsparung von Energieverbräuchen bei. Dieses Arbeitspaket baute auf den Infrastrukturarbeitspaketen AP3 (Technische Ausrüstung der ausgewählten Gebäude) und AP4 (Anbindung und Weiterentwicklung Cloud) auf und die Ergebnisse unterstützen die Arbeiten in AP6 (Automatisierte Betriebsoptimierung im Energiemanagement) und AP7 (Analyse der eingesetzten Cloud-Systeme).

2.5.1 Dashboards und visuelle Auswertungen

Die Anforderungen an ein Analyseverfahren sind eng an die Bedürfnisse und Gegebenheiten der Kunden und ihre Gebäude bzw. Anlagen gekoppelt. Es sollte der Anspruch bestehen, alle genutzten Medien (Strom, Gas, Wärme, Wasser) an der Gebäudegrenze zu erfassen. Wünschenswert ist darüber hinaus auch die Darstellung der Produktion von Strom durch eine vorhandene PV-Anlage oder auch der Wärme aus einer thermischen Solaranlage. Dies gibt dann einen genauen Aufschluss auf den tatsächlichen Verbrauch des jeweiligen Gebäudes. Wenn man darüber hinaus noch die Wettermessdaten, zumindest die Außentemperatur erfasst, bleiben als „unbekannte“ Einflussfaktoren allein Nutzer und Betreiber.

Bei der Erfassung der Ausgangssituation der Mensch-Maschinen-Interaktion ist aufgefallen, dass die bisherige Bereitstellung von GLT-Live-Daten, lokal am Gerät oder über proprietären Fernzugriff, Potenziale der Analyse, einer darauf aufbauenden Betriebsverbesserung sowie der aktiven Nutzereinbindung außen vor lässt. Es fehlten historische Daten und die Auswertung weiterer Datenquellen zu Verbräuchen und Komfort, wodurch sich die Tätigkeiten des Betreibers, also in diesem Fall des Liegenschaftsmanagements der Stadt Bottrop, auf einen störungsfreien Betrieb (Entstörung) und das Aufsetzen einfacher Betriebsstrategien beschränkte.

Die nun implementierten Visualisierungen der Betriebsdaten (wie Betriebszeiten, Temperaturen, Ventilstellungen, CO₂-Konzentrationen und Verbräuche) in Grafana bieten die Grundlage tiefergehender Betriebsanalysen. Neben visuellen Auswertungen in Form von Zeitreihen, Balkendiagrammen oder Heatmaps wurden auch Auszüge der Anlagenpläne, den jeweiligen Datenpunkten zugeordnet, sodass diese Gebäudeinformationen zum Verständnis von technischen Zusammenhängen der Datenpunkte verwendet werden konnten, ohne die Dashboard-Darstellung verlassen zu müssen.

In Abbildung 19 wird eine Monitoringdaten-Visualisierung für die Dieter-Renz-Sporthalle, zugeschnitten auf den Gebäudebetreiber dargestellt. Wichtige Darstellungen sind u. a. der direkte Vergleich vom jetzigen Zustand mit dem gleichen Zeitpunkt genau sieben Tage in der Vergangenheit und die Darstellung des Verbrauches in sogenannten Heatmaps, welche die Dichte des Verbrauchs darstellen. Damit lassen sich visuell sowohl temporäre Anomalien im Verbrauch als auch längerfristige Anomalien, die regelmäßig auftreten, identifizieren, die ohne eine Datenvisualisierung nur schwer im Betrieb zu bemerken wären.

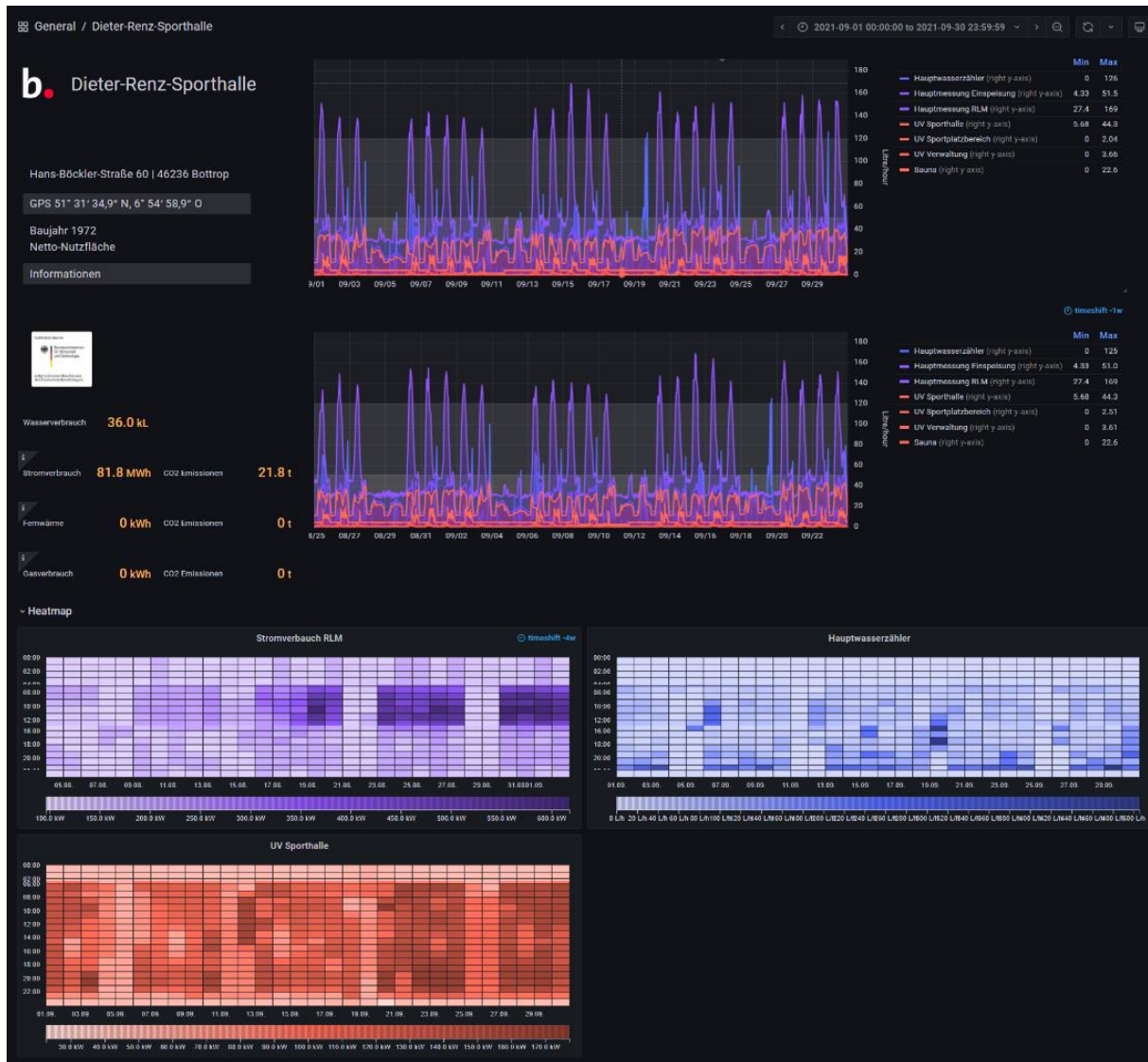


Abbildung 19: Energiedaten Dashboard für der Dieter-Renz-Sporthalle

Abbildung 20 zeigt exemplarisch eine visuelle Heatmap-Analyse. In diesem Fall sind Verbrauchs- und Kostenoptimierungspotenziale für die Fernwärme im Katasteramt gut zu erkennen.

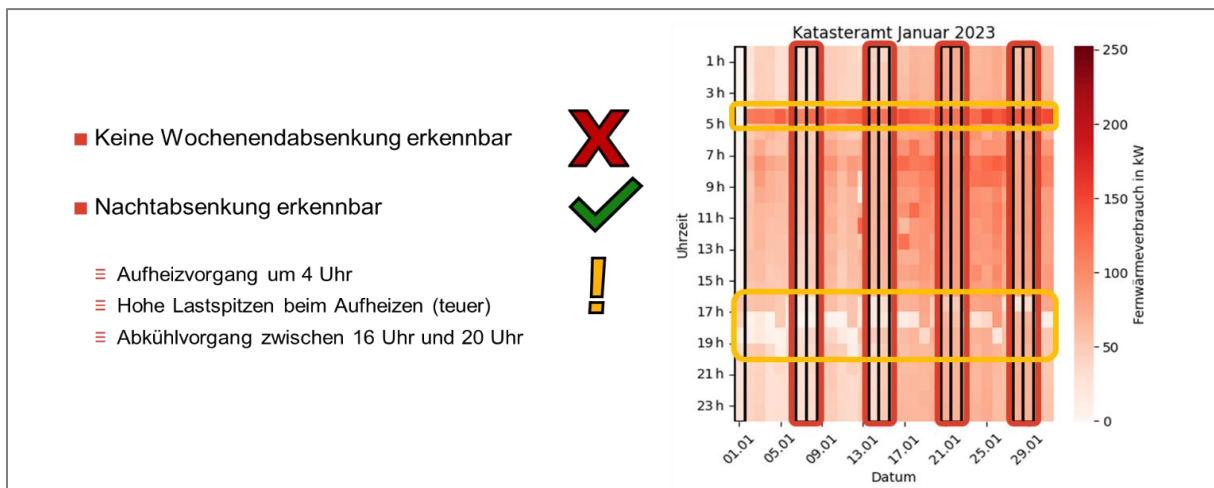


Abbildung 20: Beispiel einer visuellen Heatmap-Analyse, hier: Fernwärmeverbrauch Katasteramt

Abbildung 21 und Abbildung 22 zeigen dagegen Zeitreihen der Heizkreise aus dem Automationssystem und geben damit einen tiefen Einblick in die technischen Abläufe im Energiesystem und sind damit für Gebäudetechniker, Automatisierer und für Optimierungsanwendungen von Interesse.



Abbildung 21 : Livedaten in Auszüge aus Anlagenplänen eingebettet und historische Daten als Zeitreihen, Heizkreise der Sekundarschule Kirchhellen

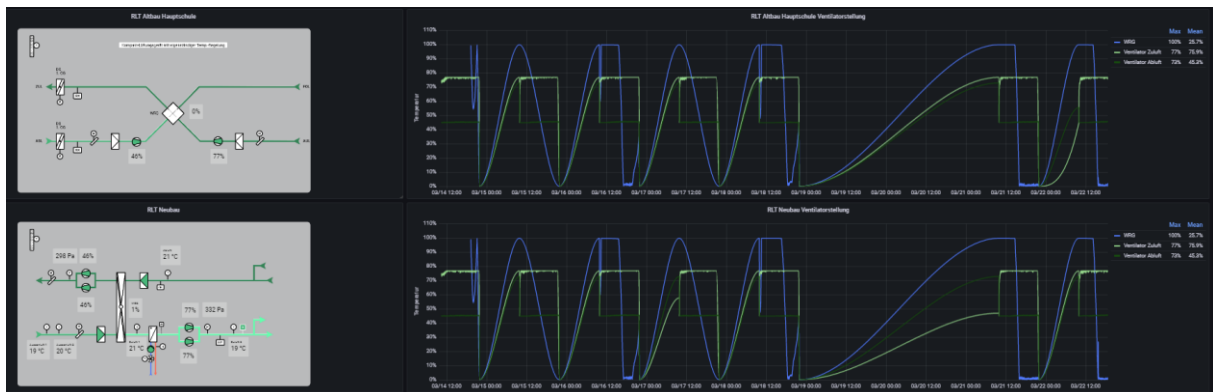


Abbildung 22: Livedaten und historische Daten vom Betrieb der RLT Anlagen in der Sekundarschule Kirchhellen
 Im Rahmen von SUSTAIN2 wurden auch visuelle und Algorithmus-basierte Anomaliendetektions-Methoden angewandt. Abbildung 23 zeigt ein Beispiel für ein anomales Betriebsverhalten an der Lüftungsanlage des Rathauses, während Abbildung 24 unterschiedliche Betriebsmodi und saisonale Verläufe an der Heizungsanlage des Rathauses aufzeigt. Die Ausräumung suboptimaler Betriebsweisen verspricht erkennbare Verbesserungen in den Bereichen Energieeffizienz und Komfort.

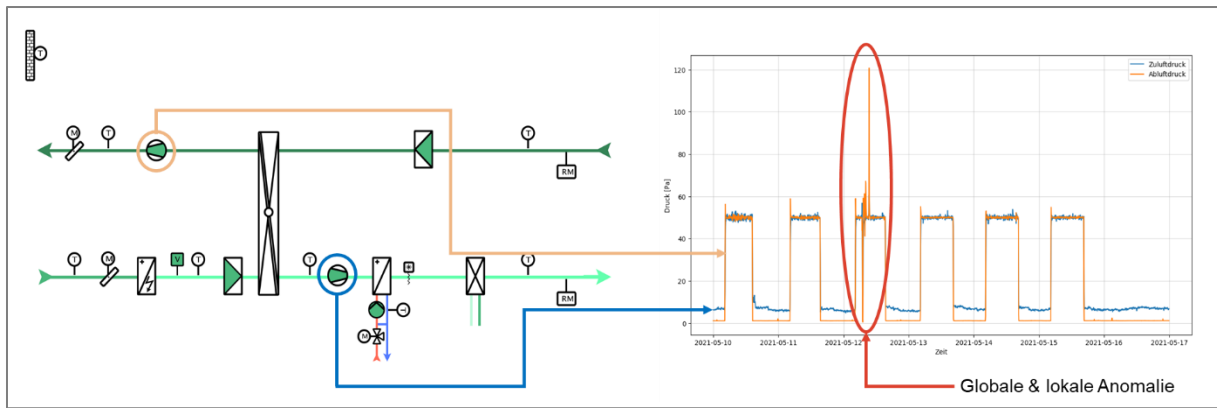


Abbildung 23: Anomalie-Erkennung in Zeitreihen der GLT-Daten, RLT-Anlage des Rathauses

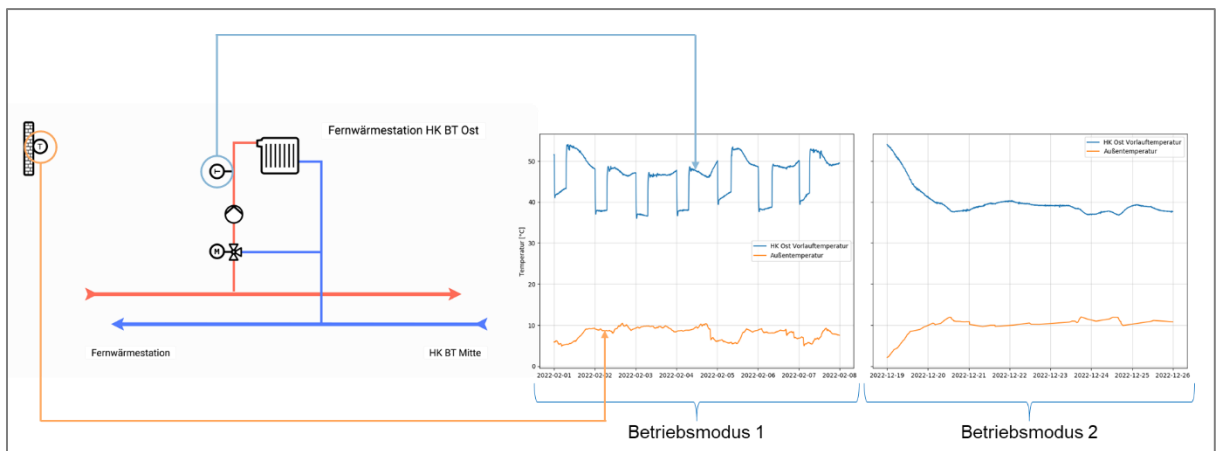


Abbildung 24: Unterschiedlicher saisonaler Verlauf mit Wechseln der Betriebsmodi, Heizungsanlage Rathaus

Für die Information der Gebäudenutzer wurden Diashows implementiert, die aktuelle Monitoringdaten zu Verbräuchen und Raumklimadaten einzelner Räume (pseudonymisiert) zeigen. Ein Informationsmonitor befindet sich im Showroom des Rathauses (vgl. Abbildung 25), welcher für Schulungen und Veranstaltungen genutzt wird. Auch im Rahmen der regelmäßigen Führungen durch das historische Rathaus kann der Monitor so eingebunden werden. Die Stadt Bottrop wurde bei der Installation der benötigten Hardware und der Konfiguration eines Raspberry Pi zum Abruf der Dashboards unterstützt.

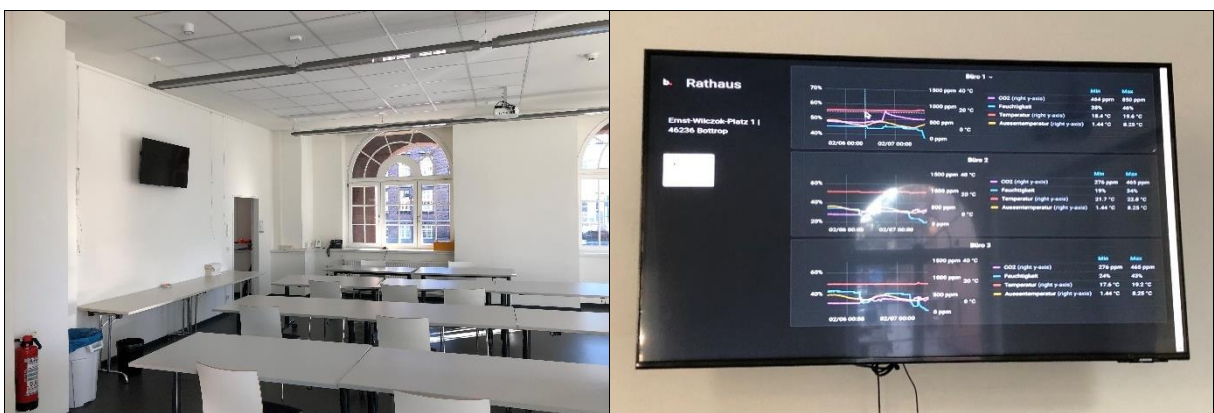


Abbildung 25: Info-Monitor im Showroom des Rathauses

Einige der in der SUSTAIN2 Plattform integrierten Visualisierungen sind in ähnlicher Form auch in der E.ON Optimum Cloud implementiert. Optimum bietet die Möglichkeit sowohl vorkonfigurierte Analysen als auch, individuelle Dashboards zu erstellen. Während des Projektes wurde viel Wert auf die

Erstellung der Dashboards gelegt, um der Stadt Bottrop auch nach der Projektphase die Möglichkeit einer zielgerichteten Überwachung der Verbräuche zu ermöglichen. Es bestehen verschiedene Darstellungsoptionen analog zu Grafana (An- und Abwählen von Zählern, Auswahl des Mess-intervalls und -Zeitraums, Darstellungsmöglichkeit in anderen Diagrammformen, z.B. Balkendiagrammen) und zudem eine Vergleichsmöglichkeit von verschiedenen Zeiträumen (s. Abbildung 26 und Abbildung 27). Eine Witterungsberreinigung von Wärmeverbräuchen wäre bei Nutzung von Optimum weiterhin durch die Übertragung in die, in AP 3 entwickelten, Kalkulationsvorlagen in Excel möglich.

