

BACHELORTHESIS
Michael Christian Gruber

Technisches Monitoring am Beispiel eines Münchner Bürogebäudes - ökologische und ökonomische Betrachtung

FAKULTÄT TECHNIK UND INFORMATIK
Department Informations- und Elektrotechnik

Faculty of Computer Science and Engineering
Department of Information and Electrical Engineering

Michael Christian Gruber

Technisches Monitoring am Beispiel eines Münchner Bürogebäudes - ökologische und ökonomische Betrachtung

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung
im Studiengang *Bachelor of Science Regenerative Energiesysteme und Energie-
management*
am Department Informations- und Elektrotechnik
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Betreuender Prüfer: Prof. Dr. Holger Gräßner
Zweitgutachter: Dipl. -Ing Jürgen Langstein

Eingereicht am: 28. Juli 2021

Michael Christian Gruber

Thema der Arbeit

Technisches Monitoring am Beispiel eines Münchner Bürogebäudes - ökologische und ökonomische Betrachtung

Stichworte

technisches Monitoring, Bürogebäude, Energiemonitoring, Anlagenmonitoring

Kurzzusammenfassung

In dieser Arbeit wird die Implementierung eines technischen Monitorings am Beispiel eines Bürogebäudes behandelt. Der Fokus liegt auf technischem Monitoring, mit ökologischer und ökonomischer Wirkung. Hierbei werden zunächst die allgemeinen Grundlagen des technischen Monitorings beschrieben. Um einen Überblick über die verbaute Technik zu erhalten folgt eine Beschreibung der Anlagentechnik. Dabei werden zudem die aufzuzeichnenden Daten definiert. Zuletzt erfolgt eine Analyse der Monitoringdaten.

Michael Christian Gruber

Title of Thesis

Technical monitoring using the example of an office building in Munich - ecological and economic approach

Keywords

technical monitoring, office building, energy monitoring, plant monitoring

Abstract

This thesis deals with the implementation of technical monitoring using the example of an office building in Munich in the ecological and economic context. At first the basics of technical monitoring will be introduced. Afterwards the technical systems are being described and the data, which is to be monitored will be defined. In the end the data is being analysed and discussed.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	vi
Tabellenverzeichnis	viii
1 Einleitung	3
2 Executive Summary	4
3 Grundlagen	5
3.1 Grundlagen zu technischem Monitoring	5
3.1.1 Energiemonitoring	5
3.1.2 Anlagenmonitoring	8
3.1.3 Gebäude- und Behaglichkeitsmonitoring	10
3.2 Nutzen von techischem Monitoring	13
3.2.1 ökologische Potenziale von Gebäuden in Deutschland	13
3.2.2 ökonomische Potenziale von Gebäuden in Deutschland	14
4 Praktische Umsetzung von technischem Monitoring im Objekt	15
4.1 Im Bestandsgebäude OC verbaute Technik	16
4.1.1 Verbaute Technik Kostengruppe 410 - Abwasser-, Wasser-, Gasan- lagen	16
4.1.2 Verbaute Technik der Kostengruppe 420 - Wärmeversorgungsanlagen	18
4.1.3 Verbaute Technik der Kostengruppe 430 - Raumluftechnische An- lagen	20
4.1.4 Verbaute Technik der Kostengruppe 434 - Kälteanlagen	23
4.1.5 Verbaute Technik der Kostengruppe 440 - Elektrische Anlagen	29
4.1.6 Verbaute Technik der Kostengruppe 450 - Kommunikations-, sicherheits- und informationstechnische Anlagen	30
4.1.7 Verbaute Technik der Kostengruppe 460 - Förderanlagen	30

4.1.8	Verbaute Technik der Kostengruppe 480 - Gebäude- und Anlagen-automation	30
4.2	Energiemonitoring	34
4.3	Anlagenmonitoring	35
4.3.1	Wärmeversorgungsanlage	35
4.3.2	Raumlufttechnische Anlagen	36
4.3.3	Kälteanlagen	37
4.3.4	Elektrotechnische Anlagen	38
4.3.5	Raumautomation	38
4.4	Behaglichkeitsmonitoring	39
5	Auswertung der Monitoring Daten des Objekts	40
5.1	Energiemonitoring	40
5.1.1	Liegenschaftsanalyse	41
5.1.2	Nutzeranalyse	50
5.2	Anlagenmonitoring	57
5.2.1	Wärmeerzeugungsanlage	58
5.2.2	Kälteanlage - Kaltwassersatz	63
5.2.3	RLT Geräte	76
5.2.4	Übergeordnete Zusammenhänge	84
5.3	Behaglichkeitsmonitoring	91
6	Fazit	92
7	Ausblick	94
7.1	Was für die Umsetzung von technischem Monitoring besonders wichtig ist und worauf bei künftigen Projekten geachtet werden muss	94
	Literaturverzeichnis	96
	Glossar	100
	Selbstständigkeitserklärung	101

Abbildungsverzeichnis

3.1	VDI 6041 Gliederung des technischen Monitoring [28]	6
3.2	Bestandteile des Energiemonitorings	7
4.1	Aufbauschema Trinkwasser Erwärmung	17
4.2	Aufbauschema Fernwärmeübergabestation	18
4.3	Aufbauschema Hauptheizkreisverteiler	19
4.4	Aufbauschema Raumluftechnik (RLT) Anlage 5	22
4.5	Aufbauschema Kälteerzeugung	24
4.6	Aufbauschema Pufferspeicher	25
4.7	Aufbauschema Kältekreisverteiler	26
4.8	Zentrale Split Kälte	27
4.9	Beispielhaftes Strangschemata Kälte Innengerät	28
4.10	Einzelraumregelung Weboberfläche	31
5.1	CO ₂ Funktions- und Nutzungskennzahlen [13]	41
5.2	Energieausweis	46
5.3	Sankey-Diagramm Heizkreis 1 zu Mieteinheiten - Vergleichszeitraum 1	49
5.4	Energieeffizienzklassen nach DIN EN 15232-1 [11]	58
5.5	Vor- und Rücklauftemperatur Heizkreis 1	60
5.6	Vor- und Rücklauftemperatur Heizkreis 2	60
5.7	Vor- und Rücklauftemperatur Heizkreis 3	61
5.8	Vor- und Rücklauftemperatur Heizkreis 4	61
5.9	Erhitzerregister Schema	61
5.10	Energieeffizienzklassen - Regelung der Wassertemperatur [11]	62
5.11	Vor- und Rücklauftemperatur Kältekreis 1	65
5.12	Vor- und Rücklauftemperatur Kältekreis 3	66
5.13	Vor- und Rücklauftemperatur Kältekreis 2	66
5.14	Vor- und Rücklauftemperatur Kältekreis 4	67
5.15	Kältekreis 1 Leistung in Watt	67

5.16 Kältekreis 2 Leistung in Watt	68
5.17 Kältekreis 3 Leistung in Watt	68
5.18 Kältekreis 4 Leistung in Watt	69
5.19 Kältemaschine Betriebsfreigabe	70
5.20 Kältemaschine Betriebsmeldung	71
5.21 Kompressor 1 Betriebszustand	72
5.22 Kompressor 2 Betriebszustand	73
5.23 Schnelle Fourier Transformation (FFT) Kältemaschine	74
5.24 Kanaldrücke RLT Gerät 1	77
5.25 Analyse Zulufttemperatur RLT Gerät 1	79
5.26 Analyse Temperaturregelung RLT Anlage 1	80
5.27 RLT Anlage 4 Betrachtung Wärmerückgewinnung	82
5.28 RLT Anlage 2 Betrachtung Wärmerückgewinnung	83
5.29 Rückwärmezahl RLT Anlage 1	85
5.30 Rückwärmezahl RLT Anlage 4	86
5.31 Heiz- und Kühlleistungsbedarf exemplarisch	88
5.32 Raumtemperaturregelung ME23 Raum 1313	89
5.33 Raumtemperaturregelung ME23 Raum 1218	90

Tabellenverzeichnis

3.1	Klimabeurteilungsskala	12
4.1	Mietflächen pro Mieteinheit	15
4.2	Zentrale Lüftungsgeräte	20
4.3	Mietflächen pro Mieter	32
5.1	Energieeinsparung über durchschnittliche wirtschaftliche Nutzungsdauer .	47
5.2	Ökonomische Einsparung über durchschnittliche wirtschaftliche Nutzungsdauer	47
5.3	Ökologische Einsparung CO ₂ Äquivalent über durchschnittliche wirtschaftliche Nutzungsdauer	48
5.4	Energetische Betrachtung der Mieteinheiten	52
5.5	HEV Matrix	53
5.6	HEV pro Mieter	55
5.7	KEV Matrix	56
5.8	KEV pro Mieter	57

Abkürzungsverzeichnis

BGF Brutto-Grundfläche

DALI Digital addressable lighting interface

EG Erdgeschoss

FFT Schnelle Fourier Transformation

GA Gebäudeautomation

HEV Heizenergieverbrauch

ISP Informationsschwerpunkt

KPI Key-Performance-Indicator

LEED Leadership in Energy and Environmental Design

MBE Management- und Bedieneinrichtung

NGF Netto-Grundfläche

OG Obergeschoss

PMV predicted mean vote

PPD predicted percentage of dissatisfied

RLT Raumluftechnik

RWA Anlage Rauch- und Wärmeabzugsanlage

SEU Wesentliche Energieverbraucher (engl. significant energy use)

TGA technische Gebäudeausrüstung

WRG Wärmerückgewinnung

WWB Warmwasserbereitung

1 Einleitung

Heute ist das Thema Klima- und Umweltschutz präsenter denn je. Daher strebt die Bundesregierung zur Eindämmung der Auswirkungen des Klimawandels die Treibhausgasneutralität Deutschlands bis 2045 an [10]. 35% des Endenergieverbrauchs wird derzeit von Gebäuden verursacht. 37% davon können den Nichtwohngebäuden zugeordnet werden. Die Nichtwohngebäude besitzen häufig Optimierungspotenzial. Um jedoch fundierte sowie wirtschaftlich und ökologisch sinnvolle Sanierungs- und Modernisierungsmaßnahmen einzuleiten fehlt häufig die Datenbasis [22]. Da die Datenbeschaffung mit Kosten verbunden ist, gibt es eine Hemmschwelle für Gebäudeeigentümer diese Daten zu beschaffen. Dementsprechend ist es für das Erreichen der Emissionsziele der Bundesregierung wichtig eine kostengünstig Möglichkeit zur Schaffung einer Datengrundlage zu haben. Dadurch können Optimierungen gezielt und kosteneffizient umgesetzt werden. Eine Möglichkeit hierfür bietet die Implementierung eines technischen Monitorings. Durch das Sammeln und Auswerten der Daten kann über verschiedene Methoden festgestellt werden, wo genau Einsparpotenziale liegen. Das bietet die Möglichkeit sowohl die Interessen des Investors nach möglichst geringen Kosten mit kurzer Amortisationsdauer, als auch die Bedürfnisse der Gesellschaft, nach einem energetisch optimierten Gebäudebestand in Deutschland zu befriedigen. Ziel der Arbeit ist es, technisches Monitoring im ökologischen und ökonomischen Kontext zu beschreiben und implementieren und Erkenntnisse für künftige Projekte zu gewinnen.

2 Executive Summary

In dieser Arbeit wird die Implementierung eines technischen Monitorings am Beispiel eines Münchner Bürogebäudes beschrieben und dokumentiert. Der Fokus liegt dabei auf Strategien und Methoden des technischen Monitoring, welche mit ökologischen und ökonomischen Faktoren korrelieren. Hierfür werden in Kapitel 3 zunächst die Grundlagen des technischen Monitorings beschrieben. Dabei wird spezieller auf die drei verschiedenen Monitoringthematiken Energiemonitoring, Anlagenmonitoring sowie Behaglichkeitsmonitoring eingegangen. Der Themenbereich Einregulierungsmonitoring wird nicht weiter betrachtet, da es sich bei dem betrachteten Gebäude um ein Bestandsgebäude handelt. Gleiches gilt für das Langzeitmonitoring, da das Gebäude Ende 2020 fertiggestellt wurde und daher die verfügbare Datenmenge zu gering ist. Im Kapitel 4 wird daraufhin die im Gebäude verbaute Anlagentechnik beschrieben. Die technischen Anlagen werden hierbei den Kostengruppen nach DIN 276 zugeordnet und mit Hilfe von Planausschnitten genauer erläutert [12]. Im Anschluss wird für die verschiedenen Anlagen definiert, welche Daten im Gebäude aufgezeichnet werden sollen. Nach der Datensammlung werden die Daten im Kapitel 5 ausgewertet und diskutiert. Wo möglich werden sowohl ökonomische, als auch ökologische Einsparpotentiale definiert und beziffert. Dabei wird festgestellt, dass zum Teil mutmaßlich die Hardware versagt und in vielen Fällen die zugehörige Anlagenregelung nicht den anerkannten Regeln der Technik entspricht und so nicht verbaut werden darf. Im Fazit wird der Gesamtzustand der analysierten technischen Anlagen kurz zusammengefasst. Zum Schluss wird im Ausblick kurz diskutiert, welche Erfahrungen für zukünftige Projekte durch diese Arbeit gezogen wurden, um technisches Monitoring leichter implementieren und einem Kunden kostengünstig zur Verfügung stellen zu können.

Der Anhang zur Arbeit mit Messdaten, Planunterlagen und Ähnlichem befindet sich auf CD und kann beim Erstgutachter eingesehen werden.

3 Grundlagen

3.1 Grundlagen zu technischem Monitoring

Monitoring beschreibt den Prozess der dauerhaften Überwachung eines Systems mit technischen Hilfsmitteln. Technisches Monitoring im Kontext der Gebäudeautomation beschreibt also die dauerhafte Beobachtung von gebäudetechnischen Prozessen. Das beinhaltet das Sammeln, Verarbeiten und Auswerten von prozessspezifischen Daten. Durch diese Daten sollen Rückschlüsse auf die Gebäudeperformance gezogen und Verbesserungen implementiert werden. Die technischen Prozesse in einem Gebäude lassen sich in drei Hauptkategorien unterteilen: Energie, Anlagen und Behaglichkeit. Daher lässt sich technisches Monitoring wie in Abbildung 3.1 für diese Arbeit in die drei Subkategorien Energie-, Anlagen- sowie Gebäude- und Behaglichkeitsmonitoring unterteilen. Weiter gibt es noch die Subkategorien Einregulierungsmonitoring und Langzeitmonitoring. Diese letzten beiden Subkategorien finden in dieser Arbeit keine Anwendung, da die Einregulierung laut Errichterfirmen bereits abgeschlossen ist und für ein Langzeitmonitoring die Daten fehlen [28].

3.1.1 Energiemonitoring

Das Energiemonitroing beschäftigt sich mit der Erfassung und Auswertung von energierelevanten Verbrauchsdaten. Dafür müssen zunächst die vorhandenen Energieträger im Gebäude festgestellt werden, welche zur Erzeugung der Nutzenergie verwendet werden. In modernen Bürogebäuden werden als Nutzenergie meist Wärme, Kälte und Strom benötigt. Der Strom wird dabei meist direkt durch eine Leitung ins Haus geliefert, während Wärme- und Kälteenergie meist im Gebäude selbst durch den Einsatz von Energieträgern bereitgestellt werden. Die Umwandlung der Energieform ist immer verlustbehaftet, daher empfiehlt es sich bei der Erfassung der Energie bereits mit den Energieträgern, die im Haus ankommen zu beginnen. Ausgehend von den zuvor genannten Energieträgern

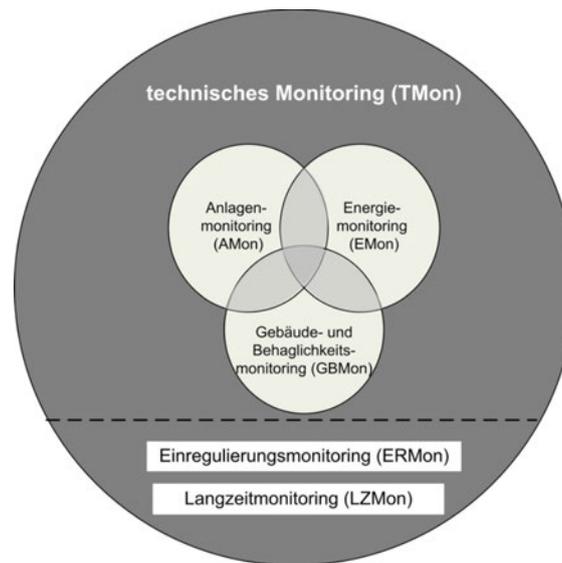


Abbildung 3.1: VDI 6041 Gliederung des technischen Monitoring [28]

kann ab diesem Startpunkt ein immer kleinteiliger werdendes Energiemonitoringkonzept entlang des Energieflusses erstellt werden.

So ist es beispielsweise bei einem Gasbrennwertkessel interessant, sowohl die zugeführte Energiemenge in Form von Gas, als auch die abgegebene Energiemenge in Form von Wärme zu monitoren. Dadurch kann zum einen der Primärenergiebedarf ökologisch wie ökonomisch bewertet werden und ein Rückschluss auf die Gebäudeperformance durch den Sekundärenergiebedarf gezogen werden.

Ein weiterer wichtiger Punkt im Energiemonitoring ist die Identifikation von Anlagen mit wesentlichem Energieeinsatz im Gebäude (engl.: significant energy use; kurz: SEU). Diese Analyse ist wichtig, um das Energiemonitoring sowohl ressourcenschonend als auch kosteneffizient durchführen zu können. Diese SEUs können entweder durch das Auswerten historischer Verbrauchsdaten, das Sichten der Planungsunterlagen, oder durch Erfahrungswerte bestimmt werden.

Zusätzlich beinhaltet die VDI 6041 im Hinblick auf die zu überwachenden Zustandsgrößen ein Baumdiagramm, welches die wesentlichen Bestandteile des Energiemonitorings darstellt (siehe Abbildung 3.2).

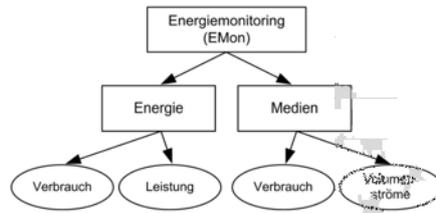


Abbildung 3.2: Bestandteile des Energiemonitorings

Nach der Erstellung eines Energiemonitoring-Konzepts und der Erfassung der entsprechenden Daten stehen im Energiemonitoring mehrere Arten der Auswertung zur Verfügung [28]. Die üblichsten Auswerteformen sind nachfolgend kurz erklärt.

Liegenschaftsanalyse

Die Liegenschaftsanalyse stellt mehrere Liegenschaften innerhalb eines Portfolios gegenüber und vergleicht deren Performance. Dabei werden die Verbräuche der einzelnen Energieträger der verschiedenen Liegenschaften gegenübergestellt und verglichen. Sollte der Verbrauch einer Liegenschaft erheblich abweichen, kann abgeschätzt werden, welche Einsparpotentiale vorhanden und welche Maßnahmen dafür erforderlich sind [28].

Nutzeranalyse

Bei der Nutzeranalyse werden einzelne Nutzer innerhalb einer Liegenschaft gegenübergestellt. Auch hier können Abweichungen analog zur Liegenschaftsanalyse festgestellt und entsprechende Maßnahmen eingeleitet werden [28].

Analyse von Zeitreihen

Bei der Analyse von Zeitreihen werden die Verbrauchskennwerte einer Liegenschaft über mehrere Jahre gegenübergestellt um die Wirksamkeit von Modernisierungsmaßnahmen zu überprüfen. Ebenso kann durch eine signifikante Änderung des Verbrauchs ein Defekt festgestellt werden [28].

Prognose von Verbrauchsanteilen bei Nutzerwechsel

Durch die Erhebung der Verbrauchsdaten der Nutzer ist es möglich, den zukünftigen Verbrauch eines neuen Nutzer auf der gleichen Fläche zu prognostizieren und entsprechende Vorauszahlungen bereits vorab anzupassen. Dies erleichtert es auch die Vorauszahlung bei einem Nutzerwechsel zu bestimmen [28].

3.1.2 Anlagenmonitoring

Das Anlagenmonitoring erfasst diverse Daten aller gebäudetechnischen Anlagen in einem Objekt. Diese Daten werden bis hin zu einzelnen Anlagenkomponenten herunterskaliert, um Aussagen über einzelne Bauteile treffen zu können. Je nach Anlage gibt es beispielsweise folgende messbare Größen:

- Betriebszustände
- Betriebszeiten
- Temperatur
- Druck
- Volumenstrom
- Massenstrom
- Störmeldung
- Betriebsweise (Vollast/Teillast)
- Luftfeuchte

Durch die Erfassung und Auswertung dieser anlagenspezifischen Daten ist es möglich die Funktion der Anlage zu überwachen und den Betrieb zu optimieren [28]. Die Optimierung des Anlagenbetriebs und die Sicherstellung der ordentlichen Funktion der Anlage hat meist einen direkten Einfluss auf den Energieverbrauch der Anlagen. Somit können durch das Anlagenmonitoring sowohl ökologische, als auch ökonomische Einsparungen erzielt werden. Neben den zuvor genannten Potenzialen hat das Anlagenmonitoring auch einen positiven Einfluss auf die Wartung der Geräte. Es ist in vielen Bereichen möglich von starren Wartungsintervallen abzuweichen und sogenanntes predictive Maintenance zu betreiben. Das bedeutet zum einen, dass die Wartungskosten sinken und zum anderen, dass Ausfallzeiten der Anlagen vermieden werden und somit die Nutzerzufriedenheit erhöht wird.

Um die Daten fachgerecht auszuwerten, schlägt die VDI 6041 folgende Arten der Auswertung vor:

Überwachung und Fehlerdiagnose

Die Überwachung und Fehlerdiagnose kann im einfachsten Fall durch die sogenannte Grenzwertüberwachung realisiert werden. Als zu überwachende Grenzwerte können vom Hersteller angegebene Daten zu Wirkungsgraden oder auch Planungsvorgaben zu der errichteten Anlage dienen.

Eine anspruchsvollere Analyse kann durch die Erstellung eines Referenzmodells einzelner Anlagen erfolgen. Dabei wird die entsprechende Anlage mit Hilfe von Software simuliert und generiert abhängig von benötigten Inputs bestimmte Outputs. Die Inputs können entweder historische Daten oder Echtzeitdaten sein. Die generierten Outputs werden dann mit den tatsächlichen Messdaten verglichen und interpretiert, um die Anlagenperformance bewerten zu können.

Die anspruchsvollste der betrachteten Analysen erfolgt durch den Einsatz eines digitalen Zwillings des Gebäudes. Dabei werden nicht nur einzelne Anlagen, sondern das gesamte Gebäude mittels Software simuliert. Dies hat den Vorteil, dass auch Zusammenhänge zwischen einzelnen Anlagen simuliert und erfasst werden und somit die Gebäudeperformance als Ganzes bewertet werden kann [28].

Kennwerte

Eine weitere gängige Möglichkeit zur Auswertung der Monitoringdaten ist die Bildung von Kennwerten. Kennwerte können beispielsweise Nutzungsgrade oder Key-Performance-Indicator (KPI) sein. Durch diese Auswertungsmethode kann mit verhältnismäßig wenigen Daten eine Aussage über die Effizienz der gebäudetechnischen Anlagen getroffen werden. Diese KPIs sollten bereits während der Planung definiert und im laufenden Projekt fortgeschrieben werden.

Grafische Methoden

Bei der graphischen Auswertungsmethode werden Datensätze mit Hilfe verschiedener Plots dargestellt. So kann das Taktverhalten einer Anlage beispielsweise mit einer FFT dargestellt werden. Die graphische Auswertungsmethode gibt geschultem Fachpersonal die Möglichkeit viele Daten schnell auszuwerten, da Anomalien und Regelmäßigkeiten gut erkannt werden können.

3.1.3 Gebäude- und Behaglichkeitsmonitoring

Ziel der technische Gebäudeausrüstung (TGA) ist es, das bestmögliche Raumklima mit größtmöglicher Behaglichkeit für den Endnutzer bei minimalem Energieeinsatz zu erreichen. Um diesen Punkt genauer zu beleuchten, ist es notwendig Behaglichkeit messbar

zu machen. Dabei muss zwischen verschiedenen Behaglichkeiten differenziert werden, auf die die TGA teilweise Einfluss hat [24]:

- thermische Behaglichkeit
- hygri-sche Behaglichkeit
- olfaktorische Behaglichkeit
- visuelle Behaglichkeit
- akustische Behaglichkeit

Da eine Betrachtung aller Themengebiete der Behaglichkeit zu umfangreich für diese Arbeit ist, wird nachfolgend ausschließlich die thermische Behaglichkeit betrachtet.

Neben der Behaglichkeitsanalyse können auch bauphysikalische Messungen gemonitort werden. Diese Messungen werden bei historischen Gebäuden und zur Denkmalpflege angewandt.

Thermische Behaglichkeit

Das Wärmeempfinden von Menschen ist von diversen Faktoren wie beispielsweise Zugluft, Bekleidung, Strahlungstemperatur und weiteren Faktoren abhängig. Eine Methode um thermische Behaglichkeit messbar zu machen ist die mittlere Zufriedenheit mit den Umgebungsbedingungen zu berechnen. Dies wird durch das predicted mean vote (PMV) Verfahren erreicht. Die grundlegende Annahme des Verfahrens ist, dass die Behaglichkeit am höchsten ist, wenn die körpereigene Wärmeproduktion mit der an die Umgebung abgegebene Wärme im Gleichgewicht steht. Dieser Wert wird mit nachfolgender Formel berechnet:

$$\begin{aligned} PMV = & (0,303 \cdot e^{-0,036 \cdot M} + 0,028) \cdot \{[M - W] \cdot 3,05 \cdot 10^{-3} \\ & \cdot [5733 - 6,99 \cdot (M - W) - p_V] - 0,42 \cdot [M - W - 58,15] \\ & - 1,7 \cdot 10^{-5} \cdot M \cdot [5867 - p_V] - 0,0014 \cdot M \cdot [34 - \theta_a] \\ & - 3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot [(\theta_{cl} + 273)^4 - (\theta_r + 273)^4 \\ & - f_{cl} \cdot h_c \cdot (\theta_{cl} - \theta_a)]\} \end{aligned} \quad (3.1)$$

mit

PMV	Ø Empfindung
+3	heiß
+2	warm
+1	etwas warm
0	neutral
-1	etwas kühl
-2	kühl
-3	kalt

Tabelle 3.1: Klimabeurteilungsskala

M Energieumsatz in $[\frac{W}{m^2}]$

W mechanische Leistung in $[\frac{W}{m^2}]$

I_{cl} Bekleidungsisoliation in $[\frac{m^2 \cdot K}{W}]$

f_{cl} Bekleidungsflächenfaktor

θ_a Lufttemperatur in $[^\circ C]$

θ_r mittlere Strahlungstemperatur in $[^\circ C]$

v_{ar} relative Luftgeschwindigkeit in $[\frac{m}{s}]$

p_a Wasserdampfpartialdruck in $[Pa]$

h_c konvektiver Wärmeübergangskoeffizient in $[\frac{W}{m^2 \cdot K}]$

θ_{cl} Oberflächentemperatur der Bekleidung in $[^\circ C]$

Das Ergebnis des PMV liegt zwischen +3 und -3 und wird gemäß Tabelle 3.1 ausgewertet.

Da der zuvor genannte Wert einen Mittelwert bildet und nicht das individuelle Empfinden darstellt, gibt es zusätzlich den predicted percentage of dissatisfied (PPD) Wert. Der PPD wird auf Basis des PMV berechnet und gibt den Anteil der mit dem Raumklima unzufriedenen in Prozent an. Als unzufrieden gelten Personen, die gemäß Tabelle 3.1 nicht neutral urteilen [2].

Diese zuvor genannte Formel eignet sich, um Solltemperaturen für spezielle Regelfälle, wie beispielsweise für diverse Jahreszeiten oder Außentemperaturen zu errechnen. Des Weiteren haben Strahlungstemperaturen, die Temperaturspreizung in der Vertikalen und die

Luftgeschwindigkeit einen Einfluss auf die Behaglichkeit von Personen im Raum. Hierauf wird in diesem Kapitel jedoch nicht genauer eingegangen. Die genauere Beschreibung hierfür kann in der DIN EN ISO 7730 nachgelesen werden.

Bauphysikalische Überwachung

Wie zuvor beschrieben werden diverse Messungen zur Erhaltung historischer und denkmalgeschützter Gebäude empfohlen. Hierfür sollen die Parameter Temperatur, Helligkeit, Feuchte, CO₂, das Nutzerverhalten mit gewählten Offset der Raumtemperatur, Lüftungsverhalten (Fensterkontakt) und Belegungsdaten sowie Nutzerbefragungen gemonitort werden. Dadurch ist es möglich schädliche Auswirkungen der genannten Parameter auf die Bausubstanz zu bewerten und Schäden frühzeitig entgegen zu wirken. Diese Überwachung macht in gewissen Teilen auch bei Neubauten Sinn, wird in dieser Arbeit jedoch nicht genauer betrachtet.

3.2 Nutzen von technischem Monitoring

Es gibt diverse Gründe die für den Einsatz eines technischen Monitorings sprechen. Das technische Monitoring gibt dem Bauherren und dem Betreiber ein Tool zur Auswertung der Gebäude- und Anlagenperformance an die Hand. So kann bereits bei der Inbetriebnahme überprüft werden, ob die vom Hersteller angegebenen und von der Fachplanung errechneten KPI erfüllt werden.

Zudem kann der Monitoringprozess als Regelkreis nach DIN EN ISO 90001 verstanden werden. Der Output (Anlagenperformance, Vorlauftemperaturen ...) wird ausgewertet und daraufhin werden die Betriebsvorgaben der Anlagen abgeändert und somit als kontinuierlicher Verbesserungsprozess verstanden werden. Dabei kann sowohl ein erhöhter Komfort, als auch geringerer Energiebedarf entstehen. Somit trägt technisches Monitoring direkt zum Qualitätsmanagement am Bau bei [18].

3.2.1 ökologische Potenziale von Gebäuden in Deutschland

In einem Gebäude gibt es diverse Energieverbraucher. Daher korreliert das Energiemonitoring am stärksten mit den ökologischen Potentialen des technischen Monitorings. Durch die Einführung eines Energiemonitorings lassen sich die größten Verbraucher im

Gebäude identifizieren und analysieren. Daraufhin kann der Betrieb dieser Verbraucher optimiert werden. Ebenso ist das Anlagenmonitoring ein essenzieller Bestandteil aus Sicht des ökologischen technischen Monitorings. Durch das Anlagenmonitoring lassen sich Fehlfunktionen in der technischen Gebäudeausrüstung feststellen und beheben.

3.2.2 ökonomische Potenziale von Gebäuden in Deutschland

Eine relevante Größe in Betrachtung der Lebenszykluskosten eines Gebäudes stellen die Energiekosten dar. Nach aktuellen Studien haben Energiekosten einen Anteil von durchschnittlich 9,74% an den Gesamtlebenszykluskosten eines Gebäudes [22]. Daher sollten wie im vorhergehenden Kapitel beschrieben die größten Verbraucher identifiziert und analysiert werden.

Ebenso können Dienstleistungskosten durch die Präsenzerfassung eingespart werden. Ein Besprechungsraum, der nachweislich nicht benutzt wurde, muss beispielsweise nicht gereinigt werden. So lassen sich Dienstleistungen in Gebäuden besser skalieren und eine verbrauchsgerechte Abrechnung ermöglicht.

