

Diploma Thesis

Elaboration of an IoT-based Energy Monitoring System for Office Buildings

Submitted in satisfaction of the requirements for the degree of
Diplom-Ingenieur
of the TU Wien, Faculty of Civil Engineering

DIPLOMARBEIT

Ausarbeitung eines IoT-basierenden Energie Monitoring Systems für Büroimmobilien

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines / einer
Diplom-Ingenieurs
eingereicht an der Technischen Universität Wien, Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Jan Höfler, BSc

Matr.Nr.: 01326091

unter der Anleitung von

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Mag. Dr.techn. **Alexander Redlein**

Institut für Managementwissenschaften
Forschungsbereich Betriebstechnik, Systemplanung und Facility Management
Forschungsgruppe Immobilien und Facility Management
Technische Universität Wien,
Karlsplatz 13/330-02-2, A-1040 Wien

Wien, Juni 2023

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Hiermit erkläre ich, dass ich die hier vorliegende Diplomarbeit selbständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt sowie der Literatur wörtlich und inhaltlich entnommene Stellen als solche gekennzeichnet habe. Die Arbeit wurde bisher weder im In- noch Ausland in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen Prüfungskommission (einer Beurteilerin/einem Beurteiler zur Begutachtung) vorgelegt und auch nicht veröffentlicht.

Wien, am 14.06.2023

Jan Höfler

KURZFASSUNG

Schlagwörter: Monitoring, Internet of Things, MQTT, Well-Being, Energieeffizienz, Dashboards, Datenvisualisierung

Die Immobilienbranche trägt die Verantwortung für ca. 37% des weltweiten energiebezogenen CO₂-Emissionsaustoßes. Einer der Hauptgründe dafür ist der energieintensive Gebäudebetrieb durch den unmittelbaren Einsatz von fossilen Energieträgern. Um diesen betriebsbedingten Energiekonsum zu reduzieren, sind energieeffiziente Verbesserungsmaßnahmen erforderlich, die eine Dekarbonisierung des Immobiliensektors über den gesamten Lebenszyklus hinweg gewährleisten. Eine dieser Maßnahmen kann die Implementierung eines Energie-Monitoring-Systems sein.

In der vorliegenden Diplomarbeit wird daher die Ausarbeitung eines solchen Energie-Monitoring-Systems thematisiert. Im Wesentlichen handelt es sich dabei um ein Managementwerkzeug, welches es ermöglicht Energieverbräuche zu überwachen und daraus Steuerungsmaßnahmen abzuleiten, welche die Energie-Performance der Immobilie verbessern. Die Beurteilung der Energie-Performance erfolgt dabei anhand von sogenannten Key-Performance-Indikatoren (KPI).

Für die technologische Umsetzung wird die weitverbreitete „Smart-Building-Technologie“ das „Internet of Things“ (IoT) verwendet. Eine Technologie die bereits in intelligenten und modernen Gebäuden zum Einsatz kommt. Neben der Datengenerierung durch entsprechende Sensoren, dem Datentransport durch Kommunikationsprotokolle sowie der Datenspeicherung mittels geeignetem Datenbankmanagementsystem (DMS), übernimmt die Datenvisualisierung eine zentrale Aufgabe. Erst mit Hilfe einer grafischen Aufbereitung von Energiedaten mittels Dashboards ist eine Entscheidungsfindung in Richtung energieeffizienten Gebäudebetrieb möglich. Voraussetzung dafür ist dabei die richtige Wahl des Analysewerkzeugs.

Die Entscheidung welche Energiedaten zu generieren und zu visualisieren sind, hängt grundsätzlich von den Energieverbrauchergruppen bzw. Energieträgern ab, die in einem Gebäude zur Anwendung kommen. In der vorliegenden Arbeit wird ein IoT-basierendes Energie-Monitoring-System für Büroimmobilien diskutiert. Dementsprechend werden die relevanten Verbrauchergruppen für diese Immobilienart erhoben. Ergänzend dazu erfolgt die Ermittlung von sogenannte „Well-Being“-Faktoren. Dabei handelt es sich um Parameter, die einerseits das Wohlbefinden des Immobiliennutzers beschreiben und andererseits das energetische Gebäudeverhalten der Büroimmobilie beeinflussen.

ABSTRACT

Key Words: Monitoring, Internet of Things, MQTT, Well-Being, Energy-Efficiency, Dashboards, Data-Visualization

The real estate industry is responsible for approximately 37% of the world's energy-related CO₂ emissions. One of the main reasons for this is the energy-intensive operation of buildings through the direct use of fossil fuels. To reduce this operational energy consumption, energy-efficient improvement measures are needed to ensure decarbonization of the real estate sector throughout its life cycle. One of these measures can be the implementation of an energy monitoring system.

This thesis therefore addresses the elaboration of such an energy monitoring system. Basically, it is a management tool that makes it possible to monitor energy consumption and derive control measures to improve the energy performance of the property. The evaluation of the energy performance is based on so-called key performance indicators (KPI).

For the technological implementation, the widely spread smart-building-technology the Internet of Things (IoT) is used. This technology is already being used in intelligent and modern buildings. In addition to data generation by corresponding sensors, data transport by communication protocols and data storage using a suitable database management system (DMS), data visualization takes on a central task. Only with the help by graphical presentations of energy data by suitable dashboards it is possible to make decisions in the direction of energy-efficient building operation. The prerequisite for this is the right choice of an analytic tool.

The decision which energy data are to be generated and visualized basically depends on the energy consumption groups or energy carriers used in a building. In this paper, an IoT-based energy monitoring system for office buildings is discussed. Accordingly, the relevant consumer groups for this type of real estate are surveyed. This is supplemented by the determination of so-called well-being factors. On the one hand these parameters describe the comfort of the property user and on the other hand influence the energy-related building behavior of the office property itself.

Inhaltsverzeichnis

EIDESSTÄTTLICHE ERKLÄRUNG	I
KURZFASSUNG	III
ABSTRACT.....	V
Inhaltsverzeichnis.....	VII
1 Einleitung.....	1
1.1 Relevanz und Problemstellung.....	1
1.2 Forschungsfragen und Forschungsziele.....	2
1.3 Methodisches Vorgehen.....	3
1.4 Aufbau der Arbeit.....	4
2 Relevante Energieparameter.....	5
2.1 Globaler Statusüberblick des Immobiliensektors.....	5
2.1.1 Energiekonsum des Immobiliensektors.....	5
2.1.2 Emissionsausstoß des Immobiliensektors	7
2.2 Energetische und soziale Parameter bei Büroimmobilien.....	8
2.2.1 Relevante Energieflüsse und Energieträger.....	9
2.2.2 Relevante „Well-Being“ Faktoren.....	10
2.2.2.1 Raumtemperatur.....	11
2.2.2.2 Luftfeuchtigkeit	11
2.2.2.3 CO ₂ -Gehalt	12
3 Energie Monitoring System (EMS)	13
3.1 Definition des Monitorings und des Monitoring Systems	13
3.2 Kriterien eines effektiven Monitoring System	14
3.2.1 Datenvisualisierung und Darstellungsformen.....	15
3.2.2 Warnsystem – Benachrichtigung.....	17
3.3 Monitoring mit Energiedaten.....	17
3.3.1 Relevante Key-Performance-Indikatoren (KPI's).....	18
3.3.2 Kriterien eines EMS	21
3.3.2.1 Energiedatensammlung.....	21
3.3.2.2 Messung durch ein EMS.....	21
3.3.2.3 Relevante Variablen und statische Faktoren	21
4 Technologischer Aufbau eines EMS.....	22
4.1 Smart Building Technologien	22

4.2	System-Architektur eines IoT-basierenden EMS.....	25
4.3	Komponenten einer EMS-Infrastruktur	25
4.3.1	Zentrale Komponente eines IoT-basierenden EMS.....	26
4.3.1.1	Arduino	26
4.3.1.2	Raspberry Pi	28
4.3.1.3	Komponentenvergleich – Raspberry Pi und Arduino	29
4.3.2	Datengenerierung und Sensorik.....	30
4.3.3	Datenspeicherung	31
4.3.3.1	Relationale Datenbank	31
4.3.3.2	Zeitreihendatenbank	32
4.3.3.3	Vergleich zwischen SQL-Datenbanken und InfluxDB.....	34
4.3.4	Datenvisualisierung und Analytik.....	34
4.3.4.1	Power-BI.....	34
4.3.4.2	Kibana	35
4.3.4.3	Grafana	35
4.3.4.4	Schlussfolgerung.....	36
5	Prototypische Umsetzung	37
5.1	Allgemein.....	37
5.2	System-Architektur.....	38
5.3	Sensor Layer – MQTT-Client.....	39
5.3.1	Messung des Betriebsstromverbrauchs	40
5.3.2	Messung des CO ₂ -Gehalts.....	40
5.3.3	Messung von Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit.....	41
5.4	Funktionsablauf des EMS.....	41
5.4.1	Datenstrang 1 – InfluxDB	43
5.4.2	Datenstrang 2 – MariaDB.....	44
6	Validierungsprozess – Prototyp mittels Experteninterview	45
6.1	Experteninterview	45
6.1.1	Leitfaden	45
6.1.2	Ergebnis	46
6.2	Prototyp nach dem Validierungsprozess	48
6.2.1	EMS-Startseite.....	49
6.2.2	Geometrische Parameter.....	50
6.2.3	Building Performance	52
6.2.4	Momentane Aufzeichnungen.....	53
6.2.5	Analytische Aufzeichnung.....	56

7	Fazit.....	58
7.1	Zusammenfassende Erkenntnisse.....	58
7.2	Beantwortung der Forschungsfragen.....	59
7.3	Ausblick.....	61
8	VERZEICHNISSE.....	63
8.1	Abkürzungsverzeichnis	63
8.2	Begriffsbestimmung	64
8.3	Literaturverzeichnis.....	66
8.4	Abbildungsverzeichnis	75
8.5	Tabellenverzeichnis	76
9	Anhang	77
9.1	Programmierung – Codes	77
9.1.1	Geometrical Parameters – HTML	77
9.1.2	Geometrical Parameters – PHP.....	79
9.1.3	Datensammlung der Sensoren.....	81

1 Einleitung

Zu Beginn dieses Kapitels und einleitend für diese Arbeit soll die Notwendigkeit von energieeffizienten Maßnahmen im Immobiliensektor aufgezeigt und das Energie-Monitoring-System als Bestandteil eines nachhaltigen Lösungsansatzes, zur Dekarbonisierung von Gebäuden, vorgestellt werden. In einer weiteren Folge werden für die Umsetzung des IoT-basierenden Energie-Monitoring-Systems relevante Forschungsziele und Forschungsfragen festgelegt und das methodische Vorgehen für die Ausarbeitung der vorliegenden Diplomarbeit erörtert. Abschließend wird der Aufbau der Arbeit beschrieben, um einen strukturierten, inhaltlichen Überblick der einzelnen Kapitel zu geben.