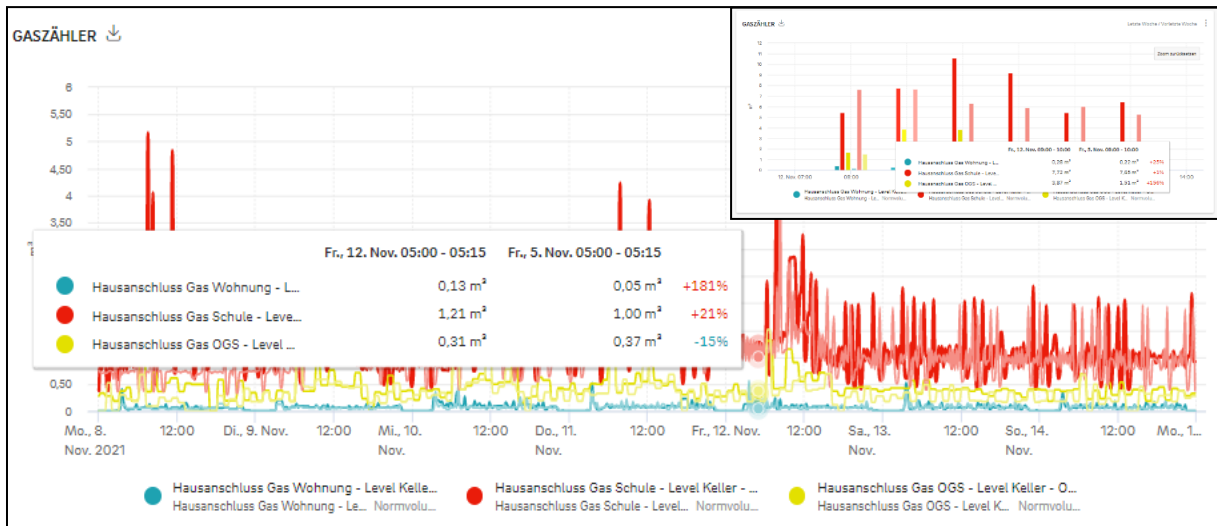


Abbildung 26: Vergleich von Gas-Verbräuchen in verschiedenen Zeitabschnitten an der Konradsschule, auch darstellbar als Balkendiagramm im Zoom

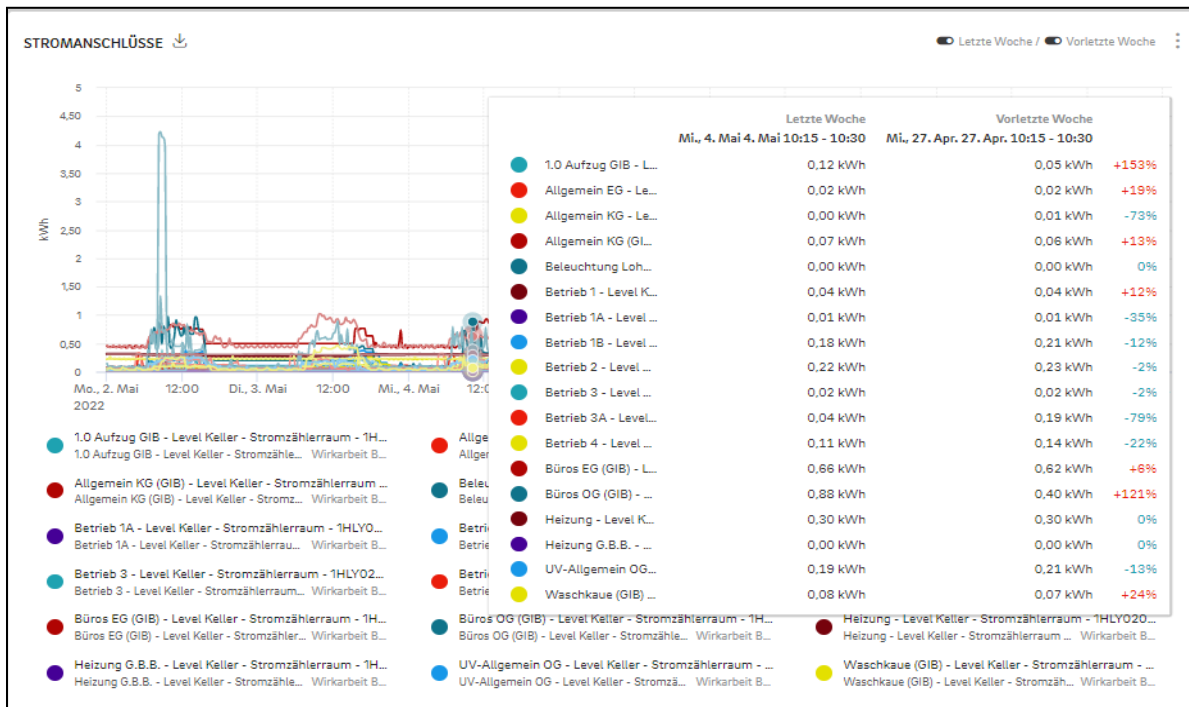


Abbildung 27: Darstellung der 18 Stromzähler der Lohnhalle und einem Vergleich über verschiedene Zeiträume

2.5.2 Alarmfunktionen

Es wurde festgestellt, dass das Bestandssystem nicht geeignet war, automatisierte Benachrichtigungen bei ungewöhnlichem Systemverhalten zu versenden. Um dieser Problematik zu begegnen, wurden automatische E-Mail-Alarime implementiert, welche direkt aus den Grafana Dashboards der SUSTAIN2-Cloud eingerichtet und aktiviert werden konnten.

Es bestand der Wunsch, Alarime, welche gemäß Vorgaben der Stadt Bottrop bei ausgewählten Störungen und Sollwertverletzungen implementiert wurden, in einem täglichen Report zusammenzufassen. Da diese Zusammenfassung die Funktionalität von Grafana übersteigt, wurde hierzu ein Webhook mit Node-Red in der SUSTAIN2-Plattform integriert (vgl. Abbildung 28). Die täglichen Reports haben den Vorteil, dass sie eine gute Übersicht bieten, wann Alarime ausgelöst, aber auch wieder aufgehoben wurden, während eine hohe Mail-Anzahl durch Einzelmeldungen vermieden wird. Es konnten auf diese Weise bereits Fehlfunktionen (wie z.B. bei der Wärmerückgewinnung der Lüftungsanlage des Rathauses) und ungünstige Sollwert-Vorgaben identifiziert werden (vgl. Abbildung 29).

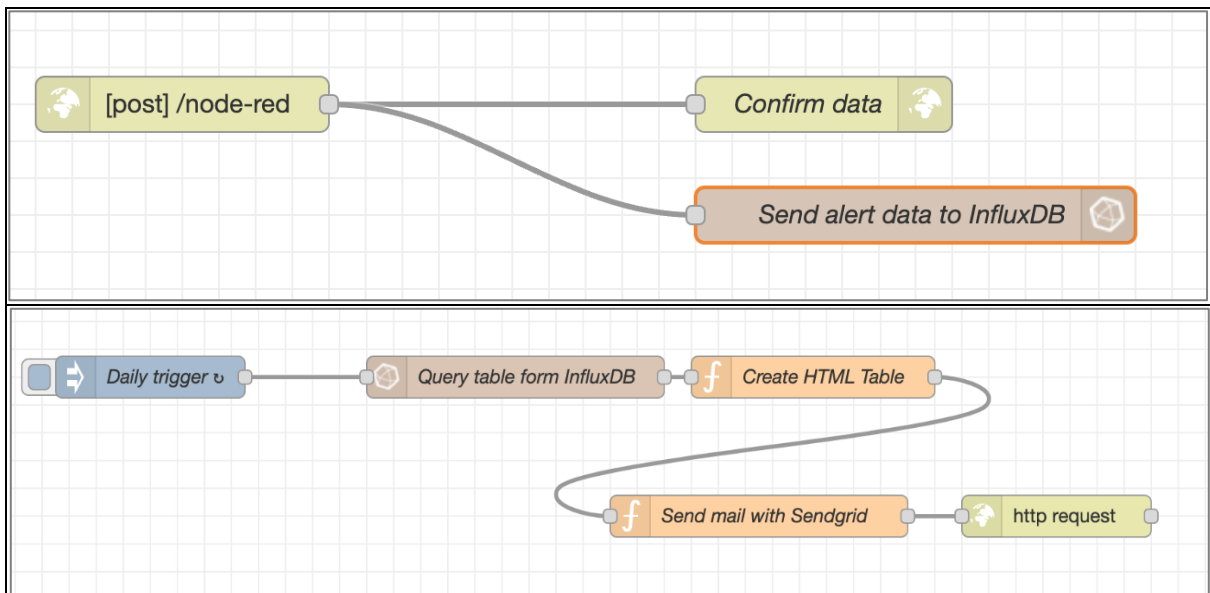


Abbildung 28: Implementierung Daily Alert Summary mit Node-Red

Daily Grafana Alert Summary for Rathaus and Ludgerusschule Bottrop

Date	Time	Value	Alertname
21.12.2022	12:20	**Firing**	Rathaus - Störung WRG
21.12.2022	13:05	**Resolved**	Rathaus - Störung WRG
21.12.2022	13:40	**Firing**	Rathaus - Störung WRG
21.12.2022	17:40	**Resolved**	Rathaus - Störung WRG
22.12.2022	06:40	**Firing**	Rathaus - Störung WRG
22.12.2022	07:20	**Firing**	Rathaus - Kältemaschine Zuluft unter 19 °C

Abbildung 29: Daily Alert Summary

Im Projekt wurde, im Bereich der Einzelclouds, E.ON Optimum in der Version „Plus“ eingesetzt (vgl. Abbildung 8 in AP 3). Diese Version wurde im Projekt zudem um die Möglichkeit der Einzel-Alarmierung per Mail bei außergewöhnlichen Betriebszuständen erweitert. Eine gruppierte Alarmierung, wie sie bei der SUSTAIN2 Plattform umgesetzt wurde, könnte hier zukünftig ebenfalls eine Option darstellen.

2.5.3 Befragung von Nutzern und Betreibern

Von den Mitarbeitern der Stadt Bottrop, welche für den Betrieb der Liegenschaften verantwortlich sind (beispielsweise Hausmeister oder Verwaltungs-Mitarbeiter des Fachbereichs Immobilienwirtschaft) wurden viele der umgesetzten Maßnahmen begrüßt. Es bestand großes Interesse an visuellen Hilfsmitteln zur Betriebsverbesserung und insbesondere den gruppierten Alarman für Sollwertverletzungen und direkter Benachrichtigung auch des Bereitschaftsdienstes bei schwerwiegenden Störungen und Ausfällen.

So wurde beispielsweise von einem Vorfall in der Vergangenheit berichtet, bei dem an der Sekundarschule Kirchhellen ein Kesselausfall von Samstag erst an unterkühlten Räumen Montagmorgens entdeckt wurde, da die direkte Benachrichtigung der Hausmeister und auch die Benachrichtigung außerhalb der Arbeitszeiten bisher nicht implementiert war. Gebäude, die im Verbund durch einen Hausmeisterpool bewirtschaftet werden, könnten durch die Einsicht in Energiesystembetriebsdaten und die dazugehörigen Planausschnitte deutlich effizienter bewirtschaftet werden. Diese Rückmeldungen sollen Eingang in eine Dienstanweisung finden und bei der weiteren Digitalisierung von Liegenschaften berücksichtigt werden.

Gemeinsam mit den Partnern wurde ein Fragebogen entwickelt, der Betreiber und Nutzer der verschiedenen Gebäude gleichermaßen anspricht. Dabei lag der erste Schwerpunkt auf individuellen Präferenzen im Bereich des Komforts und der Abwägung mit Emissions- und Kosteneinsparungen. Der andere Schwerpunkt lag auf mit Betriebsverbesserungen verbundenen Prozessen.

Beim individuellen Innenraumkomfort waren deutliche Präferenzunterschiede zu erkennen. Diese betrafen sowohl die ideale Raumtemperatur als auch die Bevorzugung bestimmter Temperaturbedingungen gegenüber bestimmten Luftqualitätsbedingungen, in diesem Fall der CO₂-Konzentration der Raumluft (exemplarisch in Abbildung 30 dargestellt).

Frage 7	
<p>Wären Sie bereit, zugunsten einer Verbesserung der Luftqualität von 1500ppm zu 500ppm CO₂-Konzentration* ohne zusätzlichen Energieverbrauch, die Raumtemperatur um 1°C zu verringern?</p> <p>* = Die Außenluft in Deutschland enthält durchschnittlich 400-500ppm CO₂, zwischen 1000 und 2000ppm werden Lüftungsmaßnahmen empfohlen, um Konzentrationsfähigkeit und Komfort zu verbessern, ab 2000ppm werden laut Arbeitsstättenrichtlinie Lüftungs-Maßnahmen erforderlich.</p>	
Antworten von Person 1	Person 2
<p><u>22°C</u> Innenraumtemperatur als Ausgangslage <input checked="" type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein <i>Reduktion auf 21°C, um Luftqualität von 1500ppm zu idealen 500ppm CO₂-Konzentration zu verbessern</i></p>	<p><input checked="" type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein <i>CO₂-Konzentration zu verbessern</i></p>
<p><u>21°C</u> Innenraumtemperatur als Ausgangslage <input type="checkbox"/> ja <input checked="" type="checkbox"/> nein <i>Analog oben, Reduktion um 1°C akzeptabel?</i></p>	<p><input checked="" type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein</p>
<p><u>20°C</u> Innenraumtemperatur als Ausgangslage <input type="checkbox"/> ja <input checked="" type="checkbox"/> nein</p>	<p><input checked="" type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein</p>
<p><u>19°C</u> Innenraumtemperatur als Ausgangslage <input type="checkbox"/> ja <input checked="" type="checkbox"/> nein</p>	<p><input checked="" type="checkbox"/> ja <input type="checkbox"/> nein</p>
<p><u>18°C</u> Innenraumtemperatur als Ausgangslage <input type="checkbox"/> ja <input checked="" type="checkbox"/> nein</p>	<p><input type="checkbox"/> ja <input checked="" type="checkbox"/> nein</p>

Abbildung 30: Individuelle Komfortpräferenzen, Exemplarische Angaben im Akteurs-Fragebogen

Bei der Abwägung zwischen Emissionen- und Kosteneinsparungen wurde mehrheitlich, aber nicht vollumfänglich, den Emissionen der Vorzug gegeben. Der Komfort wurde nicht immer im paarweisen Vergleich präferiert, auch wenn teilweise bei derselben Person sehr hohe Komfortansprüche erkennbar waren. Eine konsequente Umsetzung von theoretischen Präferenzen in die Handlungsebene ist daher nicht zu beobachten.

Die Ergebnisse des Fragebogens zum Umsetzungsprozess im Falle:

- Einer technischen Störung,
- eines eingeschränkten Komforts,
- bei der Identifizierung von energetischen Optimierungspotenzialen oder
- anderen Anpassungsvorschlägen zur Regelung

zeigten, dass klare Prozessschritte teilweise fehlen oder nicht bekannt sind.

Gemeinsam mit der Stadt wurden einige der üblichsten Anpassungsprozesse visuell aufbereitet (vgl. Abbildung 31). Mehrere Ansprechpartner und viele Prozessschritte können hemmend bei der Umsetzung von Maßnahmen wirken. Die Stadt Bottrop arbeitet daher an transparenten Verantwortlichkeiten und schlankeren Prozessen für zukünftige Anpassungen.

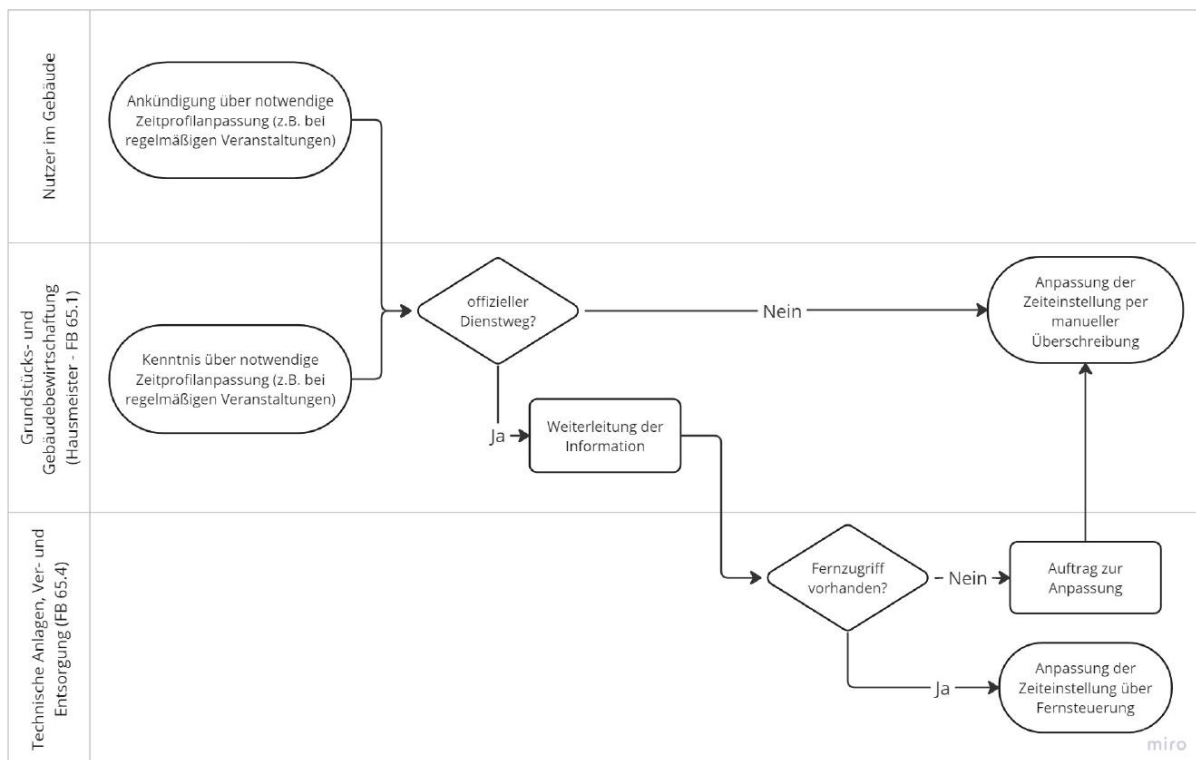


Abbildung 31: Umsetzungsprozess für eine Zeitprofilanpassung (erstellt in Zusammenarbeit mit der Stadt Bottrop)

Die Ergebnisse der Befragungen gingen auch in die Kosten-Nutzen-Analyse im Rahmen von SUSTAIN 2 ein (s. Kapitel 2.5.11). Darüber hinaus konnten Erkenntnisse im Rahmen des Mikroprojektes KlaDat¹³ weiter vertieft und wieder verwendet werden.

¹³ Klassifizierungssystematik für Dateninfrastruktur zum Abbau von initialen Hemmnissen in der datengestützten Optimierung des Wärmeverbrauchs von Bestandsgebäuden – KlaDat, Förderkennzeichen 03ENM0009, Projektlaufzeit 01.04.2023-30.09.2023

2.5.4 Analyseergebnisse: Suboptimale Außentemperatursensor-Einbindung

Die Analyse zeigte, dass in den Regelungen aller Gebäude, die der RWTH zugeordnet waren, eine witterungsgeführte Regelung der Wärmeerzeuger auf Basis einer außentemperaturabhängigen Heizkurve umgesetzt wurde. Pro Gebäude sind mehrere Außentemperatursensoren implementiert. Am Rathaus sind es beispielweise acht Datenpunkte. Die Messwerte dieser Sensoren unterschieden sich erkennbar voneinander und von den Daten der offiziellen Wetterstation in Bottrop. Sie zeigten unterschiedlich ausgeprägte Schwankungen, teilweise keine erkennbare Nachtabsenkung und zeitliche Verschiebungen untereinander (vgl. Abbildung 32). Nach Aussage des Technikers vor Ort waren einige Sensoren durch Wärme-Abstrahlung, Abwärme aus Fensteröffnungen oder ungeschützter Sonneneinstrahlung negativ beeinflusst. Zudem gab es einzelne Ausfälle von Sensoren. Für die praktische Regelung wurden daher einige der Messwerte über Zeitintervalle von 4 Stunden gemittelt oder durch Ersatzwerte überschrieben. Zudem wurden in der Regelung Korrekturfaktoren, z.B. auf Grundlage von Raumtemperatur-Messwerten, ergänzt. Dementsprechend gestalteten sich auch die Sollwertvorgabe der Vorlauftemperaturen der Heizkreise unterschiedlich. Es ist zu vermuten, dass diese essenzielle Grundlage einen entscheidenden Einfluss auf den Wärmeverbrauch und Komfort in den Gebäuden darstellt. Eine funktionierende und einheitliche Positionierung der Sensorik wäre daher zu bevorzugen.

Um eine vergleichbare Grundlage der Innentemperaturverläufe des Rathauses in den weiteren Analysen zu verwenden, wurde der am besten zur Abbildung des realen Außentemperaturverhaltens geeignete Sensor identifiziert (in diesem Fall der an der Fernwärmestation) und in allen Dashboards des Gebäudes eingesetzt. Verbleibende leichte Abweichungen können durch abweichende Umgebungsbedingungen am Gebäude im Vergleich zur Wetterstation erklärt werden.

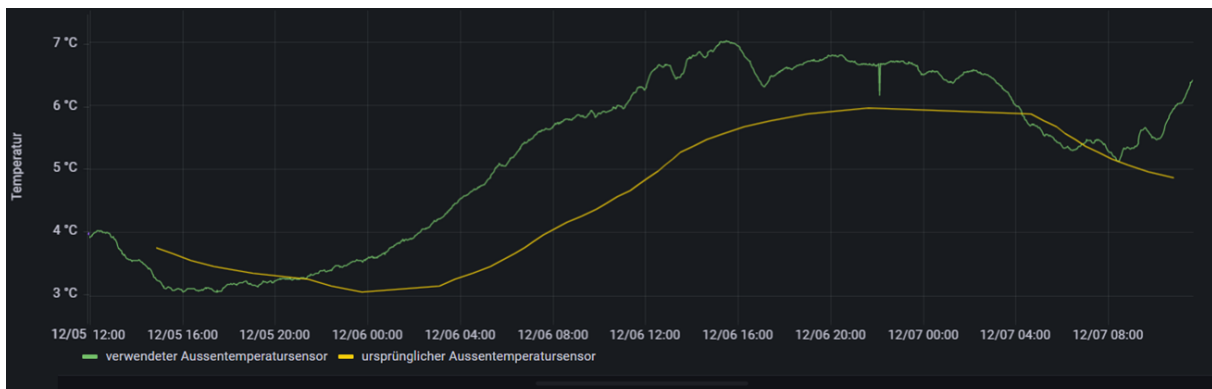


Abbildung 32: Verschiedene Temperaturverläufe von Außentemperatursensoren

Die Einbindung einer gesonderten Wetterstation in die Plattform und der routinierte Abgleich mit in die Regelung eingebundenen Außentemperatursensoren am Gebäude bietet ebenfalls eine gute Option. In Optimum können Wetterdaten lizenzgebunden verwendet und in gemeinsamen Dashboards visualisiert werden, jedoch ist die Schnittstelle zur Gebäudeleittechnik und den dort vorhandenen Außentemperaturdatenpunkten noch nicht erprobt worden.