Weiter können bauliche Schäden am Gebäude oder der Gebäudetechnik frühzeitig erkannt und behoben werden. So kann beispielsweise eine Anomalie im Wasserverbrauch identifiziert und dadurch ein Wasserrohrbruch frühzeitig erkannt werden. Ein weiteres praxisbezogenes Beispiel ist das Erkennen von Aus- und Einschaltzeiten. So gab es bereits in der Vergangenheit ein der Firma Nutz bekanntes Projekt, bei dem festgestellt werden konnte, dass eine Rampenheizung aufgrund eines Defekts dauerhaft (8.760h im Jahr) eingeschaltet war. Dadurch entstanden dem Gebäudebetreiber jährliche Kosten von über 43.000 €.

4 Praktische Umsetzung von technischem Monitoring im Objekt

Für die praktische Umsetzung des technischen Monitorings im Zuge dieser Arbeit wurde ein Gebäude im Münchner Osten gewählt. Das Bürogebäude wird nachfolgend OC abgekürzt. Das OC ist ein fünfstöckiges Bürogebäude mit ca. 17.000 Quadratmetern Brutto-Grundfläche (BGF), einer Dachterrasse und einer zweistöckigen Tiefgarage mit 164 Stellplätzen. Jedes Stockwerk ist in 6 Mieteinheiten unterteilt, welche den sechs Brandabschnitten entsprechen. Die einzigen Ausnahmen hiervon bilden das Erdgeschoss (EG), da es hier ein großes Foyer und diverse kleinere Allgemeinflächen gibt und das erste Obergeschoss (OG), da sich das Foyer über zwei Stockwerke erstreckt. Daher gliedert sich das EG und das erste OG in fünf Mieteinheiten. Die Größe der einzelnen Mietflächen ist in Tabelle 4.1 aufgeführt.

	ME1	ME2	ME3	ME4 (a/b)	ME5	ME6
EG	287,34 m ²	256,33 m ²	607,15 m ²	323,92 m ² / 338,73 m ²		
1.OG	421,33 m ²	457,32 m ²	248,73 m ²	398,89 m ²	602,48 m ²	
2.OG	408,67 m ²	377,93 m ²	408,85 m ²	398,89 m ²	422,38 m ²	409,85 m ²
3.OG	408,67 m ²	377,93 m ²	408,85 m ²	398,89 m ²	422,38 m ²	409,85 m ²
4.OG	408,67 m ²	377,93 m ²	408,85 m ²	398,89 m ²	422,38 m ²	409,85 m ²
5.OG	373,69 m ²	355,67 m ²	358,22 m ²	353,53 m ²	377,02 m ²	358,22 m ²

Tabelle 4.1: Mietflächen pro Mieteinheit

4.1 Im Bestandsgebäude OC verbaute Technik

Um die Theorie aus dem Kapitel Grundlagen im realen Objekt anzuwenden, muss zunächst die verbaute Technik betrachtet werden. An dieser Stelle ist anzumerken, dass eine Umsetzung des technischen Monitorings wie in der AMEV beschrieben nicht möglich ist, da es sich um ein Bestandsobjekt handelt. Diese Arbeit betrachtet daher lediglich die Leistungsphase 9 nach der Honorarordnung für Architekten und Ingenieure und hat keinen Einfluss auf die verbaute Technik. Im folgenden wird die verbaute Technik der technischen Gewerke nach DIN 276 gegliedert und erläutert [12]

4.1.1 Verbaute Technik Kostengruppe 410 - Abwasser-, Wasser-, Gasanlagen

Die Trinkwasserversorgung des Gebäudes erfolgt durch einen Trinkwasseranschluss der Stadtwerke München. Die Zentralentechnik der Trinkwasserversorgung besteht aus einer Enthärtungsanlage sowie einer Druckerhöhungsanlage mit einer Anschlussleistung von gemeinsam 1,1 kW und einer Druckhalteanlage mit einer Anschlussleistung von 1,1 kW. Die Trinkwassererwärmung erfolgt sowohl durch dezentrale als auch zentrale Warmwasserbereitung (WWB). In den Sanitärkernen der Mieteinheiten wurde eine dezentrale Warmwasserbereitung mit Hilfe von Durchlauferhitzern gewählt. Diese planerische Festlegung ist auf den geringen zu erwartenden Warmwasserbedarf an Waschtischen in Bürogebäuden zurückzuführen. Es ist davon auszugehen, dass eine zentrale Warmwasserbereitung aus hygienischen und energetischen Gründen für diese Bereiche nicht sinnvoll umsetzbar ist. Die allgemein zugänglichen Duschen im EG hingegen werden durch eine zentrale Warmwasserbereitung versorgt, da hier während der Planungsphase von einem höheren Nutzungsgrad ausgegangen wurde. Die zentrale Warmwasserbereitung erfolgt durch einen Schichtenspeicher mit einem Nennvolumen von 1.000 l, welcher an eine Frischwasserstation angeschlossen ist. Der schematische Aufbau ist im Planausschnitt Abb. 4.1 dargestellt. Abwassertechnisch ist das Gebäude an das öffentliche Kanalnetz angebunden und verfügt in den Untergeschossen über diverse Hebeanlagen, da dort eine Entwässerung im Gefälle nicht möglich ist.

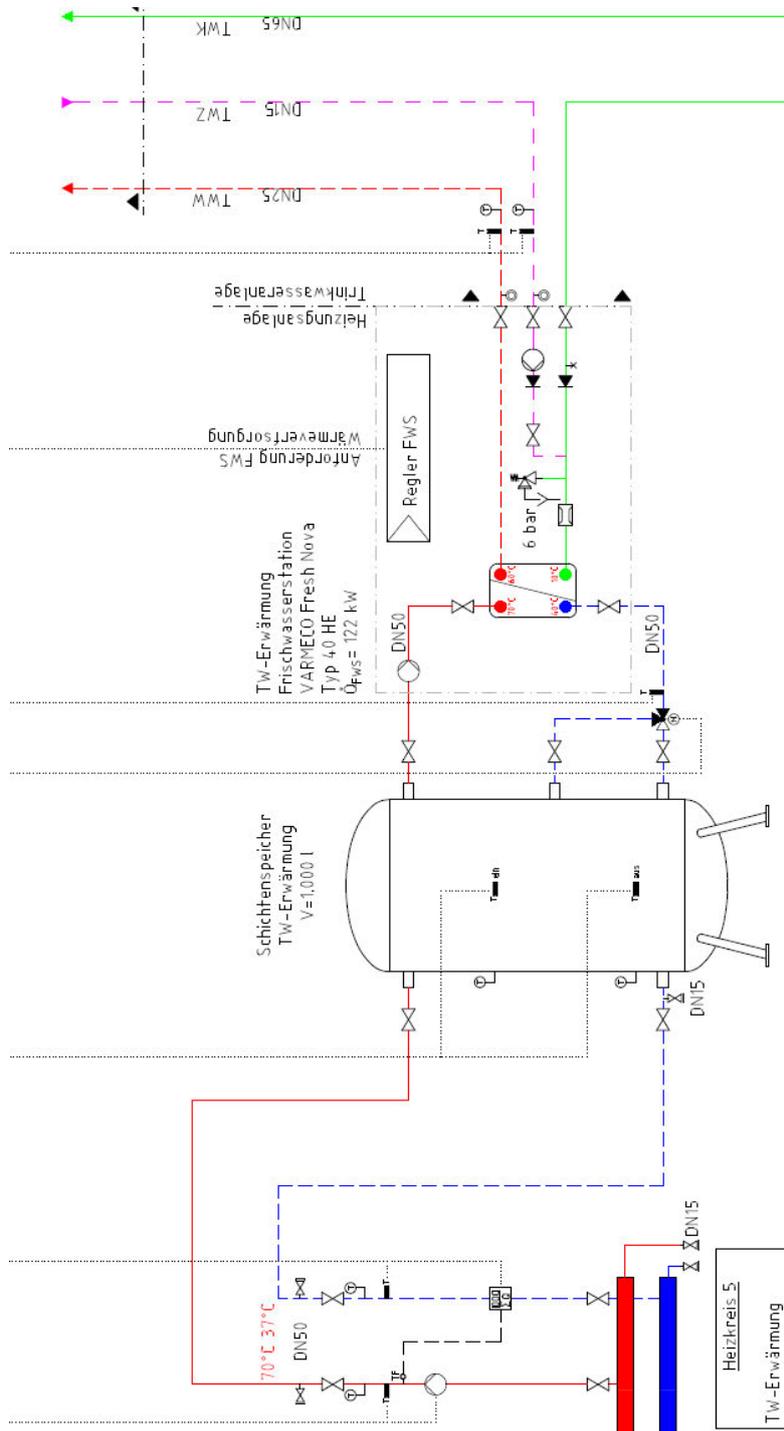


Abbildung 4.1: Aufbauschema Trinkwasser Erwärmung

4.1.2 Verbaute Technik der Kostengruppe 420 - Wärmeversorgungsanlagen

Die zentrale Wärmeversorgung erfolgt durch einen Fernwärmeanschluss der Stadtwerke München. Als Fernwärmeübergabestation wurde eine flexible Wärmeübergabestation des Herstellers Yados mit einer Nennanschlussleistung von 1,1 MW gewählt. Die Funktionsweise der Übergabestation ist in Abb. 4.2 schematisch dargestellt. Grundlegend liefern die Stadtwerke München einen Vorlauf mit 125°C und erwarten einen Rücklauf von 45°C. Daraus ergibt sich eine Temperaturspreizung von 80K. Die Fernwärme ist an einen Plattenwärmetauscher mit einem Wirkungsgrad von $\eta = 0,988$ angeschlossen, an dem die Wärme auf ein Temperaturniveau von Vorlauf 70°C und Rücklauf 40°C und somit einer Temperaturspreizung von 30 K umgesetzt wird.

Von der Übergabestation führt die Wärmeversorgung auf den Hauptheizkreisverteiler. Dieser besteht aus fünf Heizkreisen:

- Heizkreis 1 : Unterflurkonvektoren Büroeinheit
- Heizkreis 2 : Heizregister RLT Anlagen
- Heizkreis 3 : Statische Heizung allgemeine Bereiche
- Heizkreis 4 : Fußbodenheizung Eingangshalle
- Heizkreis 5 : Trinkwassererwärmung

Im Planausschnitt Abbildung 4.3 ist dieser Aufbau schematisch dargestellt.

Alle genannten Heizkreise sowie die Primärseite der Fernwärmeübergabestation sind mit Wärmemengenzählern ausgestattet. Genaueres dazu folgt im Kapitel 4.1.8 zur Kostengruppe 480 in dem das Messkonzept vorgestellt wird. Die statische Heizung der Büro-

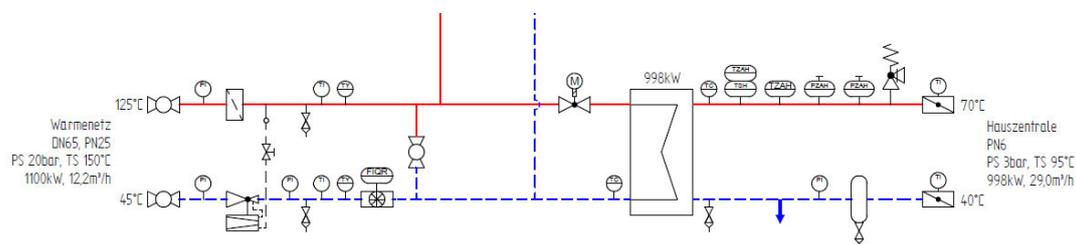


Abbildung 4.2: Aufbauschema Fernwärmeübergabestation

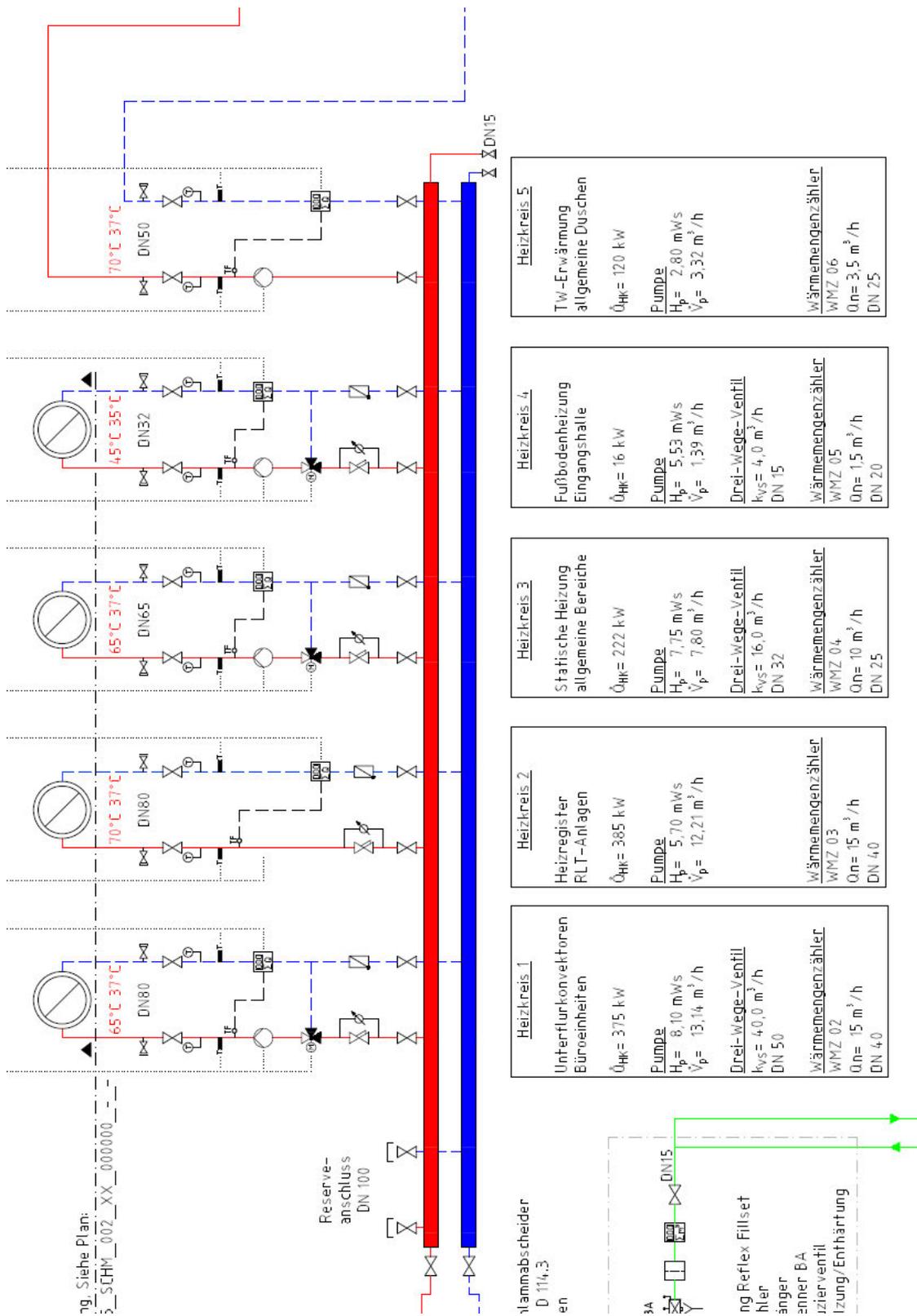


Abbildung 4.3: Aufbauschema Hauptheizkreisverteiler

räume sowie der Allgemeinbereiche erfolgt durch Unterflurkonvektoren, welche über die Management- und Bedieneinrichtung (MBE) angesteuert werden. Die MBE hat einen fest eingestellten Sollwert, der durch die Enduser um $\pm 3K$ verstellt werden kann. Die Steuerung der Fußbodenheizung ist analog dazu aufgebaut, hier kann der Sollwert vom Facility Management jedoch frei eingestellt werden. Die Erwärmung der Luft in den RLT Geräten besitzt eine Steuerung, die in die Anlagenautomation der RLT Geräte eingebunden ist. Die Trinkwassererwärmung hat ebenfalls eine eigene autarke Steuerung, welche in die Steuerung der Heizungsanlage eingebunden ist.

4.1.3 Verbaute Technik der Kostengruppe 430 - Raumluftechnische Anlagen

Vom EG bis zum 5.OG erfolgt die Be- und Entlüftung der Büroräume und des Foyers durch fünf zentrale RLT Anlagen. Die WC Kerne und Technikräume werden durch sechs Radial-Dachventilatoren entlüftet. Diese Abluftventilatoren sind auf einen Volumenstrom zwischen $240 \text{ m}^3/\text{h}$ und $2.000 \text{ m}^3/\text{h}$ ausgelegt. Gemäß der Anlagenbeschreibung werden diese Abluftventilatoren im 24h Betrieb und damit 8.760h im Jahr betrieben. Diese Dauerschaltung ist für den Betrieb der Technikräume zum Teil durch entsprechenden Sachverständigen vorgegeben. Bei den Abluftventilatoren der WC Kerne würde es sich jedoch empfehlen die Einschaltzeiten durch die MBE vorzugeben und an eine Belegung der WC-Kerne zu koppeln. Da diese zuvor genannten kleinen Abluftventilatoren nicht in die MBE eingebunden sind, gibt es derzeit keine Möglichkeit diese Anlagen sinnvoll in einem für diese Arbeit vertretbaren Rahmen zu monitoren. Daher werden diese Anlagen im Folgenden nicht genauer betrachtet und der Fokus auf die Zentralgeräte gelegt. In Tabelle 4.2 sind die Zentralgeräte inklusive technischer Nennvolumenstrom und Art der Wärmerückgewinnung aufgelistet.

RLT Anlage	Nennvolumenstrom	Wärmerückgewinnung
RLT Anlage 1	$15.000 \text{ m}^3/\text{h}$	Kreuzstromwärmetauscher
RLT Anlage 2	$15.000 \text{ m}^3/\text{h}$	Kreuzstromwärmetauscher
RLT Anlage 3	$25.000 \text{ m}^3/\text{h}$	Kreuzstromwärmetauscher
RLT Anlage 4	$25.000 \text{ m}^3/\text{h}$	Kreuzstromwärmetauscher
RLT Anlage 5	$7.000 \text{ m}^3/\text{h}$	Kreuzstromwärmetauscher

Tabelle 4.2: Zentrale Lüftungsgeräte

Die Zentralgeräte laufen im Normalbetrieb mit zweifachem Luftwechsel der versorgten Räumlichkeiten. Für Besprechungsräume wurde zusätzlich die Funktion installiert, den Luftwechsel per variablen Volumenstromregler auf den fünffachen Raumlufthochzufahren. Diese Bedienung erfolgt jedoch manuell über die verbauten Raumbediengeräte. Obwohl die Raumbediengeräte einen CO₂-Sensor integriert haben, wurde die Steuerung nicht bedarfsorientiert ausgeführt. Die Zentralgeräte selbst laufen mit einer eigenen autarken Regelung. Die Regelung erfolgt druckgeführt über einen durch den Lüftungsbauer vorgegebenen Solldruck. Zusätzlich ist laut Anlagenbeschreibung ein Kalender mit einem Zeitprogramm hinterlegt. Die Verteilung der Luftmengen im Gebäude erfolgt durch ein Kanalnetz in den jeweiligen Versorgungsschächten. Zur Versorgung der Mieteinheiten werden Kanalstiche aus dem Schacht herausgeführt und mit Kanaldruckreglern geregelt. Die Kanaldruckregler regeln autark und erhalten durch die MBE lediglich eine Solldruckvorgabe. Diese Solldruckvorgabe wurde während der Bauzeit durch den Errichter der Lüftungsanlage vorgegeben. Ein schematischer Aufbauplan der Anlage des Herstellers, oder Errichters liegt zur Erstellung dieser Arbeit nicht vor. Daher wurde im Rahmen einer Ortsbegehung versucht den Aufbau der Anlage zu erfassen. Es wurde festgestellt, dass sowohl an den Geräten, als auch an einigen Feldgeräten keine Beschriftung vorhanden ist. Da die Anlagen eins bis vier auf dem Dach nur schwer zugänglich waren, wurde das RLT Gerät fünf als Basis des Aufbauschemas verwendet. Anlage fünf befand sich zur Zeit der Begehung außer Betrieb und konnte somit auch geöffnet werden. Bilder der Begehung finden sich im digitalen Anhang im Ordner Bilder\RLT. Das in Abbildung 4.4 dargestellte Schema wurde nach bestem Wissen und Gewissen erstellt und spiegelt die vor Ort vorgefundenen Gegebenheiten der RLT Anlage fünf wieder. Es wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit davon ausgegangen, dass alle zentralen RLT Geräte strukturell gleich aufgebaut sind.

Zusätzlich sind in der Tiefgarage Jet Ventilatoren zur Entrauchung im Brandfall vorhanden. Diese Anlage ist komplett autark und erhält lediglich einen potentialfreien Kontakt von der Brandmeldeanlage. Daher wird diese Anlage im Verlauf der Arbeit nicht weiter betrachtet.

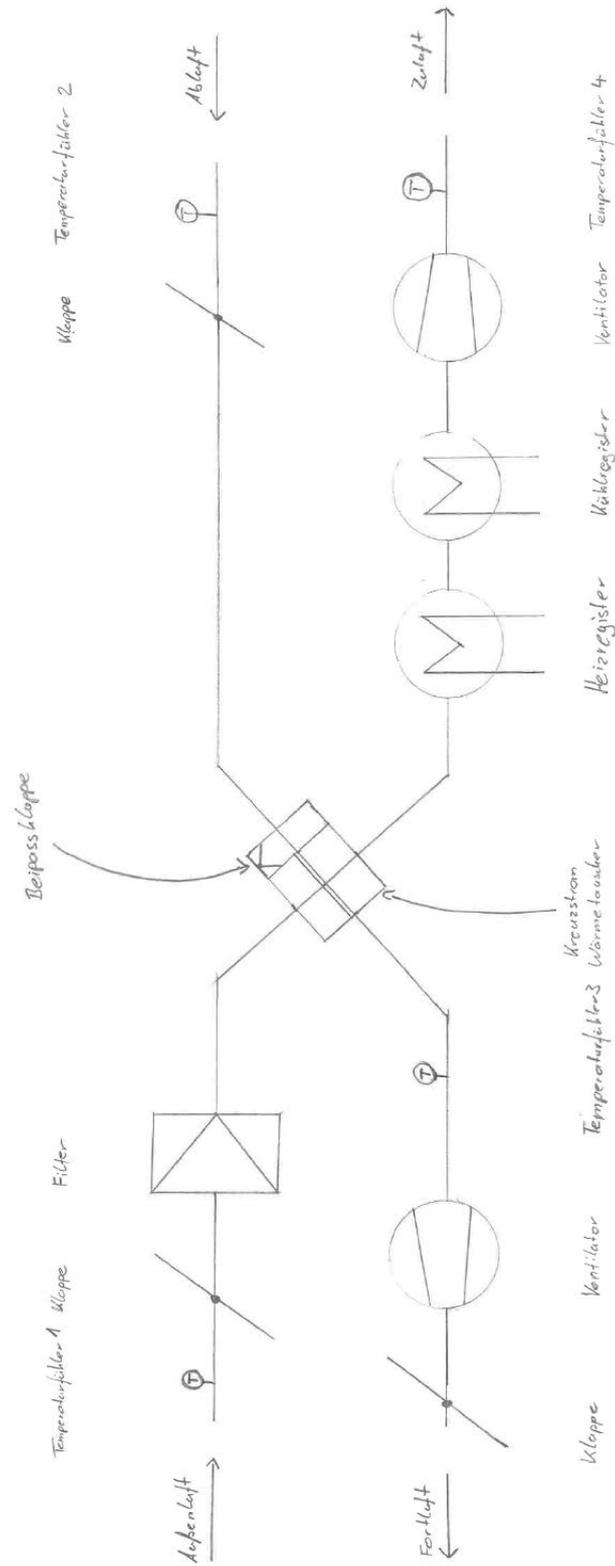


Abbildung 4.4: Aufbauschema RLT Anlage 5

4.1.4 Verbaute Technik der Kostengruppe 434 - Kälteanlagen

Im OC kommen zwei Technologien zur Kälteerzeugung zum Einsatz. Zur Kühlung der Büroflächen und zur Temperierung der RLT Anlagen Zuluft wird ein Kaltwassersatz verwendet, für die Server- und Netzwerkverteilerräume wird eine Split-Kälteanlage verwendet.

Kälteanlage - Kaltwassersatz

Die Kälteerzeugung im OC erfolgt zentral im ersten Untergeschoss des Gebäudes und wird durch einen Rückkühler auf dem Dach unterstützt. Die thermische Leistung der Kältemaschine beträgt 908,7 kW, die des Rückkühlers 1.171 kW. Die elektrische Anschlussleistung beträgt 219,6 kW. Als Kältemittel wird in der Anlage ein Glykol-Wassergemisch genutzt [26]. Dieser Aufbau ist auch im Planausschnitt Abbildung 4.5 zu erkennen. Zur Kälteversorgung im Gebäude dient ein Kaltwassersatz, welcher in zwei Pufferspeichern mit einem Nennvolumen von je 2.000 l beinhaltet. Die Pufferspeicher werden unabhängig vom Kältebedarf geladen, damit das Kaltwasser bei Bedarf in ausreichend großer Menge zur Verfügung steht. Der Aufbau der Pufferspeicher ist im Planausschnitt Abbildung 4.6 dargestellt. Die vom Planer vorgegebenen Systemtemperaturen betragen 14°C im Vorlauf für die RLT Geräte, 16°C für die Kühlsegel und -decken und 19°C im Rücklauf. Die Verteilung der Kälte erfolgt über vier Kältekreise:

- Kältekreis 1: Kühlsegel/Kühldecken Büroeinheit Nord-West
- Kältekreis 2: RLT Anlagen Bauteil 3 und 4
- Kältekreis 3: Kühlsegel/Kühldecken Büroeinheit Süd-Ost
- Kältekreis 4: RLT Anlagen Bauteil 1 und 2

Dieser Aufbau ist auch im Planausschnitt Abbildung 4.6 zu erkennen. Die primäre Methode für den Kälteeintrag bildet eine statische Kühlung mit Hilfe von Kühlsegeln und -decken. Die RLT Anlagen sind nicht als aktive Elemente im Kältekonzept zu sehen. Es soll durch das Kaltwasserregister in der RLT Anlage lediglich ein Wärmeeintrag durch die Lüftungsanlage verhindert werden.