1.1 Relevanz und Problemstellung

Die Klimakonvention der vereinten Nationen bezeichnet im Artikel 1 den Klimawandel als eine Änderung des Klimas, die direkt oder indirekt auf menschliche Aktivitäten zurückzuführen ist und die Zusammensetzung der Atmosphäre beeinflusst (United Nations, 1992). In den Jahren zwischen 1880 und 2012 ist es zu einem Anstieg der gemittelten globalen Oberflächentemperatur um $0,85^{\circ}\text{C}$ ($0,65^{\circ}\text{C}$ - $1,06^{\circ}\text{C}$) gekommen. Je nach dem von Masson-Delmotte et al. (2021) beschriebenen Szenarien ist bis Ende des 21. Jahrhunderts eine Zunahme der Oberflächentemperatur um $1,0^{\circ}\text{C}$ bis $5,7^{\circ}\text{C}$ im Vergleich zu den vorindustriellen Bedingungen (Zeitspanne von 1850 bis 1900) möglich. Als Hauptursache der beobachteten Erwärmung werden die anthropogenen Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen) gesehen, wodurch sich zufolge des resultierenden Temperaturanstiegs irreversible Auswirkungen auf den Menschen und das Ökosystem ergeben. Ohne der Implementierung von Minderungsversuche kann eine Begrenzung des Temperaturanstieges von $1,5^{\circ}\text{C}$ bis $2,0^{\circ}\text{C}$, sowie im Pariser Klimaabkommen gefordert, gegenüber dem Basisjahr (vorindustrielle Zeit) bis 2100 nicht gewährleistet werden und die einhergehenden irreversible Folgen nicht verhindert werden (Masson-Delmotte et al., 2021; Pachauri & Meyer, 2014).

Um eine Senkung der THG-Emissionen zu bewirken und einen weiteren globalen Temperaturanstieg einzubremsen, ist eine Effizienzsteigerung des Energie- und Ressourceneinsatzes sowie eine Verhaltensänderung der Menschen erforderlich. Als Schlüsselsektor wird dazu unter anderem der Immobiliensektor gesehen (Masson-Delmotte et al., 2021; Pachauri & Meyer, 2014).

Seit dem Jahr 2010 hat sich die Immobilienfläche stetig pro Jahr um ca. 2% erhöht und befand sich im Jahr 2021 bei geschätzten 242 Mrd. m^2 (Delmastro, 2022). Zur selben Zeit ist auch die Bevölkerungsanzahl linear angewachsen, wodurch die Nachfrage an energieverbrauchenden Dienstleistungen zugenommen hat. Beide genannte Faktoren stellen wesentliche Treiber des gebäudebezogenen Energiekonsums sowie der damit verbundenen THG-Emissionen dar (United Nations, 2022; United Nations Environment Programme, 2021). Um diesen Treibern entgegenzuwirken ist die Dekarbonisierung des Immobiliensektors über den gesamten Lebenszyklus hinweg notwendig (United Nations Environment Programme, 2022).

Für eine Dekarbonisierung ist neben der Sanierung von Bestandsgebäuden durch konstruktive Maßnahmen vor allem die Optimierung des Gebäudebetriebs sicher zu stellen. Dies kann unter anderem durch die Implementierung eines Energie-Monitoring-Systems erfolgen, damit die Energieverbräuche überwacht, Anomalien erkannt und Energieverbrauchstrends sowie Optimierungsmaßnahmen abgeleitet werden können. Für die Umsetzung eines solchen intelligenten Systems

sollen Sensoren und Steuerungseinrichtungen zum Einsatz kommen, um Präferenzen der Nutzer¹ zu verstehen und darauf basierende Verbesserungsmaßnahmen einzuleiten (Global ABC et al., 2020).

Auch auf europäischer Ebene werden im Zuge der dritten Energy Efficiency Directive (EED) Maßnahmen formuliert, um die Dekarbonisierung der Wirtschaft der Unionsgemeinschaft voranzutreiben und um das Arbeitsprogramm „Fit für 55“ – Paket umzusetzen. Für Unternehmen die einen durchschnittlichen jährlichen Energieverbrauch von mehr als 100TJ (27,8GWh) in einer Durchrechnungsperiode von drei Jahren überschreiten, soll ein Energie-Management-System nach europäischen und internationalen Normen wie der ISO 50001:2018 *Energiemanagementsysteme – Anforderungen mit Anleitung zur Anwendung* eingerichtet werden (Europäische Kommission, 2021). Ein weiteres Werkzeug, um die europäischen Klima- und Energieziele zu erreichen, stellt die im Jahr 2020 eingeführte EU-Taxonomie-Verordnung dar. Dabei handelt es sich um ein System, welches basierend auf definierten Bewertungskriterien die Nachhaltigkeit von Wirtschaftstätigkeiten einstuft (BMK, 2023). Ergänzend dazu sorgt die EU-Richtlinie CSRD (engl. Corporate Sustainability Reporting Directive) für eine erhebliche Erweiterung der Berichterstattung von Unternehmen im Bereich von Nachhaltigkeitsaspekten (Deloitte Österreich, 2023). Durch diese genannten Maßnahmen sowie neuen Richtlinien wird der Einsatz eines Energie-Monitoring-Systems gefördert.

1.2 Forschungsfragen und Forschungsziele

Die Forschungsfragen sowie die Ziele dieser Arbeit wurden unter anderem durch die „Innovation Challenge 2020/2021“ im Zuge der ME310 Class an der Stanford University definiert und mit der Unterstützung von Experten validiert. Die Forschungsfragen sowie Forschungsziele sind in den folgenden Punkten ausformuliert.

Forschungsfragen

Folgende Fragestellungen werden von der vorliegenden Arbeit beantwortet:

- 1) Welche relevanten Messdaten sollen erhoben werden, um eine Büroimmobilie energieeffizienter zu betreiben und um das „Well-Being“ der Immobiliennutzer zu erhöhen?
- 2) Wie können generierte Daten bestmöglich zusammengefasst, in einer einheitlichen Darstellungsform aufbereitet und visualisiert werden?
- 3) Wie sieht die Software (SW) und Hardware (HW) Architektur eines Energie-Monitoring-Systems aus?

¹ Genderhinweis: Der Autor legt großen Wert auf Diversität und Gleichbehandlung. Im Sinne einer besseren Lesbarkeit wurde in der vorliegenden Arbeit jedoch oftmals entweder die maskuline oder feminine Form gewählt. Es ist festzuhalten, dass dieses Vorgehen keinesfalls eine Benachteiligung des jeweils anderen Geschlechts impliziert.

Forschungsziele

Folgende Forschungsziele wurde definiert (sind auch durch die Validierungen entstanden):

- 1) Der Prototyp soll aus einer SW/HW Architektur bestehen, welche primär auf gratis Applikationen und Tools basiert, um die Entwicklungskosten und Betriebskosten auf ein Minimum zu halten.
- 2) Der Prototyp soll bei räumlichen Erweiterungen einfach adaptierbar sein.
- 3) Die Darstellungsformen der Energieverbräuche sollen auf unterschiedlichen Ebenen möglich sein (gesamter Trakt, Raumgruppe, einzelne Geräte).

1.3 Methodisches Vorgehen

Der in Abbildung 1 gezeigte Algorithmus stellt die gewählte methodische Vorgehensweise der vorliegenden Diplomarbeit dar, um die in Kapitel 1.2 angeführten Forschungsfragen beantworten zu können und die angeführten Forschungsziele umsetzen zu können.

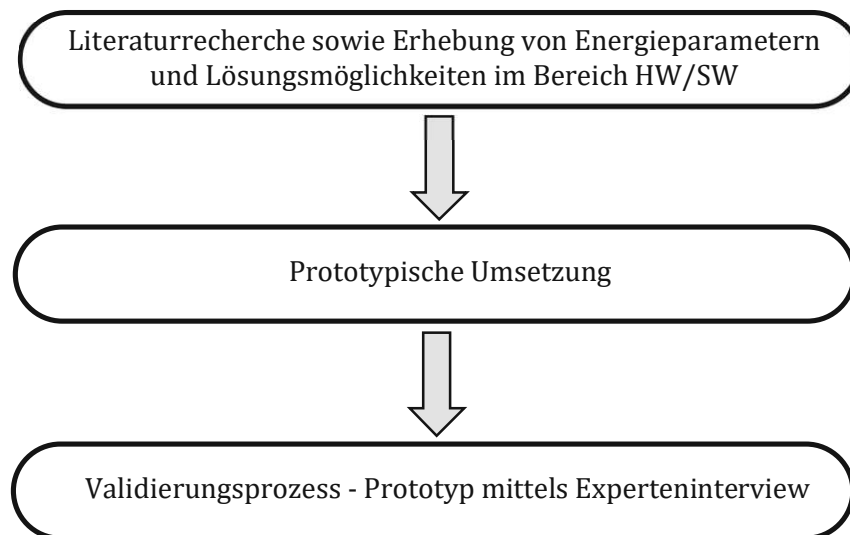


Abbildung 1: Forschungsmethode

Als erster Schritt wurde eine Literaturrecherche durchgeführt. Diese war erforderlich, um relevante soziale sowie energetische Parameter für Büroimmobilien zu erhalten, die im Zuge eines Monitorings zu messen sind und für die Ermittlung von KPI's herangezogen werden können. Des Weiteren sammelte der Autor Anwendungsbeispiele für Energie-Monitoring-Systeme, um daraus den technologischen Aufbau eines solchen Systems ableiten zu können. Dafür kamen vorwiegend folgende Publikationsplattformen zum Einsatz: ScienceDirect, IEEE Xplore, Google Scholar und Catalog Plus der TU-Wien. Im Zuge der Recherche wurde unter anderem nach folgenden Wörtern gesucht: Eco System, Big Data, IoT, Analytic, Energy Monitoring, Energy Dashboards, Data visualization, Dashboards, Energy Efficiency, Smart Buildings.