2.5.5 Analyseergebnisse: Nahwärmenetz-Zentrale Kirchhellen

Im Rahmen des Projekts SUSTAIN2 wurde der Verbrauch der Nahwärmenetz-Zentrale Kirchhellen untersucht. Diese umfasst zwei Gaskessel und ein extern betriebenes Biogas-Blockheizkraftwerk (BHKW). Das BHKW soll priorisiert zur Grundlastabdeckung dienen, während die Gaskessel die Spitzenlast abdecken sollen. Die nachfolgend gezeigten Verbräuche ergeben sich aus dem Erdgasverbrauch der Gaskessel und der Wärmeerzeugung des BHKWs.

Aufschlüsselung nach Jahren

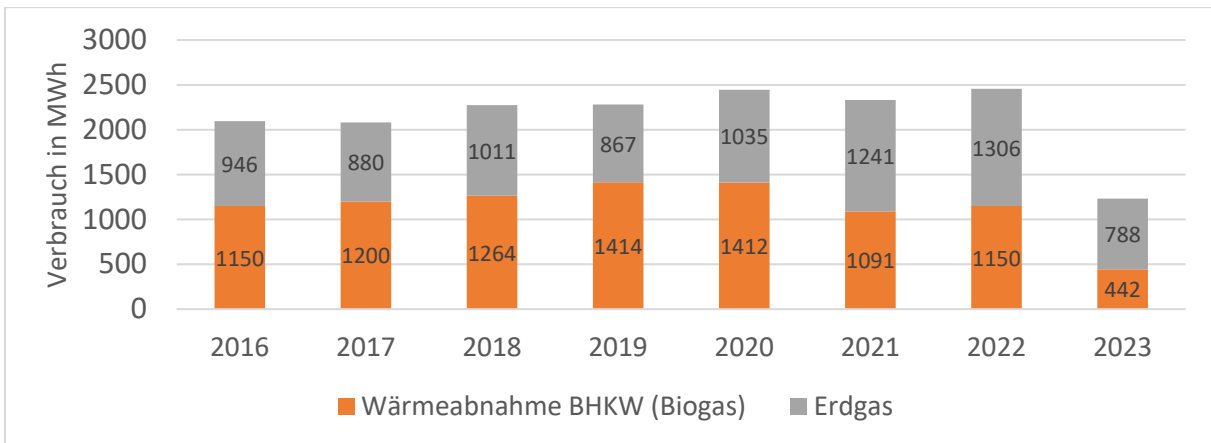


Abbildung 33 zeigt den witterungsbereinigten Verbrauch aufgeschlüsselt nach Jahren. Für das Jahr 2023 stehen die Daten nur bis einschließlich Mai zur Verfügung, was den reduzierten Verbrauch erklärt. Der Trend zeigt, dass der Verbrauch seit 2016 tendenziell zunimmt. Dies kann mit dem Anschluss von weiteren Nutzern oder geänderten Randbedingungen zusammenhängen. Eine Ausnahme von diesem Trend bildet das Jahr 2021, was mit großer Sicherheit an geänderten Randbedingungen resultierend aus der Corona Pandemie liegt.

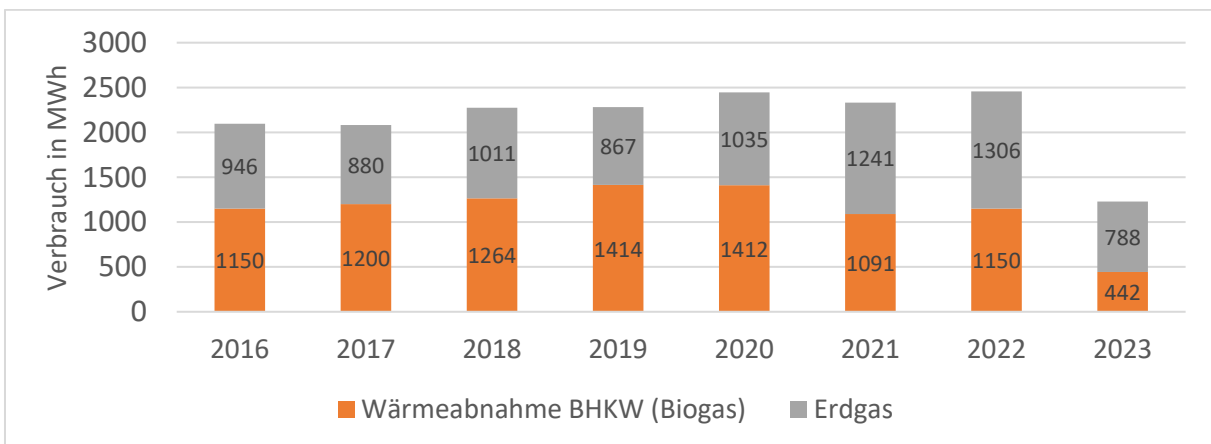


Abbildung 33: Witterungsbereinigter Verbrauch der Nahwärmezentrale Kirchhellen nach Jahren

Aufschlüsselung nach Heizperioden

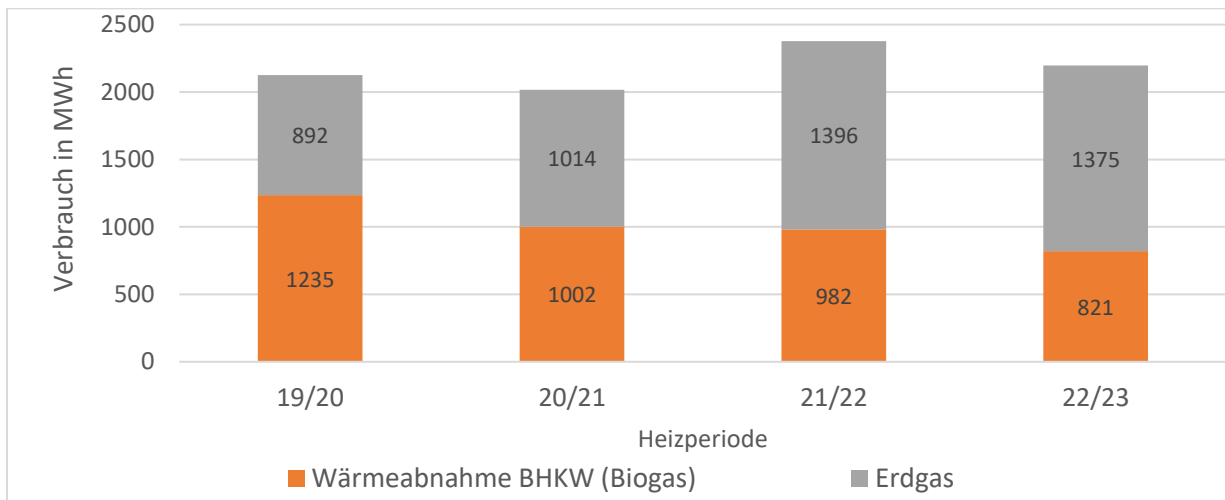


Abbildung 34 zeigt den witterungsbereinigten Verbrauch aufgeschlüsselt nach Heizperiode. Es ist ein ähnlicher Trend wie in Abbildung 33 zu erkennen. Die Heizperiode 22/23 wird durch die Verordnung zur Sicherung der Energieversorgung über kurzfristig wirksame Maßnahmen (EnSikuMaV), welche auch als 19 °C Regelung bekannt ist, beeinflusst. Es zeigt sich, dass in der Heizperiode 22/23 der Verbrauch zwar im Vergleich zur Heizperiode 21/22, nicht jedoch im Vergleich zu den Perioden 19/20 und 20/21, abgenommen hat. Dies kann unter anderem daran liegen, dass viele von der Nahwärmezentrale versorgte Gebäude, wie z.B. Schulen, nur eingeschränkt von der EnSikuMaV betroffen waren.

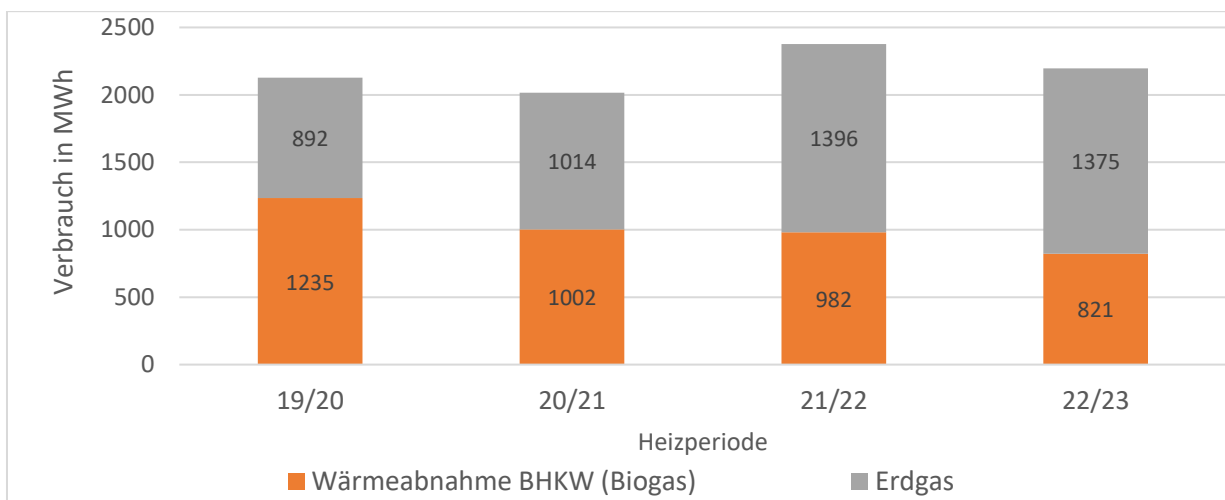


Abbildung 34: Witterungsbereinigter Verbrauch der Nahwärmezentrale Kirchhellen nach Heizperiode

Verhältnis von Biogas und Erdgas Verbrauch

Abbildung 35 zeigt die Anteile der Wärmeerzeugung des BHKWs und des Erdgasverbrauchs am Gesamtverbrauch. Es zeigt sich, dass der Anteil der Wärmeerzeugung des BHKWs kontinuierlich abgesunken ist. Dies entspricht nicht dem gewünschten Verhalten, da das BHKW die Grundlast übernehmen

soll und die Kessel lediglich die Spitzenlast decken sollen. Hier ist ein Verbesserungspotential erkennbar. Zu prüfen ist jedoch, ob die Leistung des BHKWs überhaupt ausreicht, um die Grundlast zu decken. Hierfür werden die durchschnittlichen Leistungen der Wärmezeugung des BHKWs in

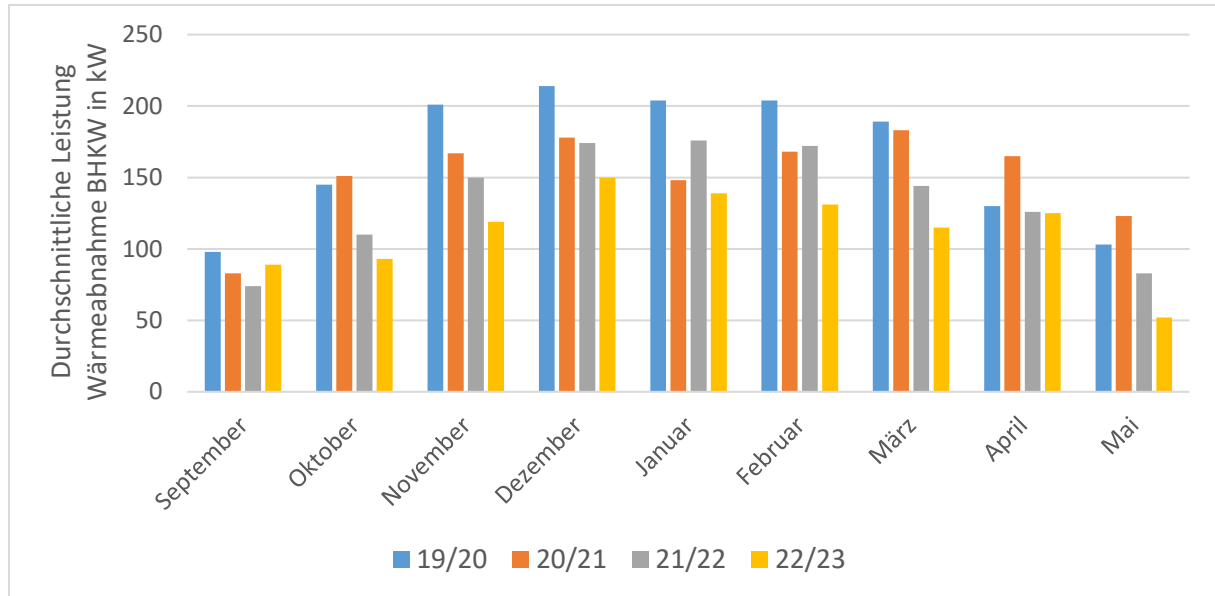


Abbildung 36 genauer geprüft. Es zeigt sich, dass über die Jahre auch die durchschnittliche Leistung abgenommen hat. Dies lässt darauf schließen, dass der gesunkene Anteil der Wärmezeugung des BHKWs nicht mit einem Erreichen der maximal möglichen Lastabnahme zusammenhängt.

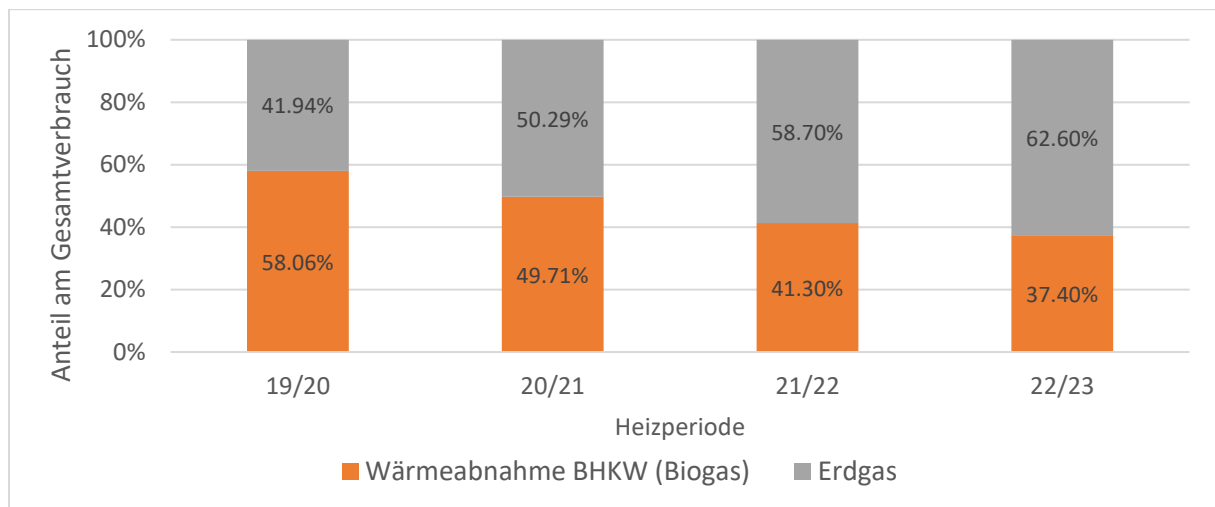


Abbildung 35: Anteile am Gesamtverbrauch der Nahwärmezentrale Kirchhellen

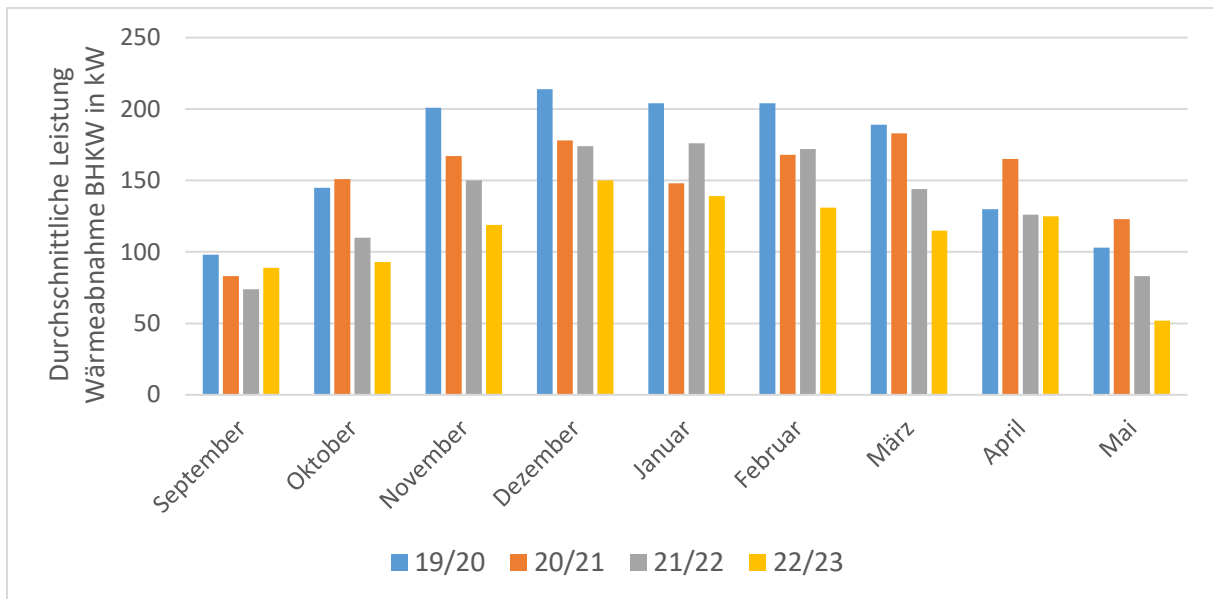
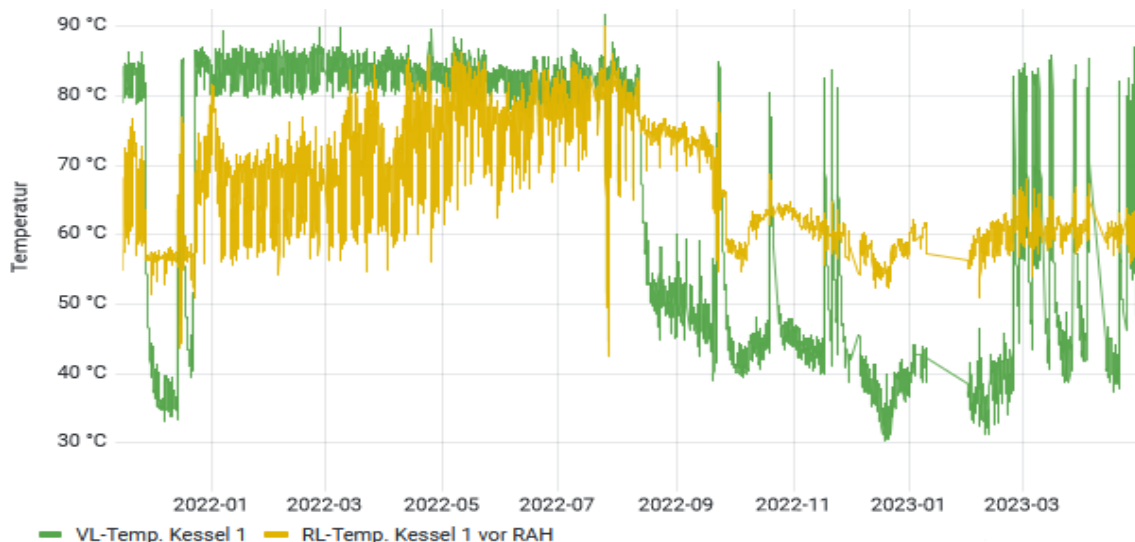


Abbildung 36: Durchschnittliche Leistung der Wärmeerzeugung des BHKWs der Nahwärmezentrale Kirchhellen

Analyse der Automationsdaten

Im Folgenden werden die Vor- und Rücklauftemperaturen aus den Automationsdaten für die Periode vom 15.11.2021 bis 30.04.2023 analysiert, um weitere Verbesserungspotentiale zu identifizieren. In Abbildung 37 sind die Temperaturen der Fernwärmeleitung dargestellt. Es zeigt sich, dass in den Sommer- und Übergangsmonaten die Vorlauftemperatur konstant auf einem hohen Niveau ist. An dieser Stelle sollte die Stadt Bottrop nach Rücksprache mit den angeschlossenen Verbrauchern prüfen, welche Verbraucher in den Sommermonaten einen Heizbedarf haben und ob das Temperaturniveau in diesen Monaten abgesenkt werden könnte.



In

Abbildung 38 sind die Temperaturen von Kessel 1 dargestellt. Anhand der Temperaturniveaus zeigt sich, dass der Kessel vorwiegend im Zeitraum von Ende Dezember 2021 bis Mitte August 2022 in Betrieb ist. Der Kessel ist in den Zeiträumen vom 27.11.2021 bis 22.12.2021 sowie ab dem 12.08.2022 überwiegend nicht in Betrieb. Ab dem 24.02.2023 deckt der Kessel vermehrt wieder einzelne Spitzen von ein paar Stunden.