4 Praktische Umsetzung von technischem Monitoring im Objekt

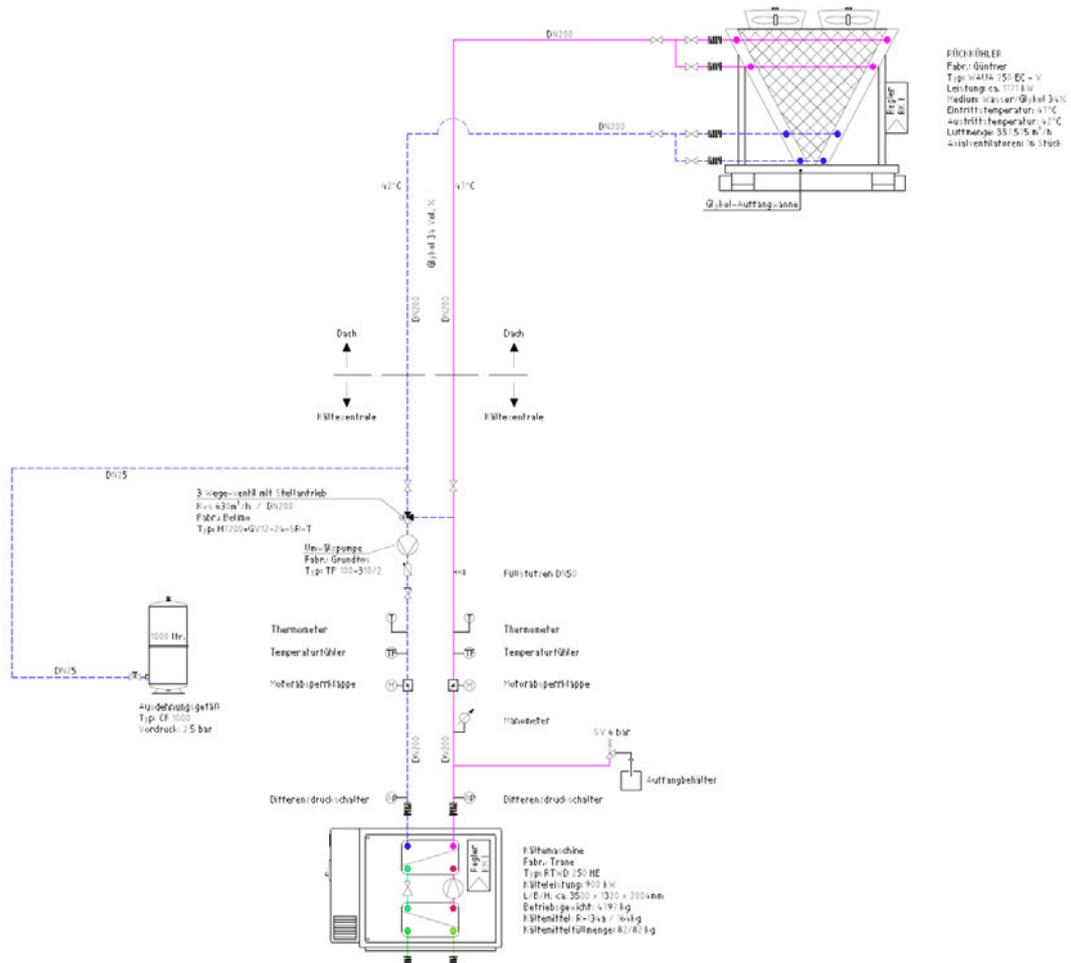


Abbildung 4.5: Aufbauschema Kälteerzeugung

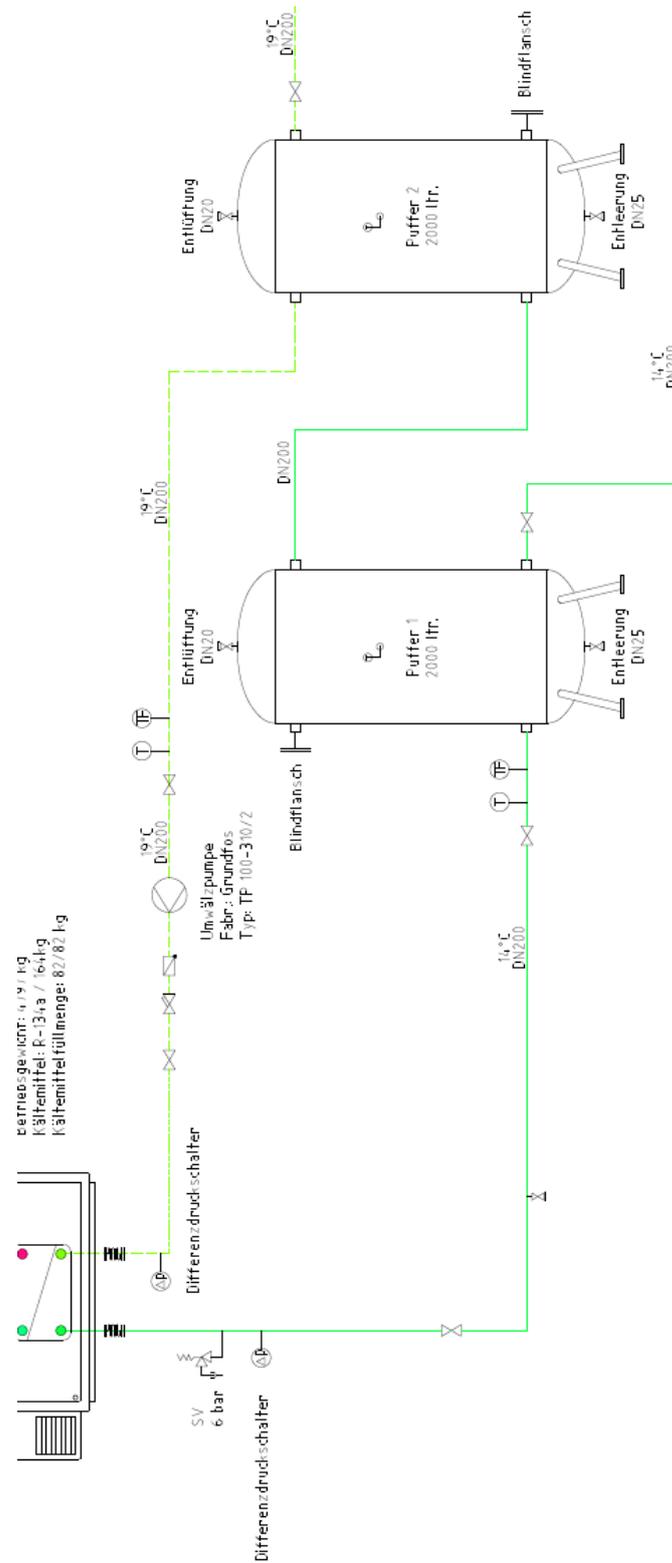


Abbildung 4.6: Aufbauschema Pufferspeicher

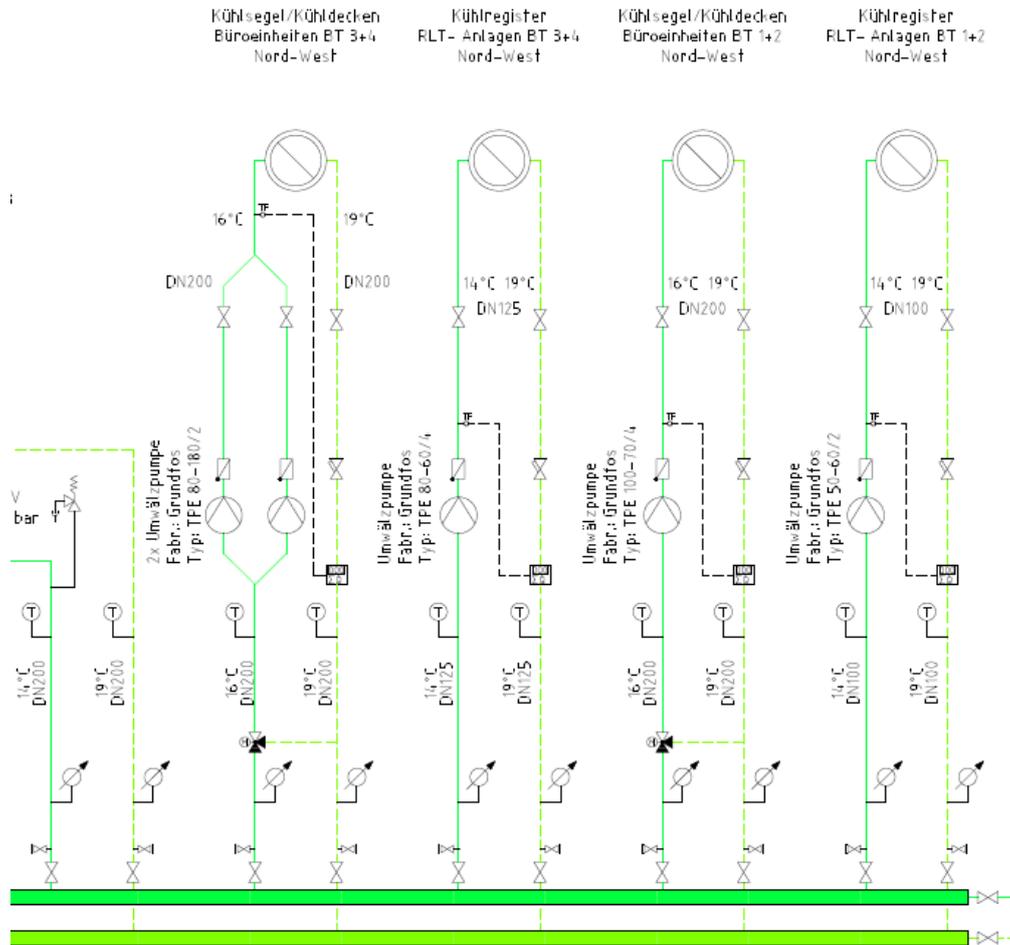


Abbildung 4.7: Aufbauschema Kältekreisverteiler

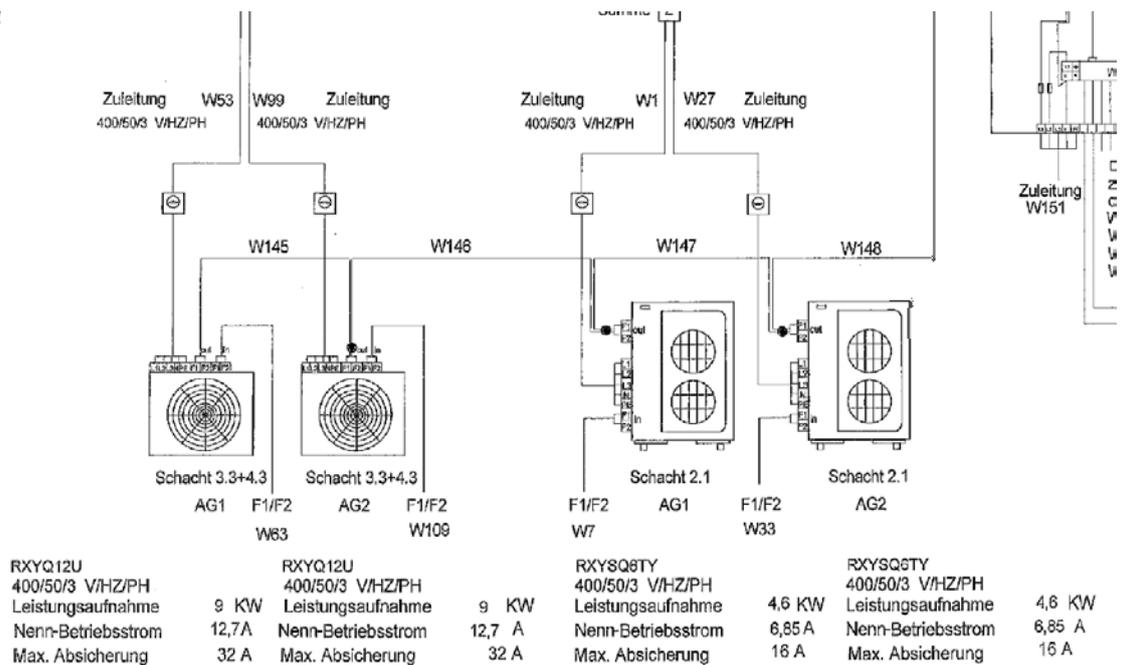


Abbildung 4.8: Zentrale Split Kälte

Kälteanlage - Split-Kälte

Da es sich bei Server- und Netzwerkverteilerräumen um elementare Bestandteile der modernen Büroinfrastruktur mit besonderer Anforderung an die Raumtemperatur handelt, wurden für diese Bereiche redundante Klimasplitgeräte verbaut. Hierfür wurden zwei Kältestränge mit jeweils zwei Außeneinheiten auf dem Dach verbaut. Diese Geräte werden zusätzlich auch elektrisch redundant versorgt, um die Ausfallsicherheit zu erhöhen. Die für die Versorgung von Bauteil eins und zwei zuständigen Außengeräte haben eine elektrische Anschlussleistung von 4,6 kW, während die für Bauteil drei und vier zuständigen Geräte eine elektrische Anschlussleistung von 9 kW besitzen. Als Kältemittel wird das Medium R-134A verwendet.

Der schematische Aufbau ist in Abbildung 4.8 und Abbildung 4.9 dargestellt. In Abbildung 4.8 sind die Außengeräte mit den zugehörigen Leistungen und in Abbildung 4.9 ist das Strangschemata eines Außengeräts mit zugehörigen Innengeräten dargestellt. Die restlichen Stränge sind mit anderer Anzahl an Innengeräten analog aufgebaut.

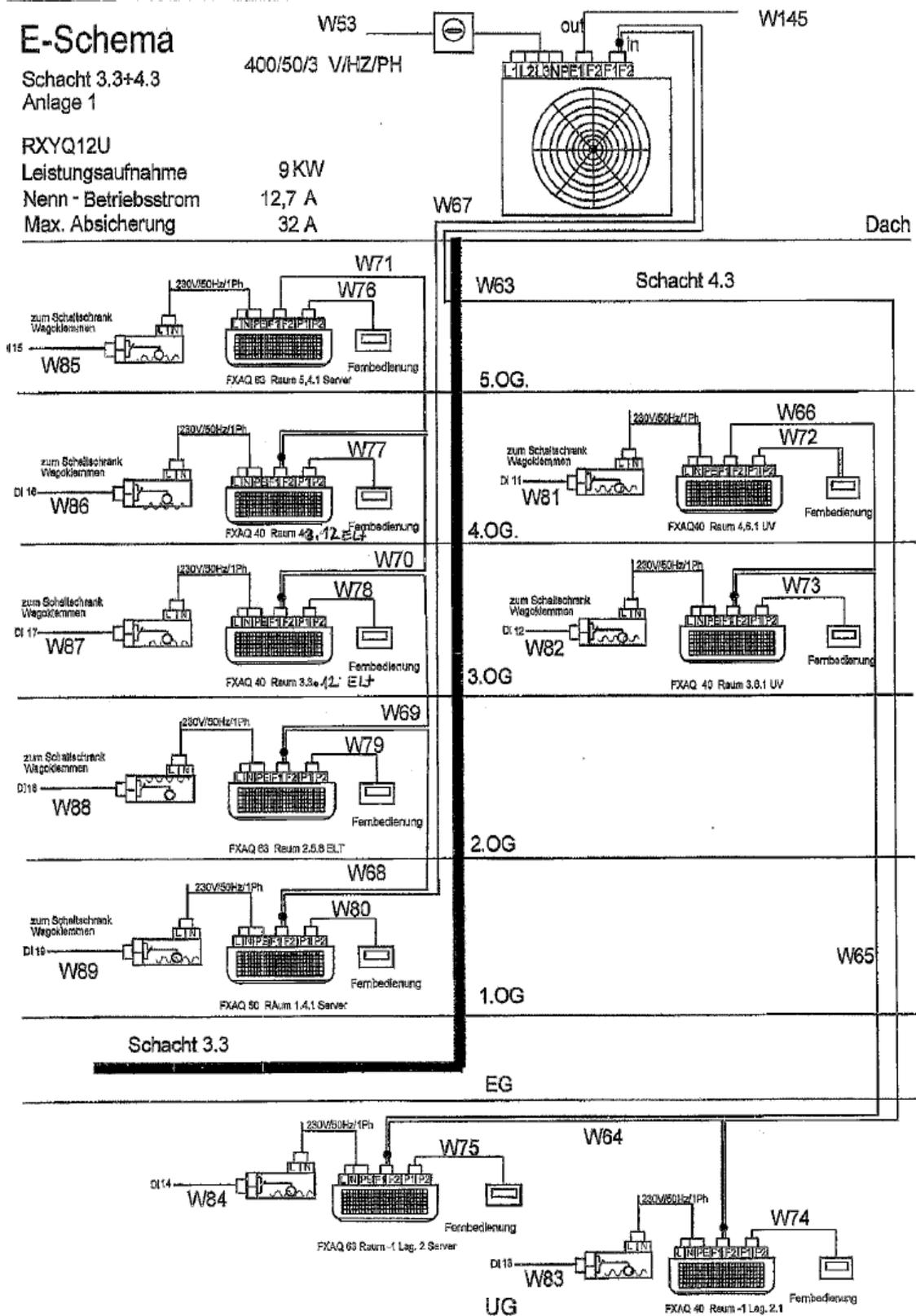


Abbildung 4.9: Beispielhaftes Strangschemata Kälte Innengerät

4.1.5 Verbaute Technik der Kostengruppe 440 - Elektrische Anlagen

Das OC ist an die Mittelspannung der Stadtwerke München angeschlossen und besitzt eine eigene Trafostation. Dieser Bereich kann im Monitoring nicht betrachtet werden, da die Stadtwerke München den Zugang und Messungen im Technikraum untersagen. Von der Trafoanlage wird die Energie per Kabel auf die Niederspannungshauptverteilung geleitet. Über Zählersysteme werden dann die Mieteinheiten versorgt. Als Zählersysteme kommen sogenannte Smart Meter zum Einsatz. Aufgrund der hohen Energiemenge werden die einzelnen Mieteinheiten per Wandlermessung erfasst. Eine Aufschaltung der Smart Meter in das übergeordnete Zählerkonzept ist nicht möglich, da die Stadtwerke München keine M-Bus-Schnittstelle zur Verfügung stellen. Zu Beginn wurden die Zähler manuell ausgelesen. Im Zuge der Bachelorarbeit wurde nun ein sogenannter Optokopf gekauft, mit welchem die Smart Meter auf Basis des D0 Protokolls kommunizieren. Der Optokopf bietet eine USB Schnittstelle, wodurch die Daten am Laptop ausgelesen werden können. Gegebenenfalls ist es sinnvoll die Zähler aus kostentechnischen Gründen des Monitorings per D0 Schnittstelle in das übergeordnete Messkonzept einzubinden. Die manuelle Auslesung der Zählerdaten mit der D0 Schnittstelle bringt jedoch in diesem Fall, wie im Versuch festgestellt werden konnte keinen wesentlichen Vorteil.

Des Weiteren ist ein KNX System zur Steuerung des Sonnenschutzes verbaut. Die Beschattungssteuerung erfolgt mit Hilfe einer KNX Wetterstation, welche den Sonnenstand erfasst und die entsprechende Gebäudeseite beschattet.

Als Beleuchtung werden LED Leuchten eingesetzt. Die Beleuchtung ist gemäß der nach den technischen Regeln für Arbeitsstätten geltenden Mindestwerte ausgelegt. Die Beleuchtung in Bereichen niedriger Anforderung wird gemäß Planungs- und Leadership in Energy and Environmental Design (LEED) Zertifizierungsvorgabe per Bewegungsmelder ein- und ausgeschaltet. In den Bereichen der Arbeitsplätze wird die Beleuchtungsstärke gemäß zuvor genannter Anforderungen auf einen Sollwert von 500 lx geregelt. Zur Steuerung der Beleuchtung wird das Standardprotokoll Digital addressable lighting interface (DALI) verwendet. Die Regelung erfolgt durch an die MBE angeschlossene Automationsstationen. Die Automationsstationen sind Bestandteil der Kostengruppe 480.

4.1.6 Verbaute Technik der Kostengruppe 450 - Kommunikations-, sicherheits- und informationstechnische Anlagen

Im Bereich der Kostengruppe 450 wurden im Gebäude eine Brandmeldeanlage, mehrere Einbruchmeldeanlagen sowie ein Datennetz aufgebaut. Die Anlagen dieser Kostengruppe werden im weiteren Verlauf der Arbeit nicht weiter betrachtet, da diese Anlagen in keiner Form auf die MBE aufgeschaltet sind und dementsprechend nicht durch die MBE überwacht werden können. Es wird nur ein geringer Mehrwert durch die manuelle Überwachung dieser Systeme gesehen, der mit hohen Kosten verbunden ist. Sicherheitsrelevante Anlagen sind auf einer anderen dauerhaft besetzten Stelle aufgeschaltet.

4.1.7 Verbaute Technik der Kostengruppe 460 - Förderanlagen

Als Förderanlagen sind im Gebäude vier Aufzugsanlagen des Herstellers Schindler vorhanden. Zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Arbeit liegen trotz Anfrage leider keine Daten der Aufzugsanlagen vor. Ebenso sind die Anlagen nicht in die MBE eingebunden. Daher sind diese Anlagen nicht Bestandteil der Arbeit.

4.1.8 Verbaute Technik der Kostengruppe 480 - Gebäude- und Anlagenautomation

Zur Steuerung, Regelung und Überwachung der haustechnischen Anlagen der Gewerke Sanitär-, Heizungs-, Lüftungs-, Kälte- und Elektrotechnik wurde im Objekt ein Automationssystem auf Basis der DIN EN ISO 16484-5 mit dem Datenkommunikationsprotokoll BACnet errichtet. Die übergeordnete MBE auf der Subsysteme wie Lüftungsanlagen mit autarker Regelung auflaufen wird im Zuge dieser Arbeit als Hauptwerkzeug zur Datensammlung verwendet.

Die Anlagenautomation erfolgt wie bereits zuvor beschrieben autark und wird falls möglich lediglich in die MBE eingebunden. Die Raumautomation der Flächen erfolgt über in die MBE eingebundenen Automationsstationen. So wird beispielsweise ein Temperatursollwert von der MBE vorgegeben, der durch den Enduser mittels eines Interfaces zur MBE um $\pm 3K$ geändert werden kann. Ebenso wird die Jalousieanlage und die Beleuchtungsanlage von der MBE geregelt. Auch hier ist eine manuelle Verstellung der Sollwerte

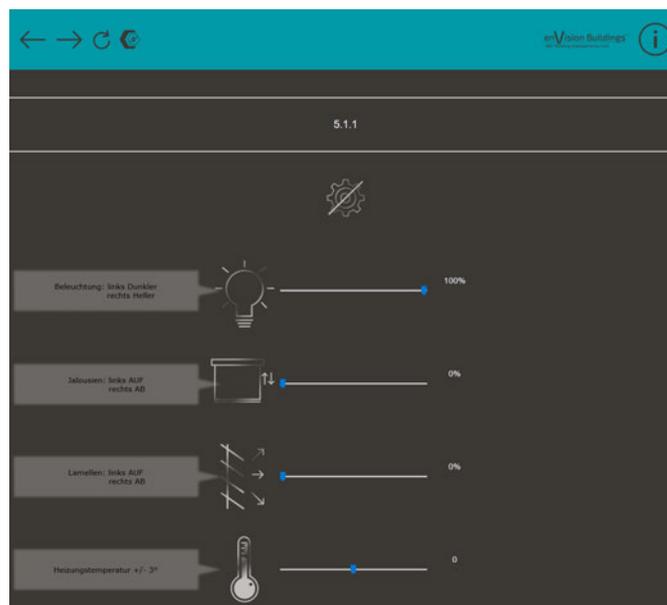


Abbildung 4.10: Einzelraumregelung Weboberfläche

und damit eine temporäre Überschreibung der Automatik möglich. Die Bedienoberfläche für den Enduser ist in Grafik 4.10 dargestellt. Als Sensorik zur Raumautomation dient in den Büroflächen ein O3 Sensor Hub des Herstellers DeltaControls. Mit diesem Feldgerät ist es möglich Raumtemperatur, relative Luftfeuchte, Bewegung, Präsenz, Beleuchtungsstärke zu erfassen. Zusätzlich verfügt dieser Hub über zwei Mikrophone für eine akustische Insassenerkennung sowie einen 1 W Audioausgang und einen LED Ring mit 12 RGB [1].

Für die Energieerfassung werden die per M-Bus in die MBE eingebundenen Mengenzähler verwendet sowie die manuell ausgelesenen Zählerwerte der Hauptzähler der Stadtwerke München verwendet. Das Messkonzept für die einzelnen Medien wird nachfolgend genauer erläutert.

Messkonzept elektrische Energie

Die Erfassung der elektrischen Energie im Haus erfolgt durch elf Zähler mit Wandlermessung sowie einen Direktzähler.

Direkt gezählt wird lediglich die Barista Bar im EG, welche derzeit coronabedingt nicht betrieben wird. Vier der Wandlermessungen erfassen die Verbräuche der einzelnen Mieter

	Fläche
Mieter 1	5.774,74 m ²
Mieter 2	3.398,55 m ²
Mieter 3	2.176,35 m ²
Mieter 4	2.08,64 m ²

Tabelle 4.3: Mietflächen pro Mieter

mit unterschiedlich großen Mietflächen. Die Mieter mit zugehörigen Flächen gliedern sich wie in Tabelle 4.3 dargestellt.

Mit der fünften Wandlermessung werden die Ladesäulen für Elektroautos im Tiefgaragenbereich erfasst. Die Ladesäulen werden durch die Firma GP-Joule betrieben und verfügen über ein eigenes Energie- und Lademanagement-System. Dieses Energie- und Lademanagement-System wird vom Betreiber selbst verwaltet und hat keine Schnittstelle zum Auswerten der Daten.

Die restlichen sechs Wandlermessungen betreffen die Allgemeinflächen und -anlagen und sind wie in folgende als sinnvoll erachtete Messungen aufgeteilt:

- Haus allgemein
 - Beleuchtung
 - Hebeanlagen
 - Rohrbegleitheizungen
 - Steuerungseinrichtungen
 - Kleinkälteanlage
 - Steckdosen
 - Aufzüge
 - Sprechanlage
 - Druckerhöhungsanlage
 - Einbruchmeldeanlage
 - Brandmeldeanlage

- Gebäudeautomationsserver
- Rauch- und Wärmeabzugsanlage (RWA Anlage)
- RLT Anlagen
 - RLT Zentralgeräte
 - Informationsschwerpunkt 1 + 2
- Heizungsanlage
 - Fernwärmeübergabestation
 - Steuerschrank Heizung
 - Pumpen der Heizkreise
- Kälteanlage
 - Kälteerzeugung
 - Rückkühler
 - Steuerschrank Kälte
 - Pumpen der Kältekreise

Messkonzept Wärmemenge

Die Wärmemenge im Gebäude wird zunächst mit einem Hauptzähler der Stadtwerke München auf der Primärseite des Plattenwärmetauschers gemessen. Dieser Zähler kann nicht auf die MBE aufgelegt werden, da keine M-Bus Schnittstelle zur Verfügung steht. Alle weiteren Wärmemengenzähler sind an das M-Bus System angeschlossen und damit auf die MBE aufgeschaltet. Auf den primärseitigen Zähler folgend wird sekundärseitig die Wärmemenge der einzelnen Heizkreise erfasst. Nach den Heizkreisen wird das Messkonzept hin zu den Mieteinheiten und RLT Geräten feingliedriger. Im Heizkreis 'Unterflurkonvektoren Büroeinheiten' wird die Wärmemenge erneut pro Abgang in die einzelnen Mieteinheiten gemessen. Diese Messung erfolgt mietbereichsweise, damit eine spätere Auftrennung der von den Mietern angemieteten Bereiche möglich ist. Im Heizkreis 'Heizregister RLT Anlagen' erfolgt die Aufgliederung in die einzelnen RLT Anlagen. Die Heizkreise drei bis fünf haben keine Unterzählung.

Messkonzept Kältemenge

Da die Kälte im Gebäude selbst mit einer Kältemaschine durch Strom erzeugt wird, gibt es keinen Kältemengenzähler eines Energieversorgers. Die Erfassung des Primärenergiebedarfs erfolgt durch den im Kapitel 4.1.8 genannten elektrischen Zähler. Daraufhin wird die thermische Energie analog zur Wärmemenge an den einzelnen Kältekreisen gemessen. Auch hier wird die Messung weiter auf die einzelnen RLT Anlagen und die Mieteinheiten spezifiziert.

Messkonzept Trinkwasser

Das verbrauchte Trinkwasser wird am Hausanschluss durch die Stadtwerke mit Hilfe eines analogen Zählers gemessen. Dieser ist daher nicht auf die MBE aufschaltbar und muss vor Ort ausgelesen werden. Die Erfassung des Verbrauchs der Mieter erfolgt durch eine Messung an den Abgängen zu den Mieteinheiten und in den allgemeinen Bereichen durch Zähler direkt an der Zapfstelle. Diese Unterzähler sind analog zu denen der Wärme- und Kältemengenzählung auf die MBE aufgeschaltet. Eine Besonderheit stellt die zusätzliche Erfassung des Warmwasserbedarfs in den durch die zentrale Warmwasserbereitung versorgten Bereichen dar. Hierfür werden mehrere separate Zähler eingesetzt, die unmittelbar vor den Verbrauchern liegen.

4.2 Energiemonitoring

Zur Umsetzung des Energiemonitorings werden die Hauptzähler, sofern terminlich und zugangstechnisch möglich, aufgrund der fehlenden MBE Anbindung manuell vor Ort ausgelesen. Des weiteren werden die Zählerstände der an die MBE angeschlossenen Zähler im 30 Minuten Takt abgefragt und in einem Trendlog in der MBE Software (enteliWEB) gespeichert. Diese Trendlogs werden automatisiert alle sechs Stunden durch ein firmeneigenes Programm über die Web API der enteliWEB als CSV Dateien heruntergeladen und abgespeichert. Energietechnisch werden somit alle relevanten Werte des Gebäudes erfasst. Einzige Ausnahme hiervon stellen die nachfolgenden Zähler dar, da diese keine Werte liefern:

- Wärmemengenzähler Warmwasserbereitung

- Wärmemengenzähler RLT Anlage 1
- Wärmemengenzähler RLT Anlage 2
- Kältemengenzähler RLT Anlage 1
- Kältemengenzähler RLT Anlage 3
- Kältemengenzähler RLT Anlage 4

Auffällig bei diesen Zählern ist, dass die Vor- und Rücklauftemperatur identisch ist. Dies deutet auf einen Fehler in der Anbringung der Sensorik, oder der Sensorik selbst hin, muss jedoch genauer untersucht werden.

4.3 Anlagenmonitoring

Für das Anlagenmonitoring werden im Folgenden die Zentralgeräte einzeln betrachtet.

4.3.1 Wärmeversorgungsanlage

Da diese Anlage bei Erstellung dieser Arbeit noch nicht an die MBE angeschlossen wurde, ist es hier nur möglich ein rudimentäres Monitoring mit den zur Verfügung stehenden Daten zu implementieren. Hierzu wird zum einen die primärseitig und die sekundärseitig an den Heizkreisen verbrauchte Energie gemessen, um Rückschlüsse auf den Wirkungsgrad der Anlage ziehen zu können. Des Weiteren wurden Trendlogs der Vor- und Rücklauf Temperaturen angelegt, um nachvollziehen zu können, ob die Systemtemperaturen gemäß der Planung im Betrieb eingehalten werden. Dies ist insbesondere bei Fernwärmanlagen wichtig, da die Rücklauftemperatur ins öffentliche Netz als Maximalwert vorgegeben wird. Bei Nichteinhaltung der Systemtemperaturen kann es zu einer Überschreitung der Rückspeisetemperatur und damit zu Rügen von Seiten des Netzbetreibers kommen. Meist ist die vom Netzbetreiber geforderte Rücklauftemperatur vertraglich festgehalten und dementsprechend einzuhalten.

4.3.2 Raumlufotechnische Anlagen

Die raumlufotechnischen Anlagen des Gebäudes besitzen eine BACnet Schnittstelle und sind in die MBE eingebunden. Daher werden für die spätere Analyse für diese Anlagen folgende Soll- und Ist-Werte aufgezeichnet:

Soll-Werte:

- Ventilatorgeschwindigkeit Zu- und Abluft in %
- Zuluft Temperatur
- Stellsignal heizen
- Stellsignal kühlen
- Kanaldruck Zu- und Abluft

Ist-Werte:

- Temperatur Fortluft
- Temperatur Zuluft nach Wärmerückgewinnung (WRG) und Kühl-/Heizregister
- Temperatur Abluft
- Temperatur Außenluft
- Kanaldruck Zu- und Abluft

Weitere für ein Anlagenmonitoring interessante Werte sind:

- Volumenstrom Zu- und Abluft
- CO₂ Gehalt der Abluft in ppm
- Absolute und relative Luftfeuchtigkeit

Der Volumenstrom der Zu- und Abluft wird der MBE mit dem Wert $0 \text{ m}^3/\text{h}$ angezeigt, während alle Kanaldruckregler der Anlage Werte von mehr als $0 \text{ m}^3/\text{h}$ übermitteln. Ebenso konnte bei einer Ortsbegehung festgestellt werden, dass die Anlage in Betrieb war und Luft förderte und der Datenpunkt nach wie vor $0 \text{ m}^3/\text{h}$ anzeigte. Die Volumenströme der RLT Geräte können theoretisch über die Addition der Volumenströme aller Kanaldruckregler des jeweiligen Strangs einer Anlage errechnet werden. Verluste zwischen RLT Gerät und Kanaldruckregler können so jedoch nicht festgestellt werden.

Der CO_2 Wert wird der MBE dauerhaft mit 0 ppm übermittelt. Daher ist hier davon auszugehen, dass ein entsprechender Sensor nicht verbaut wurde.

Die relative Luftfeuchte wird mit -25% an die MBE übermittelt. Da die relative Luftfeuchte keinen negativen Wert annehmen kann, ist davon auszugehen, dass der Fühler entweder verpolt angeschlossen wurde, oder fehlt. Für die absolute Luftfeuchte ist kein Datenpunkt vorhanden.

Ebenso wurden die Datenpunktliste und Dokumentation erst zum 20.06.2021 übermittelt. Daher beginnt diese Aufzeichnung ab dem 21.06.2021.

Zusätzlich ist das BACnet Gateway der RLT Anlage 3 seit Februar 2021 defekt. Daher können über diese Anlage keine Daten erhoben werden.

Seit 01.07.2021 ist Anlage RLT 5 ebenfalls offline. Dies wurde dem Anlagenerrichter mitgeteilt.

4.3.3 Kälteanlagen

Wie auch die RLT Geräte ist die Kälteerzeugung per BACnet Schnittstelle in die MBE eingebunden. Dementsprechend werden auch hier für die Auswertung folgende Soll- und Istwerte aufgezeichnet:

- Betriebsmeldung Kältemaschine
- Betriebsmeldung Verdichter 1 und Verdichter 2
- Betriebsmeldung Kaltwasserpumpe
- Betriebsmeldung Kühlwasserpumpe
- Betriebsmeldung Rückkühlwerk

- Störmeldung Kältemaschine
- Störmeldung Kaltwasserpumpe
- Störmeldung Kühlwasserpumpe
- Störmeldung Rückkühlwerk
- Temperaturfühler Kühlwasser Vor- und Rücklauf
- Temperaturfühler Kaltwasser Vor- und Rücklauf
- Betriebsstunden Verdichter 1 und Verdichter 2
- Starts Verdichter 1 und Verdichter 2

Bei der Kälteanlage musste festgestellt werden, dass einige Werte zwar in der enteliWEB dargestellt, jedoch nicht aufgezeichnet werden können. Dies liegt vermutlich daran, dass die Informationsschwerpunkte (ISPs) der Kälteanlage entgegen der Gebäudeautomation (GA) Anforderungen anders portiert sind als der Rest der Anlage. Es wird empfohlen dies dringend zu beheben.

Während der Auswertung der Daten wurde festgestellt, dass bestimmte Datenpunkte die auf einem ISP der Anlagenautomation zwar in der MBE angezeigt werden, nicht gemonitort werden können.

4.3.4 Elektrotechnische Anlagen

Da keine Störmeldungen auf die MBE auflaufen, wird für diese Anlagen kein Monitoring betrieben. Ein manuelles Messen von Anlagendaten wird als kostenintensiv und wenig zielführend angesehen.