Die daraus hervorgehende Sammlung an Dokumenten wurde anschließend zufolge der individuellen Kurzzusammenfassungen gefiltert. Nach der Selektion wurden die verbleibenden 59 Dokumente auf den qualitativen Inhalt überprüft. Das Resultat davon ist in Kapitel 4 zu finden.

Nach einer Evaluierung der untersuchten Literatur, wurde basierend auf der durchgeführten Recherche ein erster Prototyp umgesetzt. Dabei lag der Fokus darauf, eine Software-Architektur aufzusetzen, die primär aus „Open-Source“-Applikation besteht und eine Hardware-Architektur zu verwenden, die kostengünstig ist. Um bereits erste Erkenntnisse zu erlangen, wurde der Prototyp eines IoT-basierenden Energie-Monitoring-Systems an einem historischen Bestandsgebäude, der Hofburg-Wien getestet.

In einem finalen Schritt fand die Adaptierung des Prototyps im Zuge eines Validierungsprozesses statt. Für den Validierungsprozess selbst wurde das Experteninterview als Erhebungsmethode gewählt. Dabei konnte die Funktionalität des Prototyps im Allgemeinen besprochen werden und auf die Benutzeroberfläche des Prototyps hinsichtlich der Datenaufbereitung sowie Datenvisualisierung eingegangen werden. Resultierend aus diesem Prozess wurde seitens des Autors ein Analyse-bzw. Visualisierungswerkzeug gewählt und für die Erstellung von unterschiedlichen Dashboards eingesetzt.

1.4 Aufbau der Arbeit

Um die Ausarbeitung eines IoT-basierenden Energie-Monitoring-Systems für Büroimmobilien verständlich aufzubereiten, wurde die vorliegende Diplomarbeit in drei wesentliche Bereiche untergliedert.

Der erste Bereich der Arbeit umfasst die Kapitel 2 bis Kapitel 4 und bildet jene relevanten Informationen ab, die für die Umsetzung des IoT-basierenden Energie-Monitoring-System erforderlich sind. In Kapitel 2 werden sowohl wichtige Energieparameter als auch „Well-Being“-Faktoren für Büroimmobilien aufgelistet, die bei der prototypischen Umsetzung zu messen sind. Welche Messdaten für die Berechnung der KPI's erforderlich sind, wird in Kapitel 3 erläutert. Ein möglicher technologischer Aufbau eines IoT-basierenden Energie-Monitoring-System wird in Kapitel 4 beschrieben.

Mit den gesammelten Ergebnissen aus dem ersten Bereich der Arbeit, erfolgt im Kapitel 5 die Umsetzung des Prototyps. Dabei liegt der Fokus auf der Datengenerierung bzw. Datensammlung durch ausgewählte Sensoren und auf dem Datentransport bzw. Datenspeicherung durch den passenden Server. Um den Prototypen zu validieren, wurde dieser in der Hofburg-Wien installiert.

Nach der Implementierung des Prototyps wird das Resultat in einem Validierungsprozess mittels Experteninterview erörtert. Die Ergebnisse dieses Prozesses sind in Kapitel 6 angeführt. Im Wesentlichen ist festzuhalten, dass der Fokus in diesem Abschnitt auf der Datenvisualisierung durch ein passendes Analysewerkzeug liegt.

2 Relevante Energieparameter

Einen erheblichen Bestandteil des globalen Emissionsausstoßes hat die Immobilienbranche zu verantworten, was sich im Wesentlichen auf den energieintensiven Immobilienbetrieb rückzuführen lässt. Für die Umsetzung eines Energie-Monitoring-Systems sollen daher in einem ersten Schritt relevante Energieparameter des Immobilienbetriebs identifiziert werden, die sowohl einen Einfluss auf den Energieverbrauch als auch auf das nutzerseitige Wohlbefinden haben. Aus diesem Grund wird zu Beginn dieses Kapitels die allgemeine energetische Sachlage des Immobiliensektors thematisiert und anschließend auf das energetische Verhalten von Büroimmobilien im Detail eingegangen, um daraus zu messende Energieparameter, die für die Steigerung der Energieeffizienz einer Büroimmobilie sowie des Wohlbefindens erforderlich sind, ableiten zu können.

2.1 Globaler Statusüberblick des Immobiliensektors

Das Kohlendioxid (CO₂) zählt zu den wichtigsten Klimaregulatoren in der Atmosphäre und gilt außerdem als wesentlicher Treiber des Klimawandels. Mit einem Emissionsbeitrag von ca. 66% am anthropogenen Treibhauseffekt (Methan: 16%, Lachgas: 6%, weitere Treibhausgase: 11%) ist das CO₂ die zentrale Komponente der anthropogenen Treibhausgas-Emissionen. Der Großteil des CO₂ wird dabei von der weltweiten Energiewirtschaft, durch die Nutzung von fossilen Energieträgern (z.B.: Erdöl und Kohle), emittiert (Koppmann & Wiesen, 2015; Umweltbundesamt Deutschland, 2022a). Welchen Anteil der Immobiliensektor am weltweiten Energiebedarf sowie dem korrelierenden CO₂-Ausstoß hat, wird im folgenden Abschnitt erläutert.

2.1.1 Energiekonsum des Immobiliensektors

Im Jahr 2020 wurde der Immobilienbranche ein Anteil von 36% am globalen Energiekonsum zugeschrieben. Dabei fielen geschätzte 22EJ mit 6% auf die Bauindustrie (zur Kategorie Bauindustrie zählen unter anderem die Betonerzeugung, die Stahlerzeugung, die Aluminiumerzeugung sowie die Ziegel- und Glasproduktion) und geschätzte 127EJ mit 30% auf den Immobilienbetrieb. Im Jahr 2021 stieg der operative Energiebedarf weiter auf 135EJ an. Als Hauptursache lässt sich der intensivere Immobilienbetrieb benennen, nachdem zuvor eine pandemiebedingte wirtschaftliche Entschleunigung den Gebäudeenergiebedarf abschwächte (Delmastro, 2022; United Nations Environment Programme, 2021, 2022).

In Abbildung 2 ist dazu der oben erwähnte prozentuale Anteil des Immobiliensektors (grün eingefärbte Kreissegmente) am globalen Energiekonsum zu sehen. Dabei geht der hohe Energiebedarf des Immobilienbetriebs, welcher sich aus dem Betrieb der Nicht-Wohngebäude (NWG) sowie der Wohngebäude (WG) zusammensetzt, deutlich hervor. Zu der Gebäudekategorie NWG sind laut Österreichisches Institut für Bautechnik (2019) unter anderem die Büroimmobilien zu zählen.

Eine detailliertere Aufschlüsselung des Immobilienbetriebs kann mittels Energieverbraucher (Kühlung, Heizung, Licht, Geräte und Ausstattung) erfolgen (siehe Abbildung 2). Die aktuelle Sachlage hinsichtlich der einzelnen Energieverbraucher in Zusammenhang mit dem Energiebedarf einer Immobilie wird wie folgt beschrieben:

- ◆ Heizung: Das Heizen ist der größte, weltweite Endenergieverbraucher und machte im Jahr 2021 fast die Hälfte des globalen Energiekonsums aus. Im Immobiliensektor ist der Energiebedarf für das Heizen sowie für die Warmwasseraufbereitung am größten (IEA, 2021b).

- ◆ Kühlung: Obwohl der Energiekonsum für das Kühlen von Gebäuden im Verhältnis zum Heizen verschwindend klein wirkt, ist die in Anspruch genommene Energie für die Raumkühlungen seit dem Jahr 1990 signifikant angestiegen. Im Jahr 2021 waren rund 16% (ca. 2000TWh) des gesamten Elektrizitätsbedarfs des Immobiliensektors dem globalen Kühlbedarf (KB) von Gebäuden zuzuordnen (Delmastro & Martinez-Gordon, 2022). Heute gilt der KB als der schnellst wachsende Bedarf im Gebäudebetrieb und wird sich voraussichtlich um mehr als 3% pro Jahr für die nächsten drei Jahrzehnte vermehren. Dies bedeutet ein achtmal schnelleres Wachstum im Vergleich zum Heizenergiebedarf (HEB) in den letzten 30 Jahren (Delmastro & Abergel, 2020).
- ◆ Licht: Der Energieverbrauch für Beleuchtungen hat im Jahr 2021 zugenommen. Aufgrund getätigter Effizienzmaßnahmen (Einführung von Leuchtdioden) kann jedoch davon ausgegangen werden, dass der Energieverbrauch trotz vermehrtem Einsatz in Gebäuden sinken wird. Mehr als 50% des weltweiten Beleuchtungsmarktes nutzt die LED-Technologie (Lane, 2022b).
- ◆ Geräte und Ausstattungen: Neben den bereits aufgezählten Energieverbrauchern nimmt auch der globale Energiebedarf für Geräte und Ausstattungen (Geschirrspüler, Waschmaschinen, Kühlschränke usw.) kontinuierlich zu. Da der Energiekonsum in diesem Bereich durch getätigte Energieeffizienzmaßnahmen der fortgeschrittenen Länder in absehbarer Zeit sinken wird, liegt der Fokus auf jenen Ländern mit geringerem Wohlstand und geringerem Ausstattungsgrad. Auf Grund einer zunehmenden Bevölkerungsanzahl, wird in diesen Ländern bis ins Jahr 2030 eine voraussichtliche Zunahme des Energiebedarfs für Geräte und Ausstattungen von 40% bis 130% erwartet (Lane, 2022a).