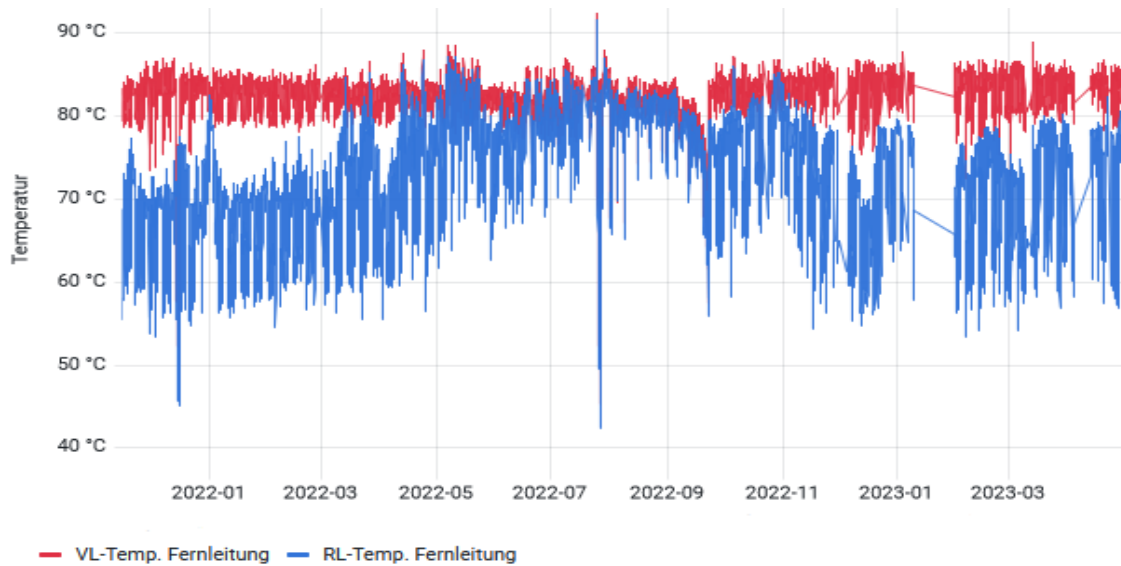


Abbildung 37: Vor- und Rücklauf der Fernleitung der Nahwärmezentrale Kirchhellen. Die Vorlauftemperatur ist konstant auf einem hohen Niveau.

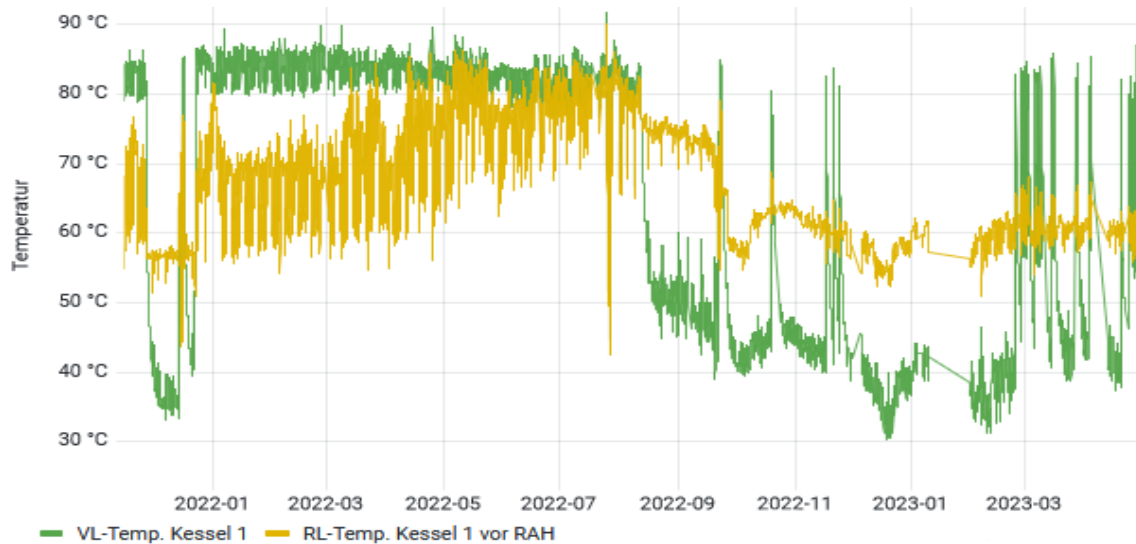


Abbildung 38: Vor- und Rücklauf des Kessel 1 der Nahwärmezentrale Kirchhellen. Der Kessel ist vorwiegend im Zeitraum von Ende Dezember 2021 bis Mitte August 2022 in Betrieb. Ab dem 24.02.2023 deckt der Kessel vermehrt einzelne Spitzen von ein paar Stunden.

In Abbildung 39 sind die Temperaturen von Kessel 2 dargestellt. Anhand der Temperaturniveaus zeigt sich, dass der Kessel ab Mitte Juni 2022 nahezu dauerhaft in Betrieb ist. Im Zeitraum vom 15.11.2021 bis 11.06.2022 deckt der Kessel vorwiegend die Spitzenlasten, die werktags während der Betriebszeiten anfallen. Abbildung 40 verdeutlicht das Verhalten für den dreiwöchigen Zeitraum vom 10.01.2022 bis 30.01.2022. Es ist klar zu erkennen, wie der Kessel vorwiegend tagsüber und an Werktagen unterstützt. Ebenso zeigt sich, dass der Kessel 2 im Zeitraum vom 27.11.2021 bis 22.12.2021, in dem Kessel 1 überwiegend nicht in Betrieb ist, über längere Zeiträume dauerhaft in Betrieb ist.

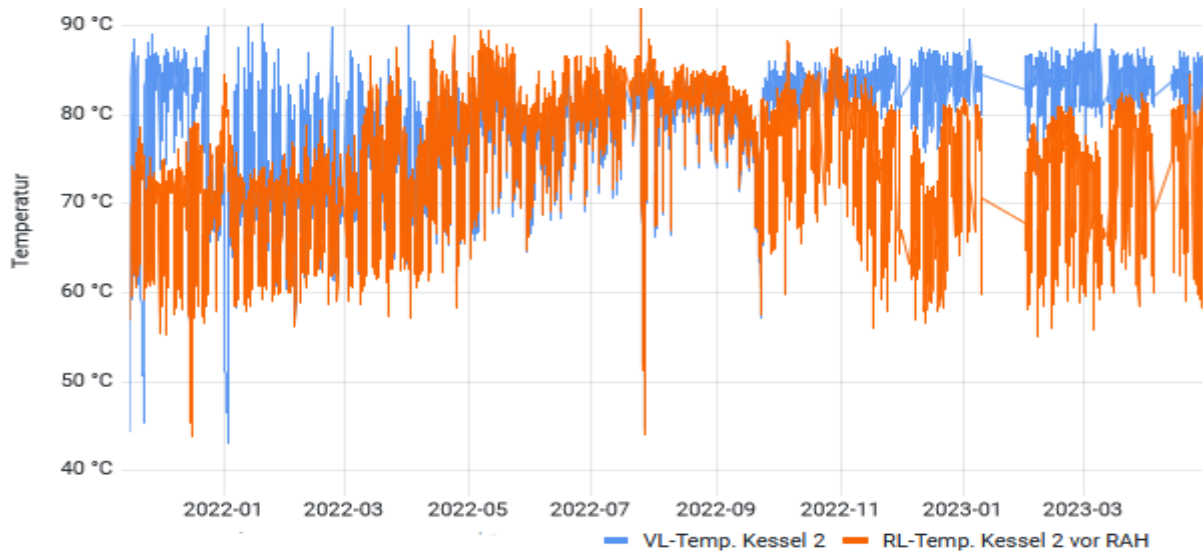


Abbildung 39: Vor- und Rücklauf des Kessel 2 der Nahwärmezentrale Kirchhellen. Der Kessel ist ab Mitte Juni 2022 nahezu dauerhaft in Betrieb. Im Zeitraum vom 15.11.2023 bis 11.06.2022 deckt der Kessel vorwiegend Spitzenlasten.

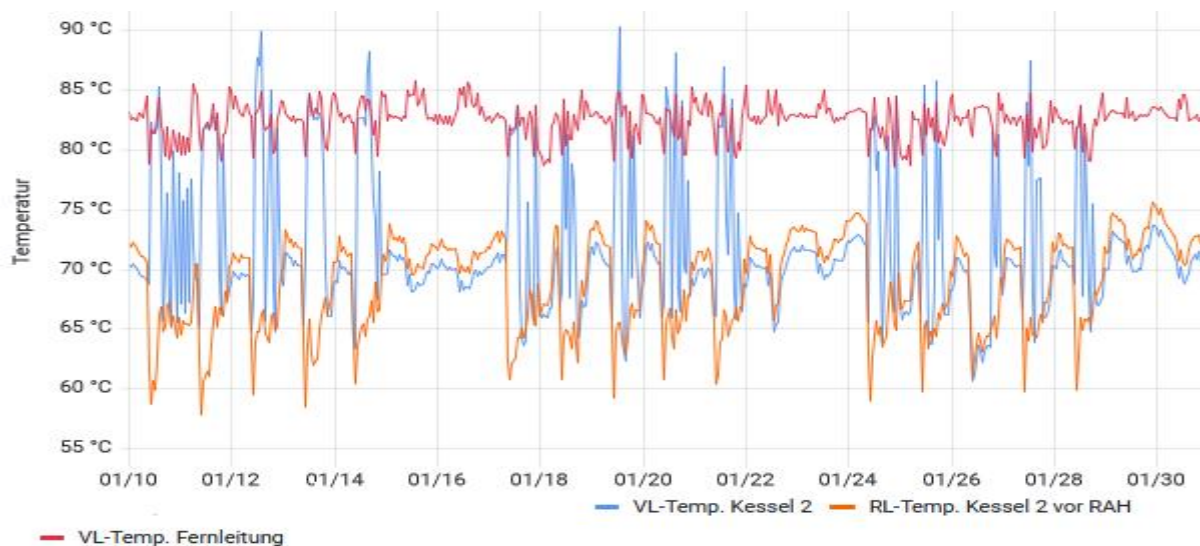


Abbildung 40: Betriebsweise von Kessel 2 der Nahwärmezentrale Kirchhellen vom 10.01.2022 bis 30.01.2022. Der Kessel unterstützt vorwiegend während der Nutzungszeiten.

Insgesamt zeigt die Analyse der Vor- und Rücklauftemperaturen aus den Automationsdaten für die Periode vom 15.11.2021 bis 30.04.2023, dass mindestens immer ein Kessel über längere Zeiträume in Betrieb ist, während der andere Kessel vorwiegend Spitzenlasten abdeckt. Diese Spitzenlasten treten vor allem werktags zu den Betriebszeiten auf.

Um den Betrieb weiter zu verbessern, ergeben sich die folgenden **Handlungsempfehlungen**:

- Zum einen sollte geprüft werden, ob die Vorlauftemperatur während der Sommer- und Übergangsmonate abgesenkt werden könnte.
- Zum anderen sollte geprüft werden, ob zur Deckung der Grundlast auch beide Kessel abgeschaltet werden können und die Grundlast nur durch das BHKW abgedeckt werden könnte. Dadurch ließe sich der Anteil der Wärmeerzeugung des BHKWs am Gesamtverbrauch erhöhen.

Reduktion des Erdgas Leistungspreises

Ein großes Einsparpotential ergibt sich durch die Reduktion der Jahres-Höchstleistung der Gaskessel und damit einhergehend eine Verringerung des Leistungspreises. Hierfür ist es sinnvoll, hohe Lastspitzen zu vermeiden. Das Prinzip dieses Einsparpotenzials ist gleichermaßen anwendbar auf die Sparten Strom und Fernwärme.

In der Heizperiode 2022/2023 beträgt die abzurechnende Jahres-Höchstleistung 994 kW. Diese wurde am 06.03.2023 um 07:00 Uhr gemessen. Daraus ergibt sich ein Leistungspreis für den Gasanschluss von 14.693 € pro Jahr. Teilt man die monatlichen Erdgasverbräuche durch die Anzahl der Stunden des Monats, lässt sich eine durchschnittliche Monatsleistung berechnen. Das Maximum der durchschnittlichen Monatsleistung beträgt nur 320 kW. Die Jahres-Höchstleistung beträgt über das Dreifache der maximalen durchschnittlichen Monatsleistung. Dies lässt darauf schließen, dass die Jahres-Höchstleistung auf kurzfristige Lastspitzen zurückzuführen ist.

Hieraus lässt sich ein erhebliches Einsparpotential ableiten. Bei einer Reduzierung der Anschlussleistung auf 320 kW würde nur ein Leistungspreis von 5.444 € pro Jahr fällig werden. Dies entspricht einem maximalen Einsparpotential von 9.249 € pro Jahr. Hierbei ist zu beachten, dass in der Praxis eine gleichmäßige Auslastung schwierig zu erreichen ist und das Einsparpotential dadurch in der Realität niedriger ausfallen könnte. Im Folgenden wird analysiert, auf welche Ursachen die Jahres-Höchstleistung von 994 kW am 06.03.2023 um 07:00 Uhr zurückzuführen ist. In Abbildung 41 sind die Vor- und Rücklauftemperaturen für den 06.03.2023 dargestellt. Es zeigt sich, dass vor 7:00 Uhr nur Kessel 2 in Betrieb ist. Um 7:00 Uhr tritt eine Lastspitze auf, wodurch auch Kessel 1 in Betrieb geht. Hierdurch tritt auch die Lastspitze des Gasverbrauchs auf.

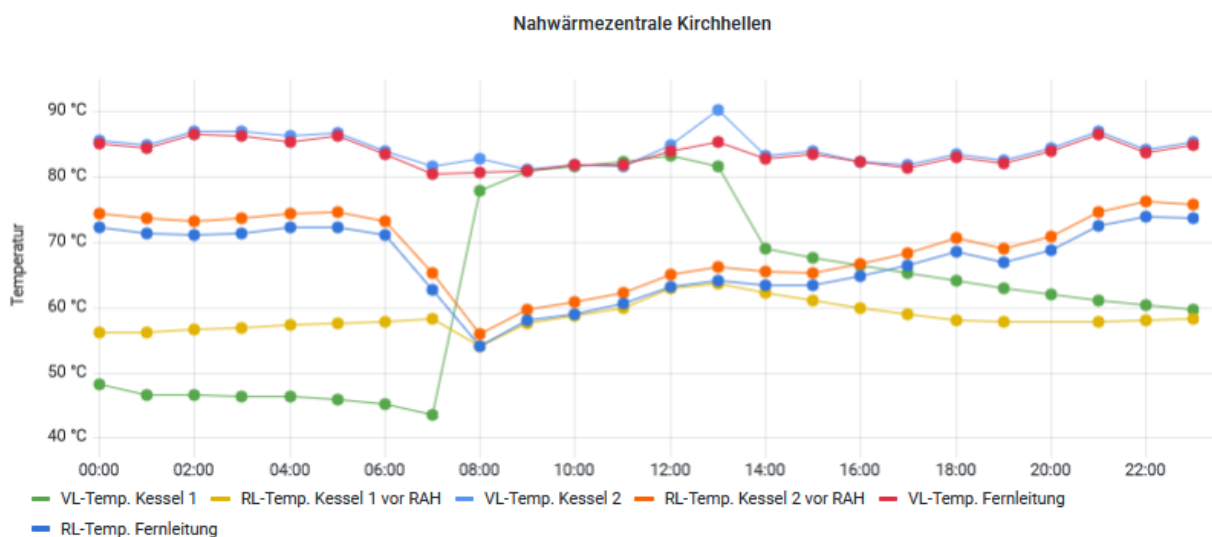


Abbildung 41: Vor- und Rücklauftemperaturen am 06.03.2023, Nahwärmezentrale Kirchhellen

Der Tag und die Uhrzeit der Lastspitze lassen darauf zurück schließen, dass diese auf Grund einer Nacht- und Wochenendabsenkung aufgetreten ist. Eine Nacht- und Wochenendabsenkung bietet durch die Reduzierung der Solltemperaturen außerhalb der Betriebszeiten ein großes Verbrauchseinsparpotential. In diesem Fall könnte dies jedoch gleichzeitig dazu führen, dass durch das plötzliche Anheben der Solltemperaturen und das zuvor ausgekühlte Gebäude eine Lastspitze auftritt.

Um diese Annahme zu überprüfen, wird in Abbildung 42 die Übergabestation der Sekundarschule Kirchhellen, welche an die Nahwärmezentrale angeschlossen ist, dargestellt. Hier zeigt sich, dass vor 7:00 Uhr nur eine geringe Wärmemenge abgenommen wird. Die Temperaturspreizung zwischen Vor- und Rücklauftemperaturen ist gering und das Ventil ist nur zu ca. 30 % geöffnet. Um 7:00 Uhr öffnet das

Ventil schlagartig. Gleichzeitig erhöht sich die Temperaturspreizung deutlich. Hierdurch entsteht eine große Lastspitze, welche sich wenig später bis in die Nahwärmezentrale fortgepflanzt hat.

Insgesamt zeigt die Analyse, dass die Nacht- und Wochenendabschaltung zwar zu einer Verbrauchsreduzierung führt, gleichzeitig jedoch auch große Lastspitzen hervorrufen kann, welche den Leistungspreis erhöhen. Durch eine Abschaltung der Nacht- und Wochenendabsenkung könnte zwar der Leistungspreis reduziert werden, gleichzeitig würde jedoch auch der Verbrauch ansteigen. Daher ist diese Maßnahme nicht zu empfehlen.

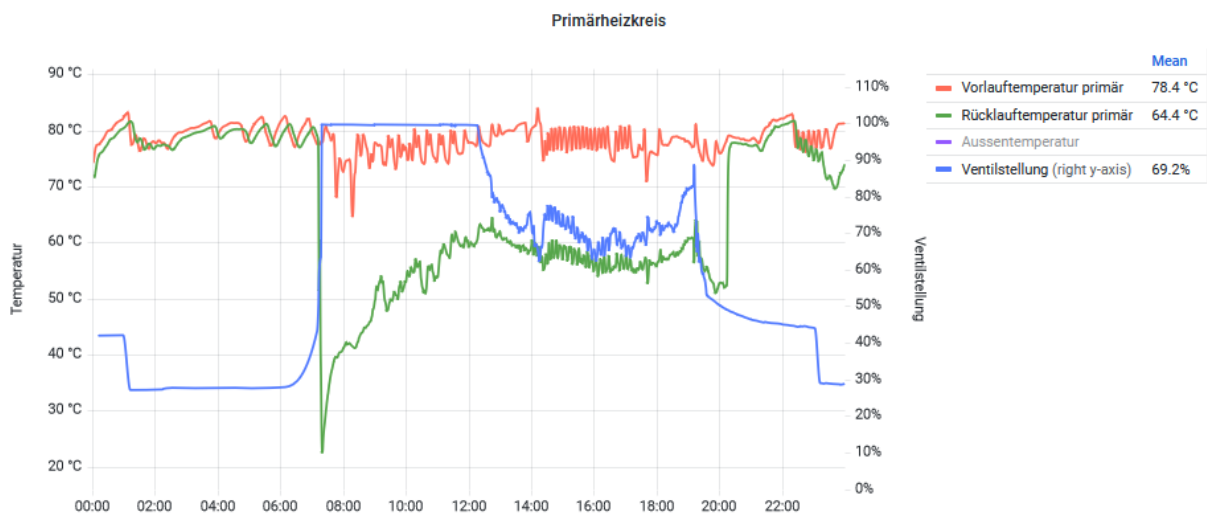


Abbildung 42: Automationsdaten der Übergabestation Sekundarschule Kirchhellen am 06.03.2023

Vielmehr ergeben sich die **folgenden Handlungsempfehlungen**:

- Verteilung der Umschaltunkte der Nacht- und Wochenendabsenkung der einzelnen Verbraucher auf verschiedene Zeitpunkte
- Kontinuierliche, langsame Änderung der Sollwerte am Umschaltpunkt, um schlagartige Ventiländerungen zu vermeiden
- Anpassung der Regelung, um eine Vollauslastung des Biogas-BHKWs während der Umschaltzeitpunkte zu erreichen

2.5.6 Analyseergebnisse: Fernwärmeverbrauch Rathaus und Katasteramt

Im Rahmen des Projekts SUSTAIN2 wurden die Fernwärmeverbräuche des Rathauses und des Katasteramts anhand der aufgenommenen Messdaten analysiert, um Einsparpotentiale zu identifizieren. In Abbildung 43 sind die Fernwärmeverbräuche für die Heizperiode 22/23 bezogen auf die Nutzfläche dargestellt. Bei den beiden Gebäuden zeigt sich ein ähnlicher Verlauf, während das Katasteramt bezogen auf die Nutzflächen insgesamt 52 % mehr verbraucht als das Rathaus. Der niedrigere Verbrauch des Rathauses ist auf eine energetische Sanierung der Gebäudehülle im Zeitraum von 2017 bis 2019 zurückzuführen.