4.3.5 Raumautomation

Die Einzelraumregelung wird durch in die MBE integrierte Automationsstationen umgesetzt. Hierfür werden für den Monitoringprozess folgende Werte aufgezeichnet:

- Raumlufttemperatur Soll-/Istwert
- Schwellwerte heizen/kühlen

- Präsenz

4.4 Behaglichkeitsmonitoring

Für die Umsetzung des Behaglichkeitsmonitorings werden unter anderem die Raumtemperaturen der einzelnen Regelzonen überwacht und gespeichert. In der GA sind keine Datenpunkte für eine Messung der Raumfeuchte vorhanden, daher findet die relative Luftfeuchte in den Räumen keine Anwendung in der Behaglichkeitsbetrachtung dieser Arbeit. Der CO₂ Wert kann lediglich in Besprechungsräumen erfasst werden und spielt damit eine untergeordnete Rolle, wird jedoch ausgewertet. Da keine Messung der Luftgeschwindigkeit im Raum möglich ist, wird davon ausgegangen, dass die Fachplanung und die Ausführung den Schwellwert für Zugserscheinungen von maximal 0,2 m/s berücksichtigt hat und dementsprechend nicht überschritten wird. Diesbezüglich liegen leider keine Unterlagen vor. Ein Messgerät zur Überprüfung der Annahme steht bei der Erstellung dieser Arbeit ebenfalls nicht zur Verfügung.

5 Auswertung der Monitoring Daten des Objekts

Die im Kapitel 4 beschriebenen erhobenen Daten werden in diesem Kapitel nun ausgewertet. Die Daten wurden hierfür mit Hilfe eines firmeneigenen Tools vom Webserver in einem Intervall von 6h downgeloadet und als CSV Dateien gespeichert. Der Aufbau der CSV ist bis zum 06.07.2021 00:00 Uhr: 'Datetime (dd.MM.yyyy hh:mm)' ; Messwert und seit 06.07.2021 00:00 Uhr: 'Datetime (dd.MM.yyyy hh:mm:ss) ; Messwert'. Als Tool zur Datenauswertung wurden Matlab und Excel verwendet, da diese Programme dem Auswertenden aus dem Studium bekannt sind. Matlab liefert hier eine gute Lösung zur graphischen und mathematischen Aufbereitung großer Datenmengen und Excel dient zur Auswertung von Langzeitdaten die zusammengetragen werden müssen.

5.1 Energiemonitoring

Zunächst werden die einzelnen im Kapitel 3 vorgeschlagenen Analysemethoden betrachtet und gegebenenfalls umgesetzt. Daraufhin werden die Hauptverbräuche (Primärzähler) mit der Summe der Hauptzähler über einen definierten Zeitraum verglichen, wodurch der tatsächliche Wirkungsgrad der Primäranlagen ermittelt werden kann. Im Anschluss werden die Strangzähler der Anlagen mit den Zählern der Mieteinheiten verglichen, um den Verlust längs der Rohrleitung zu bestimmen. Daraufhin werden die Wärme- und Kälte-technischen Verbräuche der statischen Heizung und Kühlung der übereinanderliegenden Mieteinheiten mit gleicher Fassadenausrichtung in Relation zur Fläche verglichen. Im Anschluss werden die Zähler der einzelnen Medien pro Mieter zusammengefasst und als Verbrauch in Relation zur Mietfläche gesetzt.

Verhältnis Qualifizierung	Büro- und Verwaltungsgebäude			Wohn- sowie Wohn- und Geschäftsgebäude		
	gut	mittel	schlecht	gut	mittel	schlecht
Netto-Grundfläche (NFG)	0,94	0,91	0,88	0,88	0,83	0,78
Brutto-Grundfläche (BGF)						

Abbildung 5.1: CO₂ Funktions- und Nutzungskennzahlen [13]

5.1.1 Liegenschaftsanalyse

Eine Liegenschaftsanalyse im Sinne des Vergleichs eines Liegenschaftsportfolios ist im konkreten Beispiel nicht möglich, da es sich lediglich um eine betrachtete Liegenschaft, das OC, handelt. Es kann jedoch der Gesamtverbrauch des Gebäudes betrachtet und mit Durchschnittswerten verglichen werden. In Zukunft kann das Gebäude auf dieser Datenbasis auch mit den eigenen Vorjahren verglichen werden. Da für diese Analyse Langzeitdaten wichtig sind und die Auflösung für eine erste Analyse zweitrangig ist, werden hierfür die Werte vom Jahreswechsel 02.09.2020 sowie die Werte zum Stichtag 09.07.2021 verwendet. Ebenso werden die Werte vom 31.12.2020 ausgewertet, um unter anderem Hochrechnungen zur Validierung von Methoden zu erstellen. Daher gibt es im folgenden eine 190 sowie eine 310 tägige Datenaufzeichnung. Um den Verbrauch vergleichbar zu machen, muss die zuvor angegebene BGF noch bereinigt und in die Netto-Grundfläche (NGF) umgerechnet werden. Da zur NGF keine zuverlässigen Zahlen aus einem Raumbuch oder ähnlichem zur Verfügung stehen, wird die NGF mit Hilfe eines standardisierten Faktors aus der BGF berechnet. Dieser Faktor ist aus der in Abbildung 5.1 dargestellten Tabelle aus einem Buch der Fachliteratur entnommen. Da es sich um ein Gebäude mit überwiegend Großraumbüros handelt, wird der Faktor von NGF zu BGF als 'gut' angesehen und im folgenden dieser Faktor verwendet.

Heizenergieverbrauch ohne Warmwasserbereitung

Zunächst erfolgt eine Analyse des Heizenergieverbrauch (HEV) der gesamten Liegenschaft. Die Warmwasserbereitung fließt in diese Bewertung nicht mit ein, da der Wärmemengenzähler zur Erstellung der Arbeit keinen gemessenen Verbrauch sowie Vor- und Rücklauftemperaturen von 0°C anzeigt. Der Verbrauch der WWB muss größer null sein, da der Verbrauch von zentral bereitetem Warmwasser größer als 0 m³ ist. Daher wird

nachfolgend die verbrauchte Heizenergie ohne Berücksichtigung der zentralen Warmwasserbereitung berechnet:

$$HEV_{EGes310} = HEV_{EHK1-310} + HEV_{EHK2-310} + HEV_{EHK3-310} + HEV_{EHK4-310} \quad (5.1)$$

$$HEV_{EGes190} = HEV_{EHK1-190} + HEV_{EHK2-190} + Q_{EHK3-190} + HEV_{EHK4-190} \quad (5.2)$$

$$HEV_{AGes} = HEV_{AHK1} + HEV_{AHK2} + HEV_{AHK3} + HEV_{AHK4} \quad (5.3)$$

Der Index 190 steht in diesem Fall für den Zählerwert vom 31.12.2021 und der Index 310 für den vom 02.09.2021.

$$HEV_{m^2} = \frac{HEV_E - HEV_A}{A} \quad (5.4)$$

$$HEV_{m^2310} = \frac{HEV_{AGes} - HEV_{EGes310}}{A_{NGF-Ges}} \quad (5.5)$$

$$HEV_{m^2190} = \frac{HEV_{AGes} - HEV_{EGes190}}{A_{NGF-Ges}} \quad (5.6)$$

$$A_{NGF} = A_{BGF} \cdot F \quad (5.7)$$

$$F = \frac{A_{NGF}}{A_{BGF}} = 0,94 \quad (5.8)$$

mit

HEV_{m^2} = Heizenergieverbrauch in $[\frac{Wh}{m^2}]$

HEV_E = Heizenergieverbrauch Ende in $[Wh]$

HEV_A = Heizenergieverbrauch Anfang in $[Wh]$

$$A_{NGF} = NGF \text{ in } [m^2]$$

In die Gleichungen 5.1 bis 5.8 werden die Messergebnisse wie in nachfolgenden Gleichungen 5.9 bis 5.13 zu sehen eingesetzt.

$$HEV_{EGes310} = 140kWh + 4kWh + 8.573kWh + 5.030kWh = 15.007kWh \quad (5.9)$$

$$\begin{aligned} HEV_{EGes190} &= 315.210kWh + 417.481kWh + 39.410kWh + 16.930kWh \\ HEV_{EGes190} &= 789.031kWh \end{aligned} \quad (5.10)$$

$$\begin{aligned} HEV_{AGes} &= 728.460kWh + 1.026.228kWh + 88.420kWh + 33.685kWh \\ HEV_{AGes} &= 1.876.793kWh \end{aligned} \quad (5.11)$$

$$HEV_{m^2310} = \frac{1.876.793,018kWh - 15.007kWh}{17.000m^2 \cdot 0,94} = 116,507 \frac{kWh}{m^2} \quad (5.12)$$

$$HEV_{m^2190} = \frac{1.876.793,018kWh - 789.031kWh}{17.000m^2 \cdot 0,94} = 68,070 \frac{kWh}{m^2} \quad (5.13)$$

Daraufhin wird für den betrachteten Zeitraum die Gradtagszahl nach VDI 2067 berechnet. Da keine Daten der tatsächlichen Heizgrenztemperatur der Heizungsanlage vorliegen, werden die in der VDI 2067 und VDI 3807 beschriebenen Werte von 15°C für die Heizgrenztemperatur und 20°C Raumtemperatur angenommen [17] [29].

Die Berechnung der Gradtagszahl erfolgt mit den Gleichungen 5.14 bis 5.16.

$$GTZ = \sum_{n=1}^z (\theta_{raum} - \theta_{a,n}) \quad (5.14)$$

$$HEV_{Jahr} = HEV_{Teiljahr} \cdot \frac{GTZ_{Jahr}}{GTZ_{Teiljahr}} \quad (5.15)$$

$$HEV_{norm} = HEV_{spez} \cdot \frac{GTZ_{norm}}{GTZ_{spez}} \quad (5.16)$$

Um den Verbrauchswert langfristig und mit anderen Gebäuden vergleichen zu können, wird der spezifische Verbrauch auf ein Jahr hochgerechnet. In der Praxis wird die Hochrechnung und ähnliches derzeit mit der Gradtagszahltable aus Dezember 1983 durchgeführt [5] [8] [4] [14] [6]. Da es sich bei den in der Praxis üblichen Werte um langjährige Mittelwerte der Gradtagszahlen in Promille aus dem Jahr 1983 handelt, wird davon ausgegangen, dass eine analoge Berechnung der Gradtagszahlen über den realen Betrachtungszeitraum von 09.07.2020 bis 09.07.2021 für eine Hochrechnung genauere Ergebnisse liefert. Es kann weiter festgestellt werden, dass das Ergebnis der Berechnung des Verhältnisses Teiljahr zu Ganzjahr der aktuellen Daten mit $\frac{989}{1000}$ auch sehr nahe an der Berechnung mit der Tabelle aus dem Jahr 1983 mit einem Wert von $\frac{976}{1000}$. Wird nun noch eine Witterungsbereinigung an dem aktuell berechneten Wert vorgenommen, erhält man einen Wert von $\frac{979}{1000}$. Damit ist der Wert genau genug und es wird im Folgenden mit dem nicht bereinigten tatsächlichen Wert weiter gerechnet. Die Witterungsbereinigung wird später noch genauer beschrieben.

Daraus ergibt sich für die weitere Berechnung:

$$GTZ_{spez310} = 3.871,1Kd$$

$$GTZ_{spez190} = 2.353,1Kd$$

$$GTZ_{spez365} = 3.913,1Kd$$

$$HEV_{Jahr310} = HEV_{Teiljahr} \cdot \frac{GTZ_{spez365}}{GTZ_{spez310}} \quad (5.17)$$

$$HEV_{Jahr310} = 116,507 \frac{kWh}{m^2} \cdot \frac{3.913,1Kd}{3.871,1Kd} = 117,771 \frac{kWh}{m^2} \quad (5.18)$$

$$HEV_{Jahr190} = HEV_{Teiljahr} \cdot \frac{GTZ_{spez365}}{GTZ_{spez190}} \quad (5.19)$$

$$HEV_{Jahr190} = 68,070 \frac{kWh}{m^2} \cdot \frac{3.913,1Kd}{2.353,1Kd} = 113,197 \frac{kWh}{m^2} \quad (5.20)$$

Um die Genauigkeit dieser Berechnungsmethode zu validieren, wurde der Heizenergieverbrauch mit der selben Methodik von 190 Tage auf 310 Tage hochgerechnet. Diese

Berechnung ergab eine Abweichung von 4,04%. Die gleiche Abweichung ergibt sich auch beim Vergleich der beiden Jahreshochrechnungen.

Da zu vermuten ist, dass die Daten des in Gleichung 5.18 errechnete Heizenergieverbrauch $HEV_{Jahr310}$ aufgrund des längeren Monitoring-Zeitraums genauer sind, wird für nachfolgende Berechnungen dieser Wert verwendet. Um diesen Heizenergieverbrauch mit anderen Verbräuchen vergleichen zu können, muss dieser nun witterungsbereinigt werden. Dafür wurden die täglichen Wetterdaten der Wetterstation am Münchner Flughafen von 01.01.1993 bis 31.12.2020 des Deutschen Wetterdienstes verwendet [7]. Die Temperaturen dieser 27 Jahre wurden gemittelt und analog zur Gradtagszahlbildung wie zuvor beschrieben verwendet:

$$GTZ_{avg} = \sum_{n=1}^z \left(\theta_{raum,n} - \frac{\sum_{k=1}^x \theta_{a,n,k}}{a} \right) \quad (5.21)$$

$$GTZ_{avg} = 3690,4Kd \quad (5.22)$$

In Gleichung 5.23 wird der tatsächliche Heizenergieverbrauch witterungsbereinigt errechnet.

$$HEV_{norm} = 117,771 \frac{kWh}{m^2} \cdot \frac{3690,4Kd}{3.913,1Kd} = 111,068 \frac{kWh}{m^2} \quad (5.23)$$

Zuletzt wird der normierte Wert noch mit dem Wirkungsgrad des Wärmetauschers auf die Hausanschlussseite übersetzt. Dadurch erhält man den in Gleichung 5.24 Endenergieverbrauch des Gebäudes.

$$HEV_{normHA} = \frac{111,068 \frac{kWh}{m^2 \cdot a}}{0,988} = 112,42 \frac{kWh}{m^2 \cdot a} \quad (5.24)$$

Mit diesem Wert liegt das Gebäude beim Betrachten des Heizenergieverbrauchs laut einer Publikation des BBSR [20] um knapp 10% über der in der Studie definierten Energieaufwandsklasse 'mittel'. Eine Gegenanalyse auf Basis der im Gebäude gegebenen Randbedingungen ist leider nicht möglich, da hierfür die Unterlagen aus dem Hochbau fehlen. Auch von technischer Seite schwanken die Parameter zwischen Energieaufwandsklasse 'Sehr gering' und 'Sehr hoch'.

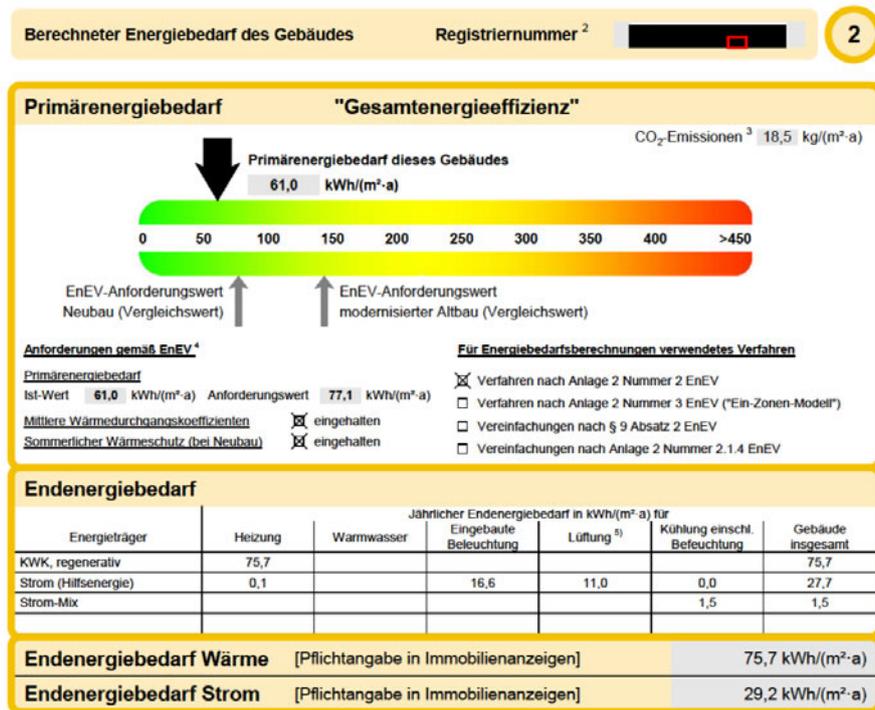


Abbildung 5.2: Energieausweis

Einen weiteren Anhaltspunkt liefert der Energieausweis des OC, siehe hierfür Abbildung 5.2. Hier ist der Endenergiebedarf des Gebäudes mit $75,7 \frac{kWh}{m^2 \cdot a}$ angegeben. Dieser Wert wird mit $112,42 \frac{kWh}{m^2 \cdot a}$ um 48,5% überschritten. Unter der Berücksichtigung, dass die Gradtagszahl um ca. 6-7% pro 1 K Raumtemperaturänderung verändert wird [19] und dass der Heizenergieverbrauch in der Bereinigung direkt proportional zum Heizenergieverbrauch ist, kann davon ausgegangen werden, dass sich pro 1 K Raumtemperatur der Heizenergieverbrauch ebenfalls um 6-7% ändert. Für diese Arbeit werden im Folgenden 6% verwendet. Lediglich im Falle von Maximalabweichungen und ähnlichem werden 7% verwendet. Daher könnte der Verbrauchswert des Gebäudes beispielsweise durch eine Absenkung des Raumtemperatursollwerts von 24°C auf 20°C um ca. 24% verringert werden.

Der aktuelle Preis für Fernwärme in München liegt bei netto $46,41 \frac{Euro}{MWh}$ [21] für Geschäftskunden. Nach Stand 2021 liegen die Emissionen für Fernwärme in München bei ca. $66 \frac{gCO_{2eq}}{kWh}$ [25].

Die Einsparung von 24% (Szenario 1) entspricht somit einer potentiellen Endheizenergieeinsparung von jährlich ca. 433,3 MWh (Gleichung 5.25) und somit aus ökonomischer

	31,5 Jahre	49 Jahre	59 Jahre	69 Jahre
Szenario 1	13.648,95 MWh	21.231,70 MWh	25.564,70 MWh	29.897,70 MWh
Szenario 2	18.483,89 MWh	28.752,71 MWh	34.620,61 MWh	40.488,51 MWh

Tabelle 5.1: Energieeinsparung über durchschnittliche wirtschaftliche Nutzungsdauer

	31,5 Jahre	49 Jahre	59 Jahre	69 Jahre
Szenario 1	633.447,78 €	985.363,21 €	1.186.457,74 €	1.387.552,27 €
Szenario 2	857.837,10 €	1.334.413,27 €	1.606.742,51 €	1.879.071,75 €

Tabelle 5.2: Ökonomische Einsparung über durchschnittliche wirtschaftliche Nutzungsdauer

Sicht einer Heizkostensparnis von netto 20.109 € und einer jährlichen Menge von 28,6 Tonnen CO₂ Äquivalent.

$$HEV_{Einsparung} = HEV_{normHA} \cdot 0,24 \cdot A_{NGF} = 433,3MWh \quad (5.25)$$

Falls der im Energieausweis errechnete tatsächliche Endheizenergiebedarf erreicht wird (Szenario 2), ist gemäß Gleichung 5.26 eine Einsparung von $586,79 \frac{MWh}{a}$ (witterungsbereinigt) zu erwarten. Das entspricht einer jährlichen monetären Ersparnis von netto 27.233 € und einer CO_{2eq} Ersparnis von 38,7 Tonnen.

$$HEV_{Einsparung} = (HEV_{normHA} - HEV_{Energieausweis}) \cdot A_{BGF} \cdot F$$

$$HEV_{Einsparung} = \left(112,42 \frac{kWh}{m^2 \cdot a} - 75,7 \frac{kWh}{m^2 \cdot a} \right) \cdot 17.000m^2 \cdot 0,94 \quad (5.26)$$

$$HEV_{Einsparung} = 586,79 \frac{MWh}{a}$$

Als wirtschaftliche Nutzungsdauer eines Gebäudes können in der Regel 60 Jahre +/- 10 Jahre angesetzt werden. Eine Untersuchung an realen Gebäuden in Frankfurt am Main hat jedoch ergeben, dass sehr häufig eine wirtschaftliche Nutzungsdauer von 32,5 Jahren angenommen wird [9]. Aus diesem Grund werden die potentiellen Einsparpotentiale nun in der Matrix in den Tabellen 5.1, 5.2, 5.3 für einen Zeithorizont von 31,5, 49, 59 und 69 Jahre dargestellt (Es wurde 1 Jahr von den Basiswerten abgezogen, da das Gebäude bereits ca. 1 Jahr in Betrieb ist).

	31,5 Jahre	49 Jahre	59 Jahre	69 Jahre
Szenario 1	900,8 t	1.401,3 t	1.687,3 t	1.973,3 t
Szenario 2	1.219,9 t	1.897,7 t	2.283,0 t	2.672,2 t

Tabelle 5.3: Ökologische Einsparung CO₂ Äquivalent über durchschnittliche wirtschaftliche Nutzungsdauer

Heizkreis 1 Unterflurkonvektoren Büroeinheiten - Mieteinheiten

Als Nächstes wird über den selben Zeitraum vom 02.09.2020 bis zum 09.07.2021 (Vergleichszeitraum 1) sowie vom 31.12.2020 bis zum 09.07.2021 (Vergleichszeitraum 2) am Abgang des Hauptheizkreisverteilers gemessene Heizenergie mit der an den einzelnen Mieteinheiten angekommene Heizenergie verglichen. Dabei lässt sich feststellen, dass die Summe der Mieteinheiten im Vergleich zur Verbrauchszählung des Heizkreis 1 im Vergleichszeitraum 1 um 7,84% und im Vergleichszeitraum 2 um 8,19% geringer ist. Dies wurde für den Vergleichszeitraum 1 auch in einem Sankey-Diagramm in Abbildung 5.3 graphisch aufgearbeitet.

Wird dieser Verlust nun gemäß den Berechnungen aus 5.1.1 auf den Jahresverbrauch hochgerechnet, erhält man einen Energieverlust vom Heizkreisverteiler bis zum heizungstechnischen Anschluss der Mieteinheit von ca. 57,878 MWh.

Auf dieser Datengrundlage lässt sich dieser Verlust ökonomisch mit netto 2.686,14 € und ökologisch mit 8,68 Tonnen CO₂ bewerten.

Da keine Berechnungsdaten zu den Rohrleitungsverlusten der Planung vorliegen, kann nicht bewertet werden, ob diese Verlustleistung aus errichtungstechnischer Sicht in Ordnung ist oder hier ein Fehler im Verteilnetz der Heizungsanlage vorliegt. Es empfiehlt sich dies zu prüfen und gegebenenfalls nachzubessern.

Zu den Zählern liegen leider keine Daten zu den Messtoleranzen vor. Daher ist eine Beurteilung des Verlustes im Bezug auf potentielle Messfehler nicht möglich. Unabhängig davon kann diese Differenz jedoch auch durch den sogenannten Schlupf erklärt werden. Wärmemengenzähler beginnen erst ab einem bestimmten Massestrom zu messen. Wenn nun mehrere Mieteinheiten eine geringe Menge an Energie benötigen, reicht der Massenstrom der Mieteinheitenszähler für die Zählung noch nicht aus, am Hauptstrang wird jedoch die kumulierte Wärmemenge abgenommen. Dadurch kann es passieren, dass der Hauptzähler einen höheren Verbrauch anzeigt, als die Mieteinheitenszähler.

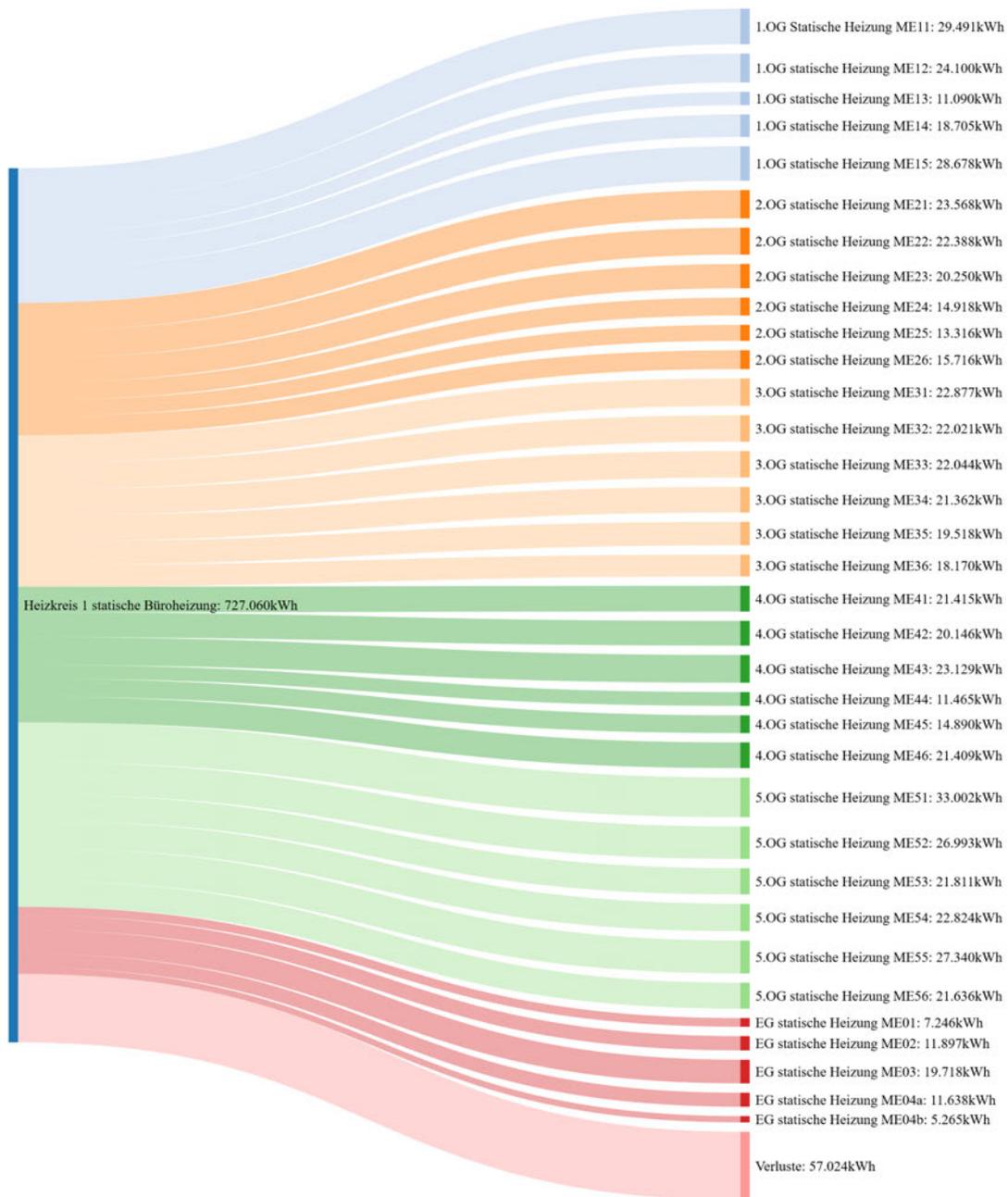


Abbildung 5.3: Sankey-Diagramm Heizkreis 1 zu Mieteinheiten - Vergleichszeitraum 1

Kälteenergieverbrauch ohne Serverräume

Eine analoge Berechnung wie im Abschnitt 5.1.1 für den Heizenergieverbrauch kann für den Kälteenergieverbrauch angesetzt werden. Dafür werden statt der Gradtagszahlen die sogenannten Kühlungsgradtage, oder Kühlungsgradstunden verwendet. Da die Wirksamkeit dieses Verfahren für die Hochrechnung des Energieverbrauchs nicht durch wissenschaftliche Quellen belegbar ist, wird diese Methode zur Berechnung in dieser Arbeit nicht angewandt. Es empfiehlt sich hierfür eine empirische Studie durchzuführen.

Des Weiteren ist das Verhältniss von Kühlgradtagen des gesamten Jahres (08.07.2020 - 09.07.2021) zu dem 310 Tagetrend (02.09.2020 - 09.07.2021) mit einem Faktor von 2,465 so hoch, dass davon auszugehen ist, dass die Hauptverbräuche für diese Anlage noch nicht aufgezeichnet wurden. Dieser Faktor verdeutlicht, dass der Kältebedarf in den nicht erfassten knapp zwei Monaten deutlich höher ist, als in den erfassten ca. 10 Monaten. Bei diesem hohen Faktor wird davon ausgegangen, dass eine Hochrechnung zu ungenau für eine Bewertung der Verbräuche ist.

Kältekreis 1 & 2 Kühlsegel Kühldecken - Mieteinheiten

Analog zu 5.1.1 wird die gleiche Analyse hier angestellt. Dabei stellt sich heraus, dass vom Hauptzähler zu den Mieteinheitszählern im 310-tägigen Vergleich ein Energiegewinn von 1,3 MWh und im 190-tägigen Vergleich ein Energiegewinn von 833 kWh zu verzeichnen ist. Dieses Phänomen ist lediglich durch Messfehler zu erklären. Die in die Kalkulation eingegebenen Daten wurden mehrfach überprüft und eine zweite Kalkulation zur Validierung wurde erstellt. Alle Kalkulationen kommen auf das gleiche Ergebnis. Eine weitere mögliche Erklärung könnten Messtoleranzen sein, die in beiden Fällen in die extreme ausgeschlagen sind.

Dies sollte weiterhin beobachtet und gegebenenfalls genauer untersucht werden.

5.1.2 Nutzeranalyse

Für die Nutzeranalyse werden zunächst die Zählerwerte über den komplett gemonitor-ten Zeitraum der einzelnen Mieteinheiten den Mietern zugeordnet. Daraufhin wird dieser Wert auf einen Basiswert skaliert, um einen Vergleich ziehen zu können. Dafür werden die Verbräuche über den gemonitor-ten Zeitraum in Wh/m² angegeben. Die Mietflächen der

einzelnen Mieter sind in Tabelle 5.4 zu finden. Die energetische Betrachtung der Mieteinheiten im Zeitraum vom 02.09.2020 bis 09.07.2021 ist in Tabelle 5.4 pro Mieteinheit, in den Tabellen 5.5 und 5.7 als Matrix pro Mieteinheit und Stockwerk sowie in den Tabellen 5.6 und 5.8 pro Mieter aufgelistet. In Tabelle 5.4 wurden die höchsten und niedrigsten drei Verbräuche in rot und grün hervorgehoben. Der Kurzname der Mieteinheit wird mit ME Stockwerk Mieteinheit abgekürzt. Das heißt ME 35 ist die fünfte Mieteinheit im dritten Stock. Zusätzlich wurden in Tabelle 4.1 den Mieteinheiten noch die jeweiligen Mieter zugeordnet. So ist zu erkennen, dass Mieter 1 den Hauptanteil seiner Mietflächen im 3. und 4.OG, Mieter 2 im EG und 1.OG, Mieter 3 im 5.OG und Mieter 4 im 2.OG hat.