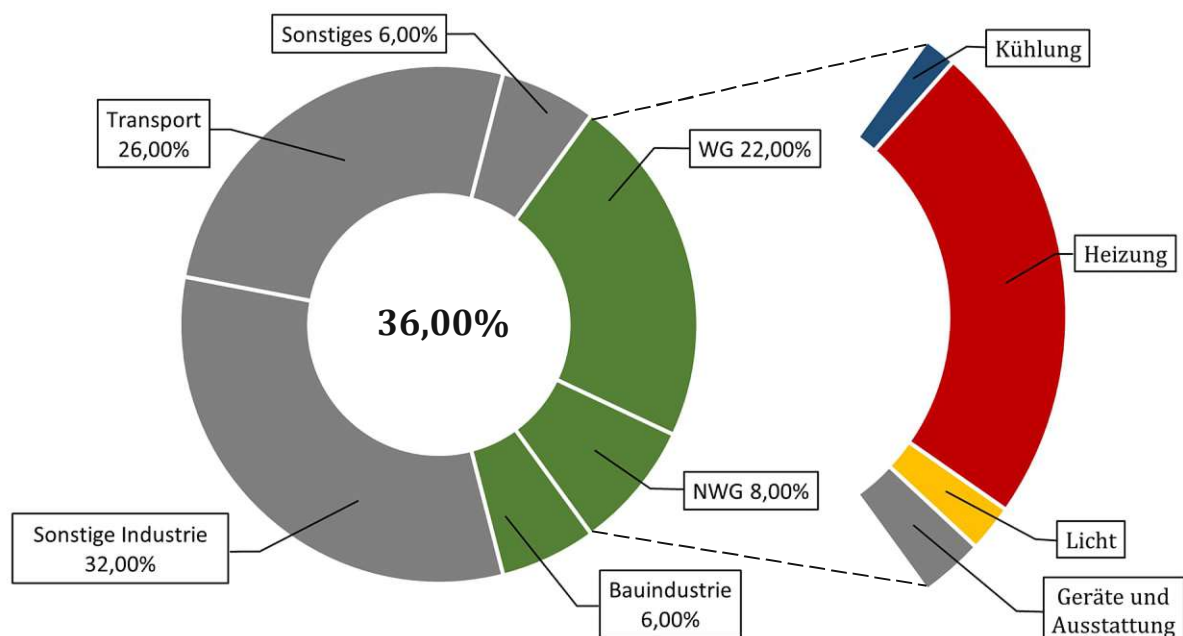


Abbildung 2: Anteil des Immobiliensektors am globalen Energiekonsum mit Stand 2020
(Delmastro, 2022; IEA, 2022; United Nations Environment Programme, 2021)

Äquivalent zur Abbildung 2 werden im Kapitel 2.2 die relevanten Energieverbraucher für Büroimmobilien angeführt und deren Auswirkungen beschrieben.

2.1.2 Emissionsausstoß des Immobiliensektors

Im Jahr 2020 fielen die von der Immobilienbranche produzierten CO₂-Emissionen unter dem Einfluss der COVID-19 Pandemie auf einen Tiefpunkt von 11,7GtCO₂ (United Nations Environment Programme, 2021). Mit dem Wiederaufschwung der Weltwirtschaft im Jahr 2021 erreichten die CO₂-Emissionen ein Niveau von ca. 13,5GtCO₂ (United Nations Environment Programme, 2022).

In Abbildung 3 wird der CO₂-Fußabdruck der Immobilienbranche mit dem Emissionsausstoß anderer relevanter Sektoren ins Verhältnis gesetzt. Dabei ist ersichtlich dass der Immobiliensektor die Verantwortung für über ein Drittel der weltweiten CO₂-Emissionen trägt. Der ausschlaggebende Grund dafür ist der energiebezogene CO₂-Emissionsaustoß von 27%, welcher im Zuge des Betriebs einer Immobilie entsteht. In weiterer Folge können die emittierten Mengen an CO₂ entsprechende des betriebsbedingten Energieverbrauchs in direkte und indirekte Anteile zerlegt werden (Delmastro, 2022).

- ◆ **Direkte CO₂-Emissionen:** Dabei handelt es sich um Emissionen des Gebäudes, welche durch den unmittelbaren Einsatz von Energie (fossile Energieträger) bzw. am Ort der Energieumwandlung entstehen. Darunter fallen unter anderem die Bereiche Heizen sowie die Warmwasseraufbereitung. Obwohl die Verwendung von erneuerbaren Energien sowie eine effizientere technische Gebäudeausstattung Emissionsmindernd wirken, kann eine energieintensive Gebäudenutzung einen negativen Effekt bewirken. Dazu zählt unter anderem der Trend mehr Wohnfläche pro Person zu belegen sowie der Bedarf eines erhöhten Ausstattungsgrades (Umweltbundesamt Deutschland, 2022d; United Nations Environment Programme, 2022).
- ◆ **Indirekte CO₂-Emissionen:** Dieser Emissionsanteil entsteht durch die Energiebereitstellung. Vor allem die Erzeugung von Elektrizität und die Bereitstellung von Wärme (z.B.: Erzeugung von Fernwärme in Heizkraftwerke) sind hierbei zu benennen (Umweltbundesamt Deutschland, 2022d).

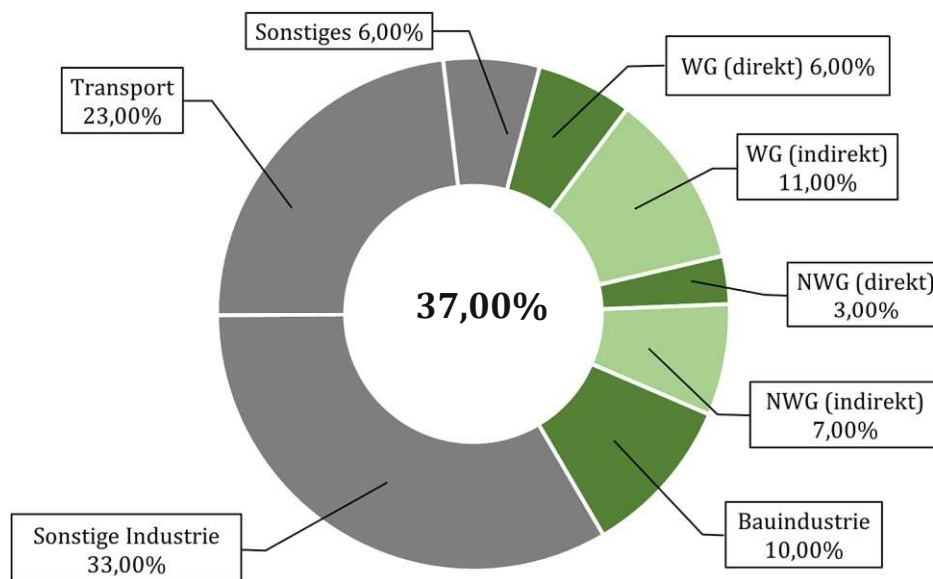


Abbildung 3: Anteil des Immobiliensektors am globalen Emissionsausstoß mit Stand 2020 (Delmastro, 2022; United Nations Environment Programme, 2021)

Im Jahr 2021 betrug die Summe des direkten und indirekten CO₂-Emissionsausstoßes zufolge des Immobilienbetriebs ca. 10GtCO₂ (siehe grün eingefärbte Kreissegmente – mit Ausnahme des Kreissegments „Bauindustrie“). Die energiebezogenen Emissionen zufolge Herstellung und Verarbeitung von Baumaterialien sowie der Gebäudekonstruktion selbst, umfassten ca. 3,5GtCO₂. Dieser Emissionsanteil wird im abgebildeten Diagramm vom Kreissegment „Bauindustrie“ erfasst (Delmastro, 2022; United Nations Environment Programme, 2021).

2.2 Energetische und soziale Parameter bei Büroimmobilien

Aus dem Kapitel 2.1 geht eindeutig hervor, dass vor Allem der energieintensive Betrieb einer Immobilie für den korrelierenden, ansteigenden, energiebezogenen CO₂-Emissionsausstoß des Immobiliensektors verantwortlich ist. Dabei können getätigte Energieeffizienzmaßnahmen technischer Natur (z.B.: Einsatz von erneuerbaren Energieträgern, Verwenden der LED-Technologie etc.) den Emittenten positiv entgegenwirken, werden jedoch von einer energieintensiven Immobiliennutzung (z.B.: hoher Ausstattungsgrad etc.) konterkariert.

Eine spezielle Sachlage stellt dabei der Betrieb von Büroimmobilien dar. Seit der COVID-19 Pandemie befindet sich die Arbeitswelt im Wandel und bringt entsprechende Anpassungen, in der Art und Weise wie Büroimmobilien verwendet sowie betrieben werden, mit sich. Der ausschlaggebende Grund dafür ist die Transformation vom Arbeiten am Arbeitsplatz hin zum „Remote Working“ im Heimbüro. Eine Verlagerung die sich auch im Energiebedarf einer Büroimmobilie bemerkbar macht. Als Nicht-Wohngebäude sind Büroimmobilien zufolge Abbildung 2 als Bestandteil von 8% des betriebsbedingte Immobilienenergiebedarfs (NWG) sowie zufolge Abbildung 3 als Bestandteil von 10% des betriebsbedingten, energiebezogenen CO₂-Emissionsausstoßes des Immobiliensektors (NWG-direkt, NWG-indirekt) für den weltweiten Anstieg des Energiekonsums und dem zusammenhängenden weltweiten CO₂-Emissionsausstoßes mitverantwortlich. Basierend auf den aktuellen Entwicklungen hinsichtlich einer hybriden Arbeitswelt, kann davon ausgegangen werden, dass die energieintensive Büronutzung weiter zunehmen wird. Als wesentlicher Aspekt dafür kann genannt werden, dass Unternehmen vor der Situation stehen, wo ein Minimum an Dienstleistung aufrechterhalten bleibt, mehr Fläche pro Mitarbeiter kühlen bzw. heizen zu müssen. Des Weiteren erfordert das Arbeiten im Homeoffice eine Adaptierung des HEB bzw. KB und eine Abwägung des Stromverbrauchs in Bezug auf die Steckdosenbelegung. (United Nations Environment Programme, 2021, 2022).

Um Büroimmobilien energieeffizienter betreiben zu können, ist neben der Feststellung des erhöhten betriebsbedingten Energiebedarfs am Arbeitsplatz, auch das nutzerseitige Verhalten mit zu berücksichtigen. Dadurch soll das Wohlbefinden des Arbeitnehmers gesteigert und eine nutzerzentrierte Ausrichtung der Arbeitsstätte sichergestellt werden. In diesem Kontext sind aus den siebzehn (17) SDG (engl. Sustainability Development Goals) der United Nations (2023) die für den Immobiliensektor wesentlichen Ziele anzuführen:

- ◆ SDG-Goal 3: „Good health and well-being“
- ◆ SDG-Goal 7: „Energy Efficiency“
- ◆ SDG-Goal 8: „Decent Work Environment“

Im Zusammenhang mit den oben angeführten Nachhaltigkeits-Zielen werden für die Umsetzung eines Energie-Monitoring-System im nachfolgenden Abschnitt sowohl relevante energetische Parameter als auch relevante soziale Parameter bzw. „Well-Being“-Faktoren behandelt.

2.2.1 Relevante Energieflüsse und Energieträger

Da sich das Referenzprojekt für die prototypische Umsetzung in Österreich/Wien befindet (siehe Kapitel 5), werden im Zuge der Literaturrecherche die Energieflüsse für österreichische Büroimmobilien angeführt. Das energetische Verhalten von Büroimmobilien anderer Länder wird dabei nicht berücksichtigt.