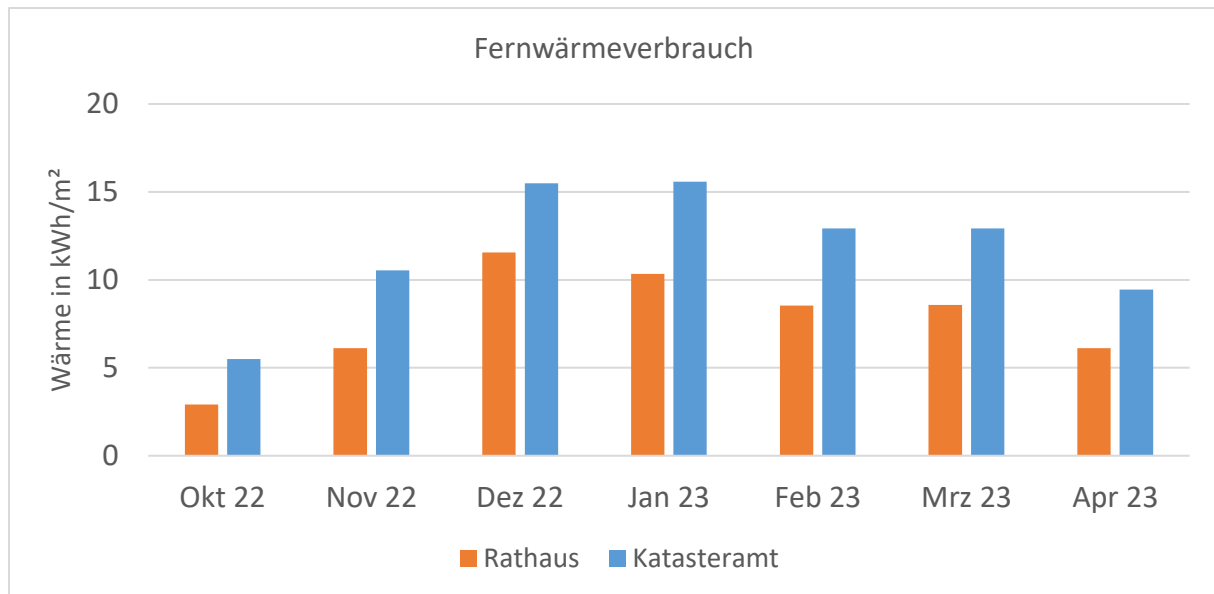


Abbildung 43: Fernwärmeverbrauch des Rathauses und Katasteramts

In der Heizperiode 2022/23 hat das Katasteramt einen Fernwärmeverbrauch von $82,4 \frac{kWh}{m^2}$ und das Rathaus von $54,2 \frac{kWh}{m^2}$. Anhand der Typologie der Nichtwohngebäude in Deutschland¹⁴ lassen sich Vergleichswerte von ähnlichen Gebäuden ermitteln. Der mittlere spezifische Nutzheizenergiebedarf für Büro-, Verwaltungs- oder Amtsgebäude, welche bis einschließlich 1978 errichtet wurden, beträgt $107,6 \frac{kWh}{m^2}$. Für Gebäude, welche nach 1978 aber vor 2010 errichtet wurden, beträgt dieser Wert $64,6 \frac{kWh}{m^2}$. Es zeigt sich, dass sowohl das Katasteramt als auch das Rathaus, welche vor 1978 errichtet wurden, einen vergleichsweise geringen Verbrauch haben. Durch die Sanierung der Gebäudehülle verbraucht das Rathaus sogar weniger als Gebäude, welche nach 1978 aber vor 2010 errichtet wurden. Hieraus ergibt sich für die beiden Gebäude im Vergleich kein direkter Sanierungsbedarf.

Detailanalyse Rathaus

In Abbildung 44 ist der Fernwärmeverbrauch des Rathauses über die Außentemperatur für die Heizperiode 22/23 dargestellt. Es ist ein annähernd lineares Heizkurvenverhalten zu erkennen. Anhand des Diagramms lässt sich die eingestellte Heizgrenztemperatur, ab welcher nicht mehr geheizt wird, ermitteln. Diese liegt bei ungefähr 19°C . Hieraus lässt sich ein Verbesserungspotential ableiten, da laut Norm die Heizgrenztemperatur bei 15°C liegen sollte.

Ein weiteres Einsparpotential ergibt sich bei Betrachtung der Anschlussleistung. Für die Anschlussleistung der Fernwärme ist ein Leistungspreis zu entrichten. Daher sollte sich die Anschlussleistung an der tatsächlichen Spitzenlast des Gebäudes orientieren.

¹⁴ Typologie der Nichtwohngebäude in Deutschland – Methodik, Anwendung und Ausblick, IWU; https://www.iwu.de/fileadmin/publikationen/gebäudebestand/2022_IWU_HoernerEtBischof_WorkingPaper_Typologie-der-Nichtwohngebäude-Deutschlands.pdf
ENOB:dataNWG - Typologie des IWU und Toolbox zur Verbrauchsstrukturanalyse VSA 2.0, <https://www.dat-anwg.de/downloads/schlussbericht/>, letzter Zugriff 17.01.2023

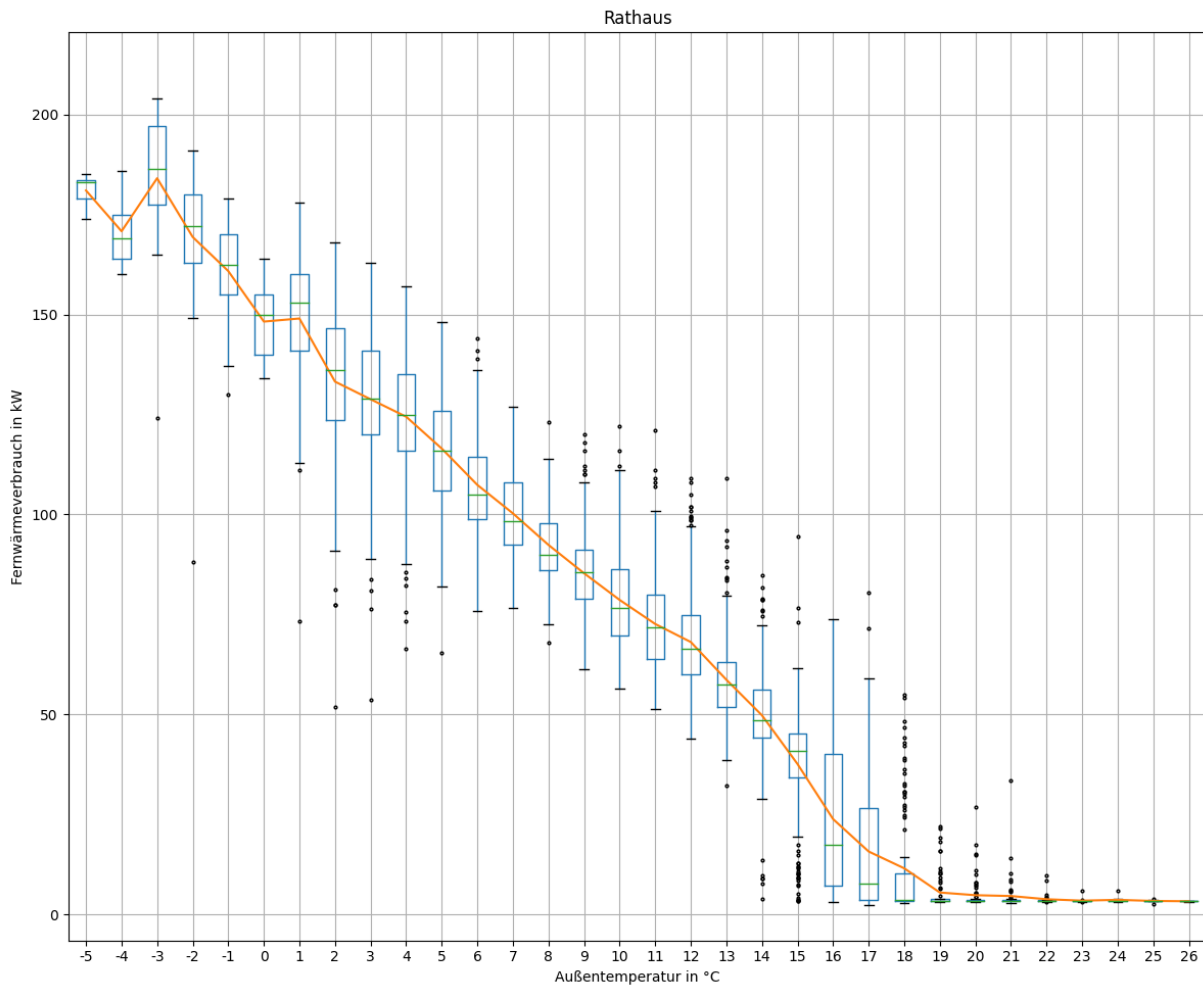


Abbildung 44: Fernwärmeverbrauch des Rathauses über die Außentemperatur

Die Anschlussleistung des Rathauses beträgt 350 kW. Aus Abbildung 44 lässt sich die Spitzenlast des Gebäudes ablesen. Diese beträgt in der Heizperiode 22/23 204 kW. Anhand des linearen Heizkurvenverhalten lässt sich ebenfalls eine Regressionsgerade ermitteln, mit der die Spitzenlast bei Normaußentemperatur von -10 °C ermittelt werden kann. Die berechnete Spitzenlast beträgt 226 kW. Mit einem Sicherheitsfaktor von 20 % ergibt sich eine empfohlene Anschlussleistung von 272 kW. Bei einem Leistungspreis von $39,46\frac{\text{€}}{\text{kWh}}$ ergibt sich hieraus ein Einsparpotential von 3.109,45 €.

Detailanalyse Katasteramt

Ähnliche Analysen wurden auch für das Katasteramt durchgeführt. In Abbildung 45 ist der Fernwärmeverbrauch des Katasteramts über die Außentemperatur für die Heizperiode 22/23 dargestellt. Im Vergleich zum Rathaus ergeben sich deutlich mehr Ausreißer aus dem linearen Heizkurvenverhalten. Hieraus ergeben sich mögliche Verbesserungspotentiale, da die vielen Ausreißer für eine nicht gut eingestellte Regelung sprechen. Eine häufige Ursache für Abweichungen vom linearen Heizkurvenverhalten sind fehlerhafte Außentemperaturmessungen, wodurch zu hohe oder zu niedrige Vorlauftemperaturen im Heizsystem eingestellt werden.

Die eingestellte Heizgrenztemperatur beträgt ungefähr 21 °C . Ähnlich wie beim Rathaus lässt sich hieraus ein Verbesserungspotential durch eine Absenkung auf 15 °C ableiten.

Die Anschlussleistung des Katasteramts beträgt 250 kW. Aus Abbildung 45 lässt sich die Spitzenlast des Gebäudes ablesen. Diese beträgt in der Heizperiode 22/23 156 kW. Anhand des lineares Heizkurvenverhaltens lässt sich ebenfalls eine Regressionsgerade ermitteln, mit der die Spitzenlast bei Normaußentemperatur von -10 °C ermittelt werden kann. Die berechnete Spitzenlast beträgt 141 kW. Mit einem Sicherheitsfaktor von 20 % ergibt sich eine empfohlene Anschlussleistung von 170 kW. Bei einem Leistungspreis von $39,46 \frac{\text{€}}{\text{kWh}}$ ergibt sich ein Einsparpotential von 3.188,37 €.

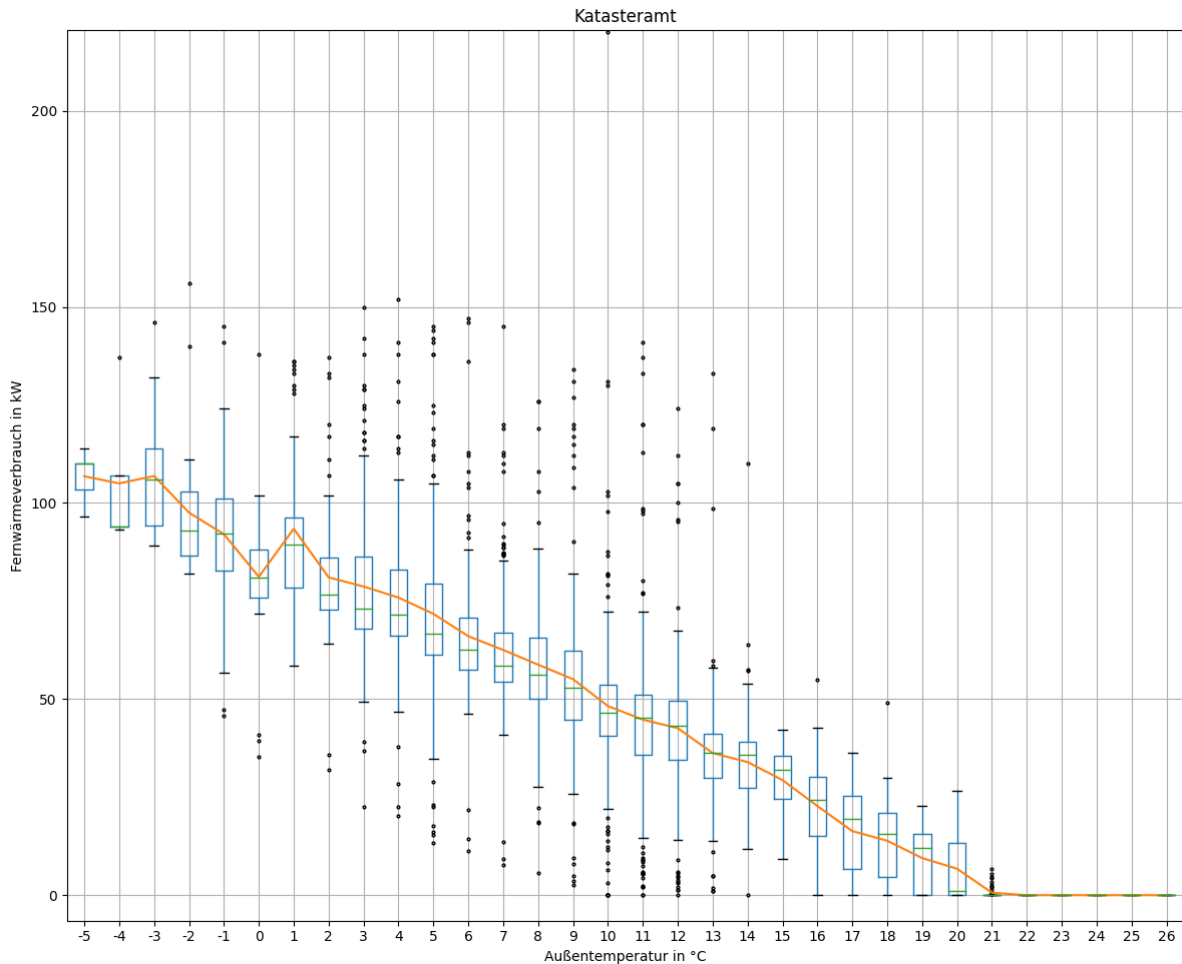


Abbildung 45: Fernwärmeverbrauch des Katasteramts über die Außentemperatur

2.5.7 Analyseergebnisse: Solltemperaturen Heizsystem

Allgemein ist zu empfehlen, die Solltemperatureinstellungen zu prüfen. In der Analyse wurde bei mehreren Gebäuden festgestellt, dass keine oder eine suboptimale Nacht- und Wochenendabsenkung von Solltemperaturen implementiert war. Auch Betriebszeiten an Samstagen unterschieden sich mehrfach nicht von denen an Wochentagen, obwohl abweichende Nutzungen vorlagen. Bei außentemperaturabhängigen Sollwertvorgaben ist eine korrekte Einbindung von Außentemperaturwerten maßgeblich (vgl. Kapitel 2.3.4). Prinzipiell kann mit der Einbindung von Raumklimasensoren eine verbesserte Regelung erzielt werden, da Soll- und Messwerte miteinander verglichen werden können. Weitere Optimierungspotenziale ergäben sich bei einer indirekt belegungsabhängigen Regelung mit vorhandener ansteuerbarer Aktorik (z.B. Luftvolumenstrom erhöhen, wenn aufgrund einer Gruppenbelegung die Luftqualität sinkt und Raumtemperatur bei fehlender Belegung reduzieren).

Neben der Sollwertdefinition kann die Abweichung vom Sollwert Rückschlüsse zur Regelgüte ermöglichen. Abbildung 46 zeigt in diesem Zusammenhang ein Beispiel für verhältnismäßig großes Schwanken

bzw. Einschwingen um den jeweiligen temporären Sollwert eines Heizkreisvorlaufs. Hier sollte der Regler nachjustiert werden.

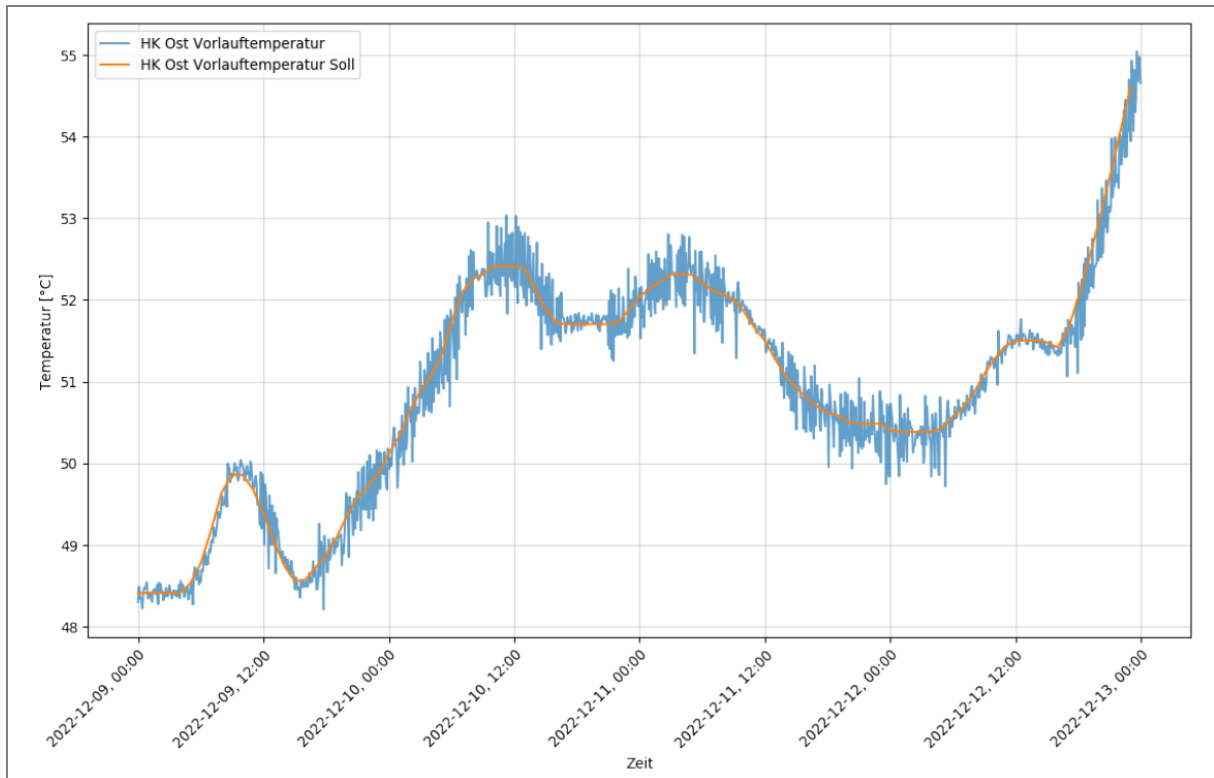


Abbildung 46: Verlauf Soll- und Ist-Temperatur des Vorlaufs des Heizkreises Ost im Rathaus

Im Rahmen der EnSikuMaV konnte nachgewiesen, dass in vielen Gebäuden Reduktionen der Solltemperaturen durchgeführt wurden, um der Verordnung zu entsprechen. Allerdings geschah dies nicht flächendeckend. Eine Erfassung der Raumklimadaten kann hier eine gute Hilfestellung in der Umsetzung von Maßnahmen darstellen.

2.5.8 Analyseergebnisse: Lüftungsanlage und elektrische Verbraucher

Neben einzelnen Anomalien im Betrieb der Drücke der Lüftungsanlage wurde teilweise beobachtet, dass wasserseitige Ventile bei Betriebsunterbrechungen nicht komplett zu fahren. Hier würde vermutlich eine Reinigung und mechanische Prüfung der Ventile zur Behebung ausreichen.

Maschinelle Lüftung wird im öffentlichen Verwaltungsbereich in der Regel nur für einzelne Flächen mit besonderen Anforderungen, wie Versammlungsräume, vorgesehen. Beim Rathaus bestehen beispielsweise einzelne Lüftungsanlagen für den Bereich des Bürgerservices und das Standesamt. Der Ratssaal, in dem auch politische Sitzungen stattfinden, wird natürlich belüftet. Auch da der Einbau einer RLT-Anlage hier aufgrund des Denkmalschutzes zu schwierigeren technischen Umsetzungen geführt hätte. Besonders bei Versammlungsräumen und Klassenzimmern sind rein mit natürlicher Lüftung nur schwierig sehr hohe Luftqualitätsniveaus erzielbar. Die Räume, die maschinell gelüftet werden, zeigen teilweise sehr gute Komfortwerte (Bürgerbüro), teilweise werden die empfohlenen CO₂-Konzentrationen zwischenzeitlich erkennbar überstiegen (Standesamt). Beim Standesamt könnte dies an der notwendigen Aktivierung mittels eines Schalters liegen, eine automatische Anwesenheitserkennung wäre hier zielführend. In den Zeiten der Covid-Pandemie konnten deutlich reduzierte Besucherzahlen und Veranstaltungsgrößen verzeichnet werden. Die geringere Belegung bei gleichzeitig verschärften Lüftungsanordnungen führte unabhängig von der Belüftungsweise zu beinahe ausschließlich idealen CO₂-Konzentrationen (s.

Abbildung 47).