Vergleich des Heizenergieverbrauchs der Mieter

Um die Heizenergieverbräuche der einzelnen Mieteinheiten untereinander zu vergleichen, wurde nachfolgende in Tabelle 5.5 dargestellte Matrix erstellt. In dieser Matrix werden die übereinanderliegenden Mieteinheiten gegenübergestellt und nach Energieverbrauch farblich hinterlegt, rot stellt hierbei den schlechtesten und grün den besten Wert der übereinanderliegenden Mieteinheiten dar. Diese Methode der Auswertung wurde gewählt, da die übereinander liegenden Mieteinheiten die gleiche Ausrichtung der Fassadenseiten haben. Die einzige Ausnahme hierfür bildet die Mieteinheiten eins im EG, da dieser die Fassadenseite der Gebäudefront fehlt, denn hier liegt die Allgemeinfläche Foyer. Auf dieser Basis wird vermutet, dass die Energieverbräuche der übereinanderliegenden Stockwerke pro Quadratmeter im Vergleichszeitraum ähnlich sind. Es wird weiter vermutet, dass der Energieverbrauch pro Quadratmeter vom EG bis ins vierte OG sinkt und im fünften OG ansteigt. Der insgesamt größte Energieverbrauch wird im fünften OG erwartet, da es sich hier, aufgrund der großen Flächenanteile von Außenwänden und Dach, um das Stockwerk mit den größten Transmissionswärmeverlusten nach außen handelt.

In Tabelle 5.5 ist zu erkennen, dass der Heizenergieverbrauch im EG, mit Ausnahme der Mieteinheit vier, am niedrigsten ist. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass der Mieter 1 die Mietbereiche ME03, ME04a, ME04b im EG und alle Mietbereiche im ersten OG erst zum 01.03.2021 tatsächlich bezogen hat. Die Flächen wurden während dieser Zeit mit dem gleichem Basissollwert und Raumautomationsschaltung wie der Rest des Gebäudes beheizt. Da davon auszugehen ist, dass die Flächen dem entsprechend nicht betreten wurden, wird davon ausgegangen, dass die Raumautomation die Räumlichkeiten im Präcomfort Modus mit einem Totband von 4K um den Basissollwert betrieben

5 Auswertung der Monitoring Daten des Objekts

	HEV ₃₁₀ [$\frac{kWh}{m^2}$]	KEV ₃₁₀ [$\frac{kWh}{m^2}$]	TWK ₃₁₀ [$\frac{m^3}{100 \cdot m^2}$]	Mietfläche [m^2]	Mieter
ME01	25,218	2,012	n.v.	287,34	Mieter 1
ME02	46,413	3,589	8,157	256,33	Mieter 1
ME03	32,476	3,744	10,671	607,15	Mieter 2
ME04a	35,929	3,535	3,348	323,92	Mieter 2
ME04b	15,543	1,730	0,426	338,73	Mieter 2
ME11	69,995	2,305	0,641	421,33	Mieter 2
ME12	52,698	0,883	0,301	457,32	Mieter 2
ME13	44,586	4,354	0,511	248,73	Mieter 2
ME14	46,893	1,306	0,244	398,89	Mieter 2
ME15	47,600	3,188	1,339	602,48	Mieter 2
ME21	57,670	2,569	6,423	408,67	Mieter 4
ME22	59,238	8,435	3,931	377,93	Mieter 1
ME23	49,529	1,918	5,980	408,85	Mieter 4
ME24	37,399	2,813	3,757	398,89	Mieter 4
ME25	31,526	5,012	0,109	422,38	Mieter 4
ME26	38,346	8,286	4,038	409,85	Mieter 4
ME31	55,979	7,074	3,902	408,67	Mieter 1
ME32	58,267	3,556	3,868	377,93	Mieter 1
ME33	53,917	2,996	4,099	408,85	Mieter 1
ME34	53,554	5,413	1,296	398,89	Mieter 1
ME35	46,210	8,499	n.v.	422,38	Mieter 1
ME36	44,333	0,276	3,963	409,85	Mieter 1
ME41	52,402	4,608	7,697	408,67	Mieter 1
ME42	53,306	2,773	6,403	377,93	Mieter 1
ME43	56,571	2,314	3,911	408,85	Mieter 1
ME44	28,742	6,365	4,588	398,89	Mieter 1
ME45	35,253	4,943	1,343	422,38	Mieter 1
ME46	52,236	5,797	7,330	409,85	Mieter 1
ME51	88,314	2,523	1,292	373,69	Mieter 3
ME52	75,893	1,442	2,520	355,67	Mieter 3
ME53	60,887	2,708	4,372	358,22	Mieter 3
ME54	64,560	2,421	2,380	353,53	Mieter 3
ME55	72,516	2,862	n.v.	377,02	Mieter 3
ME56	60,399	2,920	4,362	358,22	Mieter 3

Tabelle 5.4: Energetische Betrachtung der Mieteinheiten

	1.OG	2.OG	3.OG	4.OG	5.OG	EG
MEX1	70,754 $\frac{kWh}{m^2 \cdot a}$	58,296 $\frac{kWh}{m^2 \cdot a}$	56,587 $\frac{kWh}{m^2 \cdot a}$	52,970 $\frac{kWh}{m^2 \cdot a}$	89,272 $\frac{kWh}{m^2 \cdot a}$	25,491 $\frac{kWh}{m^2 \cdot a}$
MEX2	53,270 $\frac{kWh}{m^2 \cdot a}$	59,881 $\frac{kWh}{m^2 \cdot a}$	58,900 $\frac{kWh}{m^2 \cdot a}$	53,885 $\frac{kWh}{m^2 \cdot a}$	76,717 $\frac{kWh}{m^2 \cdot a}$	46,916 $\frac{kWh}{m^2 \cdot a}$
MEX3	45,070 $\frac{kWh}{m^2 \cdot a}$	50,067 $\frac{kWh}{m^2 \cdot a}$	54,502 $\frac{kWh}{m^2 \cdot a}$	57,185 $\frac{kWh}{m^2 \cdot a}$	61,548 $\frac{kWh}{m^2 \cdot a}$	32,829 $\frac{kWh}{m^2 \cdot a}$
MEX4	47,401 $\frac{kWh}{m^2 \cdot a}$	37,805 $\frac{kWh}{m^2 \cdot a}$	54,135 $\frac{kWh}{m^2 \cdot a}$	29,054 $\frac{kWh}{m^2 \cdot a}$	65,261 $\frac{kWh}{m^2 \cdot a}$	36,318 $\frac{kWh}{m^2 \cdot a}$
MEX5/4b	48,116 $\frac{kWh}{m^2 \cdot a}$	31,868 $\frac{kWh}{m^2 \cdot a}$	46,711 $\frac{kWh}{m^2 \cdot a}$	35,635 $\frac{kWh}{m^2 \cdot a}$	73,303 $\frac{kWh}{m^2 \cdot a}$	15,712 $\frac{kWh}{m^2 \cdot a}$
MEX6	n.v.	38,762 $\frac{kWh}{m^2 \cdot a}$	44,814 $\frac{kWh}{m^2 \cdot a}$	52,803 $\frac{kWh}{m^2 \cdot a}$	61,054 $\frac{kWh}{m^2 \cdot a}$	n.v.

Tabelle 5.5: HEV Matrix

hat. Dies sollte für einen künftigen Leerstand anders geregelt werden. Eine Lösung hierfür wäre beispielsweise ein Schalter für Leerstandsbetrieb in der MBE. Dann können die Raumtemperaturen erheblich heruntergefahren und somit Energie und Geld eingespart werden.

Betrachtet man die Energieaufwendung vom 02.09.2020 bis zum 31.12.2020 in den genannten Flächen, ergibt sich ein Gesamtheizenergieverbrauch von 62,774 MWh. Dieser muss nun noch auf die primärseitige Leistung umgesetzt werden:

$$HEV_{\text{primaer}} = \frac{HEV_{\text{sekundaer}}}{\eta_{\text{Waermetauscher}}} = \frac{62,774 \text{ MWh}}{0,988} = 63,536 \text{ MWh} \quad (5.27)$$

Aus der Berechnung 5.27 und den in Abschnitt 5.1.1 genannten Daten ergeben sich Kosten von netto 2.948,71 € und 9,530 Tonnen CO₂. Während des Winterbetriebs wurde auf ausdrücklichen Wunsch des Bauherrn ein Raumtemperatursollwert von 24°C für das gesamte Gebäude eingestellt. Ausgehend von den zuvor getroffenen Annahmen liegt der Schwellwert zum Einschalten der Heizung bei 22°C. Dieser Schwellwert errechnet sich wie folgt:

$$T_{\text{Schwellwert-heizen}} = T_{\text{Raumtemperatursollwert}} - 0,5 \cdot T_{\text{Hysterese}} = 24^\circ\text{C} - 0,5 \cdot 4\text{K} \quad (5.28)$$

$$T_{\text{Schwellwert-heizen}} = 22^\circ\text{C}$$

Betrachtet man die Empfehlung des Umweltbundesamts die Wohnraumtemperatur bei Abwesenheit von bis zu zwei Tagen auf 15°C und bei längeren Abwesenheiten auf 12°C abzusenken [23] und überträgt diese auf Teilleerstände in Gewerbeimmobilien, kann man wie in 5.1.1 beschrieben davon ausgehen, dass eine Absenkung der Raumtemperatur um 1 K ca. 6% Energieeinsparung bedeutet. Daraus ergibt sich eine prozentuale Energieeinsparung von 60%. Diese Energieeinsparung lässt sich mit Berechnung 5.30 energetisch bewerten.

$$HEV_{\text{Leerstand-opt}} = HEV_{\text{Leerstand-tatsaechlich}} \cdot (1 - \text{Abweichung}) \quad (5.29)$$

$$HEV_{\text{Leerstand-opt}} = 63,536 \text{ MWh} \cdot (1 - 0,6) = 25,411 \text{ MWh} \quad (5.30)$$

Aus Gleichung 5.30 ergibt sich ein energieoptimierter Heizenergieverbrauch der Leerstandsflächen von 25,411 MWh. Das bedeutet im Umkehrschluss ein Einsparpotential von 38,122 MWh im Zeitraum vom 02.09.2020 bis 31.12.2021. Dies lässt sich monetär mit netto 1.769,22 € und ökologisch 2,516 Tonnen CO_{2eq} bewerten. Translationswärmeverluste der benachbarten Mieteinheiten wurden mangels Daten nicht berücksichtigt.

Aufgrund der im Vergleich sehr hohen Energieverbräuche pro m^2 und Jahr im fünften OG ist es empfehlenswert die Dämmung der Dachflächen zu betrachten und diese gegebenenfalls nach zu dämmen. Die Daten zur Isolation der Gebäudeaußenhaut wurden angefragt, liegen zur Erstellung dieser Arbeit leider noch nicht vor. So ist eine Bewertung der Umsetzbarkeit dieser Maßnahme nicht möglich. Es wird dem Gebäudeeigentümer jedoch dringend empfohlen die U-Werte des Dachs zu prüfen und gegebenenfalls nach zu dämmen.

Die Mieteinheiten werden wie im Kapitel 4.1.2 durch sechs separate Steigstränge versorgt. Auffällig ist hierbei, dass die bezogene Wärmemenge in kWh pro m^2 und Jahr über die Stockwerke stark voneinander abweichen. Diese Abweichung weist über die Mieteinheiten keine Regelmäßigkeit auf. Wirft man nun einen Blick auf die Planung, fällt auf, dass die Heizungsanlage im Stockwerk im Tichelmannsystem verlegt ist, wodurch ein hydraulischer Abgleich innerhalb der Mieteinheit nicht notwendig ist. Die einzelnen Stränge der Heizungsanlage sind durch sogenannte Strangreguliertventile hydraulisch abgeglichen. Die einzelnen Abgänge zu den Mieteinheiten innerhalb eines Strangs sind jedoch nicht hydraulisch abgeglichen. Es empfiehlt sich nun zu überprüfen, ob ein hydraulischer Abgleich der Stränge untereinander notwendig ist und ob die Anschlussventile der Heizkörper voll

	Verbrauch	Abweichung vom Durchschnitt
Mieter 1	49,009 $\frac{kWh}{m^2 \cdot a}$	-3,15 %
Mieter 2	44,224 $\frac{kWh}{m^2 \cdot a}$	-14,31 %
Mieter 3	71,345 $\frac{kWh}{m^2 \cdot a}$	29,15 %
Mieter 4	43,307 $\frac{kWh}{m^2 \cdot a}$	-16,73 %

Tabelle 5.6: HEV pro Mieter

aufgedreht sind, da diese Bedingung für ein funktionierendes Tichelmann System erfüllt sein muss.

Der Vergleich der Mieter selbst ist in Tabelle 5.6 dargestellt. Hierbei ist zu erkennen, dass Mieter 3, welcher das gesamte fünfte OG gemietet hat, den im Vergleich höchsten Energieverbrauch pro Quadratmeter aufweist. Der errechnete Durchschnitt aller Mieteinheiten liegt bei $50,758 \frac{kWh}{m^2 \cdot a}$. Von diesem Durchschnitt weicht Mieter 3 um 29,15% ab, während alle anderen Mieter diesen Wert unterschreiten. Dies unterstützt die zuvor aufgestellte These, dass in diesem Gebäude eine Nachdämmung der Dachhaut zu überprüfen ist. Ebenso ist zu erkennen, dass die restlichen Mieter, welche sich über mehrere Stockwerke verteilen verbrauchstechnisch nah zusammen liegen.

Da der Basissollwert von der MBE vorgegeben wird und der Enduser diese Temperatur um maximal 3 K ändern kann, beträgt die maximale Abweichung vom Normalverbrauch 42%. Ausgehend davon, dass der durchschnittliche Verbrauch $50,758 \frac{kWh}{m^2 \cdot a}$ liegt, erhält man als minimalen HEV $29,440 \frac{kWh}{m^2 \cdot a}$ und als maximalen HEV $72,076 \frac{kWh}{m^2 \cdot a}$. Das bedeutet, dass die Verbräuche, welche unter dem Minimum und über dem Maximum liegen bei einer technisch einwandfreien Anlage nicht möglich sein sollten. Auch dies ist ein Indiz dafür, dass Bereiche des Gebäudes mit Energie unterversorgt sind.

Vergleich des Kühlenergieverbrauchs der Mieter

Analog zum Vergleich der Mieter im Abschnitt 5.1.2 wird im Folgenden ein Vergleich des Kühlenergieverbrauchs der Mieter erstellt. Anders als im Abschnitt 5.1.2 wird hier der

	1.OG	2.OG	3.OG	4.OG	5.OG	EG
MEX1	2,305 $\frac{kWh}{m^2}$	2,569 $\frac{kWh}{m^2}$	7,074 $\frac{kWh}{m^2}$	4,608 $\frac{kWh}{m^2}$	2,523 $\frac{kWh}{m^2}$	2,012 $\frac{kWh}{m^2}$
MEX2	0,883 $\frac{kWh}{m^2}$	8,435 $\frac{kWh}{m^2}$	3,556 $\frac{kWh}{m^2}$	2,773 $\frac{kWh}{m^2}$	1,442 $\frac{kWh}{m^2}$	3,589 $\frac{kWh}{m^2}$
MEX3	4,354 $\frac{kWh}{m^2}$	1,918 $\frac{kWh}{m^2}$	2,996 $\frac{kWh}{m^2}$	2,314 $\frac{kWh}{m^2}$	2,708 $\frac{kWh}{m^2}$	3,744 $\frac{kWh}{m^2}$
MEX4	1,306 $\frac{kWh}{m^2}$	2,813 $\frac{kWh}{m^2}$	5,413 $\frac{kWh}{m^2}$	6,365 $\frac{kWh}{m^2}$	2,421 $\frac{kWh}{m^2}$	3,535 $\frac{kWh}{m^2}$
MEX5/4b	3,188 $\frac{kWh}{m^2}$	5,012 $\frac{kWh}{m^2}$	8,499 $\frac{kWh}{m^2}$	4,943 $\frac{kWh}{m^2}$	2,862 $\frac{kWh}{m^2}$	1,730 $\frac{kWh}{m^2}$
MEX6		8,286 $\frac{kWh}{m^2}$	0,276 $\frac{kWh}{m^2}$	5,797 $\frac{kWh}{m^2}$	2,920 $\frac{kWh}{m^2}$	

Tabelle 5.7: KEV Matrix

reale Kühlenergiebedarf für den Betrachtungszeitraum vom 02.09.2021 - 09.07.2021 aus den in Abschnitt 5.1.1 genannten Gründen dargestellt.

Die Gegenüberstellung der einzelnen Stockwerke des gleichen Mietbereichs ist in der Matrix in Tabelle 5.7 dargestellt. Hierbei wird ebenfalls angenommen, dass der Kühlenergieverbrauch im fünften OG am höchsten ist, da die Außenfläche im Vergleich zur Mietfläche am größten ist. Daher sollte zum einen der Transmissionsverlust der Kühlenergie und zudem die absolute globale Sonneneinstrahlung am höchsten sein. Anders als im Abschnitt 5.1.2 wird jedoch angenommen, dass der Kühlenergiebedarf von den oberen Stockwerken nach unten hin abnimmt. Diese Vermutung begründet sich zum einen in der größeren Verschattung der unteren Geschosse durch benachbarte Gebäude und zum anderen durch des thermischen Verhaltens von Luft, welche mit sinkender Temperatur an Dichte und damit an Gewicht zunimmt und dementsprechend nach unten sinkt.

Bei Betrachtung der Ergebnisse der Tabelle 5.7 fällt auf, dass der höchste Kälteverbrauch nicht im 5.OG vorliegt. Der durchschnittliche Kälteverbrauch im 5.OG liegt mit $2,484 \frac{kWh}{m^2}$ sogar ca. 33% unter dem Gebäudedurchschnittsverbrauch von $3,707 \frac{kWh}{m^2}$. Dies kann ein Hinweis für ein Problem mit dem hydraulischen Abgleich unter den Stockwerken sein. Ebenso kann dies ein Indiz für Luft im Kälteverteilsystem sein. Dies war bereits zum Zeitpunkt der Inbetriebnahme im August 2020 ein Problem und scheint weiterhin zu bestehen. Dieser Umstand sollte unbedingt genauer untersucht werden, damit ein ordnungsgemäßer Betrieb der Anlage gewährleistet werden kann. Weiter ist auffällig, dass der Verbrauch der anderen Geschosse entgegen der Annahme nicht von den oberen Geschossen nach unten hin sinkt (mit Ausnahme von MEX4), sondern scheinbar willkürlich variiert. Ein möglicher Grund hierfür ist, dass diverse Zonenabsperrentile mechanisch

	Verbrauch	Abweichung vom Durchschnitt
Mieter 1	4,656 $\frac{kWh}{m^2}$	20,38%
Mieter 2	2,620 $\frac{kWh}{m^2}$	-41,49%
Mieter 3	2,484 $\frac{kWh}{m^2}$	-49,21%
Mieter 4	4,134 $\frac{kWh}{m^2}$	10,33%

Tabelle 5.8: KEV pro Mieter

klemmen und dadurch nicht auf oder zu fahren. Dies würde beispielsweise die äußerst geringen Verbrauchswerte von $0,276 \frac{kWh}{m^2}$ in der Mieteinheit ME36 und $0,883 \frac{kWh}{m^2}$ in der Mieteinheit ME12 erklären.

Der Verbrauch der Mieter selbst ist in Tabelle 5.8 dargestellt. Auch hier zeigen sich mit bis zu 49,21% erhebliche Abweichungen vom Durchschnitt. Besonders auffällig ist, dass Mieter 1 mit dem Großteil der Mietflächen im dritten und vierten OG die höchsten Kühlenergieverbräuche hat.

Analyse von Zeitreihen

Eine Analyse von Zeitreihen ist derzeit noch nicht möglich, da hierfür Daten über mehrere Jahre gesammelt werden müssen.

Prognose von Verbrauchsanteilen bei Nutzerwechsel

Da derzeit kein Nutzerwechsel geplant ist, wird diese Analyse nicht durchgeführt.

5.2 Anlagenmonitoring

Neben der rein energetischen und funktionellen Betrachtung werden die Anlagen und Anlagenfunktionen auch auf ihre in Abbildung 5.4 dargestellten Energieeffizienzklassen beurteilt.

5.5 GA-Effizienzklassen

Es sind vier verschiedene GA-Effizienzklassen (A, B, C, D) der Funktionen sowohl für Nicht-Wohngebäude als auch für Wohngebäude definiert.

- Klasse D entspricht GA-Systemen, die nicht energieeffizient sind. Gebäude mit derartigen Systemen sind zu modernisieren. Neue Gebäude dürfen nicht mit derartigen Systemen gebaut werden.
- Klasse C entspricht Standard-GA-Systemen.
- Klasse B entspricht erweiterten GA-Systemen und einigen speziellen TGM-Funktionen.
- Klasse A entspricht hoch energieeffizienten GA-Systemen und TGM-Funktionen.

Die GA-Umsetzung wird als Klasse D kategorisiert: wenn die für Klasse C erforderlichen Mindestfunktionen nicht umgesetzt sind.

Abbildung 5.4: Energieeffizienzklassen nach DIN EN 15232-1 [11]

5.2.1 Wärmeerzeugungsanlage

Kennwerte/Grafische Methode - Vor- und Rücklauftemperaturen der Heizkreise

Wie im Kapitel 4 beschrieben, liegen für die Wärmeerzeugungsanlage kaum Daten vor. Dennoch ist es möglich die Vor- und Rücklauftemperaturen durch die Wärmemengenzähler an den einzelnen Heizkreisen auszulesen. Für die im Folgenden analysierten Daten ist anzumerken, dass für den Zeitraum 01.07.2021 03:15-14:45 keine Daten vorliegen. Daher wird dieser Zeitraum in der Analyse nicht weiter thematisiert. In Abbildung 5.5 ist die Vor- und Rücklauftemperatur des Heizkreis 1 sowie die Außentemperatur dargestellt. Dabei fällt auf, dass die Vorlauftemperatur relativ konstant bei den in der Planung vorgesehenen 65°C liegt. Die Planung spiegelt jedoch den Auslegungsfall wieder, welcher von einer Außentemperatur von -16°C ausgeht. Daher sollte die Vorlauftemperatur des Heizkreis 1 - Unterflurkonvektoren Büroeinheiten variabel an die Außentemperatur angepasst und damit witterungsgeführt betrieben werden. Weiter kann festgestellt werden, dass am 30.06.2021 und am 01.07.2021 die Heizungsanlage angeschaltet war. Dieses Verhalten der Heizungsanlage kann so in Ordnung sein, wenn ein Sommerheizbetrieb gewollt ist, da an diesen beiden Tagen die Heizgrenztemperatur mit $14,8^{\circ}\text{C}$ und $14,3^{\circ}\text{C}$ im Tagesmittel unterschritten wurde. Es sollte mit dem Betreiber abgestimmt werden, ob ein Sommerheizbetrieb wirklich notwendig ist. Die darauf folgenden Tage zählen jedoch nicht mehr als Heiztage. Daher hätte die Heizungsanlage an diesen Tagen theoretisch abgeschaltet werden sollen. Betrachtet man nun den weiteren Verlauf der Vorlauftemperatur ist sowohl in Abbildung 5.5, als auch in Abbildung 5.6 festzustellen, dass die Heizungsanlage an den wärmeren Tagen abgeschaltet wurde. Dies geschah jedoch nur tagsüber, Abends

wurde die Heizungsanlage wieder eingeschaltet. Dieses Verhalten kann aus energetischer Sicht zu einem erheblichem Energieverbrauch führen, da es passieren kann, dass tagsüber gekühlt und Nachts geheizt wird. Dieses taktende Verhalten könnte beispielsweise durch eine Anpassung des Heizgrenzwertes erfolgen. Dieser sollte nicht den akuten Wert abbilden, sondern eine gemittelte Temperatur der letzten 24h.

Des Weiteren kann in Abbildung 5.5 festgestellt werden, dass die Rücklauftemperatur des Heizkreises eins um ca. 10-13°C über der Soll-Rücklauftemperatur liegt. Dies kann unter anderem zu Rügen durch den Fernwärmenetzbetreiber führen und könnte durch die Einführung der witterungsgeführten Vorlauftemperatur im Heizkreis 1 behoben werden.

In Abbildung 5.6 ist zu erkennen, dass die Temperatur konstant über der mit 70°C geforderten Systemtemperatur liegt. Ebenso kann festgestellt werden, dass der Rücklauf dieses Heizkreises mit ca. 25°C im Normalbetrieb ca. 10°C unter der geforderten Rücklauftemperatur liegt. Dies stellt im aktuellen Betrieb der Übergangszeit kein Problem dar, weist jedoch darauf hin, dass die Anlage nicht gemäß der Planung betrieben wird. Es ist ratsam das Verhalten dieses Heizkreises in den Wintermonaten genauer zu beobachten, um feststellen zu können, ob hier die maximale Leistung des Auslegungsfalls erreicht werden und somit die Luft auf eine angemessene Temperatur erhitzt werden kann. Betrachtet man nun den Aufbau der Heizregister in Abbildung 5.9 stellt man fest, dass jedes RLT Gerät über eine eigene Pumpe und ein 3 Wege Mischventil verfügt. Daher sollte auch der Massestrom der Heizkreise und der Pumpen an den Erhitzerregistern selbst geprüft werden, da gemäß Gleichung 5.31 durch eine Erhöhung des Massenstroms bei gleichbleibender Heizleistung die Temperaturspreizung sinkt und so die Systemtemperaturen erreicht werden könnten.

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta\theta \quad (5.31)$$

Bei den Heizkreisen drei und vier in Abbildung 5.7 und 5.8 kann festgestellt werden, dass die Vorlauftemperaturen augenscheinlich außentemperaturgeführt eingestellt wird. Es ist jedoch auch festzustellen, dass die Vorlauftemperaturen zum Teil unter den vom Planer vorgegebenen Rücklauftemperaturen liegen. Weiter fällt auf, dass die Rücklauftemperaturen teilweise über den Vorlauftemperaturen liegen. Dies ist durch einen hohen Temperatureintrag von außen zu erklären und deutet darauf hin, dass dem Raum in diesem Moment Energie entzogen wurde.

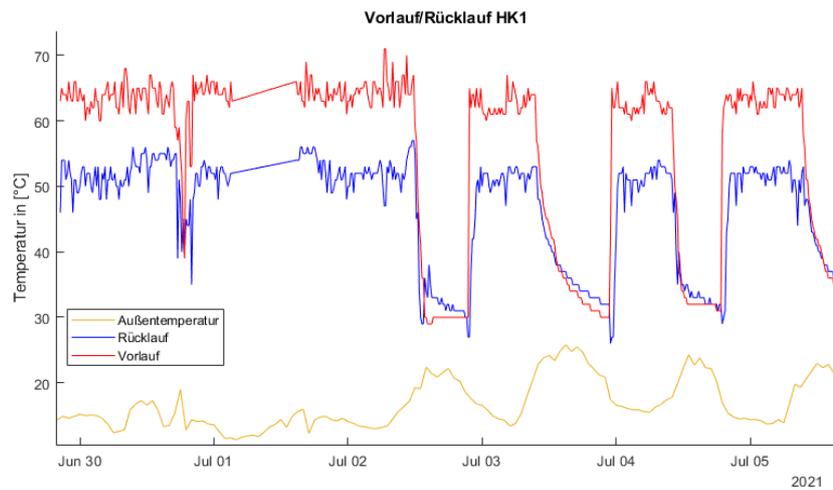


Abbildung 5.5: Vor- und Rücklauftemperatur Heizkreis 1

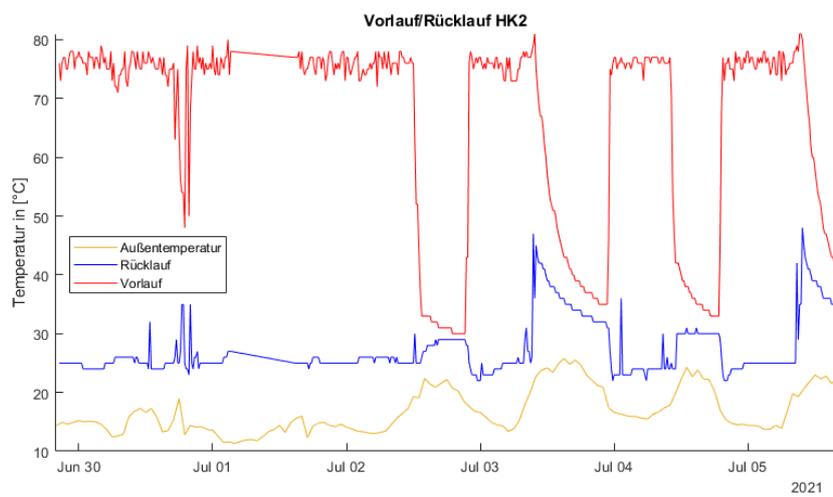


Abbildung 5.6: Vor- und Rücklauftemperatur Heizkreis 2

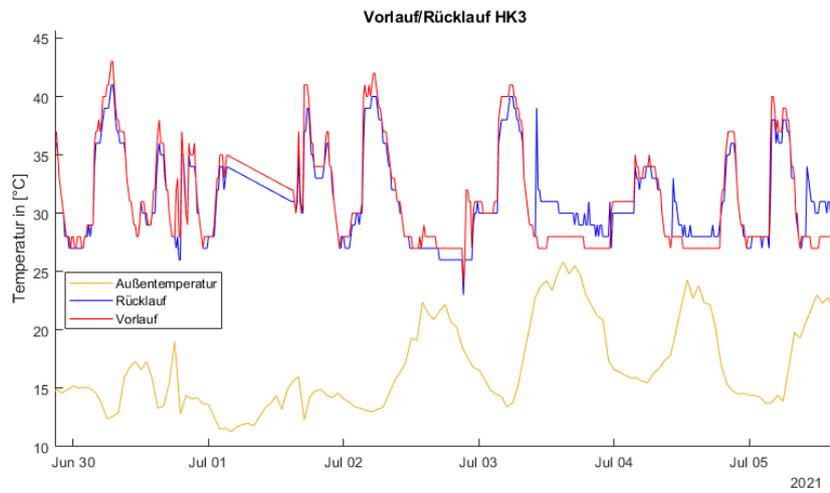


Abbildung 5.7: Vor- und Rücklauftemperatur Heizkreis 3

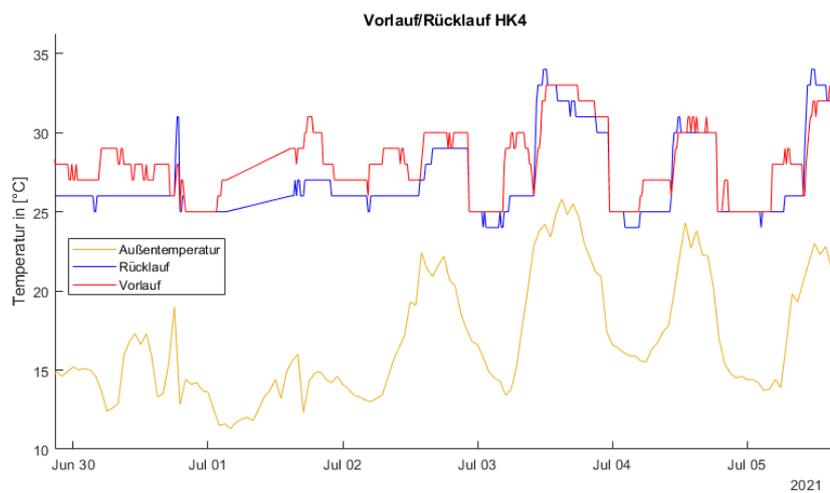


Abbildung 5.8: Vor- und Rücklauftemperatur Heizkreis 4

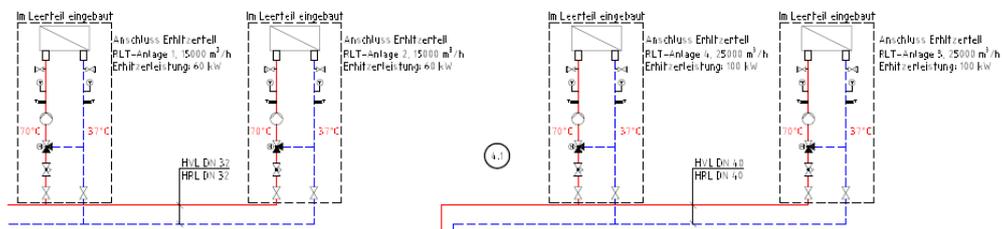


Abbildung 5.9: Erhitzerregister Schema

		Definition der Klassen							
		Wohngebäude				Nicht-Wohngebäude			
		D	C	B	A	D	C	B	A
Automatische Regelung									
1.2	Regelung der Übergabe für TABS (Heizbetrieb)								
	0	Keine automatische Regelung	x				x		
	1	Zentrale automatische Regelung	x	x			x	x	
	2	Erweiterte zentrale automatische Regelung	x	x	x		x	x	x
	3	Erweiterte zentrale automatische Regelung mit intermittierendem Betrieb und/oder Raumtemperatur-Rückführregelung	x	x	x	x	x	x	x
1.3	Regelung der Warmwassertemperatur im Verteilungsnetz (Vor- oder Rücklauf)								
	Vergleichbare Funktionen können auf die Regelung von Netzen für die elektrische Direktheizung angewendet werden								
	0	Keine automatische Regelung	x				x		
	1	Witterungsgeführte Regelung	x	x			x	x	
	2	Bedarfsabhängige Regelung	x	x	x	x	x	x	x

Abbildung 5.10: Energieeffizienzklassen - Regelung der Wassertemperatur [11]

Im Allgemeinen ist festzustellen, dass die Funktion des Anlagenteils zur Regelung der Warmwassertemperatur in den Heizkreisen eins und zwei nach DIN EN ISO 15232-1, wie in Abbildung 5.10 der GA-Effizienzkategorie D entspricht. Laut der Norm entspricht Energieeffizienzkategorie D einem GA-System, welches nicht energieeffizient ist und es ist untersagt Neubauten mit solchen Systemen zu errichten [11]. Daher ist dieser Umstand umgehend zu beheben und stellt einen gravierenden Normverstoß dar.