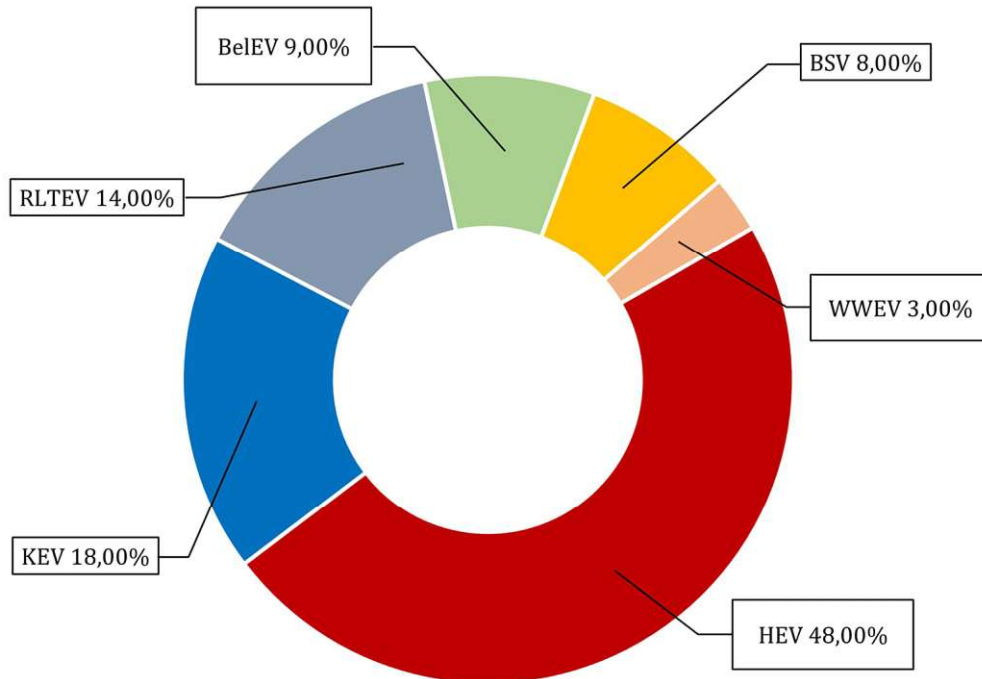


Abbildung 4: Mittlerer Nutzenergiebedarf von Büroimmobilien (Bayer et al., 2014)

Die energetischen Eigenschaften von Büroimmobilien wurden seitens Bayer et al. (2014) für den Standort Wien untersucht. Die Zusammensetzung der ermittelten spezifischen Energieverbräuche ist in Abbildung 4 dargestellt. Bayer et al. (2014) unterscheidet dabei zwischen folgenden Verbrauchergruppen sowie folgende Eigenschaften:

- ◆ Heizenergieverbrauch (HEV): Die Verbrauchergruppe Heizen nimmt mit 48% den größten Anteil unter den Nutzenergieverbrauchern ein. Der spezifische Heizwärmeverbrauch (HWV) der untersuchten Büroimmobilien weist einen Mittelwert von ca. $83\text{kWh/m}^2 \cdot \text{a}$ auf. Je nach Art der Wärmeerzeugung kann der Wert der HEV variieren, da die benötigte Energiemenge für die Beheizung des Gebäudes von Verlusten (z.B.: Verteilungsverluste, Wirkungsgradverluste) definiert wird. Erfolgt die Wärmeerzeugung zum Beispiel durch Erdgas, liegt der HEV auf Grund der Verluste über 15% des genannten HWV. Im Wesentlichen lässt sich dabei festhalten, dass der hohe HEV zumeist auf das Nutzerverhalten zurückzuführen ist und die Verantwortung nicht bei der Gebäudehülle liegt.
- ◆ Kälteenergieverbrauch (KEV): Der prozentuale Anteil des KEV am gesamten Nutzenergieverbrauchs liegt bei ca. 18%. Zur Deckung dieses Bedarfs beträgt der Stromverbrauch ca. $14\text{kWh/m}^2 \cdot \text{a}$. Aus Sicht von Bayer et al. (2014) ist das Optimierungspotential zur Verringerung des Stromverbrauchs vorhanden (z.B.: Nutzung von Grund- und Oberflächenwasser).

- ◆ Lüftungsenergieverbrauch (RLTEV): Der Mittelwert des RLTEV befindet sich bei ca. 23kWh/m². a.
- ◆ Beleuchtungsenergieverbrauch (BelEV): Der BelEV setzt sich aus dem tatsächlichen Stromverbrauch für die Beleuchtung im Innen- sowie Außenbereich zusammen und ist im Wesentlichen ist von der eingetzten Beleuchtungstechnologie abhängig. Je nachdem kann liegt der Wert zwischen 5kWh/m². a und 30kWh/m². a
- ◆ Betriebsstromverbrauch (BSV): Der BSV beinhaltet unter anderem den Strombedarf für die diverse Steckdosenbelegung (z.B.: Drucker, Monitore, Schreibtischlampen, Küchenausstattung usw.) sowie den Strombedarf für die Information und Kommunikationstechnik (IKT). Der BSV beträgt ca. 16kWh/m² a.
- ◆ Warmwasserenergieverbrauch (WWEV): Der Warmwasserwärmeverbrauch (WWV) liegt bei ca. 5kWh/m². a und hat im Vergleich zu den anderen Energieverbräuchen mit 3% des gesamten Nutzenergieverbrauchs eine untergeordnete Bedeutung. Der WWEV resultiert aus dem WWV und den entsprechenden Verlusten (siehe HEV). Der wesentliche Verbrauch entsteht bei den Handwaschbecken in den Sanitärräumen sowie in den Teeküchen. In den meisten Gebäuden wird dafür Untertischspeicher verwendet. Eine Potential für eine haustechnische Optimierung sowie eine Verbesserung im Nutzerverhalten wird seitens Bayer et al. (2014) nicht gesehen.

Für den Büroimmobilienbetrieb werden zufolge Jandrokovic et al. (2012) je nach Größe der Büroimmobilie folgende wesentlichen Energieträger zur Deckung des Nutzenergiebedarfs eingesetzt:

- ◆ Erdgas: 25% bis 41%
- ◆ Strom: 33% bis 41%
- ◆ Fernwärme: 7% bis 20%
- ◆ Heizöl: 11% bis 12%
- ◆ Flüssiggas: 2%
- ◆ Biomasse: 8%

In Abhängigkeit der technischen Gebäudeausstattung einer Büroimmobilie sind die oben angeführten Energieträger sowie die korrelierenden Energieverbrauchergruppen im Zuge eines Energie-Monitorings zu überwachen.

2.2.2 Relevante „Well-Being“ Faktoren

Das thermische Verhalten eines Bürogebäudes sollte förderlich für die nutzerseitige Gesundheit sowie für das Gefühl der Behaglichkeit sein. Dies ist zufolge ISO 7730:2005 (2005) unter anderem von folgenden Kenngrößen abhängig:

- ◆ Bekleidung des Nutzers
- ◆ Aktivität des Nutzers (Tätigkeitsgrad)
- ◆ Temperatur
- ◆ Luftfeuchtigkeit
- ◆ CO₂-Gehalt
- ◆ Luftgeschwindigkeit

Aus Sicht von Redlein & Thrainer (2022) sind vor Allem die Parameter Raumtemperatur, Luftfeuchtigkeit sowie der CO₂-Gehalt als „Well-Being“-Faktoren in einem Monitoring-System zu messen, um die in Kapitel 2.2 angeführten und für den Immobiliensektor drei wesentlichen SDG der United Nations (2023) zu erfüllen. Diese sozialen Parameter werden im folgenden Abschnitt erörtert.

2.2.2.1 Raumtemperatur

Die Raumtemperatur ist einer der wichtigsten Parameter, um die Energieeffizienz von Gebäuden zu beeinflussen und um eine Dekarbonisierung des Immobiliensektors herbeizuführen. Außerdem kann die Raumtemperatur wie kein anderer „Well-Being“ Faktor durch eine nutzerseitige Verhaltensänderung gesteuert werden (IEA, 2021a). Bei einer Reduktion der Raumtemperatur um 1 C kann im Winter der Energieverbrauch der Heizanlage bis zu 11% gesenkt werden (Bayer et al., 2014).

Die Arbeitsstättenverordnung §28 Abs 1 Z 1 AStV definiert eine mögliche Lufttemperatur bei Arbeiten mit geringer körperlicher Belastung von 19°C bis 25°C.

2.2.2.2 Luftfeuchtigkeit

In Abbildung 5 sind die Grenzwerte für die Behaglichkeit in Abhängigkeit der rel. Luftfeuchtigkeit und der Raumlufttemperatur dargestellt.

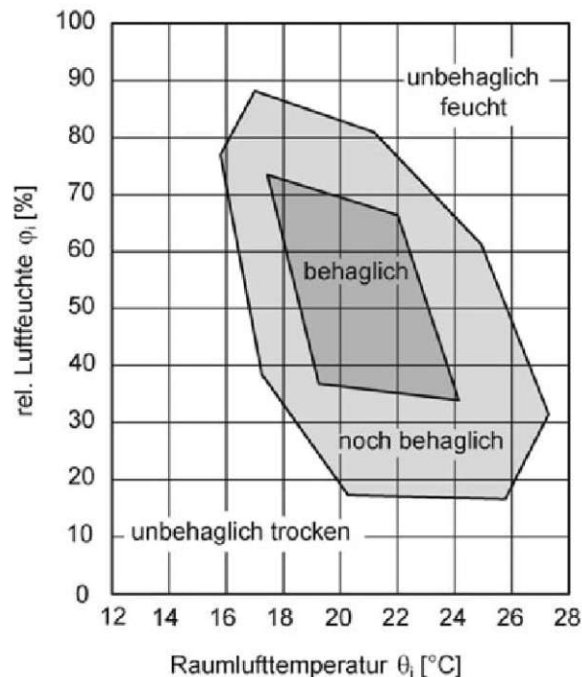


Abbildung 5: Behaglichkeit für das Verhältnis rel. Luftfeuchtigkeit und Raumlufttemperatur (Leusden & Freymark, 1951)

Die Arbeitsstättenverordnung §28 Abs 5 Z 1 AStV definiert eine mögliche relative Luftfeuchtigkeit bei Verwendung einer Klimaanlage von 40% bis 70%.