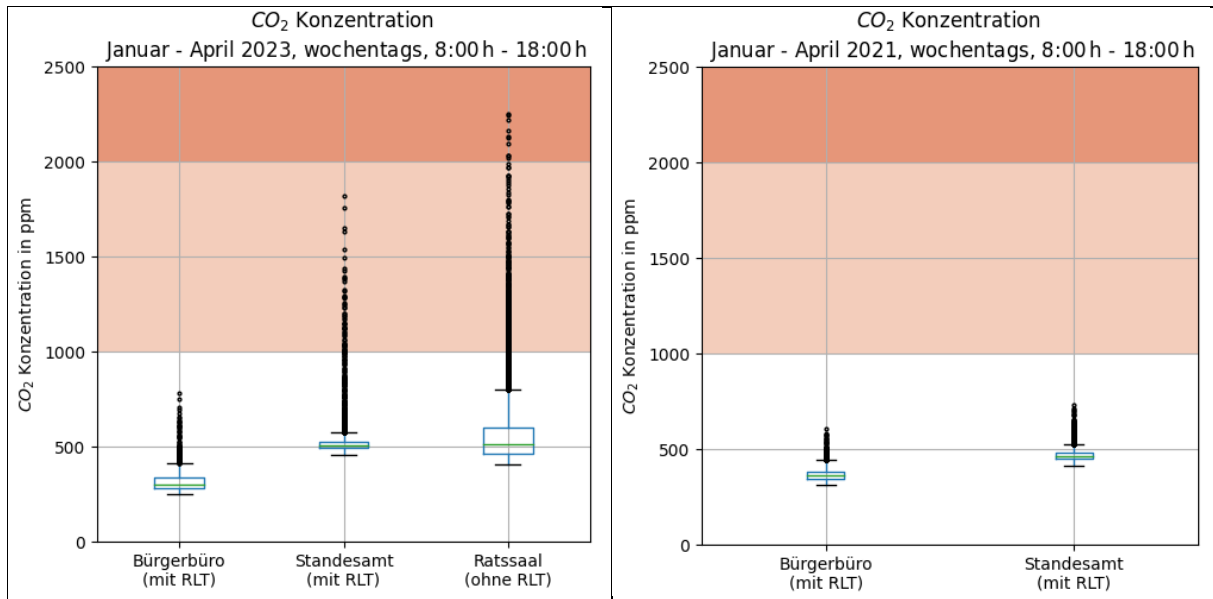


Abbildung 47: CO₂-Konzentrationen in maschinell belüfteten Räumen nach und während der Covid-Pandemie
 Auch die elektrischen Verbräuche gingen während der Pandemie aufgrund geringerer Belegung und, soweit vorhanden, reduzierter maschineller Lüftung deutlich zurück (vgl. Abbildung 48).

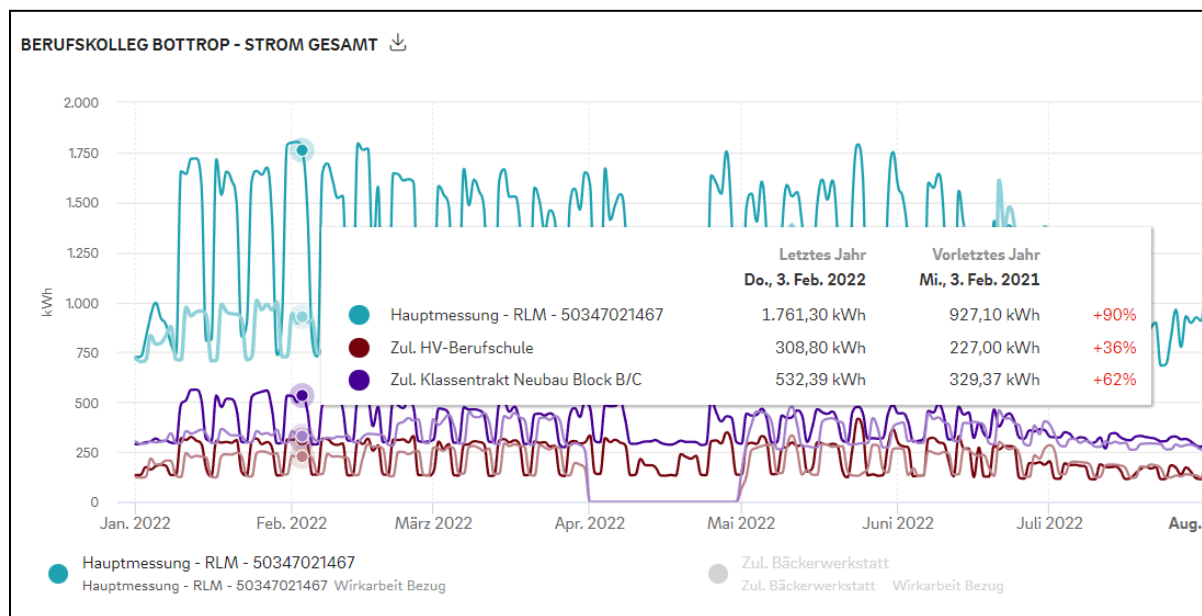


Abbildung 48: Unterschied zwischen Schulbetrieb vor Ort und teilweisen Online-Unterricht in der Corona-Zeit
 Im Bereich der thermischen Verbräuche gab es teilweise Rückgänge, teilweise Stagnation und teilweise temporär erhöhte Spitzenlasten als Reaktion auf erhöhte Lüftungswärmeverluste. Komforttemperaturen konnten aber größtenteils eingehalten werden.

2.5.9 Analyseergebnisse: Wasserversorgung

Teilweise wurden negative Wasserverbräuche verzeichnet, sodass eine Prüfung des Rückflussverhinderers dringend angeraten wird, um mögliche hygienische Missstände auszuschließen.

Es konnten verteilt über mehrere Gebäude mehrfach Leckagen verdeckt in Schächten und defekte Ventile (wie Toilettenspülungen) identifiziert werden. Bei Datenanalysen auf stundenweiser Basis

wurde systematisch der Wasserverbrauch in der Nacht überprüft. So wurde ungewöhnlicher Wasserverbrauch identifiziert und konnte vor-Ort, teilweise unter Zuhilfenahme von Fachfirmen, lokalisiert und behoben werden. Die jährlichen Kosten des Wasserverlustes summierten sich an einzelnen Gebäuden auf über 10.000 €. Darüber hinaus kann eine frühzeitige Leckage Ortung Bauschäden vorbeugen und führt auch hier zu möglichen Kostenersparnissen.

Auch ein fehlerhafter Sensor in einer Regenwasserzisterne wurde entdeckt. Dieser führte dazu, dass permanent Frischwasser anstelle des gespeicherten Regenwassers verwendet wurde. Möglicherweise bestand dieser Mangel bereits seit Jahren. Der Austausch des Sensors kostete lediglich 80 €.

2.5.10 Weitere betriebliche Empfehlungen

1. Regelmäßige Verbrauchserfassung:

Es wurde festgestellt, dass hohe Verbräuche oft zu spät oder gar nicht erkannt werden. Um diesem Problem zu begegnen, werden eine regelmäßige Verbrauchserfassung und die Analyse der Messwerte dringend empfohlen. Darüber hinaus sollten Nutzer, Reinigungsmitarbeiter und Hausverwalter klare Anweisungen und Unterweisungen erhalten, wie und welche Geräte/ Anlagen richtig zu bedienen sind, um unnötigen Energieverbrauch zu vermeiden.

Diese erfassten Daten sollten von geschultem Personal analysiert werden, um Abweichungen und ineffiziente Verbrauchsmuster frühzeitig zu erkennen. Dadurch können Energieeinsparungen erzielt und unnötige Kosten vermieden werden. Die digitale Darstellung von Zählerständen erleichtert die Arbeit bei der Abrechnung von Nebenkosten. Beispielsweise ermöglicht eine tag- oder wochengenaue Verbrauchsdarstellung eine genaue Abrechnung bei Vermietungen von Veranstaltungsstätten (Beispiel siehe Abbildung 49).

WOCHE ↑	ZEITSTEMPEL	ABLESUNG	WERT [KWH]
Jan. kw 1 2022	03.01.2022 00:00	1.809,98	22,01
Jan. kw 2 2022	10.01.2022 00:00	1.831,98	37,05
Jan. kw 3 2022	17.01.2022 00:00	1.869,03	36,89
Jan. kw 4 2022	24.01.2022 00:00	1.905,92	37,70
Jan. kw 5 2022	31.01.2022 00:00	1.943,62	35,86
Feb. kw 6 2022	07.02.2022 00:00	1.979,48	67,82
Feb. kw 7 2022	14.02.2022 00:00	2.047,30	67,21

Abbildung 49: Strom-Verbrauchswerte auf Wochenbasis, es sind auch detailliertere Zeiträume möglich

2. Check-Listen und Anweisungen für das Abschalten:

Die Implementierung von Checklisten und klaren Anweisungen für das tägliche Abschalten von Geräten ist von entscheidender Bedeutung. Nutzer, Reinigungsmitarbeiter und/oder Hausverwalter sollten darüber informiert sein, welche Geräte zu welchem Zeitpunkt abgeschaltet werden können, um unnötigen Energieverbrauch zu verhindern.

3. Anpassung der Gebäudeleittechnik:

Die vorhandene Gebäudeleittechnik sollte genutzt werden, um den Energieverbrauch zu optimieren. Dies kann bspw. durch die Implementierung von 'Feiertagsregelungen' erfolgen, die sicherstellen, dass Energie nur dann verbraucht wird, wenn sie wirklich benötigt wird. Wartung, Schulung von Mitarbeitern und gegebenenfalls das Hinzuziehen von Fremdfirmen sind notwendig, um sicherzustellen, dass die GLT effizient betrieben wird.

4. Anpassung der Heizungseinstellungen:

Einige Heizungseinstellungen müssen überarbeitet werden, um unnötigen Energieverbrauch zu verhindern. Wochenprogramme, Nutzzeiten und Komforttemperaturen sollten so angepasst werden, dass die Heizung nur dann in Betrieb ist, wenn sie benötigt wird. Dies kann auch kürzere Heizperioden einschließen, um den Energieverbrauch zu reduzieren.

Eine Mess-, Steuer- und Regelungs-Checkliste (MSR) ist unerlässlich, um die Effizienz der Heizungsanlage zu gewährleisten. Diese Checkliste sollte Einstellungen, Betriebszeiten und Temperaturen erfassen, um eine optimale Heizungsregelung sicherzustellen. Die Schulung des Personals und die gegebenenfalls erforderliche Unterstützung von Fremdfirmen sind notwendig, um die MSR-Checkliste effektiv umzusetzen.

5. Fehlende hydraulische Abgleiche:

Nach Heizungserneuerungen oder -sanierungen fehlen oft hydraulische Abgleiche, die jedoch auf einer raumbasierten Heizwärmebedarfsberechnung vor der Heizperiode durchgeführt werden sollten.

6. Heizkörperabdeckungen (schlechte Konvektion):

Die schlechte Konvektion zahlreicher Heizkörper, die oft zugestellt oder verbaut sind, kann die Effizienz der Heizung beeinträchtigen. Regelmäßige Inspektionen und Freihaltung der Heizkörper sind erforderlich, um die Effizienz zu steigern.

7. Fehlende Belegungspläne der Räume:

Fehlende Belegungspläne der Räume erschweren die optimale Nutzung der Heizungszeiten. Eine fortlaufende Anpassung der Nutzungszeiten sowie die Bündelung der Abend- und Fremdnutzung können dazu beitragen, die Heizungszeiten in den entsprechenden Heizkreisen zu optimieren.

8. Verspätete Schadenserfassung:

Die kontinuierliche technische Betreuung und die Einführung von periodischen Regelbegehungen mit Dokumentation sind erforderlich, um Schäden frühzeitig zu erkennen und Folgekosten zu verhindern.

9. Ineffiziente Beleuchtung:

Der Austausch aller ineffizienten Leuchtmittel und der Einsatz von Bewegungsmeldern sind Maßnahmen zur Verbesserung der Beleuchtungseffizienz. Die Integration dimmbarer Beleuchtungsmöglichkeiten sollte ebenfalls in Erwägung gezogen werden.

10. Fehlende Spar-Spültasten in einigen WCs:

Die Installation zeitgemäßer Einheiten mit Sparspülung anstelle von alten Spülkästen in bisher nicht sanierten WC-Bereichen kann den Wasserverbrauch reduzieren.

11. Thermostat-/Ventile und Heizkörper:

Die korrekte Voreinstellung der Heizkörper und Entlüftung sollten regelmäßig durchgeführt werden, um die Heizungsleistung zu optimieren.

12. Falsches Heizen und Lüften:

Die Vermeidung der Dauerkippstellung von Fenstern und die Durchführung konsequenter Stoßlüftung sind effektive Maßnahmen zur Energieeinsparung. Bei Bedarf sollten die Thermostatventile während des Lüftungsvorgangs abgedreht werden.

13. Erhöhte Wasserverbrauchsmengen:

Die periodische Überprüfung und Erneuerung von Spar-perlatoren an Waschbecken-Armaturen sowie der Einsatz von elektrischen Wasserarmaturen können den Wasserverbrauch reduzieren.

2.5.11 Kosten-Nutzen-Analyse

Im Rahmen von SUSTAIN2 wurden verschiedene Daten aus unterschiedlichen Quellen (vgl. Abbildung 50) in den 25 betrachteten Gebäuden analysiert. Allgemein lässt sich zu jeglicher zusätzlich eingebrachter Sensorik folgendes festhalten: Neben dem Aufwand und den initialen Kosten für Gateways und Datenplattformen ist das Einbringen von Sensoren mit 70 bis 300 € und maximal einem Tag Aufwand pro Gebäude vergleichsweise günstig. Eine Ausnahme stellt hierbei die Digitalisierung abrechnungsrelevanter Messstellen (beispielsweise für Gas, Fernwärme, Strom oder Wasser) dar, da diese häufig in Kooperation mit dem jeweiligen Netzbetreiber realisiert werden muss. Bei Temperaturfühlern, die für Anlagentechnik im Hochtemperaturbereich eingesetzt werden, sollten vor dem Kauf Erfahrungsberichte recherchiert werden, da es in SUSTAIN2 zu mehreren Ausfällen aufgrund von überschrittenen Temperatureinsatzbereichen kam.

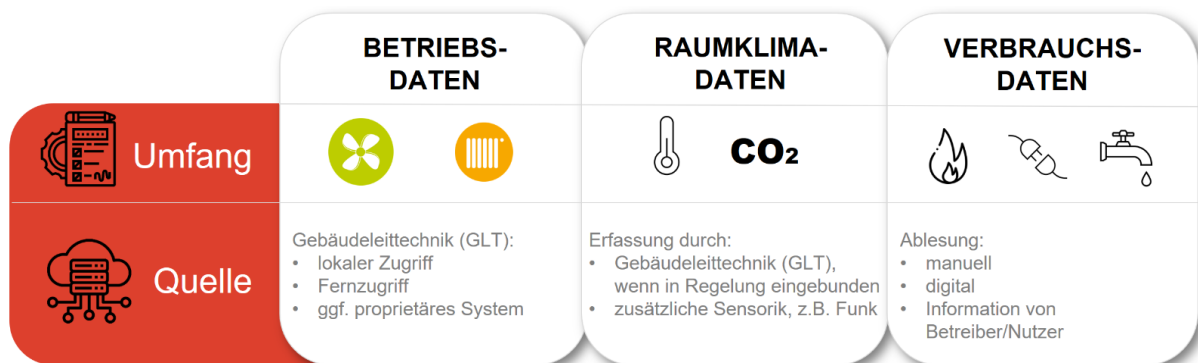


Abbildung 50: Datenquellen kommunaler Gebäude

Digitale Gaszähler wie G25 und G40-Gaszähler, welche in SUSTAIN2 in Schulen notwendig waren, sind im Vergleich zu anderer Sensorik teuer. Pro Objekt entstanden Kosten von bis zu 3.000 €. Um die hohen Kosten zu vermeiden, bietet sich das Nachrüsten von Zusatzmodulen in Form von fernauslesbaren Aufsatzmodulen an, welche zu Kosten von etwa 60 € - 70 € pro Modul verfügbar sind. Gleiches gilt für fernauslesbare **Fernwärmezähler**, welche ebenfalls durch den Netzbetreiber eingebracht werden müssen und etwa 600 € kosten. Zusätzlich musste hier ein verpflichtender Schlüsselschalter zur Freischaltung (stromlos) des digitalen Zählers von weiteren 300 € erworben werden. Dem gegenüber steht allerdings auch ein nicht unerhebliches Einsparpotential.

Der Austausch von **Stromverbrauchszählern** verursachte Kosten von etwa 200 € pro Zähler, welche vergleichsweise niedrigen elektrischen Verbräuchen für Beleuchtung und Nutzerstrom und vereinzelte Lüftungsanlagen in den betrachteten kommunalen Gebäuden gegenüberstanden. Dies gilt allerdings nicht für Gebäude mit flächendeckender Lüftung, Kühlung oder elektrischen Wärmeerzeugern (wie beispielsweise Wärmepumpen). Bei Gebäuden mit Lüftungsanlagen konnten teilweise Störungen im Betrieb erkannt werden, beispielsweise indem bei einer Betrachtung der Dauerverbraucher außerhalb

der Nutzungszeiten durchgehend laufende Ventilatoren identifiziert wurden. Eine Empfehlung für digitale Stromzähler geben wir daher nur direkt an Lüftungsanlagen oder für stärker elektrifizierte Gebäude.

Das Einbringen von **Raumklimasensoren** hat sich als eine vielversprechende Ergänzung zum energetischen Monitoring erwiesen. Mit Hilfe der erhobenen Daten konnten gezielte Analysen der Raumklimadaten durchgeführt werden, die zur Identifizierung notwendiger Anpassungen bei Lüftungsanlagen und Heizsystemen führten. Die eingebrachten Sensoren sollen daher weiterhin in der Stadt Bottrop verwendet werden und als Grundlage für weitere Analysen dienen. Die Anbindung der von der RWTH installierten Hardware an das E.ON System ist wegen der konsequenten Nutzung von LoRaWAN Sensoren problemlos möglich. Mit der Sensorik konnte auch die Einhaltung der EnSikuMaV¹⁵, die während der Projektlaufzeit zum Tragen kam, gut nachvollzogen und überprüft werden. Ein zunächst nicht beachteter Aspekt ist, dass Sensoren an öffentlichen Orten, aber insbesondere in Schulen, robust und mit zusätzlichen Schutzeinrichtungen gesichert sein sollten. Gerade Raumklimasensoren in Schulen wurden häufig durch Vandalismus beschädigt. Die verwendeten ELSYS ERS Lite Sensoren für Temperatur und Feuchte kosteten jeweils 60 € und die Variante mit zusätzlicher CO₂-Konzentrationsmessung 225 €. Beide Typen können empfohlen werden.

Ein unerwartetes Projektergebnis war die hohe Relevanz von Sensoren für den **Hausanschluss-Wasserzähler**. Leckagen bauen sich häufig über mehrere Jahre auf, wodurch ein Vergleich der Jahresverbräuche unzureichend ist, um Schäden zu identifizieren. Erst eine Analyse auf Stundenbasis lässt die Identifikation nicht plausibel hoher Verbräuche zu. Im konkreten Fall konnte so im Rahmen von SUSTAIN2 zum Beispiel eine Leckage identifiziert werden, die zu Verlusten von 4 m³/Tag und jährlichen Kosten von 10.220 € führte. Dies stand einer Sensorinvestition von ca. 100 € und einer Installationszeit von einer Stunde gegenüber. Darüber hinaus kann eine frühzeitige Leckageortung Bauschäden vorbeugen oder reduzieren und führt auch hier zu möglichen Kostenersparnissen.

Die vorgenannten Kosten- und Renditebetrachtungen sind jedoch unter Vorbehalt zu bewerten. Zum einen können laufende Betriebskosten über einen längeren Zeitraum eine Verbrauchskosten-Einsparung wieder negieren. Zum anderen werden bei diesen Kostenbetrachtungen die Festlegung und Einhaltung von Komfortanforderungen nicht berücksichtigt.

Im Rahmen von SUSTAIN2 wurde daher ein Ansatz zur Berücksichtigung der Betriebskosten und des Komforts über einen Investitionszeitraum in Anlehnung an die Kapitalwertmethode entwickelt. Dabei wurde eine Strafkostenfunktion für Komfortverletzungen integriert. Das beste Aufwand-Nutzen-Verhältnis wäre damit für jenes Szenario mit den geringsten „Gesamtkosten“ gegeben. Der gewählte Ansatz entsprach der folgenden Gleichung

$$\text{Min } K_{GES} = \text{Min} (K_{Inv} + K_{BA} + K_{penalty})$$

$$K_{penalty,i} = K_{CO2,j,i} + K_{T,j,i}$$

i – Zeitschritt von 15 Minuten

j – Passende Strafkostenfunktion je Grenzwertbereich

K_{GES} – Gesamtkosten

K_{Inv} – Kosten der Investition

K_{BA} – Kosten der Betriebsaufwände (Bilanz aus Mehr- und Minderkosten)

K_{penalty} – Virtuelle Strafkosten zur nicht-monetären Nutzenbewertung

¹⁵ Verordnung zur Sicherung der Energieversorgung über kurzfristig wirksame Maßnahmen

$K_{CO_2,j,i}$ – Strafkosten für erhöhte CO₂-Konzentration in der Raumluft

$K_{T,j,i}$ – Strafkosten für Komforttemperaturverletzung

Aus bestehenden Verordnungen wurden Komfortklassen für Temperatur und Luftqualität gebildet, welche als Grundlage für verschiedene Strafkostenhöhen dienen. Zusätzlich zeigen Studien, dass die Einhaltung des Komfortbereichs zwischen 21°C und 25°C auch indirekte wirtschaftliche Profite mit sich bringt, da Mitarbeiter leistungsfähiger sind, seltener krank und insgesamt zufriedener sind, wodurch sich eine stärkere Mitarbeiterattraktivität und Bindung ergeben kann. Eine Verletzung der Komfortbedingungen hat also auch real Kosten bzw. wirtschaftliche Nachteile zur Folge, diese sind nur nicht direkt erkennbar. Die Strafkostenfunktion dient als Mittel zum Vergleich von Zuständen und Gebäuden im Vorlauf von Maßnahmenplänen, als Hilfsmittel zur Bewertung von Investitionsszenarien und als quantifizierbare Belohnung, wenn Zielbereiche eingehalten wurden. Abbildung 51 zeigt die Grundlagen zur Klassenbildung exemplarisch für die Raumtemperatur im Heizfall für (öffentliche) Büros und Schulen.