Überwachung und Fehlerdiagnose

1. Rücklauftemperaturüberwachung

Die Überwachung der Rücklauftemperatur kann sowohl dem Abschnitt 5.2.1 als auch diesem Abschnitt zugeordnet werden. In dieser Arbeit wurde die Rücklauftemperatur bereits im vorhergehenden Abschnitt diskutiert, daher findet hier keine weitere Analyse statt.

2. Überwachung des Wirkungsgrades

Eine Überwachung des tatsächlichen Wirkungsgrads des Plattenwärmetauschers der Fernwärmeübergabestation ist aufgrund der fehlenden Zählerdaten der Warmwasserbereitung nicht möglich. Dennoch kann eine Überprüfung der Genauigkeit der Messdaten durch einen Vergleich von Sekundär- zu Primärseite erfolgen. Hierbei ist davon auszugehen,

dass das Verhältnis $\frac{Q_{sekundaer}}{Q_{primaer}} < \eta_{Waermetauscher}$ ist. Im folgenden werden aufgrund der manuellen Zählerauslesung der Hauptzähler, die Verbräuche im Zeitraum von 18.09.2020 bis 25.06.2021 in den Gleichung 5.32 betrachtet.

$$\frac{\sum_{n=1}^4(Q_{HK,n})}{Q_{Hauptzaehler}} < \eta_{Waermetauscher} \quad (5.32)$$

$$\frac{717.120kWh + 1.016.362kWh + 78.091kWh + 27.802kWh}{1.819.590kWh} < 0,988$$

$$1,011 > 0,988$$

Daraus folgt:

$$\frac{\sum_{n=1}^4(Q_{HK,n})}{Q_{Hauptzaehler}} > \eta_{Waermetauscher} \quad (5.33)$$

Dementsprechend findet laut Messungen beim Wechsel von der Primär- auf die Sekundärseite ein Energiegewinn statt. Das ist unter den vor Ort gegebenen Bedingungen physikalisch nicht möglich, daher ist die Genauigkeit der Messeinrichtungen anzuzweifeln. Es ist hier von einer Mindestabweichung von $\frac{\sum_1^n(Q_{HK,n})}{Q_{Hauptzähler}} - \eta_{Wmetauscher} = 2,3\%$ auszugehen. Wobei die tatsächliche Abweichung aufgrund der fehlenden Wärmemenge der Warmwasserbereitung höher ausfallen dürfte. Dementsprechend sollten die Zähler auf ihre Genauigkeit geprüft werden.

5.2.2 Kälteanlage - Kaltwassersatz

Analog zur Heizungsanlage werden hier auch zunächst die Vor- und Rücklauftemperaturen gemessen und verglichen. Daraufhin wird das Taktverhalten analysiert und der Wirkungsgrad betrachtet.

Kennwerte/Grafische Methode - Vor- und Rücklauftemperaturen der Kältekreise

Analog zum Abschnitt 5.2.1 werden nachfolgend die Systemtemperaturen der einzelnen Kältekreise betrachtet. Aufgrund der schnellen Schwankungen und der Nähe von Vor-

und Rücklauf zueinander wurde in den Diagrammen 5.11 bis 5.14 zusätzlich noch die Temperaturspreizung zwischen Vor- und Rücklauf dargestellt.

In allen vier Abbildungen ist zu erkennen, dass die Temperaturen des Vorlaufs augenscheinlich ungeachtet der Außentemperaturen auf einem Niveau zwischen 16°C und 20°C gehalten wird. Bei genauerer Betrachtung der Daten fällt auf, dass die Temperatur halbständig taktet und nicht konstant auf einem Wert gehalten wird. Dieser Effekt wird durch das Messintervall von 30 Minuten und die Auflösung der Messdaten in 1K Schritten verstärkt.

Insgesamt ist zu bemängeln, dass in der Funktionsbeschreibung vom Gerätehersteller angegeben ist, dass eine konstante Kaltwassertemperatur zwischen 6°C und 15°C angefordert werden kann [15], der Sollwert für den Vorlauf durch die Anlagenautomation jedoch konstant mit 18°C vorgegeben wird. Das entspricht nicht den Herstellervorgaben und sollte umgehend behoben werden. Die 18°C wurden eingestellt um eine Taupunktbildung an den Kühldecken zu vermeiden. Diese Regelung sollte jedoch nicht durch eine erhöhte Vorlauftemperatur der Kältemaschine geschehen, sondern durch eine Rücklaufbeimischung durch das Dreiwegemischventil wie im Planausschnitt in Abbildung 4.7 dargestellt erfolgen. Um eine einwandfreie Anlagenfunktion zu gewährleisten wird dringend empfohlen die Vorlauftemperatur auf das vom Hersteller vorgegebene Temperaturband herabzusetzen. Es wurde versucht die Messergebnisse der Vor- und Rücklauftemperaturen durch den Trendlog der Kühlwasser- und Kaltwassertemperaturen zu validieren. Dies ist leider nicht möglich, da die Datenpunkte, welche diese Temperaturen laut Datenpunktliste in °C übermitteln sollen, unrealistische Temperaturen und Temperaturschwankungen anzeigt. Screenshots der Daten finden sich im digitalen Anhang im Ordner Bilder\KLTGA. Insgesamt ist die Korrektheit Datenpunktliste anzuzweifeln, da die Datenpunktkürzel zum Teil nicht mit den Datenpunktkürzeln in der Programmierung übereinstimmen und die Beschreibungen in der Programmierung nicht zu den tatsächlichen Werten passen. Siehe hierfür auch Screenshot im digitalen Anhang im Ordner Bilder\KLTGA.

Ebenso ist die Temperaturspreizung zwischen Vor- und Rücklauf interessant zu betrachten. In Abbildung 5.11 und 5.12 ist beispielsweise zu erkennen, dass eine Temperaturspreizung zwischen -1K und +4K erreicht wird, die Abnahme der Kälteenergie jedoch nicht konstant ist. Der Wert von -1K kann auf Messungenauigkeiten zurückgeführt werden. Betrachtet man nun die Abbildungen 5.15 bis 5.18 fällt auf, dass die Kälteenergie analog zu den Vor- und Rücklauftemperaturen taktet. Dies könnte auf die Sollwertvorgabe außerhalb des Temperaturbands des Herstellers zurückzuführen sein. Es empfiehlt sich

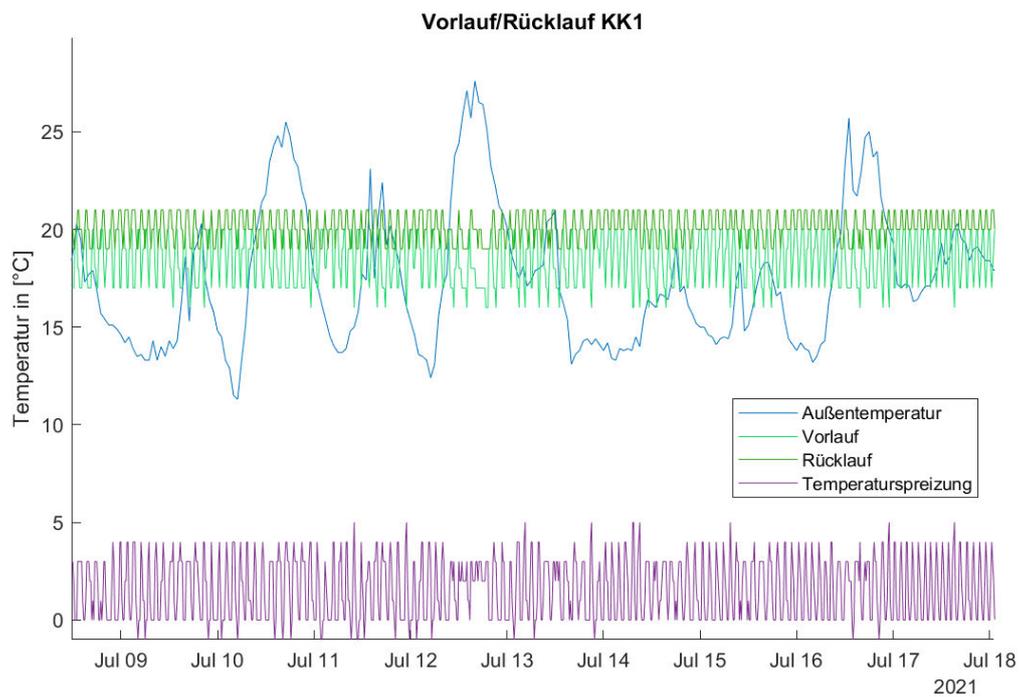


Abbildung 5.11: Vor- und Rücklauftemperatur Kältekreis 1

daher wie zuvor beschrieben die Solltemperatur auf einen Wert innerhalb des Bandes herabzusetzen und die Vorlauftemperatur nach dieser Maßnahme erneut zu beobachten.

Weiter zeigen die Grafiken 5.15 bis 5.18, dass alle Kältekreise Leistung abgerufen haben, obwohl die Außentemperaturen unterhalb der Sollwertvorgabe 18°C liegen. Dies bildet ein erstes Indiz dafür, dass keine Verriegelung der Kühlung in Abhängigkeit der Außentemperatur stattfindet. Dies wird in den folgenden Abschnitten noch genauer betrachtet.

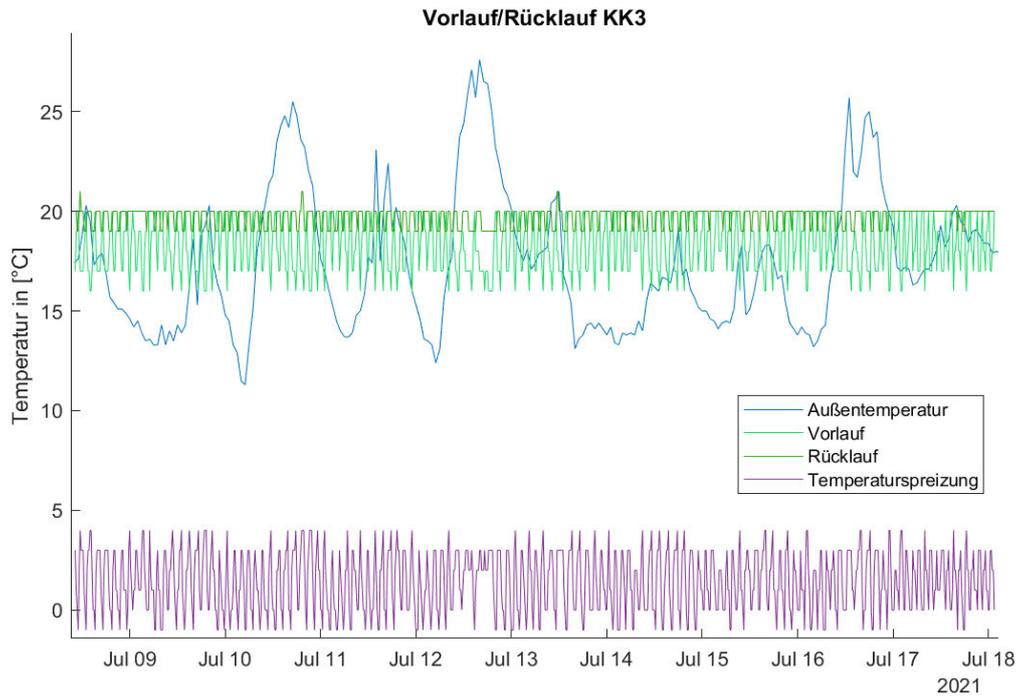


Abbildung 5.12: Vor- und Rücklauftemperatur Kältekreis 3

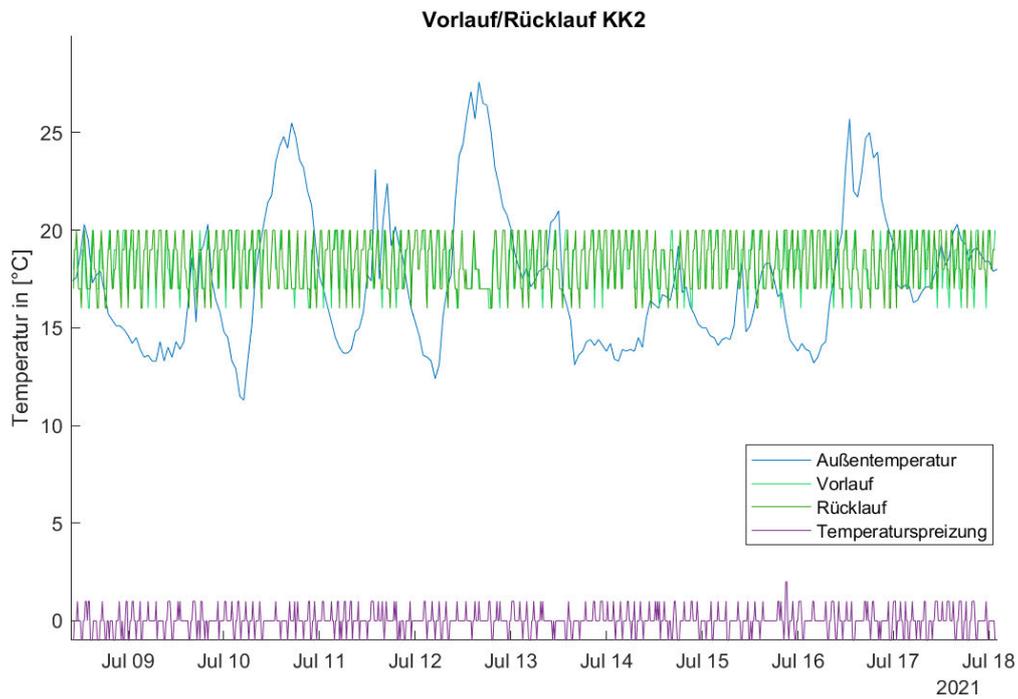


Abbildung 5.13: Vor- und Rücklauftemperatur Kältekreis 2

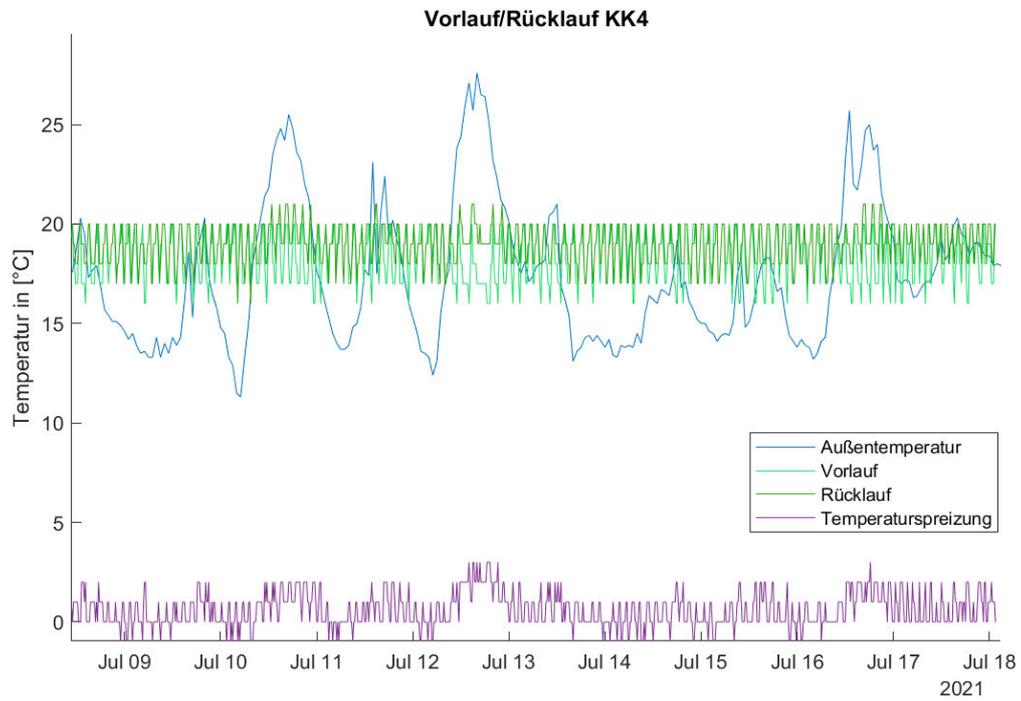


Abbildung 5.14: Vor- und Rücklauftemperatur Kältekreis 4

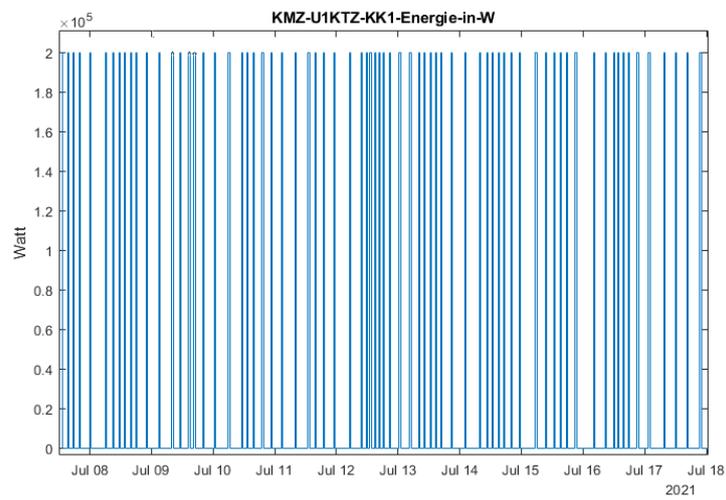


Abbildung 5.15: Kältekreis 1 Leistung in Watt

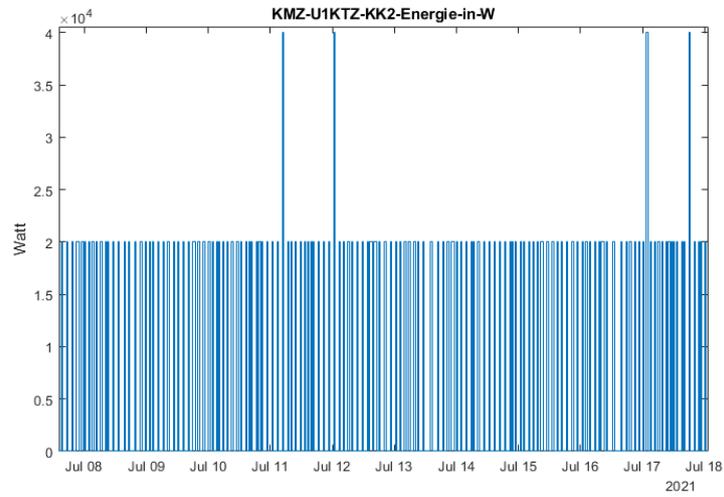


Abbildung 5.16: Kältekreis 2 Leistung in Watt

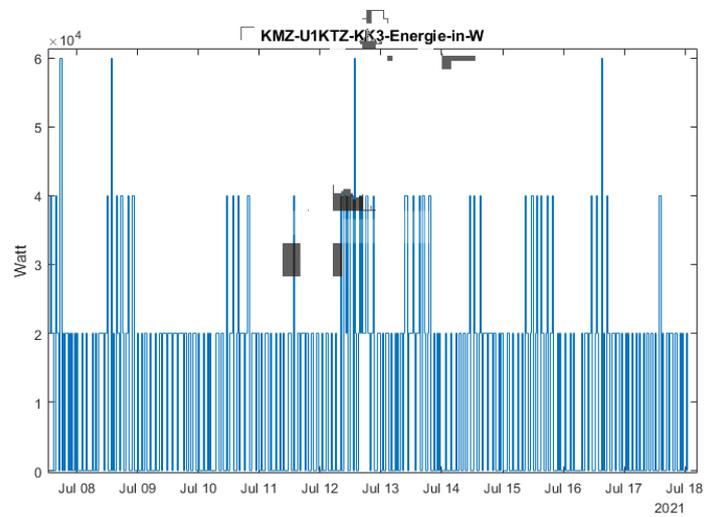


Abbildung 5.17: Kältekreis 3 Leistung in Watt

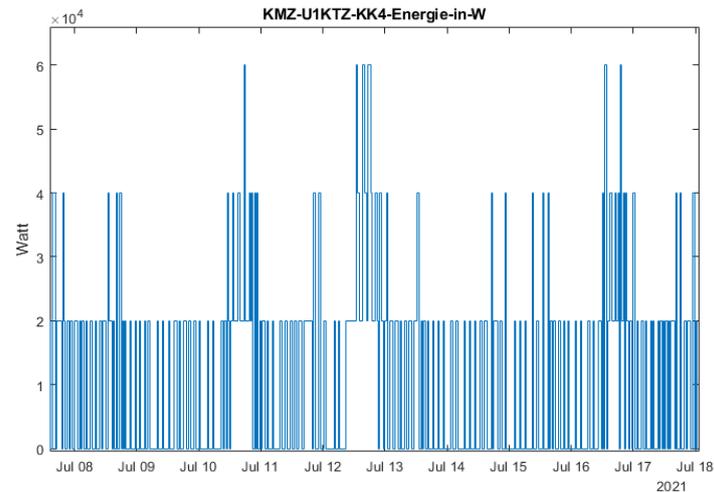


Abbildung 5.18: Kältekreis 4 Leistung in Watt

Überwachung und Fehlerdiagnose/Grafische Methoden - Taktverhalten der Kältemaschine

Im Nachfolgenden werden die Einschaltzeiten der Kältemaschine und der Verdichter betrachtet. Ebenso wird die Freigabe der Kältemaschine dargestellt. Beim Betrachten der Grafiken fällt auf, dass die Betriebsfreigabe der Kältemaschine nicht durch ein tagesabhängiges Zeitprogramm gesteuert wird. Ebenso kann kein Zusammenhang mit den Wochentagen festgestellt werden. Auch kann ein Zusammenhang mit der Außentemperatur nicht erkannt werden, da sowohl die mittlere Außentemperatur, als auch die minimalen und maximalen Temperaturen vom 17.07. auf 18.07. gestiegen sind. Ebenfalls wurden am 09.07. alle der zuvor genannten Werte um mindestens 3,1 K unterschritten und es gab trotzdem eine Betriebsfreigabe der Kältemaschine. Die weitere Nachforschung hat ergeben, dass die Kältemaschine selbst seit 18.07. 01:30 Uhr eine Störung meldet. Zudem wurde festgestellt, dass der Außentemperaturfühler der Kältemaschine konstant den Wert 0,0°C ausgibt. Somit kann davon ausgegangen werden, dass die Kälteerzeugung wie auch die Heizung weder witterungs- noch bedarfsgeführt betrieben wird. Analog zur Heizungsanlage bedeutet dies, dass die Kälteerzeugungsanlage ebenfalls der Effizienzklasse D zuzuweisen ist, da zum einen keine witterungsbedingte Änderung der Vorlauftemperatur im Abschnitt 5.2.2 zu erkennen ist und zum anderen die Freigabe der Kältemaschine im Betrachtungszeitraum lediglich an eine Störung gekoppelt zu sein scheint. In der Funk-

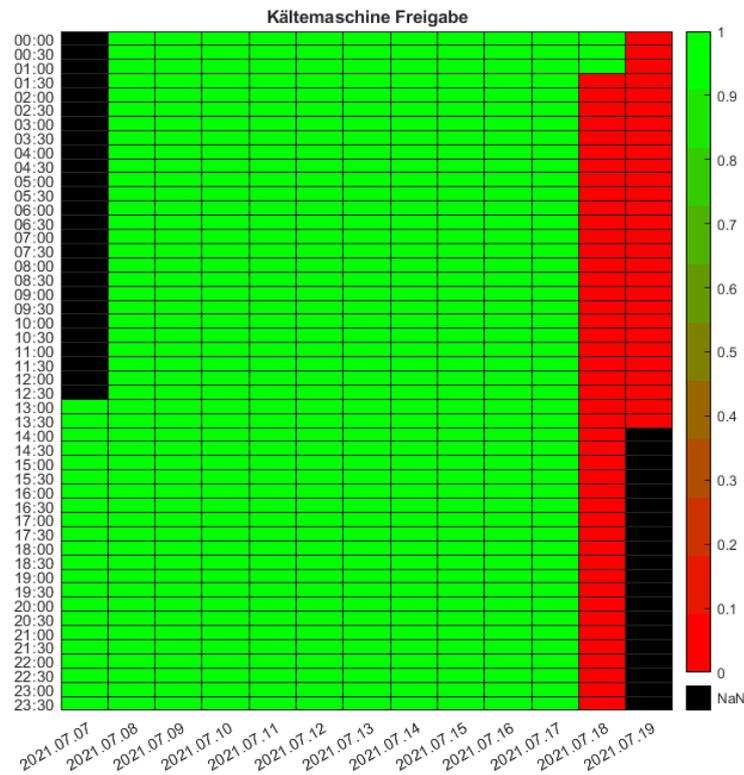


Abbildung 5.19: Kältemaschine Betriebsfreigabe

tionsbeschreibung ist zwar beschrieben, dass eine Freigabe der Kältemaschine ab $+18^{\circ}\text{C}$ erfolgt, dies ist jedoch in der Praxis offensichtlich nicht umgesetzt.

Das Taktverhalten selbst wie in den Grafiken 5.19 bis 5.22 dargestellt folgt augenscheinlich keiner Regelmäßigkeit. Dieser Verdacht bestätigt sich, wenn man an der Datenreihe eine FFT vornimmt. Das Ergebnis der FFT für die Kältemaschine ist in Abbildung 5.23 dargestellt. Die FFT zeigt, dass es keine Frequenz mit signifikant höherer Amplitude gibt, als den Mittelwert bei $f = \frac{1}{\text{Betrachtungszeitraum}}$ und die Taktung der Kältemaschine während des Betrachtungszeitraum keiner zeitlichen Regelmäßigkeit folgt. Das bedeutet, dass keine Regelung für einen Nacht- oder Wochenendbetrieb implementiert ist um Energie und Ressourcen zu sparen.