2.2.2.3 CO₂-Gehalt

Um eine entsprechende Innenluftqualität in einem Raum zu erreichen, muss ein regelmäßiger Luftwechsel stattfinden. Ein Austausch mit der Außenluft kann dabei entweder über die Fensterlüftung oder über eine mechanische Lüftungsanlage stattfinden Riccabona & Bednar (2010). Um die Leistungsfähigkeit hinsichtlich mit ausreichender Frischluftmenge zu gewährleisten, wurde seitens Tappler (2017) Grenzwerte für CO₂-Konzentration im Innenraum untersucht und in Klassen eingeteilt (siehe Tabelle 1).

Tabelle 1: Grenzwerte für CO₂-Konzentration in Innenräumen (Tappler, 2017)

Klasse	Beschreibung	Arithmetischer Mittelwert für CO ₂ [ppm]
Klasse 1	Ziel für den dauerhaften Aufenthalt von Personen	≤ 800
Klasse 2	Richtwert für Innenräume für den dauerhaften Aufenthalt von Personen, in denen geistige Tätigkeiten verrichtet werden bzw. die zur Regeneration dienen	≤ 1000
Klasse 3	Allgemeiner Richtwert für Innenräume für den dauerhaften Aufenthalt von Personen	≤ 1400
Klasse 4	Richtwert für Innenräume mit geringer Nutzungsdauer durch Personen	≤ 5000
Außerhalb der Klassen	Für die Nutzung durch Personen nicht akzeptabel	> 5000

Für Büroräumlichkeiten ist der Grenzwert von 1000ppm (Klasse 3) nicht zu überschreiten, um geistige Tätigkeiten verrichten zu können und um eine Regeneration zu gewährleisten.

3 Energie Monitoring System (EMS)

Je nach Zielsetzung kann das Konzept des Monitorings im Kontext mit Energiedaten unterschiedlich angewendet werden. Für den Bereich der Büroimmobilien kommt das Energie-Monitoring unter anderem als Arbeitswerkzeug zum Einsatz, um Energieverbräuche von konditionierten Büroflächen zu analysieren und daraus eventuelle zukünftige Trends abzuleiten (Bocheng, 2012). Die generierten Informationen dienen sowohl den ökonomischen, strategischen Überlegungen (z.B.: Reduktion der Energiekosten/Betriebskosten, Erhöhung der Energieeffizienz) als auch der Beurteilung des nutzerspezifischen Verhaltensmusters. Durch gezieltes Feedback mittels Monitoring kann eine Verhaltensänderung des Nutzers erzielt werden (Moreno et al., 2014).

Neben der Kernfunktion energieintensive Bereiche zu identifizieren, besteht die Möglichkeit das Energie-Monitoring, um die Aspekte Sicherheit und Gesundheit zu erweitern. Durch die Integration der „Well-Being“-Faktoren ist eine Verbesserung der Arbeitsumgebung möglich (Murthy & AjaySaiKiran, 2018).

Um die Umsetzung eines EMS im Zuge dieser Arbeit sicherzustellen, werden im folgenden Abschnitt die grundlegenden Eigenschaften und erforderlichen Kriterien eines Monitoring-Systems bzw. eines EMS erarbeitet. Ergänzend dazu wird das methodische Vorgehen zur Beurteilung der Energieeffizienz erörtert.

3.1 Definition des Monitorings und des Monitoring Systems

Bevor näher auf das spezifische Thema EMS eingegangen wird, soll die Definition des Monitorings bzw. eines Monitoring Systems im Allgemeinen erläutert werden. Dabei schlägt die untersuchte Literatur verschiedene Definitionen für die oben genannten Begriffe vor. Zumeist wird seitens der Autoren ein Konnex zur Computerwissenschaft hergestellt. In allen beschriebenen Anwendungsbeispielen dient Monitoring jedoch der Generierung von Informationen und Daten.

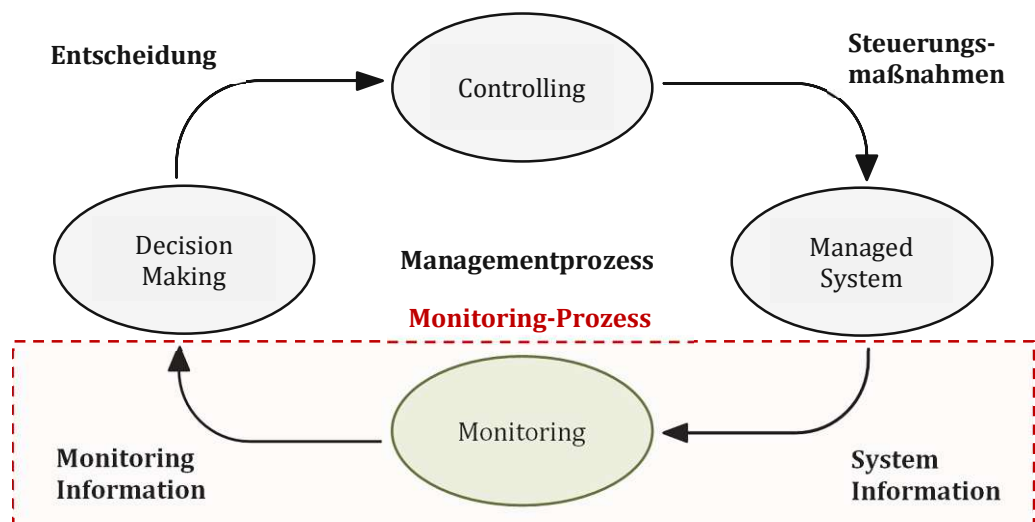


Abbildung 6: Monitoring im Managementprozess (Hoffner, 1994a, 1994b)

In der Arbeit von Snodgrass (1982) wird Monitoring als eine Erfassung von dynamischen Informationen während eines ausgeführten Datenverarbeitungsprozesses verstanden. Dabei hat das Monitoring den Zweck der Fehlersuche, der Statusabfrage und der Performanceevaluierung von

Computerressourcen. Dodd & Ravishanker (1992) bezeichnen Monitoring als die Bewertung, Verarbeitung und Sammlung von Informationen zur Aufgabenabwicklung eines Computersystems. Eine allgemeinere Formulierung wird seitens Hoffner (1994b) getroffen. Dieser beschreibt Monitoring als einen Bestandteil eines Managementprozesses, um Informationen eines zu managenden Systems zu erhalten. Der Managementprozess ist in Abbildung 6 in Form einer Schleife dargestellt. Dabei ist das Monitoring ein Vorgang der Systemüberwachung innerhalb dieses Prozesses. Zu den Aktivitäten, die eine Überwachung ausmachen, gehören unter anderem die Fehlersuche, Fehlererkennung, Analyse der Ressourcennutzung und die Leistungsbewertung. Durch die Bereitstellung von Monitoring-Informationen, welche die Systemvergangenheit abbilden, kann ein SOLL-IST Vergleich vorgenommen werden. Der Vergleich zwischen gewünschtem und vorhandenem Verhalten gewährleistet die Entscheidungsfindung auf welcher Art und Weise Einfluss auf das System genommen werden soll. Im anschließenden Controlling-Prozess finden die gewünschten Änderungen und Steuerungsmaßnahmen, basierend auf dem vorangegangenen Entscheidungsprozess, statt (Hoffner, 1994a, 1994b).

Der Ablauf des Monitoring-Prozesses lässt sich gemäß Hoffner (1994b) in Unterprozesse aufteilen, welche in folgender sequenzieller Reihenfolge ausgeführt werden:

- ◆ **Datengenerierung:** Ein System verfügt über verschiedene Schnittstellen, welche unterschiedliche Systemereignisse hervorrufen. Diese Ereignisse werden im Monitoring-Prozess zu Information verarbeitet.
- ◆ **Datentransport:** Die Informationen werden von einer oder mehr Quellen nach einer oder mehr Destinationen transportiert.
- ◆ **Datensammlung:** Dieser Teilprozess ist für die Sammlung, der Speicherung und der Weiterleitung von Informationen zur weiteren Verarbeitung verantwortlich.
- ◆ **Datenverarbeitung:** Die Verarbeitung von Informationen beinhaltet die Umformung von Überwachungsinformationen in eine für den Beobachter leichter verwendbaren Form. Zur Datenverarbeitung zählen unter anderem das Kombinieren sowie Aufsplitten von Informationen, das Filtern und das Umwandeln von Nachrichten.
- ◆ **Datenvisualisierung:** Hier werden die verarbeiteten Daten transformiert und dem Beobachter in einer zugänglichen Form präsentiert, um Ergebnisinterpretationen zur Entscheidungsfindung zu ermöglichen.

In der vorliegenden Arbeit soll das Monitoring als Managementwerkzeug verstanden werden, um dem Beobachter Informationen gefiltert zur Verfügung zu stellen und die Entscheidungsfindung zu vereinfachen. Das Monitoring wird als ein Überwachungsvorgang festgelegt. Der Monitoring-Prozess wird als ein Informationstransformation interpretiert und in Abbildung 6 mit Hilfe eines rot strichlierten Rahmens dargestellt.

Die Kombination von verschiedenen Systemkomponenten, welche dem Ablauf des Monitoring-Prozesses folgt (Datenerfassung, -verarbeitung, -speicherung und -visualisierung) wird zufolge Chakraborty & Kundan (2021b) als Monitoring-System (MS) bezeichnet.

3.2 Kriterien eines effektiven Monitoring System

Ein effektives Monitoring System setzt sich im Wesentlichen aus den oben beschriebenen Prozessen zusammen und hat die Aufgabe Probleme schnell zu erkennen. Dabei nimmt die Datenvisua-

lisierung eine zentrale Rolle ein. Aussagekräftige und lesbare grafische Darstellungen ermöglichen eine leichtere Identifizierung versteckter Systemmuster sowie ungewöhnlicher Tendenzen. Sobald ein Problem identifiziert wurde, kann der Beobachter mittels Benachrichtigung zum aktuellen Systemstatus informiert werden. Der Einsatz von Warnsystemen ist somit eine weitere entscheidende Komponente bei modernen MS und trägt zur Erhöhung der Effektivität bei (Chakraborty & Kundan, 2021c, 2021a).

Die Eigenschaften einer Datenvisualisierung sowie die unterschiedlichen Darstellungsmöglichkeiten sollen im folgenden Abschnitt näher betrachtet werden. Ergänzend dazu wird die Systembenachrichtigungen als wichtiger Bestandteil eines MS beschrieben.