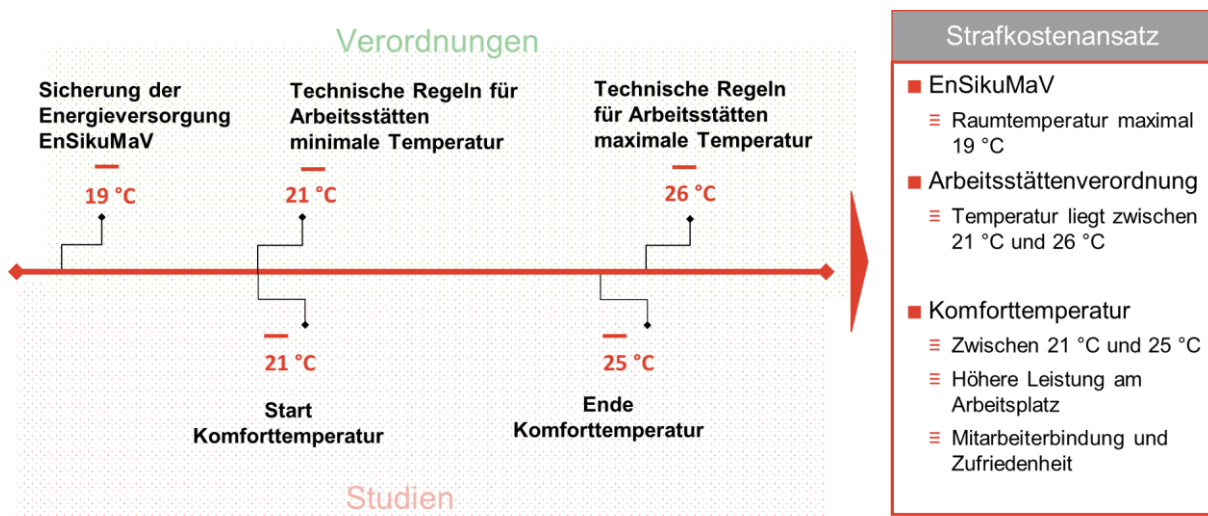


Abbildung 51: Grundlagen für die Bildung von Raumtemperatur-Komfortklassen im Heizfall (Büro und Schule)

Der Ansatz wurde qualitativ weiter ausgebildet (siehe Abbildung 52 und Abbildung 53) und diente als Grundlage für das bereits in Kapitel 2.5.3. genannte Mikroprojekt KlaDat, in welchem das monetäre Ersatzsystem zur Komfortbewertung und die Einbindung in ein Investitionsrechenverfahren basierend auf der oben beschriebenen Gleichung methodisch ausgearbeitet wurde. Die Methodik konnte folgend auf mehrere Gebäude, unter anderen aus dem SUSTAIN2 Portfolio, angewandt werden.

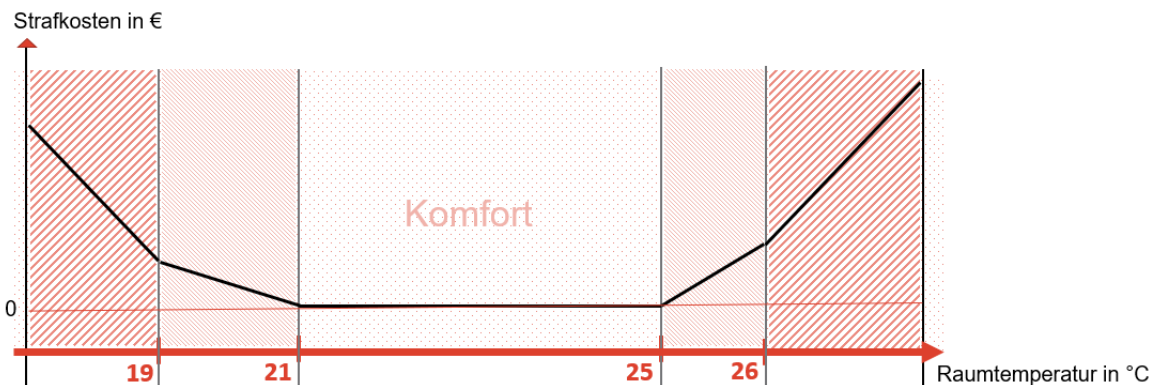


Abbildung 52 Qualitativer Strafkostenansatz für nicht ideale Komfort-Raumtemperaturen

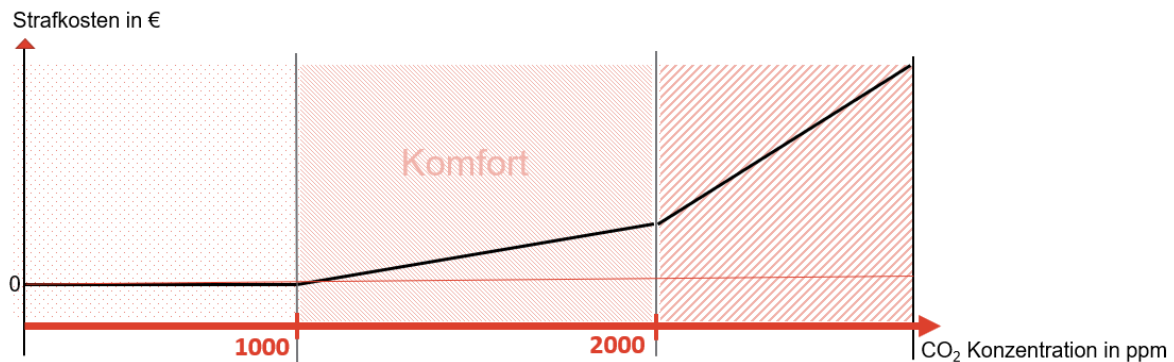


Abbildung 53: Qualitativer Strafkostenansatz für nicht ideale Komfort-Luftqualitäten

2.6 Arbeitspaket 6 (AP 6): Automatisierte Betriebsoptimierung im Energiemanagement

RWTH Aachen (PMs: 24,75); Stadt Bottrop (PMs: 4,25); ELE (PMs: 6); E.ON (PMs: 13,4)

Ziel dieses Arbeitspaketes war es, Energieeinsparungen mittels einer automatisierten Betriebsoptimierung mit optimierten Stellsignalen aus einem cloudbasierten Energiemanagement zu erzielen. Hierfür wurden auf Basis der erhobenen Messdaten Potentiale für die automatisierte Betriebsoptimierung in den einzelnen Gebäuden identifiziert. Aufgrund eingeschränkter Zugriffsmöglichkeiten auf Stellsignale und der Notwendigkeit stabiler Betriebsabläufe in den Gebäude wurde der Fokus letztendlich auf die Vorlauftemperaturoptimierung gelegt. Für die Demonstration der Übermittlung von Steuersignalen aus der Cloud wurde eine bidirektionale Kommunikation zwischen Gebäude und Cloud entwickelt und implementiert. Es wurden lernfähige Algorithmen für die kontinuierliche, automatisierte Verbesserung der Optimierungsalgorithmen ausgewählt und implementiert. Dieses Arbeitspaket baut auf den Vorarbeiten von AP4 (Anbindung und Weiterentwicklung Cloud) und AP5 (Mensch-Maschine-Interaktion im Energiemanagement) auf.

Die automatisierte Betriebsoptimierung wurde in drei Phasen konzipiert und implementiert. In der ersten theoretischen Phase wurden mehrere Konzepte verglichen und ausgewertet, um die am besten für die vorliegenden Rahmenbedingungen geeigneten auszuwählen und entsprechend den spezifischen Anforderungen zu implementieren.

In der zweiten Phase wurden die in AP2 und 3 gesammelten Gebäudedaten und -verbräuche für die Erstellung von Modellen genutzt, um mehrere Regelungskonzepte in einer Simulationsumgebung zu testen. Dafür wurden unterschiedliche Testszenarien entwickelt und modelliert.

In der dritten Phase wurde das Konzept an die realen Gegebenheiten eines konkreten Gebäudes und den bestehenden Monitoring- und Kommunikationsmöglichkeiten angepasst und getestet.

2.6.1 Gebäudemodellierung

Die Gebäudemodellierung ist ein wesentlicher Bestandteil der Entwicklung einer Anlagenbetriebsoptimierung. Die Modelle müssen einfach parametrierbar sein, um mit den wenigen in der Praxis vorhandenen Gebäudeinformationen aufgesetzt werden zu können. Zudem müssen die Modelle im Hinblick auf die Rechenkapazitäten sehr leichtgewichtig sein, um direkt in Optimierungsrechnungen eingebunden werden zu können. Auf diesem Wege kann ein Gebäude mit begrenzter Datenbasis modelliert und der Gebäudeenergiebedarf prognostiziert und für eine modellprädiktive Regelung (MPC) genutzt werden. Mit Hilfe der Analyse des zukünftigen Gebäudeverhaltens in Abhängigkeit von den Regelparametern können optimale Regelparameter ermittelt werden.

Im Rahmen des Projektes wurde eine Black-Box Modellierung gewählt. Diese Modelle lernen die Dynamik des Gebäudes ohne Vorkenntnisse über die physikalischen Zusammenhänge, rein datengetrieben. Dafür sind ausführliche Messdaten des Gebäudes erforderlich. Diese Messdaten bestehen in der Regel aus Temperaturverläufen, Energieverbrauch, Energieerzeugung, Wetterdaten usw. Je mehr Daten zur Verfügung stehen, desto besser kann das Black-Box-Modell trainiert werden. Bei ausreichender Datenverfügbarkeit führt die Black-Box Modellierung zu geringeren Entwicklungskosten, da die komplexen, individuellen physikalischen Zusammenhänge eines Gebäudes nicht aufwendig berücksichtigt werden müssen.

Für die Black-Box-Modellierung wurden Recurrent Neural Networks (RNN) mit Zellen mit Lang-Kurzzeitgedächtnis (LSTM) verwendet. LSTM-Netze sind eine spezielle Art von RNNs. RNNs sind in der Lage, den vergangenen Zellzustand in die Entscheidung über den aktuellen Zellzustand einzubeziehen. LSTMs erweitern diesen Ansatz, indem sie nicht nur die Fähigkeit haben, den vergangenen Zellzustand zu speichern, sondern auch länger in der Vergangenheit liegende Inputs in die Zellzustände einfließen zu lassen.

2.6.1.1 LSTM Framework

Da während der Projektlaufzeit erst zu einem späteren Zeitpunkt eine Möglichkeit gefunden wurde in das reale System einzugreifen und die Systeme vor Ort zu steuern, wurde für das Testen unterschiedlicher Modellierungsansätze und Regelungskonzepte ein eigenes LSTM-Framework entwickelt, welches mehrere Testszenarien bietet. Dieses wurde für das Testen unterschiedlicher Regelansätze mit unterschiedlichen Konstellationen von regelbaren Systemen und Parametern eingesetzt. Im Folgenden werden das Konzept und die Implementierung vorgestellt.

Die Implementierung des LSTM-Frameworks erfolgt in drei Schritten: Datenerfassung, Datenaufbereitung und Training. Für das Training des LSTM-Modells werden Eingangs- und Ausgangsdaten benötigt.

Für die Datenerfassung können historische Daten z.B. Energieverbrauch und Sonneneinstrahlung, aber auch andere Eingangsdaten wie die Außentemperaturdaten verwendet werden. Für die Implementierung der Regelung für das Projekt wurden historische Wetterdaten als Eingang und die gemessenen Lastdaten als Ausgabe verwendet. Das Wetter ist ein entscheidender Bestandteil der Gebäudemodellierung, da Gebäude je nach Wetterlage betrieben werden, um den Nutzerkomfort zu gewährleisten. Für das Einbeziehen von Wetterdaten wurde eine eigene Schnittstelle implementiert, um historische Wetterdaten vom DWD als Echtzeitinput zu integrieren.

Bevor die Daten für das Modelltraining verwendet werden können, müssen sie aufbereitet und in ein für das LSTM verarbeitbares Format umgewandelt werden. Oft werden den Eingabedaten Periodizitätsindikatoren hinzugefügt. Diese ermöglichen es dem Modell, Abhängigkeiten zwischen dem Zeitpunkt der Messungen und dem periodischen Profil der Daten zu lernen.

Das Training wird in Batches durchgeführt. Die Daten werden in Batches aufgeteilt, die aus Input- und Outputdaten eines Tages bestehen. Training und Validierung erfolgen an getrennten Datensätzen um sicherzustellen, dass die Validierung an „neuen“, dem Modell unbekanntem, Daten erfolgt, wie in einem realen Fall. Das Training wird über eine anpassbare Anzahl von Epochen durchgeführt und gestoppt, wenn der Validierungsfehler über zwei Epochen nicht abnimmt. Wenn der Validierungsfehler nach einer Epoche nicht abnimmt, wird die Lernrate des Modells um den Faktor 0,1 reduziert. Der minimierte Verlust wird berechnet als Mean Square Error (MSE) zwischen Vorhersage- und Validierungsdaten, und die allgemeine Modellgenauigkeit wird bewertet mit der Funktion des Mean Absolute Error (MAE).

2.6.1.1 Framework Implementierung

Das LSTM-Framework ist in Abbildung 54 schematisch dargestellt. Als Verwaltungsdatenbank für Trainingsmodelle und Trainingsaufträge wird eine PostgreSQL Datenbank verwendet. Die Zeitreihenmessdaten werden in TimescaleDB gespeichert. TimescaleDB ist eine Erweiterung für PostgreSQL, welche die zuverlässige und effiziente Speicherung von Zeitreihendaten ermöglicht. Als Blockspeicher für die Speicherung von Dateien wird ein MinIO S3-Speicher verwendet. Simple Storage Service (S3) ist eine ursprünglich von Amazon entwickelte Technologie. Die drei Programme sind Open-Source, was auch der entscheidende Grund für die Nutzung für das Framework war. Die Kommunikation erfolgt über eine REST-API.

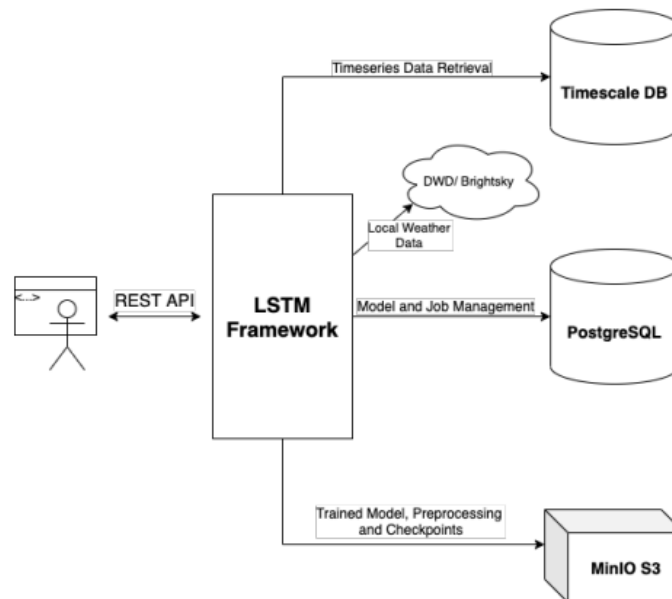


Abbildung 54 Struktur des LSTM-Framework

Die Programmierung des Frameworks erfolgte in Python mit den Bibliotheken Tensorflow und Pandas. Da dieses Framework für den Einsatz in der Cloud gedacht ist, ist der Code so geschrieben, dass parallele Instanzen des Frameworks zur gleichen Zeit laufen können. Diese Art von Programm wird als "stateless" bezeichnet, da das Programm selbst keine Informationen speichert, was es leicht austauschbar macht.

In Kombination mit einem Load Balancer kann die Leistung gesteigert werden, wenn mehrere Modelle zur gleichen Zeit trainiert werden. Das Framework wird mit einer maximalen Anzahl von laufenden Trainingsaufträgen gestartet, um sicherzustellen, dass eine Instanz des Frameworks nicht im Parallelmodus alle Trainingsaufträge alleine ausführt.

2.6.1.2 Auswertung des LSTM-Frameworks

Für die Auswertung des LSTM-Frameworks wurden fünf unterschiedliche Anwendungsfälle entwickelt, von denen im Folgenden einer vorgestellt wird, sowie die Zusammenfassung der Ergebnisse der Performance des LSTM-Frameworks.

Die Auswertung umfasst die Genauigkeit der Vorhersagen, die Rechenleistung, sowie den Vergleich zwischen Standardisierung und Normalisierung bei der Vorverarbeitung der Daten. Die Genauigkeit der Vorhersagen wurde für verschiedene Monate verglichen, da die Messungen in den Gebäuden unter anderem während der Covid-19-Pandemie durchgeführt wurden, die nicht repräsentativ für den

Gebäudebetrieb waren. Auch die Anzahl der Schichten des neuronalen Netzes und der Zellen in einer Schicht werden hinsichtlich ihrer Leistung miteinander verglichen. Die Benchmarks werden für die "Dieter-Renz-Sporthalle", einer öffentlichen Turnhalle mit sehr unterschiedlicher Nutzung, durchgeführt.

Das Training dauerte im Durchschnitt 14,3 Sekunden pro Epoche, insgesamt 4,15 Minuten. Die Berechnungen wurden nach 18 von 20 Epochen abgebrochen, da die Performance auf den Validierungsdaten (MSE) nicht weiter stieg. Der MAE in der letzten Epoche war 0,0463 und der MSE war 0,0037. Abbildung 55 zeigt den Vergleich zwischen vorhergesagter und tatsächlicher Last für Dienstag, den 18.08.2020.

Die Abbildung zeigt einen im Durchschnitt konstanten Vorhersagefehler. Der durchschnittliche Fehler über 48 Stunden beträgt 5,137 kW, was 18 % der durchschnittlichen Gebäudelast (28,462 kW) entspricht. Das Kurvenprofil zeigt, dass das LSTM-System in der Lage ist, das allgemeine Lastprofil des Gebäudes vorherzusagen. Während der Stunden von 22:00 Uhr am Dienstag bis 02:00 Uhr am Mittwoch und von 08:00 bis 14:00 Uhr am Mittwoch stimmt das vorhergesagte Profil zuverlässig mit dem tatsächlichen Verlauf überein, was durch die niedrigen absoluten Fehlerwerte bestätigt wird (gestrichelte graue Linie). Das LSTM-Framework performt schlechter in den Abendstunden von 19:00 bis 22:00 Uhr am Dienstag. Die vorhergesagte Kurve beginnt zu früh zu sinken, was zu einem Fehler über 10 kW in der Vorhersage führt. Die gleiche Situation tritt am Mittwoch gegen 18:00 Uhr auf. Hier erreicht der Fehler während des Vorhersagehorizonts mit 15 kW sein Maximum. Es wurde beobachtet, dass die vorhergesagte Last der Sporthalle immer niedriger als die tatsächliche Last während der Abendstunden ist.

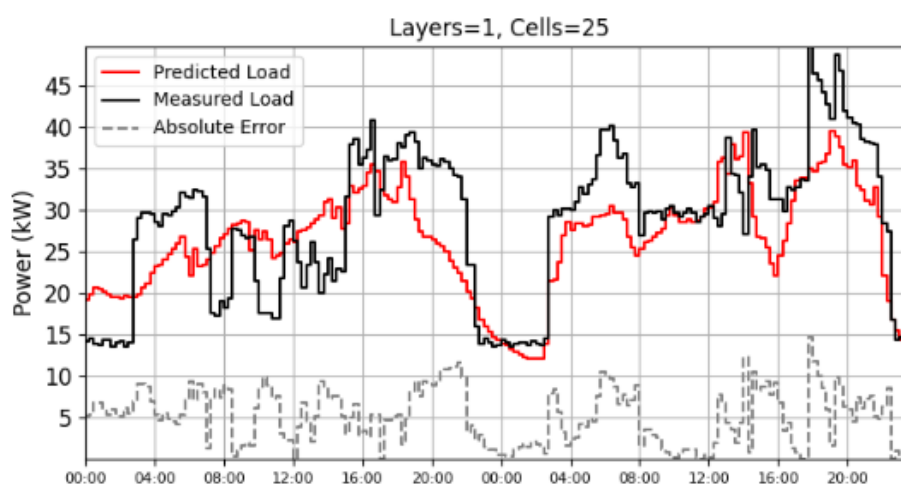


Abbildung 55 Anwendungsfall 18.08.2020

Die untersuchten Anwendungsfälle haben gezeigt, dass das LSTM-Framework durchaus fähig ist, den Lastgang eines Gebäudes auf der Basis von Wettervorhersagen vorherzusagen. Während das Lastprofil im Allgemeinen eingehalten wird, sind die Spitzen der Kurve schwieriger vorherzusagen. Die Framework-Konfiguration mit 2 Schichten und 25 Zellen pro Schicht schneidet am besten bei der Vorhersage von kurzfristigen Schwankungen und der Vorhersage von Spitzenwerten ab. Sich wiederholende Lasttrends wie die hohe Last in den Morgenstunden werden vom LSTM-Framework erkannt und vorhergesagt. Wie erwartet, hängt die Leistung des neuronalen Netzes stark von den Eingabedaten ab. Die Wetterdaten sind für erste Vorhersagen ausreichend, aber die stark schwankende Nutzung von öffentlichen Gebäuden dieses Typs macht die Eingabe von einem Inputfeature zur aktuellen Nutzung notwendig. Belegungsprofile könnten die Leistung des Netzes enorm steigern.