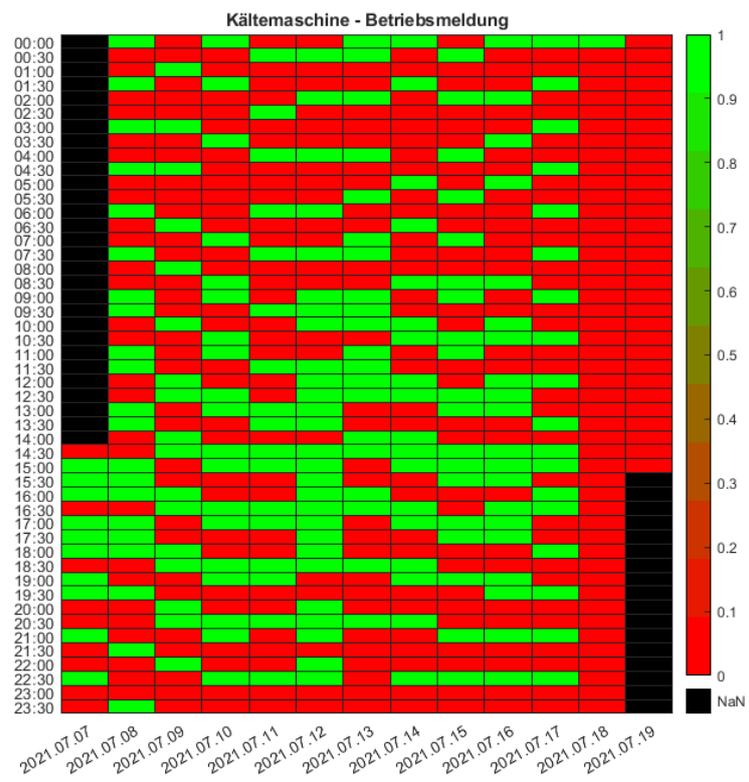


Abbildung 5.20: Kältemaschine Betriebsmeldung

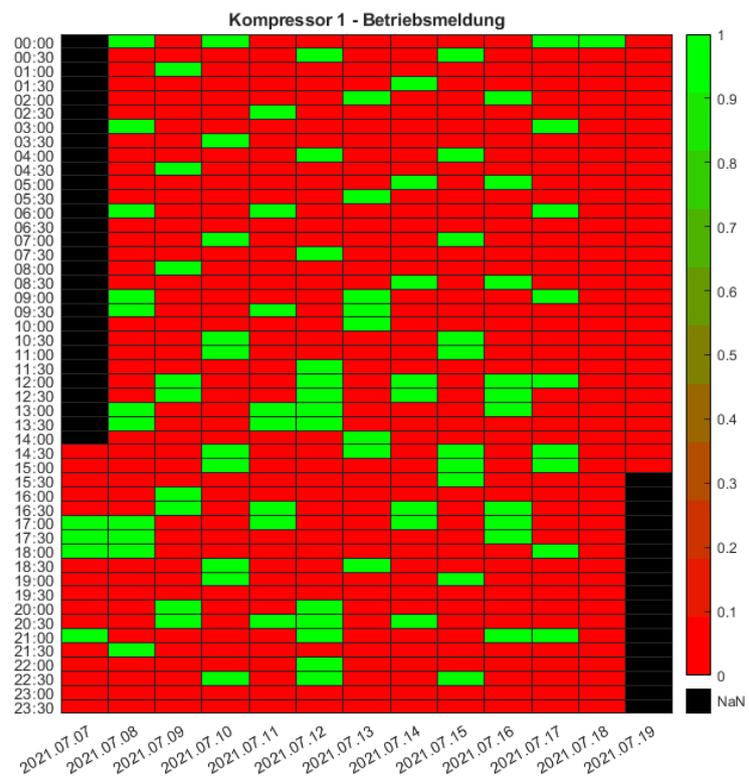


Abbildung 5.21: Kompressor 1 Betriebszustand

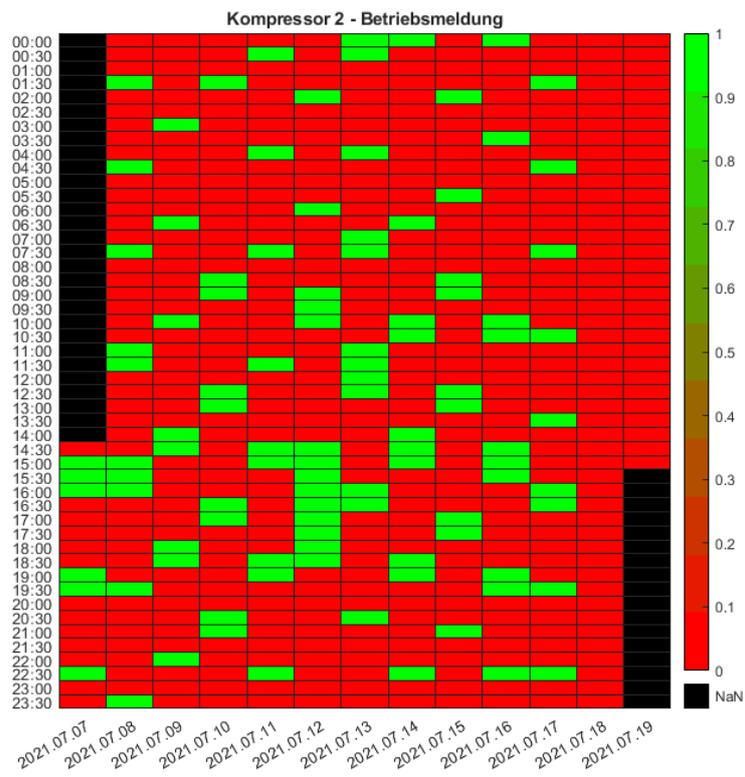


Abbildung 5.22: Kompressor 2 Betriebszustand

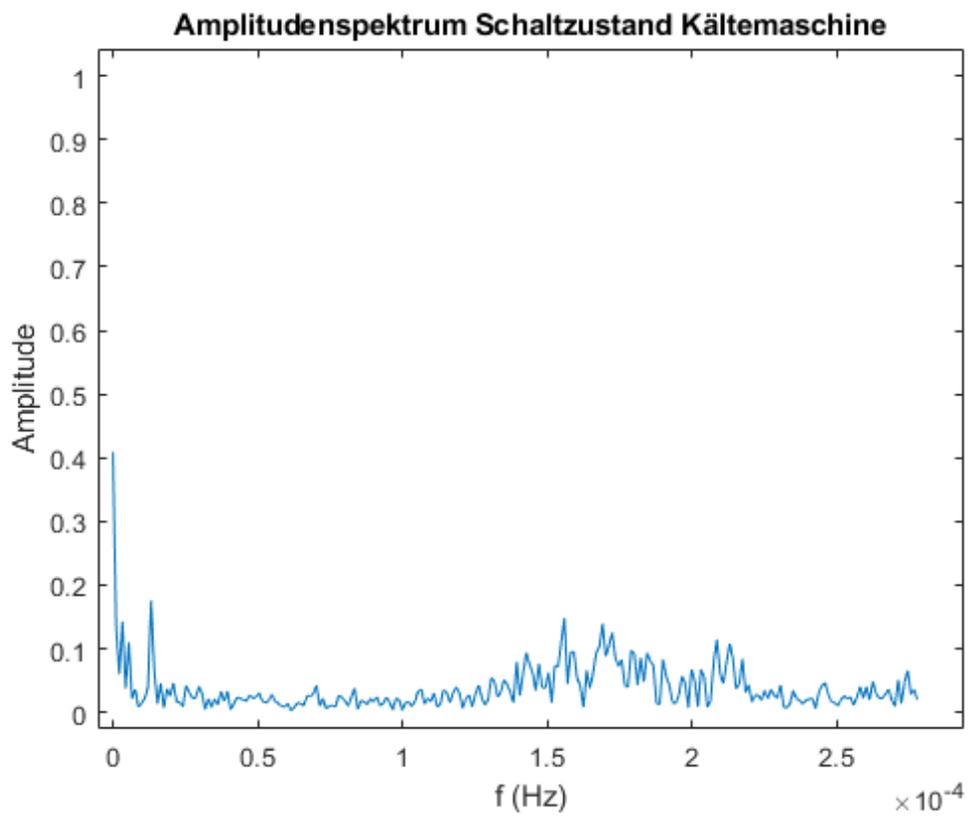


Abbildung 5.23: FFT Kältemaschine

Überwachung und Fehlerdiagnose

1. Rücklauftemperaturüberwachung

Die Überwachung der Rücklauftemperatur kann sowohl dem vorhergehenden Abschnitt, als auch diesem Abschnitt zugeordnet werden. In dieser Arbeit wurde die Rücklauftemperatur bereits diskutiert und wird hier nicht weiter betrachtet.

2. Überwachung des Wirkungsgrads

Die Kältemaschine wird mit einem Nettowirkungsgrad (hier ist Wirkungsgrad als Faktor analog zum CoP zu verstehen) von 3,89 angegeben. Nachfolgend wird Wirkungsgrad durch EER (energy efficiency ratio) ersetzt. Der europäisch einheitliche Wert für die Beurteilung unter Berücksichtigung von Teil- und Vollaststunden ist der sogenannte ESEER. Dieser wird bei der verbauten Kältemaschine mit brutto 7,90 angegeben [26]. Vergleicht man nun den tatsächlichen elektrischen Arbeitsbedarf durch das Verhältnis $\frac{Q_{sekundär}}{Q_{primär}}$ stellt man in Gleichung 5.34 fest, dass das tatsächliche Verhältnis für den Betrachtungszeitraum vom 18.09.2020 bis 25.06.2021 bei 2,3 liegt.

$$\frac{\sum_{n=1}^4(Q_{KK,n})}{Q_{Hauptzaehler-ELT}} \tag{5.34}$$

$$\frac{17.300kWh + 16.480kWh + 9.670kWh + 8.820kWh}{22.717,12kWh} \approx 2,3$$

Der errechnete EER liegt deutlich unter dem vom Hersteller angegebenen EER und ESEER. Dies ist zum einen durch die Betrachtung von einem Zeitraum in dem die Anlage vermutlich hauptsächlich auf Teillast gelaufen ist zu erklären. Zum anderen erklärt sich dieser Faktor durch die fehlende Bedarfs- oder Witterungsführung. Es ist anzunehmen, dass die Kältemaschine die Pufferspeicher dauerhaft unabhängig von der Außentemperatur auf den eingestellten Sollwert von 18°C gehalten hat. Durch dieses kontinuierliche Laden, ohne den tatsächlichen Abruf von Kälteenergie in den Wintermonaten, kommt es zu einem Energieverlust am Pufferspeicher selbst. Es ist zu erwarten, dass der tatsächliche EER höher ist, da die Entladeverluste der Pufferspeicher in dieser Analyse nicht durch reale Messwerte eingebracht werden können. Um diesen Faktor einfließen lassen und bewerten zu können ist ein Kältemengenzähler im Ladekreis (im Planausschnitt 4.6

dargestellt) selbst notwendig. Hier ist aus energietechnischer Sicht dringend eine Abänderung der Freigabe der Kältemaschine zu realisieren und daraufhin eine zweite EER Analyse vorzunehmen.

5.2.3 RLT Geräte

Überwachung und Fehlerdiagnose

Im Folgenden werden die absolute Regeldifferenz mit Gleichung 5.35 und die relative Regeldifferenz mit Gleichung 5.36 verschiedener Regelparameter der RLT Anlage errechnet. Ebenso werden die einzelnen Regelfaktoren in Diagrammen dargestellt und analysiert.

$$E = W - X \quad (5.35)$$

$$e = \frac{E}{W} \quad (5.36)$$

mit

$E = \text{absolute Regeldifferenz}$

$e = \text{relative Regeldifferenz}$

$W = \text{Sollwert}$

$X = \text{Istwert}$

1. Analyse Kanaldruck

Nachfolgend werden die Soll- und Istwerte der Kanaldrücke Zu- und Abluft der RLT Anlage 1 im Diagramm in Abbildung 5.24 beispielhaft gegenübergestellt. als erstes ist zu erkennen, dass die Regeldifferenz mit maximal $+2,28\%$ sehr gering ausfällt. Weiter ist jedoch auch festzustellen, dass der Kanaldruck in den Zu- und Abluftkanälen im Betrachtungszeitraum 24h am Tag konstant gehalten und die Anlage somit dauerhaft in Betrieb ist. Sofern dieser Betrieb nicht für die mechanische Nachtkühlung genutzt wird (genauere Betrachtung der Nachtkühlung folgt), ist dringend mindestens ein Zeitprogramm für eine

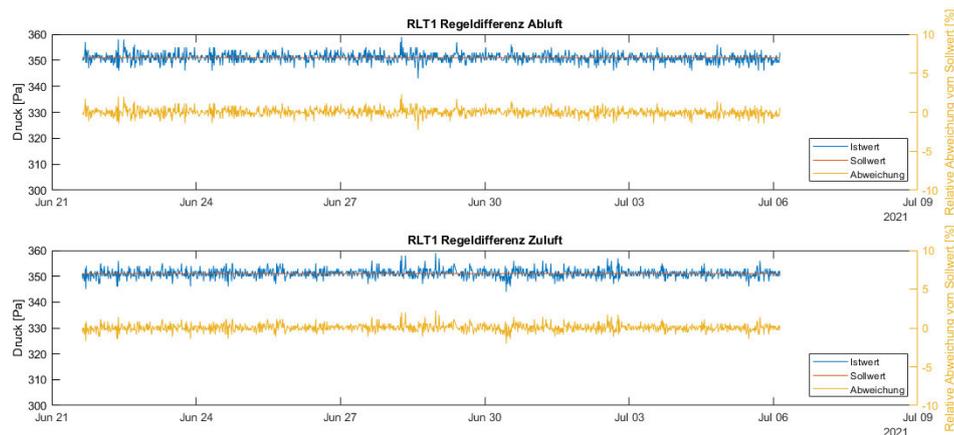


Abbildung 5.24: Kanaldrücke RLT Gerät 1

Abschaltung der Lüftungsanlage außerhalb der Betriebszeiten des Gebäudes einzurichten, damit die Anforderungen der DIN EN 15232-1 Energieeffizienzklasse C, oder besser eingehalten wird [11]. Diese Hinterlegung eines Zeitprogramms ist in der Funktionsbeschreibung beschrieben. Daher stellt dieser Punkt auch einen Mangel dar, der zu beheben ist, da diese Anlage sonst der Energieeffizienzklasse D zuzuordnen ist [11].

2. Analyse Zulufttemperatur

Die Analyse der Zulufttemperatur wird beispielhaft anhand der Lüftungsanlage RLT 1 durchgeführt. Hierfür wurden mehrere verschiedene Werte in einem Diagramm dargestellt. In Grafik 5.25 sind Ist- und Sollwert der Zulufttemperatur sowie die Außentemperatur der linken Y-Achse zuzuordnen während Abweichung von Regeldifferenz, Stellsignal heizen und Stellsignal kühlen der rechten Y-Achse zuzuordnen sind. Die Werte Stellsignal heizen und Stellsignal kühlen sind prozentuale Sollwert-Angaben der Regelventilstellung am jeweiligen Register. In Graphik 5.25 ist zunächst zu erkennen, dass der Sollwert der Zulufttemperatur mit 17°C sehr niedrig eingestellt ist. Weiter ist zu erkennen, dass der Sollwert selbst während des Betrachtungszeitraums nie erreicht wird. Zudem ist festzustellen, dass das Stellsignal für das Kälteventil beispielsweise am 02.07.2021 auf 0% absinkt, obwohl der Messwert noch einen Abstand von ca. 10% zum Sollwert hat. Daher ist davon auszugehen, dass der von der BACnet Schnittstelle der Lüftungsanlage ausgegebene Zulufttemperatur Sollwert nicht dem Sollwert entspricht, auf den tatsächlich geregelt wird. Es ist möglich, dass das BACnet Objekt falsch benannt ist, oder ein anderer Wert an anderer Stelle als Regelparameter verwendet wird.

Weiter ist anhand der Ventilstellung und den Zulufttemperaturen zu erkennen, dass diese Anlage keine aktive Nachtkühlung (Nachtkühlung durch mechanische Belüftung) vornimmt. Es ist aus energetischer Sicht ratsam eine aktive Nachtkühlung zu implementieren und die träge Masse durch die kalte Nachtluft für den Tag abzukühlen. Dies wird auch in der DIN EN 15232-1 gefordert. Ohne Nachtkühlung ist die Anlage der Energieeffizienzklasse D zuzuordnen und darf somit nicht mehr verbaut werden [11].

Zusätzlich fällt bei der Betrachtung der Zulufttemperatur in Abbildung 5.25 auf, dass der Messwert der Zulufttemperatur den Sollwert von 17°C nie erreicht. Des Weiteren ist zu erkennen, dass die Zulufttemperatur stark auf und ab schwankt. Dass die Zuluft den Solltemperaturwert von 17°C nicht erreicht ist durch die Vorlauftemperatur des Kältekreises, welcher zwischen ca. 18°C und 20°C schwankt zu erklären. Die starke Schwankung der Zulufttemperatur mit hoher Frequenz ist ebenfalls durch die Schwankung der Vorlauftemperatur zu erklären. Nach momentanen Stand kann die Anlage den Sollwert der Zulufttemperatur theoretisch nur erreichen, wenn die Außentemperatur kleiner, oder gleich der Sollwerttemperatur ist.

Weiter ist die Sinnhaftigkeit des Temperatursollwerts von 17°C anzuzweifeln, da gleichzeitig ein Basissollwert der Raumtemperatur von 23°C eingestellt ist. Es ist davon auszugehen, dass bei ordentlichem Betrieb und Erreichung der Sollwerttemperatur die Räumlichkeiten des Gebäudes gleichzeitig beheizt und gekühlt werden.[11]

3. Analyse der Temperaturregelung

Betrachtet man nun den Graphen 5.26 fällt auf, dass hier ein unnötig hoher energetischer Aufwand betrieben wird, um die Zulufttemperatur zu regeln. Dabei wird das Ergebnis wie in '2. Analyse Zulufttemperatur' bereits beschrieben verfehlt, da der Messwert konstant über dem Sollwert liegt. In dem Graphen ist zu erkennen, dass die Fortlufttemperatur der Außenlufttemperatur mit sehr geringen Abweichungen folgt, während die Ablufttemperatur selbst dies nicht macht, sondern relativ konstant mit tagestypischen Abweichungen zwischen 21°C und 24°C liegt. Das bedeutet, dass der Abluft nahezu die gesamte Energie der Temperaturdifferenz $\Delta\theta$ zwischen Abluft und Fortluft entzogen und der Außenluft zugeführt wird. Daraus kann geschlossen werden, dass die Bypass Klappe dauerhaft geschlossen ist und somit die Außenluft erhitzt, bzw. gekühlt wird. Eine Erwärmung der Außenluft findet immer dann statt, wenn die Fortlufttemperatur geringer als die Ablufttemperatur ist, eine Kühlung immer dann, wenn die Fortlufttemperatur höher als die Ablufttemperatur ist. Betrachtet man nun das Verhalten von Erhitzung zum Stellsignal kühlen der Anlage, stellt man fest, dass die Außenluft oftmals zunächst mit Hilfe der

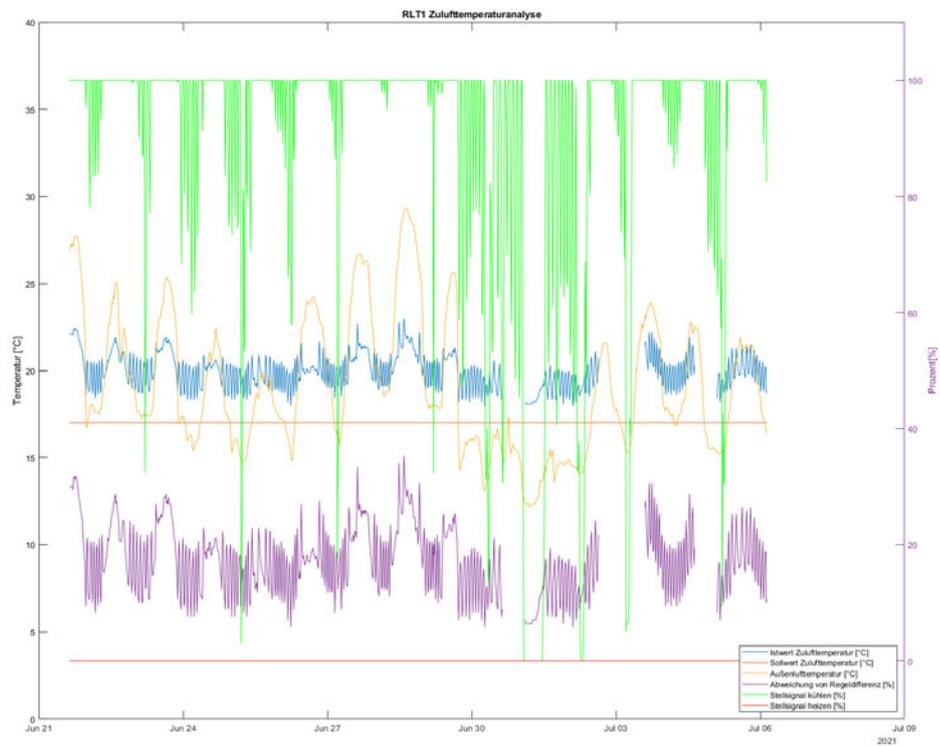


Abbildung 5.25: Analyse Zulufttemperatur RLT Gerät 1

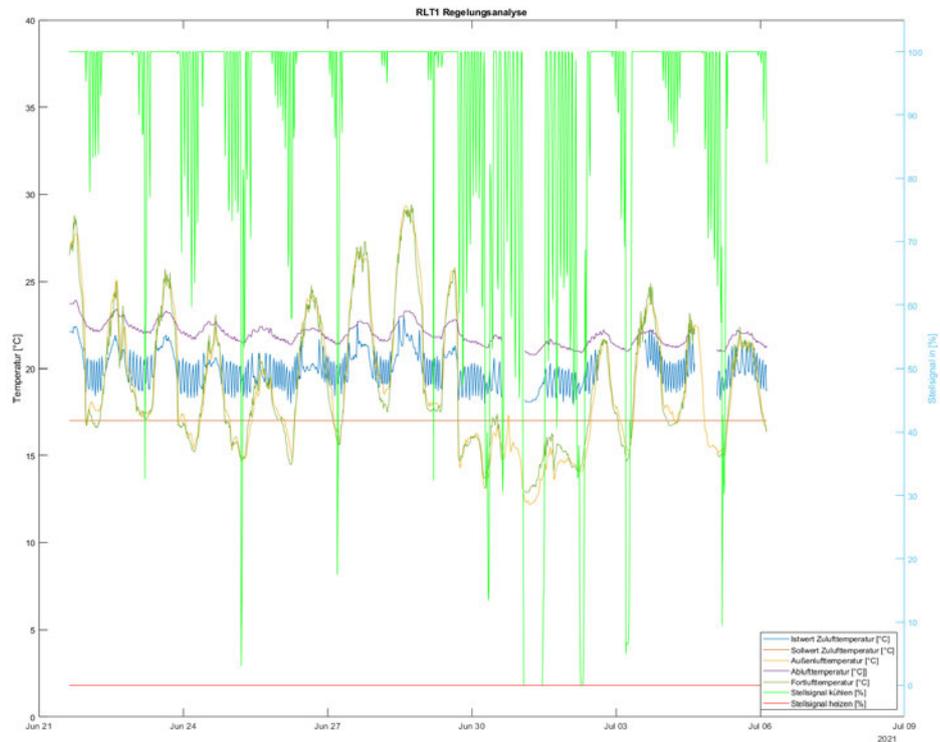


Abbildung 5.26: Analyse Temperaturregelung RLT Anlage 1

Wärmerückgewinnung erhitzt wird, während die Außenlufttemperatur bereits über dem Zuluft Sollwert liegt, um danach am Kühlregister wieder abgekühlt zu werden. Dieses Verhalten der Anlage ist aus energetischer Sicht unsinnig und sollte dringen behoben werden. Das gleiche Verhalten zeigt sich auch bei der Analyse von RLT Anlage 2 und RLT Anlage 4. Aufgrund des Ausfalls von RLT Anlage 5 weniger als drei Tage nach Beginn der Trendaufzeichnung, kann hierfür keine Analyse erstellt werden. Es ist jedoch davon auszugehen, dass alle RLTs die selbe Regelung aufweisen.

4. Analyse der Wärmerückgewinnung

Nach der vorhergehenden Analyse wurde klar, dass zusätzlich zu den bisher gemontierten Daten die Stellung des Bypass Motors der Wärmerückgewinnung essenziell ist, um die Funktion der Wärmerückgewinnung zu beurteilen. Daher wurden für die RLT Geräte noch je ein Trendlog zum Monitoring der Bypassklappe angelegt. Der Aufzeich-

nungszeitraum der nachfolgenden Daten erstreckt sich vom 10.07.2020 14:15 Uhr bis zum 18.07.2020 01:30 Uhr. Aufgrund der erhobenen Daten wird vermutet, dass ein Stellwert der Beypassklappe von 100% für einen geschlossenen und von 0% für einen geöffneten Beypass steht. Dementsprechend müsste die Wärmerückgewinnung bei einer Stellung von 100% voll arbeiten. Im Nachfolgenden wird die Wärmerückgewinnung der RLT Anlage 4 betrachtet, da hier das Stellsignal der Beypassklappe am häufigsten wechselt und so ein Rückschluss auf die Regelung der Beypassklappe gezogen werden kann. Die Daten der RLT Anlage 4 sind im Diagramm in Abbildung 5.27 dargestellt. Bei der Betrachtung der Daten fällt auf, dass die Regelung der Anlage selbst zu funktionieren scheint. Betrachtet man beispielsweise den Zeitraum vom 11.07.-12.07. kann festgestellt werden, dass das Stellsignal der Beypassklappe auf 100% gestellt wird (volle Wärmerückgewinnung), da sich die Außenlufttemperatur unter der Sollwerttemperatur befindet und somit aufgeheizt werden muss. Nachdem festgestellt wird, dass eine Temperaturanhebung allein durch die Wärmerückgewinnung nicht ausreichend ist, wird das Heizventil geöffnet. Das gleiche Verhalten ist im Kühlfall festzustellen. Auch das Ausschalten der Wärmerückgewinnung (Stellsignal Beypassklappe 0%) ist aus Sicht der Regellogik richtig. Im zuvor genannten Zeitraum wird die Beypassklappe geöffnet, da die Außenluft in der Wärmerückgewinnung erhitzt werden würde und kein Heizbedarf vorhanden ist. Wird nun jedoch die Fortlufttemperatur in diesem Zeitraum betrachtet, ist festzustellen, dass diese nach wie vor der Außenlufttemperatur folgt. Dies wird in Abbildung 5.28 noch deutlicher, da die Wärmerückgewinnung bei RLT Anlage 2 die meiste Zeit ausgeschaltet ist und die Fortlufttemperatur trotzdem der Außenlufttemperatur folgt. Bei voll geöffnetem Beypass wäre zu erwarten, dass die Fortlufttemperatur sehr nah an der Ablufttemperatur liegt und dieser folgt. Es ist weiter davon auszugehen, dass der Wärmetauscher selbst sehr gut funktioniert, da die Fortlufttemperatur der Außentemperatur eng folgt und dementsprechend ein hoher Energietransfer von der Abluft auf die Außenluft erfolgt. Es wird vermutet, dass die Steuerung der Beypassklappe jedoch versagt. Das würde den in Abbildung 5.26 zu sehenden und bereits diskutierten Effekt erklären, dass die Zulufttemperatur den Sollwert von 17°C nicht erreicht, obwohl die Außentemperatur unter dem Sollwert liegt und zusätzlich im Kälteregister gekühlt wird.

Im Weiteren werden die Rückwärmezahlen der Wärmerückgewinnungen der einzelnen RLT Geräte unter Zuhilfenahme von Formel 5.38 berechnet. Eine Berechnung mit Formel 5.37 wäre theoretisch zwar auch möglich, es ist in diesem Anwendungsfall jedoch sinnvoller Formel 5.38 zu verwenden, da die Zulufttemperatur an der Messstelle bereits

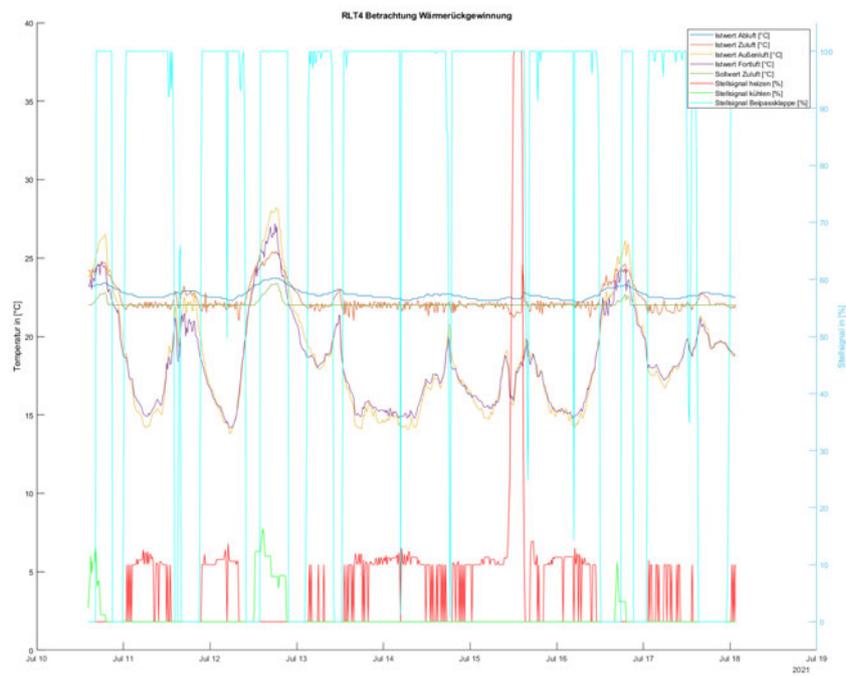


Abbildung 5.27: RLT Alage 4 Betrachtung Wärmerückgewinnung

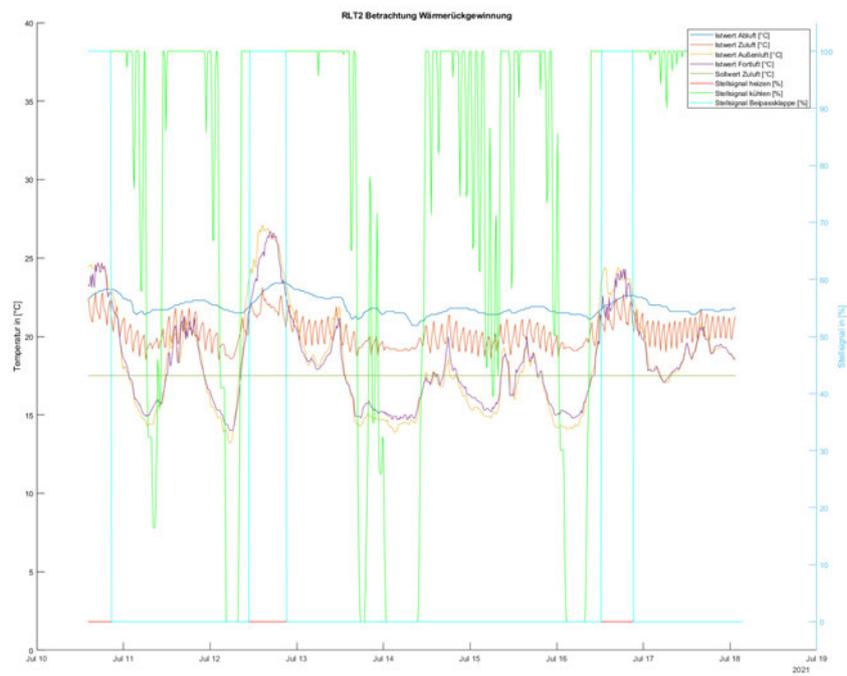


Abbildung 5.28: RLT Anlage 2 Betrachtung Wärmerückgewinnung

von den Heiz- und Kühlregistern sowie dem Zuluftventilator beeinflusst wurde (Siehe hierfür auch Abbildung 4.4)

$$\phi_{Aussenluft} = \frac{\theta_{Zuluft} - \theta_{Aussenluft}}{\theta_{Abluft} - \theta_{Aussenluft}} \quad (5.37)$$

$$\phi_{Fortluft} = \frac{\theta_{Abluft} - \theta_{Fortluft}}{\theta_{Abluft} - \theta_{Aussenluft}} \quad (5.38)$$

In Abbildung 5.29 und 5.30 sind die errechneten Rückwärmezahlen der RLT Geräte 1 und 4 dargestellt. Speziell in dem Plot der RLT Anlage 4 ist zu erkennen, dass die Wärmerückgewinnung, bei realistischen Berechnungsergebnissen, mit Werten zwischen 0,85 und 1,0 gut und gemäß den Herstellerangaben arbeitet. Es ist jedoch auch zu erkennen, dass die Rückwärmezahl zum Teil erheblich über dem Faktor 1 liegt. Das bedeutet der Abluft wird mehr Energie entzogen, als die Temperaturdifferenz zwischen Abluft und Außenluft beträgt. Dieses Verhalten ist im kleinen Maße eventuell durch die thermische Trägheit des Wärmetauschers selbst zu erklären. Da es sich hierbei jedoch um sehr extreme Abweichungen handelt, ist die Qualität der Messung anzuzweifeln. Im allgemeinen sollten Referenzmessungen an der Anlage erfolgen, um die Güte der Daten sowie die Richtigkeit der Datenpunktbenennung zu überprüfen. Insgesamt kann für die RLT Anlagen festgestellt werden, dass augenscheinlich einige Funktionen der Anlage ordnungsgemäß funktionieren, die gesamte Anlage jedoch als nicht funktional und unwirtschaftlich einzustufen ist. Die RLT Anlagen sollten unbedingt auf mindestens das Niveau der Energieeffizienzklasse C der DIN EN 15232-1 gebracht werden um den Energiebedarf und damit die Energiekosten zu senken.

5.2.4 Übergeordnete Zusammenhänge

In diesem Abschnitt werden anlagenübergreifende Daten ausgewertet und diskutiert.