3.2.1 Datenvisualisierung und Darstellungsformen

Die Datenvisualisierung selbst lässt sich als die Darstellung von digitalen Daten in computerbasierten Systemen beschreiben (Nazemi et al., 2021). Ausgehend von den erzeugten Rohdaten fließen Informationen in Richtung des Beobachters. Durch die visuelle Strukturierung erhalten Daten räumliche und grafische Eigenschaften, um diese anschließend mit Hilfe von geometrischen Parametern (Position, Skalierung, Ausschnitte etc.) in Ansichten zu transformieren (Card et al., 1999). Dieser beschriebene Informationsfluss ist in Abbildung 7 dargestellt.

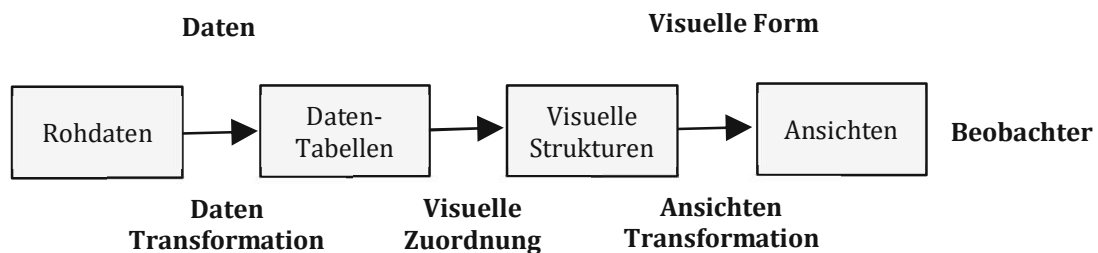































































Abbildung 7: Informationsfluss einer Datenvisualisierung (Card et al., 1999)

Eine Datenvisualisierung muss die Interaktion zwischen Beobachter und transformierten Daten sicherstellen. Erst wenn ein Datenmuster einfacher erkannt, die Datensuche reduziert und die Entscheidungsfindung erleichtert werden kann, ist eine Datenvisualisierung als Effektiv zu bezeichnen. Die Einhaltung folgender Minimalkriterien trägt zur Erhöhung der Effektivität bei:

- ◆ Eine Datenvisualisierung hat die Absicht Informationen an den Beobachter weiterzuleiten.
- ◆ Der Einsatz von zusätzlichen grafischen Elementen, im Sinne von „Eye Candy“, darf den eigentlichen Zweck der Kommunikation nicht überdecken.
- ◆ Eine Datenvisualisierung muss eine Ansicht erzeugen, welche für den Beobachter lesbar und interpretierbar ist.
- ◆ Die Lesbarkeiten einer Ansicht darf Erfahrung sowie Übung eines Beobachters voraussetzen.

Diese Minimalkriterien lassen sich mit Hilfe der richtigen Wahl an Darstellungsformen umsetzen. Jedoch ist wichtig zu erwähnen, dass nicht jedes grafische Element einen unterstützenden Charakter hat. Je nach Art der Aufgabe, kann eine Visualisierung einen positiven sowie einen negativen Einfluss auf die Entscheidungsfindung haben (Card et al., 1999; Kosara, 2007). Die passenden Darstellungsformen in Abhängigkeit der Aufgabenstellung sind in Tabelle 2 aufgelistet.

Tabelle 2: Effektive Darstellungsformen von Daten (Saket et al., 2019)

Analyse Aufgabe	Genauigkeit		Zeit		Benutzerpräferenz	
	1	2	1	2	1	2
	 Tabelle  Balken-Diagramm		 Linien-Diagramm  Blasen-Diagramm		 Torten-Diagramm	
Finden von Anomalien						
Finden von Korrelation						
Erkennen von Verteilungen						
Erkennen von Mustern						
Ableiten von Werten						
Finden von Extrema						
Auslesen von Werten						
Bestimmen des Wertebereichs						
Filtern						
Ordnen						

In Tabelle 2 sind die Schnittstellen zwischen verschiedenen 2-dimensionalen Darstellungsformen (Balkendiagramm, Liniendiagramm, Tortendiagramm, Blasendiagramm, Tabelle) sowie unterschiedlicher Analyseaufgaben dargestellt. Seitens Saket et al. (2019) werden diese Darstellungsformen bewertet und unter anderem in die Bereiche Genauigkeit, Zeit und Benutzerpräferenz kategorisiert. Dabei ist zu erkennen, dass unter Verwendung von Balkendiagrammen die aufgelisteten Analysemethoden am schnellsten sowie am genauesten erledigt werden können. Im Gegensatz dazu führt der Einsatz von Liniendiagrammen zur Ungenauigkeit und ist Zeitintensiv. Unabhängig davon können mittels Liniendiagramme Verteilungen leichter erkannt sowie Korrelationen leichter gefunden werden. Um Muster schneller zu erkennen, stellt sich das Tortendiagramme als hilfreich heraus.

3.2.2 Warnsystem – Benachrichtigung

Wie bereits erwähnt, ist ein integriertes Warnsystem innerhalb eines modernen MS eine essenzielle Komponente, um Veränderungen eines beobachteten Systems zu erkennen und ein Kriterium, für die Steigerung der Effektivität.

Das Konzept eines Warnsystems besteht aus voreingestellten Schellenwerten (obere oder untere Datenpunkte), welche in Abhängigkeit der Zeit über oder unterschritten werden. Im Falle des Übertretens eines Schwellenwerts wird eine Warnung ausgelöst. Befinden sich generierte Datenpunkte für eine zu lange Zeitdauer außerhalb des normierten Bereichs, so wird der Beobachter über integrierte Kommunikationswege (z.B.: E-Mail, SMS, Ticket-System etc.) benachrichtigt (Chakraborty & Kundan, 2021c).

3.3 Monitoring mit Energiedaten

Die energetische Gesamtübersicht eines Gebäudes ist eine zentrale Voraussetzung, um gesetzte Energieziele zu erreichen und um die Energie-Performance (Energieverbrauch, Energienutzung, Energieeffizienz) kontinuierlich zu verbessern. Eine solche energetische Übersicht des Immobilienbetriebs kann durch die Berechnung von Kennzahlen (Indikatoren für den Energieverbrauch) und der Auswertung von Energiedaten sichergestellt werden. Voraussetzung dafür ist die kontinuierliche Überwachung dieser Energiedaten. Ein Vorgang, welcher auch als Energie-Monitoring bezeichnet wird (Engelmann, 2019).

Ein Energie-Monitoring hat die Kontrolle und Quantifizierung des Energieverbrauchs zum Ziel, um eine Verbesserung im Energiehaushalt zu erreichen. Repräsentative Einheiten für den Energieverbrauch sind z.B.: die Einheit für Energie Joule (J) oder das Äquivalenz Watt-Sekunden (Ws). Wenn unterschiedliche Energieformen zum Einsatz kommen, ist es hilfreich, die Energieverbräuche auf eine gemeinsame Einheit zu bringen und somit eine Vergleichbarkeit zu erzielen. Des Weiteren unterstützt die Identifikation der Art der Energienutzung (z.B.: Kühlung, Belichtung, Heizung, Belüftung etc.) den Energieverbrauch zu kategorisieren.

Die Entwicklung des Energieverbrauchs lässt sich durch den Vergleich des Ist-Energieverbrauchs E_{ist} zu dem geplanten Energieverbrauch E_{soll} feststellen. Der Soll-Wert E_{soll} kann wie folgt berechnet werden:

$$E_{soll} = E_{0plan} + \sum_{i=1}^n w_{iplan} * F_{iist} \quad (1)$$

- n: Anzahl an Produkten
 E_{0plan} : geplanter konstanter Energieverbrauch einer Periode
 w_{iplan} : geplanter spezifischer Energieverbrauch eines bestimmten Produktes in einer Periode [kWh/h]
 F_{iist} : gesamte Ist-Produktionsmenge eines Produktes in einer Periode

Die Veränderung der energiebezogenen Leistung ΔE_R lässt sich wie folgt quantifizieren:

$$\Delta E_R = E_{ist} - E_{soll} \quad (2)$$

Neben der Überwachung des Energieverbrauchs hat das Energie-Monitoring die Aufgabe die Energieeffizienz zu optimieren. Dabei lässt sich die Energieeffizienz durch unterschiedliche Methoden ausgedrückt:

- ◆ Energie-Input / Energie-Output
- ◆ Energiebedarf / Energieverbrauch
- ◆ Produktions-Output / Energie-Input (z.B.: Produktionsmenge in Tonnen per Einheit des Energieverbrauchs)

Die Energieeffizienz wird häufig als Begriff für die Beschreibung der energiebezogenen Verbesserung eines Gebäudes verwendet, der sogenannten Energie-Performance. Diese lässt sich in den Einheiten des Energieverbrauchs (z.B.: GJ, kWh), in spezifische Energieverbräuchen (z.B.: kWh/Einheit), in Leistungsspitzen (z.B.: kW) oder in dimensionslosen Verhältnissen abbilden (Engelmann, 2019; ISO 50006, 2014).

3.3.1 Relevante Key-Performance-Indikatoren (KPI's)

Eine zentrale Größe für die Ermittlung der energetischen Verbesserung eines Gebäudes bildet der Energie-Performance-Indikator (EnPI). Dieser Wert lässt sich durch gemessene Verbräuche über die Zeit (Reporting-Periode) bestimmen. Für jeden EnPI ist eine energetische Ausgangsbasis (EnB) zu definieren, welche einen historischen Energieverbrauch innerhalb eines definierten Zeitraums (Basislinien-Periode) darstellt. Durch den Vergleich der Referenzgröße EnB mit der Kennzahl EnPI ergibt sich die Quantifizierung der Energie Performance hinsichtlich des organisationsinternen Energieverbrauchs. Sowie in Abbildung 8 ersichtlich, stellt die Ausgangsbasis EnB eine wesentliche Grundlage für den soeben beschriebenen Vergleich dar. Aus diesem Grund muss

ein Energie-Monitoring erst einige Zeit betrieben werden, um eine ausreichende Aufzeichnungszeit sicherzustellen. In der Regel beträgt diese Aufzeichnungszeit 12 Monate, um saisonabhängige Einflüsse zu berücksichtigen (ISO 50006, 2014).