2.6.2 Regelung am Beispiel der Ludgerusschule

2.6.2.1 Datenerschließung

Im Rahmen der Datenerschließung für das neuronale Netzwerk wurden unter anderem die von aedifion bereitgestellten Daten der Sensoren und LoRa-Geräte genauer betrachtet. Eine Herausforderung bei der Datenauswahl bestand darin, ein Verständnis für den Aufbau der Ludgerusschule, dessen Heizsystem und der aufgenommenen Daten zu erlangen. Die Auswahl des Zeitraums für das Machine-Learning erfolgte nach Betrachtung der verfügbaren Datenlage. Daher wurde der Zeitraum vom 21. November 2021 bis zum 11. März 2022 ausgewählt, da in diesem Zeitraum die Datenmenge am umfassendsten und repräsentativsten war.

In der Datenaufbereitung fand eine Bereinigung von Datenfehlern, die Interpolation fehlender Werte sowie die Skalierung der Daten statt, um sicherzustellen, dass sie für die geplanten Analysen und Modelle optimal nutzbar waren.

2.6.2.2 Erstellung des Gebäudemodells

Für die bereits bereinigten Daten wurde Feature-Engineering durchgeführt, wobei zusätzliche Merkmale in die Daten integriert wurden, um das Modell des neuronalen Netzwerks zu verbessern. Hierbei wurden insbesondere Sinusfunktionen für die Tageszeit und Jahreszeit hinzugefügt, um saisonale und tägliche Trends in den Temperaturdaten besser erfassen zu können. Diese Ergänzungen ermöglichten eine präzisere Modellierung der Temperaturverläufe im Zeitverlauf.

Des Weiteren wurde eine binäre Spalte für Arbeitstage eingeführt, um den Einfluss von Wochentagen in den Vorhersagen zu berücksichtigen. Dies erwies sich als relevante Variable, da Arbeitstage oft eine andere Nutzung von Gebäuden und somit unterschiedliche Temperaturverläufe aufwiesen.

Ein weiterer entscheidender Schritt in der Datenverarbeitung war die Normalisierung der Daten. Durch diesen Prozess wurden die Daten in einen einheitlichen Wertebereich skaliert, um sicherzustellen, dass alle Merkmale mit vergleichbarer Gewichtung in das neuronale Netzwerk eingebracht wurden. Die Normalisierung trug dazu bei, mögliche Verzerrungen aufgrund unterschiedlicher Skalen der Merkmale zu minimieren und die Stabilität des Modells zu erhöhen.

2.6.2.3 Optimierung

Unter Verwendung des zuvor generierten Modells wurde eine Optimierungsaufgabe definiert. Diese soll die Auswahl der Vorlauftemperatur der Heizungsanlage in Bezug auf Energieverbrauch und Raumtemperaturen verbessern.

Dieses Problem wurde als Gurobi-Modell formuliert, und zusätzliche Nebenbedingungen in Bezug auf den Anlagenbetrieb und die einzuhaltenden Temperaturwerte wurden hinzugefügt. Die Zielfunktion des Optimierungsproblems wurde definiert, wobei das Ziel darin bestand, den Energieverbrauch der Heizungsanlage so weit wie möglich zu reduzieren.

Schließlich wurde die Gurobi-Optimierung durchgeführt, um die optimalen Werte für die Vorlauftemperaturen und Raumtemperaturen zu ermitteln. Diese Optimierung wurde auf den in Grafana gespeicherten Daten vom April 2022 bis zum April 2023 angewandt. Dabei musste die Optimierung eine Temperatur von mindestens 21°C in den Räumen zwischen 9 und 18 Uhr garantieren. Aus der Optimierung wird eine Vorlauftemperaturabsenkung gegenüber den real eingestellten Werten ermittelt. Während die Optimierung die Vorlauftemperatur auf die Mindestvorlauftemperatur der Heizungsanlage reduziert, hatte die Anlage im Sommer 2023 eine tatsächliche Vorlauftemperatur von etwa 52°C. Trotzdem gibt es auch im Winter vereinzelte Perioden, in denen die Optimierung eine Vorlauftemperatur von 80

°C wählt, was auch im Bereich der aktuellen Heizungsanlage in diesen Perioden liegt. Allerdings liegt der Wert der Optimierung auch hier im Winter häufig mit einem großen Abstand unter der aufgezeichneten Vorlauftemperatur der Heizungsanlage. Gerade im Hinblick auf eine mögliche Umstellung auf den Heizbetrieb mit Wärmepumpen sind diese Erkenntnisse hilfreich.

2.7 Arbeitspaket 7 (AP 7): Analyse der eingesetzten Cloud-Systeme

RWTH Aachen (PMs: 4,5); Stadt Bottrop (PMs: 1); ELE (PMs: 1); E.ON (PMs: 2)

Ziel dieses Arbeitspakets war die Analyse und Bewertung der eingesetzten Cloud-Systeme über die gesamte Projektlaufzeit. Hierfür wurden einerseits harte Kriterien wie eine Kosten-Nutzen-Analyse der eingesetzten Messtechnik und Cloud-Systeme herangezogen, wie auch eine Bewertung auf Basis weicher Kriterien, wie Akzeptanz und Bewertung der Mensch-Maschinen-Interaktion durchgeführt. Auf Basis der Dokumentation der eingesetzten Energie Cloud-Systeme und der Erfahrungen aus der Projektbearbeitung wurde ein Leitfaden für die Implementierung von Cloud-Systemen für das Energiedaten-Monitoring von kommunalen Gebäuden erarbeitet und publiziert. In dieses Arbeitspaket gehen die Erfahrungen aus sämtlichen vorangegangenen Arbeitspaketen ein, während es selbst die Projektbearbeitung abschließt.

Der Leitfaden wurde auch bei einem gemeinsamen Pressetermin am 09.11.2023 nach Projektende vorgestellt und soll bei weiteren Digitalisierungsmaßnahmen der Stadt Bottrop Berücksichtigung finden.

Handlungsempfehlungen:

Durch das Projekt wird die Notwendigkeit und die Bedeutung eines Energiemonitoringsystems zur Verbesserung des Energieverbrauchs in den Liegenschaften deutlich. Basierend auf umfangreichen Messungen wurden verschiedene Energieeffizienzprobleme identifiziert. In der folgenden Tabelle 3 sind die Relevanz und die möglichen Einsparpotentiale der wesentlichen Maßnahmen auf Basis der Projekterfahrungen qualitativ bewertet.

Tabelle 3: Handlungsempfehlungen zur Digitalisierung von Bestandsgebäuden

	Handlungsempfehlungen zur Digitalisierung von Bestandsgebäuden	Relevanz	Einsparpotenzial
Daten	Erfassung der Verbrauchszählerstände auf Tagesbasis	Essenziell	-
	Erfassung der Verbrauchszählerstände auf Stundenbasis	Wichtig	-
	Erfassung von Raumtemperaturen und CO ₂ -Konzentration auf 15 Min.-Basis	Wichtig	-
	Betriebsdaten aus Gebäudeautomation aufnehmen	add on	-
	Einbau weiterer Sensorik wie Belegung von Räumen, Parksensoren, Füllstandsanzeige (bspw. Müllsammelbehälter), Zählung von Besucher:innen ...	add on	€
Allgemein	Zielgerichtete Alarmierung	Essenziell	-
	Vergleich der aktuellen und historischen Verbrauchswerte auf Monatsbasis, für Wärmeverbräuche inkl. Witterungsreinigung	Wichtig	-
	Vergleich der Verbrauchswerte mit Benchmarks (grafisch)	Wichtig	-
	Regelungsanpassung, sodass Komfortgrenzwertverletzungen vermieden werden	Wichtig	-
	Regelungsanpassung, sodass objektspezifisches Optimum aus Komfort und Energieeffizienz angestrebt wird	add on	-
Wärme	Nutzungszeiten, Wochenend- und Nachtabsenkung prüfen (z.B. grafische Auswertung über Heatmaps)	Essenziell	€€
	Anpassung der Heizzeiten durch Messung der Außentemperatur und Innenraumtemperatur in Referenzräumen	Wichtig	€€
	Heiztemperaturabsenkung und Vorbereitung der Wärmewende durch gezieltes Absenken der Temperatur bis zum Minimalpunkt / Einhaltung der Fernwärmehilfsleistung (Technische Anschlussbedingungen) im Bereich Delta T	Wichtig	€€
	Prüfung der Rücklauftemperaturen für Gas-Brennwertbetrieb und Temperaturoptimierung für späteren Wärmepumpenbetrieb und -auslegung	Wichtig	€
	Darstellung und Abschätzung der maximalen Heizleistung an kalten Tagen mittels Außentemperaturfühler und der gemessenen Heizleistung, Reduzierung der Leistungspreise	Wichtig	€
	Absenkung der Raumtemperaturen in Energiekrise bestätigen / Prüfung des Heizungsstillstands bei Erreichen der Grenztemperatur	add on	€
Strom	Darstellung, Analyse und Vermeidung von Lastspitzen, Einsparungen durch Absenkung des Leistungspreises	Essenziell	€
	Prüfung der Nutzungszeiten von raumlufttechnischen Anlagen	Wichtig	€
	Überprüfung und mögliche Reduzierung der Stromgrundlast in Schwachlastphasen und nach Revisionen, Auslegung für den Einbau von PV-Anlagen zur Eigenstromnutzung	add on	€
	Unterstützung bei der Suche und Ermittlung von Stromdauerläufern	add on	€
Wasser	Rückläufe identifizieren und verhindern (Hygiene) über Zeitreihen oder eine Visualisierung nach Art einer Heatmap	Essenziell	-
	Systematische Suche nach Trinkwasserleckagen durch Überprüfung des Verbrauchs außerhalb der Gebäude-Nutzungszeiten	Wichtig	€€

Weitere Nutzung der implementierten Systeme

Da während der Projektphase, das System bit:B der innogy vom Markt genommen und der Wechsel auf das E.ON System Optimum vollzogen wurde, gibt dies der Stadt Bottrop nun die Möglichkeit, die 20 ausgewählten Gebäude aus SUSTAIN2 der ELE und der E.ON in einem Energiemanagement-Programm darzustellen.

Nach Projektende ist geplant, ebenfalls die Daten aus dem eingesetzten LoRa-System der RWTH Aachen im Programm Optimum darzustellen. In jedem Fall sind diese Daten der Stadt auch nach Projektende kostenfrei über das implementierte The Things Network zugänglich.

Zusätzlich soll eine Übertragung ins neue „Energieportal“ der E.ON umgesetzt werden. Das Energieportal wird zurzeit bei verschiedenen Netzgesellschaften der E.ON ausgerollt. Die Möglichkeiten der Darstellung von Messwerten sind hier zwar noch etwas eingeschränkt, aber für die Belange eine Kommune sicherlich ausreichend. Als Blaupause dient hier die Stadt Lüneburg. Als zweite Möglichkeit steht zur Diskussion das Energiemanagement-Programm Optimum als eine App auf dem Energieportal zu etablieren und eine kostengünstige Version für die Belange von Kommunen zu entwickeln.

Im Fokus von Kommunen stehen neben der Messung der Verbräuche von Gebäuden, Zählerstände und Messdaten aus den Liegenschaften (Temperaturen, Luftzustände usw.). Ein generierter Energiebericht aus den Gebäudedaten sowie den gemessenen Werten wäre ein großes Add-on. Der Einsatz weiterer LoRaWAN-Produkte wie Park-, Ladesensoren, Füllstandsanzeigen sowie Besucherzählung usw. hätten einen enormen Mehrwert für Kommunen und wären, wenn die Infrastruktur mittels Gateways schon vorhanden ist, günstig zu realisieren. Kommerziell werden die Projektergebnisse in der Weiterentwicklung von E.ONs neonpulse Produktportfolio weiterverwendet. Abbildung 56 zeigt anhand des neonpulse Produktportfolios den Umfang möglicher Einsatzbereiche für Funksensoren für Verbräuche, Raumklima, Störungen und andere Anwendungsfälle.

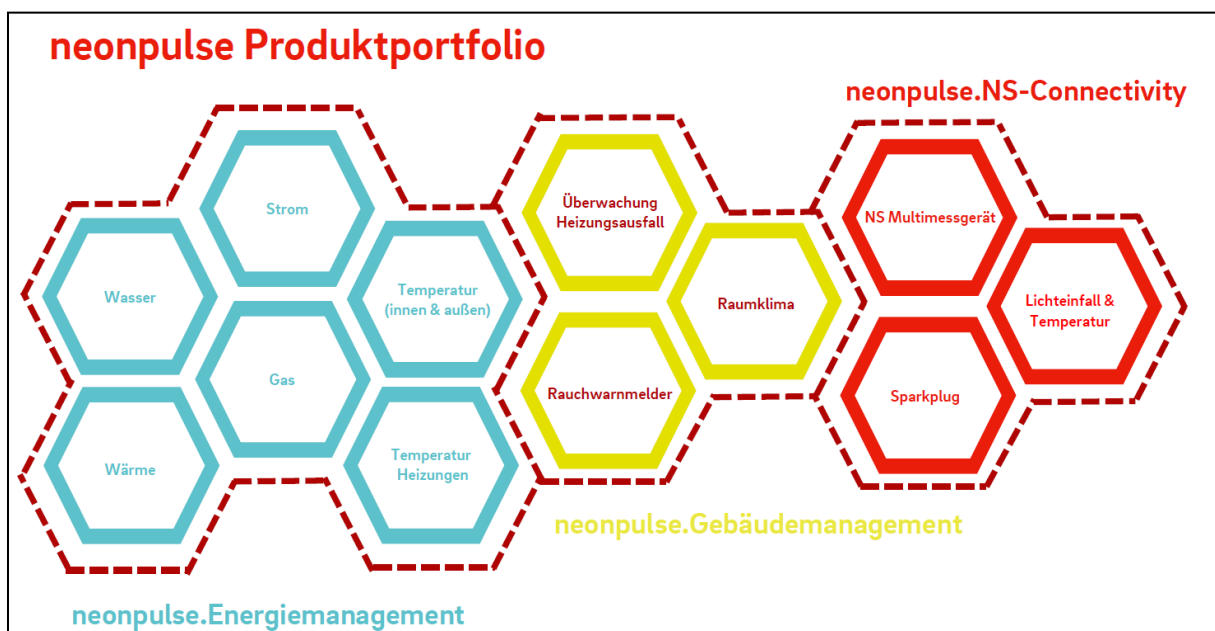


Abbildung 56: Mögliche Einsatzbereiche von Funksensoren aus dem neonpulse Produktportfolio

Die Stadt Bottrop prüft derzeit, inwieweit Betriebskosten-Einsparungen infolge der Digitalisierung der SUSTAIN2 Gebäude für Investitionen in weitere Digitalisierung verwendet werden können. So würden keine zusätzlichen Haushaltsmittel benötigt und dauerhaft Effizienzsteigerungen und Komfortverbesserungen ausgeweitet.

Die Einbindung der Nutzer der Gebäude ist ebenfalls ein großer Hebel bei der Reduzierung der Verbräuche von Gebäuden und Liegenschaften. Hier sind bei Gebäuden in öffentlicher Hand recht große Einsparungen zu erzielen. Besonders wichtig ist die Einbindung der Kinder und Schüler aus Kitas, Kindergärten und Schulen. Die SUSTAIN2 Projektpartner waren sich einig, dass bei diesem Projekt durch die Einschränkungen der Corona-Zeit eine große Chance nicht genutzt werden konnte. Diese Einschränkungen begrenzten den Austausch über sinnvolle Maßnahmen zur Energieeinsparung weitgehend auf die engagierten Mitarbeiter der Stadt Bottrop. In einem nachgelagerten Forschungsprojekt wäre ein Fokus die konsequente Einbindung der Gebäudenutzer. Hier liegen große Energieeinsparpotentiale, die über Schulungen, Wettbewerbe und Veranstaltungen gehoben werden könnten.

Fazit

Die Implementierung eines Energiemonitoringsystems in Gebäuden trägt dazu bei, Energieeffizienzprobleme zu bewältigen und Energieeinsparungen zu erzielen. Die kontinuierliche Überwachung und Anpassung sind entscheidend für den langfristigen Erfolg bei der Reduzierung des Energieverbrauchs und der Ressourcenverschwendung in Gebäuden. Die Umsetzung der Handlungsempfehlungen zur Reduktion des Energieverbrauchs wird nicht nur zu Energieeinsparungen führen, sondern auch die Umweltauswirkungen reduzieren und Kosten senken.

Im Bereich kommerzieller Lösungen für die Digitalisierung kommunaler Gebäudeenergiesysteme wurde im Rahmen von SUSTAIN2 ein problematischer Trend hin zu einer Vielzahl proprietärer Systeme identifiziert. Jeder Netzbetreiber baut derzeit sein eigenes IT-Netzwerk zur Zähler-Fernauslesung auf, was zu Inkompatibilitäten zwischen den Systemen führt. Vor diesem Hintergrund haben Kommunen Schwierigkeiten, Verbrauchsdaten von verschiedenen Netzbetreibern über ein gemeinsames System zu erfassen und zu überwachen. Zunehmend werden offene Systeme und Standardprotokolle für Neubauten gefordert, während der Gebäudebestand weiterhin auf proprietären Systemen basiert. Selbst wenn eine Zählerinfrastruktur aufgebaut wird, werden Raumklimadaten selten erfasst, was jedoch für ein optimales Energiemanagement wichtig ist. Vor diesem Hintergrund und auf Basis der gewonnenen Projektergebnisse werden die folgenden Kernaussagen formuliert:

- Die Verwaltung und Steuerung von Gebäudemanagementdaten sollten über eine Oberfläche erfolgen, die vorkonfigurierte Analysen ermöglicht und suboptimale Zustände intuitiv aufzeigt.
- Eine Alarmierung bei ungewöhnlichen Ereignissen und Verbräuchen muss gut einstellbar und übersichtlich sein.
- Bedienoberflächen und Reportfunktionen sollten nicht zu detailliert sein, sondern das Motto "Keep it simple" verfolgen. Hier sind Standardanalysen und vorgefertigte Templates wie ein Energiebericht für die Kommune hilfreich.
- Für Datenaufnahmen sollte ein paralleles IoT-Netzwerk mit Sicherheitskonzept aufgebaut werden, um Daten minimalinvasiv und kostengünstig zu erfassen.
- Serverkapazitäten können als Dienstleistungen online gekauft werden, und Datenbanken sollten direkt mit der Sensorik verknüpft sein.
- Benchmark-Analysen sind sinnvoll zur Einordnung von Gebäudeverbräuchen und zur Festlegung von Maßnahmenrangfolgen.
- Verantwortlichkeiten innerhalb von Betriebsverbesserungsprozessen sollten geprüft und transparent organisiert werden, ggf. mit Schulungen und Unterweisungen von Mitarbeitern.

Die Projektergebnisse zeigen, dass der Nutzen für die Einführung von Energie-Cloud-Systemen den Aufwand deutlich übersteigt. Die Stadt Bottrop prüft aktuell, ob die finanziellen Einsparungen aus dem Projekt bereits ausreichen, um mit den Mitteln weitere Gebäude auszurüsten zu können. Dies würde langfristige Effizienzsteigerungen und Komfortverbesserungen für alle städtischen Liegenschaften versprechen.

Sowohl open-source Eigenentwicklungen als auch der Einkauf kommerzieller Lösungen führen schnell zu Einsparungen, welche die Ausgaben in wenigen Jahren amortisieren. Welche Variante zu bevorzugen ist, hängt von den verfügbaren Ressourcen ab. Open-source Systeme selbst aufzusetzen erfordert einen nicht unerheblichen Personaleinsatz und entsprechendes Know-How bei IT und Liegenschaftsmanagement, kann dafür jedoch flexibel an individuelle Bedürfnisse der Kommunen angepasst werden. Kommerzielle Lösungen kosten dagegen initial und im Betrieb mehr, kommen dafür mit einem umfangreichen externen Know-How und vorkonfigurierten, an die Bedürfnisse von Kommunen angepassten Systemen, womit sich auch die Akzeptanz des technischen Personals erhöht. Ob Eigenentwicklung oder kommerziell:

Die Zeit ist reif, um gesteigerte Nachhaltigkeit und reduzierte Betriebskosten durch eine Konsequente Digitalisierung des Liegenschaftsenergiemanagements in Einklang zu bringen.