HEV und KEV

Im Folgenden werden jeweils der Heiz- und Kühlleistungsbedarf der Heizkreise Büro und RLT, sowie exemplarisch einer Mieteinheit dargestellt um feststellen zu können, ob und

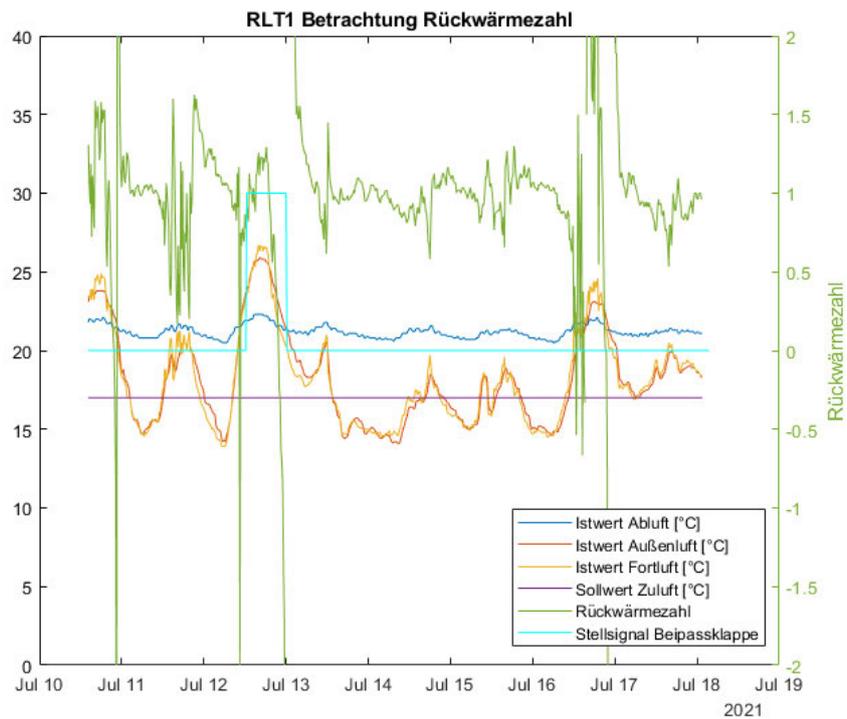


Abbildung 5.29: Rückwärmezahl RLT Anlage 1

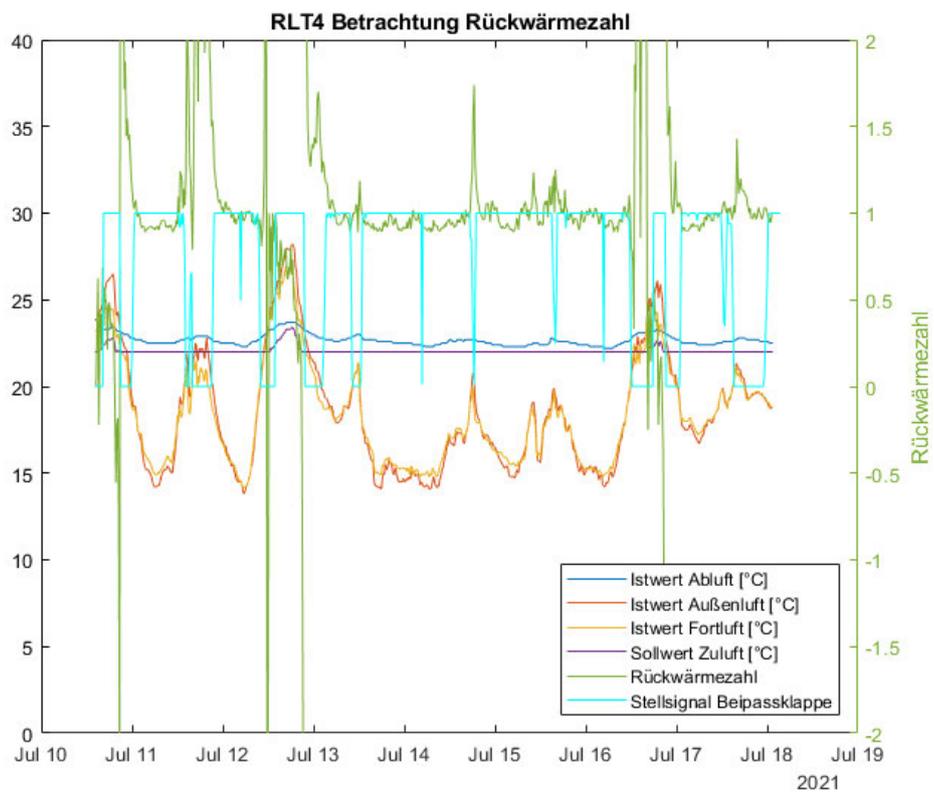


Abbildung 5.30: Rückwärmezahl RLT Anlage 4

wenn ja auf welcher strukturellen Ebene gleichzeitig geheizt und gekühlt wird. In Abbildung 5.31 ist zu erkennen, dass eine Verriegelung der Heizung und Kälte nicht funktional oder gar nicht implementiert wurde. Es kann beispielsweise festgestellt werden, dass die RLT Geräte gleichzeitig mit Heiz- und Kühlenergie versorgt werden. In den Abbildungen 5.27 und 5.28 sowie Abbildung 5.31 lässt sich dieses Verhalten feststellen und ist unter anderem auf die unterschiedlichen Sollwerte ohne Totband zurückzuführen. Weiter ist in dem Plot Leistung HZG/KAE 5.OG ME1 zu erkennen, dass im Betrachtungszeitraum vom 01.07. bis ca. 06.07. die Unterflurkonvektoren in der Mieteinheit heizen, während das RLT Gerät 1, welches diese Mieteinheit versorgt, wie in Abbildung 5.26 zu sehen ist die Zuluft kühlt. Dieses Verhalten ist gegeneinander zu verriegeln und nicht zulässig [11]. Ebenso ist festzustellen, dass während des Betrachtungszeitraums im gesamten Gebäude zur Temperierung der Büroflächen und der Zuluft gleichzeitig ein Heiz- und Kühlenergie verbraucht wurden. Dieser Zustand sollte dringend abgeändert werden, um Energie und Kosten einzusparen.

Raumtemperaturregelung

Eine Zuordnung der Ventilansteuerung zu den einzelnen Räumen ist im Umfang dieser Arbeit nicht möglich, da hierfür die Nomenklatur der Ventilansteuerung per Hand geändert werden muss. Die Heizkörper wurden nummeriert und sind nur mit erheblichem Aufwand einzelnen Räumen zuzuordnen. Dargestellt werden nachfolgend exemplarisch zwei Räume der Mieteinheit drei im zweiten OG. Bei beiden Räumen kann festgestellt werden, dass das Totband der Raumlufttemperaturregelung in Abhängigkeit der Präsenz verstellt wird. Weiter ist zu erkennen, dass zwischen 12. und 13. Juli eine Schwellwertanpassung des Kühlbetriebs in Abhängigkeit der Raumlufttemperatur vorgenommen wurde. Weiter ist jedoch auch zu erkennen, dass die Raumtemperatur trotz einer niedrigeren Außentemperatur den Sollwert in Abbildung 5.33 stark verfehlt und sich die Regelung des Raumes trotz einer Außentemperatur von unter 18°C im Kühlbetrieb befindet. Vergleicht man nun die beiden Räume aus Abbildung 5.32 und Abbildung 5.33 fällt auf, dass sich zwei Räume der selben Mieteinheit in einem Großraumbüro gleichzeitig im Heiz- und Kühlbetrieb befinden. Dieser Bedarf wird auch durch die fehlende Verriegelung von Heizungs- und Kälteanlage bedient und somit wird ein großer Raum auf einer Seite gekühlt und auf der anderen Seite geheizt. Dies ist energetisch unsinnig und durch die simple Verriegelung von Heizung und Kälte abzustellen. Es wird dem Betreiber dringend geraten hierfür Maßnahmen zu ergreifen. Weiter ist zu erkennen, dass das Totband

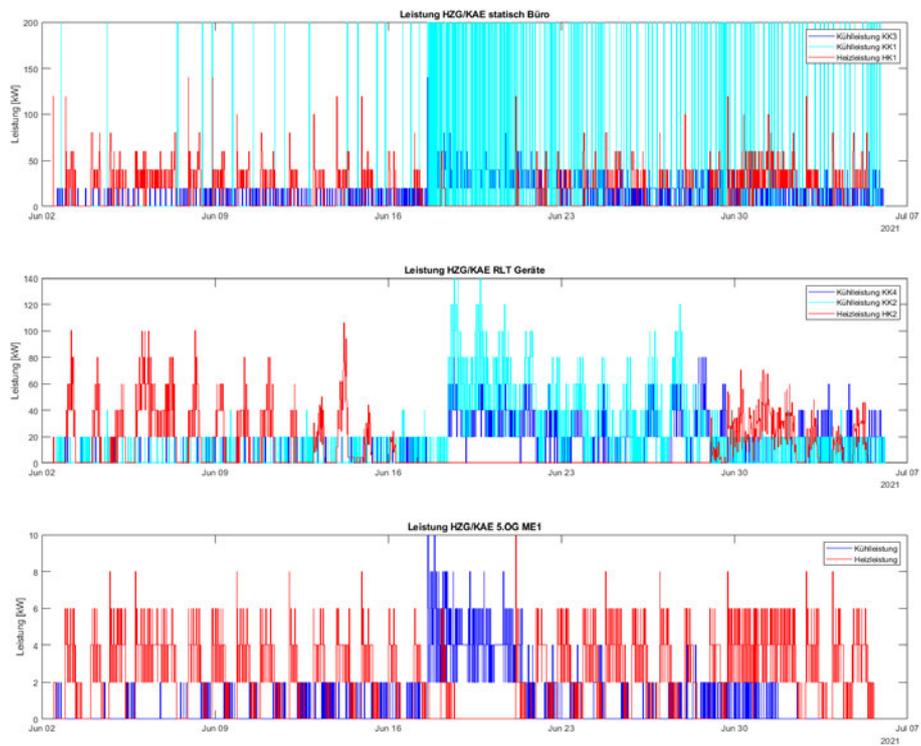


Abbildung 5.31: Heiz- und Kühlleistungsbedarf exemplarisch

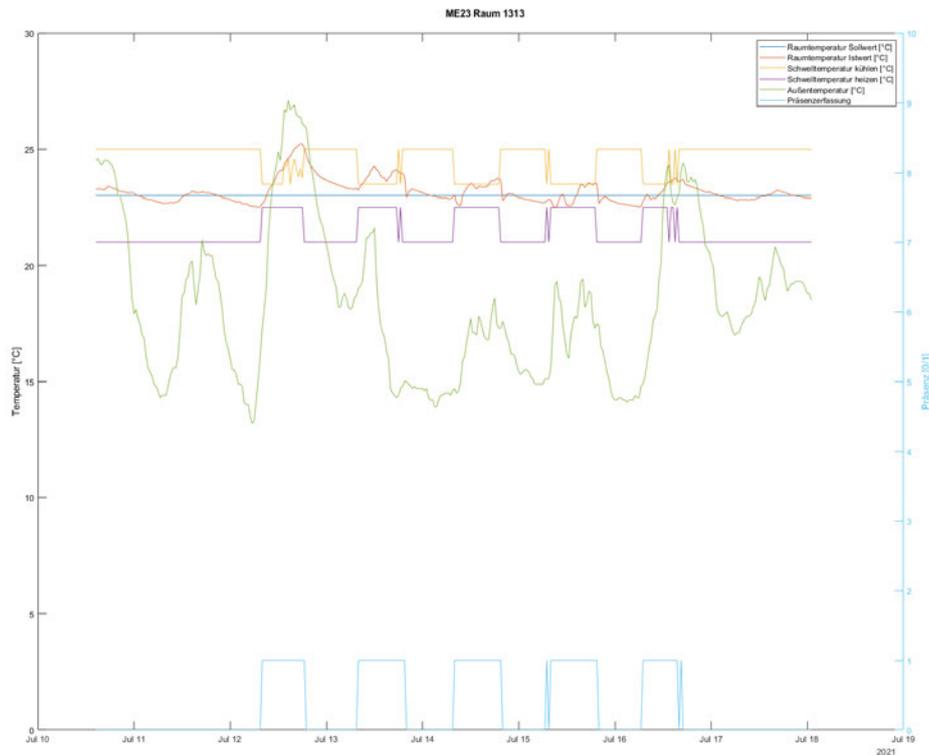


Abbildung 5.32: Raumtemperaturregelung ME23 Raum 1313

für die Regelung der Konvektoren und Kühlsegel zwar präsenzabhängig geregelt wird, jedoch keine Erweiterung des Totbands außerhalb der Betriebszeiten erfolgt. Hier wird dringend empfohlen einen ECO-Modus für die Raumtemperaturregelung außerhalb der Betriebszeiten zu implementieren. Aufgrund der Datenlage kann das Einsparpotential nicht fundiert ökologisch und ökonomisch bewertet werden.

Kanaldruckregler

Beim Betrachten der Monitoringdaten der Kanaldruckregler fällt sofort auf, dass es hier ein Problem mit der SollwertEinstellung gibt. Der Sollwert verstellt sich bei den Kanaldruckreglern von alleine auf einen Wert von 0 Pa, oder 32767 Pa. Daher sind weitere Messungen und Analysen der Monitoringdaten vorerst unerheblich. Zunächst sollte dieses Problem gelöst werden. Hierfür könnte als schnelle vorübergehende Lösung ein Programm

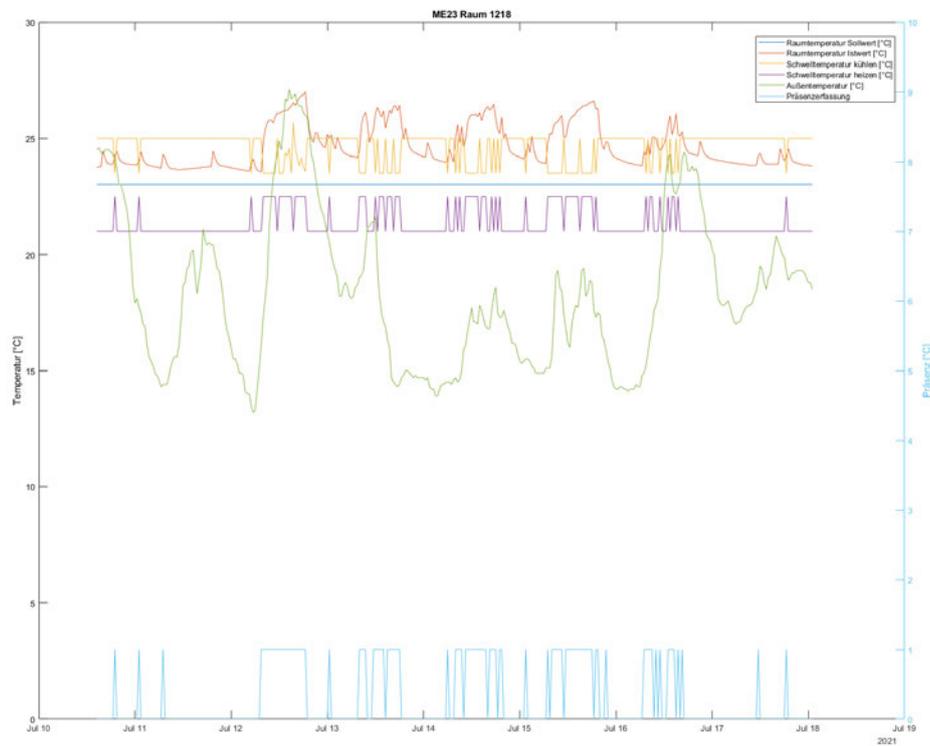


Abbildung 5.33: Raumtemperaturregelung ME23 Raum 1218

erstellt werden, welches die Sollwertvorgabe der Kanaldruckregler periodisch beschreibt und somit den Verlust des Sollwerts verhindert. Langfristig sollte jedoch Kontakt mit dem Hersteller aufgenommen und das Problem genauer analysiert werden. Es scheint ein Problem des Langzeitspeichers der Feldgeräte zu sein, dies ist jedoch genauer zu analysieren.

5.3 Behaglichkeitsmonitoring

Um ein Behaglichkeitsmonitoring fundiert umzusetzen, fehlen essenzielle Daten die gemonitort werden müssten. Es würde sich empfehlen vereinzelt IoT Messgeräte zu verbauen, um an strategisch sinnvollen Orten Referenzmessungen durchzuführen. Es wäre zudem sinnvoll eine variable Sollwertberechnung auf Grundlage der zur Verfügung stehenden Daten einzurichten und dadurch den Komfort im Gebäude zu erhöhen, beziehungsweise festzustellen, welche Temperaturschwankungen mit hinreichend großem Komfort erreichbar sind. Da das Behaglichkeitsmonitoring keinen direkten Einfluss auf ökologische und nur bedingt indirekten Einfluss auf ökonomische Faktoren haben, wird dieses Thema in dieser Arbeit nicht weiter behandelt.

6 Fazit

In dem Kapitel 5 wurden die aufgezeichnete Daten des Gebäudes und der Anlagen analysiert. Hierbei hat sich herausgestellt, dass für manche Analysen mehr Daten gesammelt und Langzeitanalysen angestellt werden müssen. Weiter wurde festgestellt, dass die Regelungstechnik im Gebäude, spezieller der Anlagenregelung noch erhebliche Verbesserungspotentiale birgt. Dies beginnt bei einfachen Verbesserungen wie dem hinterlegen von Zeitprogrammen bei Anlagen die 8760h im Jahr laufen bis hin zu aufwändigeren Verbesserungspotentialen wie die Funktionsfähigkeit der Wärmerückgewinnung herzustellen. Einige Einsparpotentiale konnten ökonomisch und ökologisch bewertet werden, während dies bei anderen Analysen aufgrund der geringen Basisdatenlage nicht möglich war. Alle der beschriebenen Maßnahmen sollten jedoch zeitnah umgesetzt werden, da das ökonomische wie ökologische Potential als hoch eingeschätzt werden kann und viele der Maßnahmen zur eigentlichen Erfüllung der vertraglich geschuldeten Leistungen gehören und somit kostenneutral durch die Errichterfirmen durchgeführt werden sollten.

Die im Folgenden aufgelistete Maßnahmen, werden als die Wichtigsten aus dieser Arbeit angesehen und werden daher hier nochmal aufgeführt. Es wird dringend empfohlen diese Maßnahmen umzusetzen.

- Außenhaut: Überprüfung der Außendämmung im 5. OG
- Wärmeversorgungsanlage: Einstellung witterungsgeführter Systemtemperaturen
- Wärmeversorgungsanlage: Einstellung einer Nachtabsenkung
- Wärmeversorgungsanlage: Verriegelung der Anlage ab einer mittleren Außentemperatur von mehr als 15°C
- Kälteversorgungsanlage: Einstellung einer Systemtemperatur der Kältemaschine im Bereich der Herstellerangaben
- Kälteversorgungsanlage: Einstellung witterungsgeführter Systemtemperaturen

- Kälteversorgungsanlage: Verriegelung der Anlage ab einer mittleren Außentemperatur von weniger als 18°C
- Raumluftechnische Anlagen: Einbindung der WC Abluft in die GA und Einführung einer präsenzabhängigen Regelung
- Raumluftechnische Anlagen: Überprüfung der Bypassklappe und somit Instandsetzung der Wärmerückgewinnung
- Raumluftechnische Anlagen: Anhebung des Sollwerts auf Raumtemperaturniveau
- Raumluftechnische Anlagen: Einstellung eines Totbands für die Regelung des Heiz- und Kühlregisters
- Raumluftechnische Anlagen: Implementation einer mechanischen Nachtkühlung
- Raumluftechnische Anlagen: Abschaltung der Anlagen außerhalb der Betriebszeiten (außer für die mechanische Nachtkühlung)
- Übergeordnet: Hinterlegung eines ECO-Kalenders in dem das Totband um den Raumtemperatursollwert erhöht wird.
- Übergeordnet: Erstellung einer Verriegelung zwischen Heiz- und Kühlbetrieb
- Übergeordnet: Instandsetzung der nicht funktionierenden Zähler

7 Ausblick

In diesem letzten Kapitel werden die Erfahrungen dieser Arbeit formuliert, um in zukünftigen Projekten die genannten Probleme zu vermeiden. Ziel ist es, technisches Monitoring in Zukunft einfacher implementieren zu können. Es hat sich im Kapitel 5 gezeigt, dass moderne Anlagen meist alle Voraussetzungen erfüllen um energieeffizient betrieben zu werden, jedoch Fehler in der Regelstrategie bestehen, welche ohne Monitoring selten bis gar nicht entdeckt würden. Es ist davon auszugehen, dass es in Deutschland Fälle analog zu diesem Gebäude gibt, in denen die TGA Anlagen über ihren gesamten Lebenshorizont mit einer solchen nicht funktionalen Regelung unwirtschaftlich sowie nicht ökologisch betrieben werden. Daher ist es essenziell und wichtig, eine kostengünstige und effiziente Möglichkeit zur Überwachung der Inbetriebnahme sowie der Anlagen und damit ein Tool zur Qualitätssicherung in der Baubranche zu haben. Diese Möglichkeit ist durch technisches Monitoring gegeben, sofern hierfür von Anfang an ein sinniges Konzept erstellt wird.

7.1 Was für die Umsetzung von technischem Monitoring besonders wichtig ist und worauf bei künftigen Projekten geachtet werden muss

Als erster wichtiger Punkt dieser Betrachtung ist hierbei die Güte der Daten zu nennen. Schlecht aufgezeichnete Werte und Einheitenverwechslungen können Analyseergebnisse sehr stark verfälschen. Weiter ist die Messgenauigkeit der Feldsensorik elementar um folgerichtige Rückschlüsse auf die Anlage ziehen zu können. In dieser Arbeit wurden Fehler festgestellt, die auf Messungenauigkeiten zurückgeführt werden könnten. Eine eindeutige Zuordnung ist jedoch nicht möglich, da hierfür die Unterlagen fehlen. Dies ist auch gleichzeitig der nächste Punkt: Bestands- und Dokumentationsunterlagen. Ohne ausreichende

Dokumentationsunterlagen ist es schwierig und kostenintensiv den Aufbau der Anlagentechnik zu analysieren. Ohne Bestands- und Dokumentationsunterlagen sind hierfür wie auch in dieser Arbeit mehrere Ortsbegehungen durch eine Fachkraft notwendig.

Ein weiterer Punkt ist die gewerksübergreifende Einigung auf ein Anlagenkennzeichnungssystem, welches über alle Bereiche hinweg gilt. Mit einem solchem System, wie es auch in der VDI 3814 beschrieben wird, sind Bauteile und Datenpunkte eindeutig identifizierbar. Weiter sollte bei BACnet Objekten die Beschreibung erstellt und auf Richtigkeit geprüft werden. Dies sollte auch als Punkt in die Abnahme solcher Anlagen aufgenommen werden.

Der Punkt einer einheitlichen Nomenklatur ist besonders wichtig, wenn die Analyse großer Datenmengen Teil- oder Vollautomatisiert erfolgen soll. Eine Automatisierung des Monitoringprozesses ist relativ einfach umzusetzen, wenn die richtigen Rahmenbedingungen gegeben sind.

Zudem empfiehlt es sich technisches Monitoring bereits während der Planung einzuführen [3]. Am besten bereits in Leistungsphase drei, damit im Anschluss alle zuvor genannten Rahmenbedingungen geklärt werden können und sowohl ein Monitoring, als auch ein Inbetriebnahmekonzept erstellt werden kann.

Denn mit einem sinnigem technischem Monitoringkonzept bei diesem Gebäude wären die meisten der genannten Fehler vermeidbar gewesen und es wäre vermutlich nicht zu einer Abnahme der Leistungen gekommen. Dadurch würde die Anlagen wie vorgesehen funktionieren, wodurch sowohl der Komfort, als auch die Zufriedenheit der Gebäudenutzer steigen und die laufenden Energiekosten sinken würden.

Literaturverzeichnis

- [1] DELTACONTROLS (Hrsg.): O3 Sensor Hub. 09.05.2018
- [2] Deutsche Norm. Bd. EN ISO 7730: Ergonomie der thermischen Umgebung: Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und des PPD-Indexes und Kriterien der lokalen thermische Behaglichkeit (ISO 7730 : 2005); deutsche Fassung EN ISO 7730 : 2005 : Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria (ISO 7730 : 2005); german version EN ISO 7730 : 2005 : Détermination analytique et interpretation du confort thermique par le calcul des indices PMV et PPD et par des critères confort thermique local (ISO 7730 : 2005); version allemande EN ISO 7730 : 2005 = Ergonomics of the thermal environment = Ergonomie des ambiances thermiques. Mai 2006. Berlin : Beuth, 2006
- [3] ARBEITSKREIS MASCHINEN- UND ELEKTROTECHNIK STAATLICHER UND KOMMUNALER VERWALTUNGEN (Hrsg.): Technisches Monitoring als Instrument zur Qualitätssicherung. 2020
- [4] : extern-pirna.de :: Gradtagstabelle. 26.07.2021. – URL <http://www.extern-pirna.de/index.php?id=185>. – Zugriffsdatum: 26.07.2021
- [5] : Gradtagzahlen in der Heizkostenabrechnung - Brunata Minol. 26.07.2021. – URL <https://www.minol.de/gradtagzahlen.html>. – Zugriffsdatum: 26.07.2021
- [6] : Gradtagzahlen-Rechner zur Heizkostenabrechnung - Brunata Minol. 26.07.2021. – URL <https://www.minol.de/gradtagzahlen-rechner.html>. – Zugriffsdatum: 26.07.2021
- [7] : Wetter und Klima - Deutscher Wetterdienst - Leistungen - Klimadaten Deutschland. 26.07.2021. – URL <https://www.dwd.de/DE/leistungen/klimadatendeutschland/klimadatendeutschland.html>. – Zugriffsdatum: 26.07.2021

- [8] AQUA CALOR GMBH: aqua calor GmbH - Gradtage. 26.07.2021. – URL <https://www.aqua-calor.de/content/103/65/news-informationen/gradtage>. – Zugriffsdatum: 26.07.2021
- [9] BÖSCH, Heidi ; BOBKA, Gabriele ; BOBKA, Gabriele (Hrsg.): Spezialimmobilien. September 2018. – URL https://www.reguvis.de/xaver/wertermittlerportal/start.xav?start=%2F%2F*%5B%40attr_id%3D%27wertermittlerportal_18800235019%27%5D#__wertermittlerportal__%2F%2F*%5B%40attr_id%3D%27wertermittlerportal_18800235019%27%5D__1626245973804. – Zugriffsdatum: 14.07.2021
- [10] BUNDESREGIERUNG: Klimaschutzgesetz: Klimaneutralität bis 2045. 27.07.2021. – URL <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/klimaschutzgesetz-2021-1913672>. – Zugriffsdatum: 27.07.2021
- [11] DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V.: Energieeffizienz von Gebäuden – Teil 1: Einfluss von Gebäudeautomation und Gebäudemanagement: Module M10-4, 5, 6, 7, 8, 9, 10; Deutsche Fassung EN 15232-1:2017. Dezember 2017
- [12] DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V.: Kosten im Bauwesen. Dezember 2018
- [13] GÄRTNER, Sven: Beurteilung und Bewertung alternativer Planungsentscheidungen im Immobilienbereich mit Hilfe eines Kennzahlensystems: Zugl.: Berlin, Techn. Univ., Diss., 1996. 1. Aufl. Berlin : VWF Verl. für Wiss. und Forschung, 1996 (Akademische Abhandlungen zur Architektur). – ISBN 3930324644
- [14] HUNDT, Dennis: Gradtagszahlen in der Nebenkostenabrechnung. In: Nebenkostenabrechnung (21.12.2012). – URL <https://www.nebenkostenabrechnung.com/gradtagszahlen/>. – Zugriffsdatum: 26.07.2021
- [15] KRAUSE, T. ; KLÜGLICH, J. ; TRANE KLIMA- UND KÄLTETECHNISCHES BÜRO GMBH (Hrsg.): Funktionsbeschreibung: Projektumfang: Regelung Kältemaschine + rückkühler inkl. Puffermanagement. 15.09.2020
- [16] LANG, Hans W. ; HOCHSCHULE FLENSBURG (Hrsg.): Schnelle Fouriertransformation (FFT). 2018. – URL <https://www.inf.fh->

- [flensburg.de/lang/algorithmen/fft/fft.htm](https://www.flensburg.de/lang/algorithmen/fft/fft.htm). – Zugriffsdatum: 23.07.2021
- [17] MATZARAKIS, A. ; MAYER, H. ; THOMSEN, F.: Klimawandel und Heizgradtage in Freiburg im Breisgau, Südwestdeutschland. 2009
- [18] PLESSER, Stefan: Qualitätsmanagement in der Gebäudetechnik. Berlin and Offenbach : VDE VERLAG GmbH, 2020 (Das Gebäude). – ISBN 9783800750139
- [19] RECKNAGEL, Hermann ; SPRENGER, Eberhard: Band 2. 80. Auflage. Kleinaitingen : ITM InnoTech Medien, 2021
- [20] RITTER, Volker ; BAGHERIAN, Behrooz ; MÜLLER, André ; BUNDESINSTITUT FÜR BAU-, STADT- UND RAUMFORSCHUNG (BBSR) IM BUNDESAMT FÜR BAUWESEN UND RAUMORDNUNG (Hrsg.): Vergleichswerte für den Energieverbrauch von Nichtwohngebäuden
- [21] ROMANA BÖHM ; LANDESHAUPTSTADT MÜNCHEN - REFERAT FÜR ARBEIT UND WIRTSCHAFT (Hrsg.): Standortinfo - Steuern, Preise und Gebäuden. 2021
- [22] ROTERMUND, Uwe ; ROTERMUND.INGENIEURE (Hrsg.): Energiekosten im Facility Management. 10.09.2019
- [23] SCHRADER, Christopher: So heizen Sie richtig: Tipps zum Energiesparen. In: Süddeutsche Zeitung (11.02.2013). – URL <https://www.sueddeutsche.de/wissen/heizen-und-energiesparen-wie-warm-muss-die-leere-wohnung-sein-1.1590673>. – Zugriffsdatum: 12.07.2021
- [24] SEDLBAUER, Klaus ; HOLM, Andreas ; KÜNZEL, Hartwig M. ; LEISTNER, Philip ; BREUER, Klaus: Raumklima und Innovation Eine Aufgabe der Bauphysik. 2008
- [25] STADTWERKE MÜNCHEN ; STADTWERKE MÜNCHEN (Hrsg.): M/Fernwärme - Ein Angebot voller Pluspunkte. 2017
- [26] TRANE KLIMA- UND KÄLTETECHNISCHES BÜRO GMBH ; TRANE KLIMA- UND KÄLTETECHNISCHES BÜRO GMBH (Hrsg.): Kompakte Wasserkühlmaschinen-Modell mit Schraubenverdichter Serie R(TM), wassergekühlt, 245 – 880 kW Kälteleistu. 2019
- [27] U.S. GREEN BUILDING COUNCILS: LEED rating system | U.S. Green Building Council. 25.07.2021. – URL <https://www.usgbc.org/leed>. – Zugriffsdatum: 25.07.2021

- [28] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: Technisches Monitoring von Gebäuden und gebäudetechnischen Anlagen. 07.2017
- [29] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE: Verbrauchskennwerte für Gebäude: Grundlagen. Juni 2013
- [30] WAGO DEUTSCHLAND: M-Bus – Protokoll zur Übertragung von Energieverbrauchsdaten. 27.07.2021. – URL <https://www.wago.com/de/m-bus>. – Zugriffsdatum: 27.07.2021

Glossar

Leadership in Energy and Environmental Design Ein Klassifizierungssystem des US Green Building Councils für nachhaltiges Bauen [27].

M-Bus Kurzform von Meter-Bus. Ein Bus-Protokoll zur Übertragung von Messdaten [30].

schnelle Fourier Transformation Ein Algorithmus zur schnellen und effizienten Berechnung der diskreten Fourier Transformation. Mit dieser Methode können Signale in Ihre Frequenzanteile zerlegt werden [16].

Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung einer Abschlussarbeit

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

Ort	Datum	Unterschrift im Original
-----	-------	--------------------------