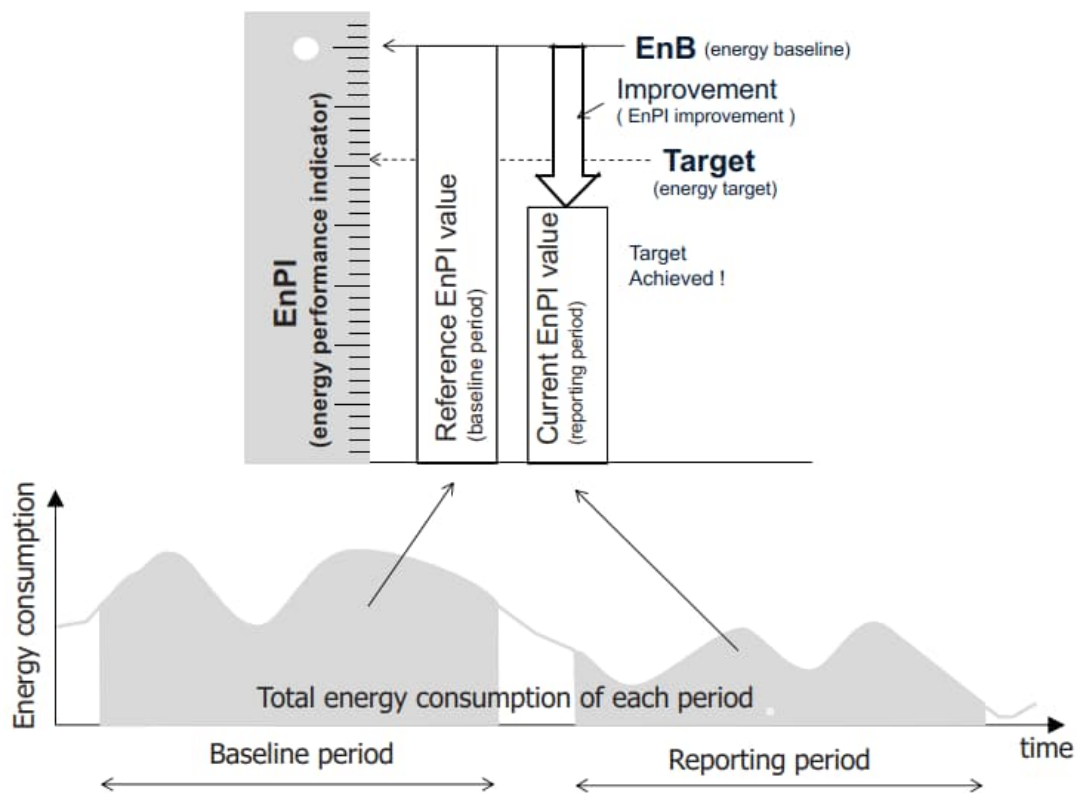


Abbildung 8: Konzept der Basislinien-Periode und Reporting-Periode für einen EnPI (ISO 50006, 2014)

Die ISO 50006 (2014) führt folgende drei Ansätze an, um die energetischen Verbesserung eines Gebäudes zu berechnen:

- ◆ Differenz: Dabei handelt es sich um die Differenz zwischen dem EnPI-Wert aus der Basislinien-Periode und der Reporting-Periode.

$$\text{Differenz} = R - B \quad (3)$$

- ◆ Prozentuale Veränderung: Bei dieser Darstellungsform wird die EnPI-Differenz mittels Prozentsatzes ausgedrückt.

$$\text{Prozentuale Veränderung} = \frac{(R-B)}{B} \cdot 100 \quad (4)$$

- ◆ Verhältnis-Wert: Hier wird die Reporting-Periode durch die Basislinien-Periode dividiert.

$$\text{Verhältnis} = \frac{R}{B} \quad (5)$$

Wie die Verbesserung der Energie Performance berechnet oder dargestellt wird, ist von den Nutzeransprüchen im Zuge des Energie-Monitorings abhängig.

Im Folgenden werden relevante Kennzahlen angeführt, welche je nach Erfordernis und strukturellem Aufbau eines Büros anzuwenden sind.

Tabelle 3: Arten und Anwendungen von EnPIs (ISO 50006, 2014)

EnPI - Typ	Verwendung	Beispiele	Betrachtung
Gemessener Energiewert	- Monitoring und Kontrolle von Kosten - Erkennung von Trendlinien im Energieverbrauch	- Stromverbrauch (kWh) - Spitzenleistung (kW)	- keine Bewertung der Energieeffizienz möglich - kann zu irreführenden Ergebnissen führen
Verhältnis gemessener Werte	- Monitoring der Energieeffizienz - Erkennen und Verstehen von Trendlinien hinsichtlich Energieeffizienz	- kWh/EH eines Produkts - kWh/m ² Grundfläche	- könnte für Einrichtungen mit einem Grundlastenergieverbrauch irreführend sein

In häufigen Fällen kommt im Immobiliensektor ein KPI zum Einsatz, wo der Energieverbrauch im Verhältnis zur Grundfläche steht. Für manche Installationen (z.B.: Belichtung) ist der Verhältniswert einer Grundfläche jedoch suboptimal. Eine Kennzahl, die auf Nutzungszeiten verweist (z.B.: kWh/Nutzungszeit) wäre in manchen Fällen die bessere Alternative (ISO 50006, 2014). Dazu definiert die DIN EN 15221-7 (2013) unter anderem folgende quantitative, umweltbezogenen sowie räumliche Kennzahlen:

- ◆ Primäre räumliche Kennzahlen
 - Nettogrundfläche je Vollzeitkraft (m² NGF)
 - Nettogrundfläche je Person (m² NGF)
 - Nettogrundfläche je Arbeitsplatz (m² NGF)
- ◆ Primäre umweltbezogene Kennzahlen
 - CO₂ – Gesamtemissionen (Tonnen je Jahr)
 - CO₂ – Emissionen je Vollzeitkraft (Tonnen je Jahr)
 - CO₂ – Emissionen je m² NGF (Tonnen je Jahr)
- ◆ Primäre energiebezogene Kennzahlen
 - Gesamt-Energieverbrauch (kWh je Jahr)
 - Energieverbrauch je Vollzeitkraft (kWh je Jahr)
 - Energieverbrauch je m² NGF (kWh je Jahr)

An dieser Stelle ist zu erwähnen, dass die DIN EN 15221-6:2011 die Nettogrundfläche (NGF) als „die berechnete Flächendifferenz aus der Innen-Grundfläche (IGF) und Innenwand-Konstruktions-Grundfläche (IKF)“ (S. 28) definiert. In der NGF sind zum Beispiel die nicht tragenden Wände, Treppenträume, Verkehrsflächen, Sanitärflächen usw. beinhaltet.

3.3.2 Kriterien eines EMS

Bei der Umsetzung eines EMS sind im Zuge des Monitoring-Prozesses auf Mindestkriterien zu achten, die wie folgt beschrieben werden.

3.3.2.1 Energiedatensammlung

Das Sammeln von Datensätzen ist ein entscheidender Vorgang, um den Energiehaushalt zu verbessern. Daher ist eine ordentliche Planung hinsichtlich wie Daten gesammelt werden, welche Daten gesammelt werden und in welcher Frequenz diese gesammelt werden, hilfreich. Dieses Wissen gewährleistet, die Berücksichtigung aller benötigten Daten im EMS. Des Weiteren spielt die Datenqualität eine wichtige Rolle im Monitoring. Fehlerhafte Messungen können das Ergebnis der Energie Performance signifikant verfälschen. Die Identifizierung solcher Datenausreißer kann durch die Anwendung von Streudiagrammen erfolgen (ISO 50001, 2018; ISO 50006, 2014).

3.3.2.2 Messung durch ein EMS

Für die Messung des Energieverbrauchs sowie Sammlung von Energiedaten werden in der Regel permanente Zähler, Unterzähler oder temporär installierte Zähler verwendet. Dabei erfolgt die Datensammlungsfrequenz in einem periodischen Ablauf (z.B.: stündlich, täglich, wöchentlich etc.). Die Wahl der Frequenz hängt davon ab, ob eine ausreichende Anzahl an Datenpunkten zur Datenanalyse abgebildet werden können. Um die genauen Messergebnisse zu erzielen sollten die Messgeräte kalibriert sein (ISO 50006, 2014).

3.3.2.3 Relevante Variablen und statische Faktoren

Abhängig von den Nutzeranforderungen eines EMS sind relevante Variablen (z.B.: saisonale Abhängigkeiten) sowie statische Faktoren (z.B.: Anzahl an Nutzer/Personen in einem Raum, flächenmäßige Größe eines Raums) zu definieren, die einen Einfluss auf die Energie Performance haben können (ISO 50006, 2014).

4 Technologischer Aufbau eines EMS

Dieses Kapitel fokussiert sich im Wesentlichen auf den technologischen Aufbau eines EMS und welche kostengünstigen Komponenten für eine Systemumsetzung relevant sind. Dafür wird zu Beginn dieses Abschnitts ein Überblick von aufstrebenden „Smart-Building Technologien“ gegeben und aufgezeigt, welche entscheidende Rolle das „Internet of Things“ bei intelligenten Gebäudesystemen einnimmt. In der Literatur werden IoT-basierende EMS hauptsächlich für momentane Statusabfragen (z.B.: Temperatur, Luftfeuchtigkeit, CO₂ etc.) verwendet. Wobei Untersuchungen von Chooruang & Meekul (2018) gezeigt haben, dass der Energieverbrauch mit Hilfe stetiger Kommunikation der Echtzeit-Energiedaten, im Vergleich zur indirekten Rückmeldung (z.B.: monatliche Energierechnung) gesenkt werden kann.

4.1 Smart Building Technologien

Das stetig ansteigende Interesse an intelligenten Gebäuden, hat zu einem Wachstum von sogenannten „Smart-Building Technologien“ im Immobiliensektor geführt. Der Einsatz dieser aufstrebenden Technologien ermöglicht unter anderem eine Optimierung des Energiehaushalts, bessere Rahmenbedingungen hinsichtlich des Komforts und der Lebensqualität sowie die Gewährleistung von sicherheitstechnischen Schutzziele. Eine Schlüsselkomponente für moderne Konstruktionen und intelligenter Bauten stellt das „Internet of Things“ (IoT) dar (Abdellah et al., 2020).

Wie in Abbildung 9 dargestellt liegt die Einsatzhäufigkeit von IoT-Geräten vor allen anderen „Smart-Building Technologien“, wodurch deren Bedeutung für moderne Gebäude noch einmal unterstrichen wird.

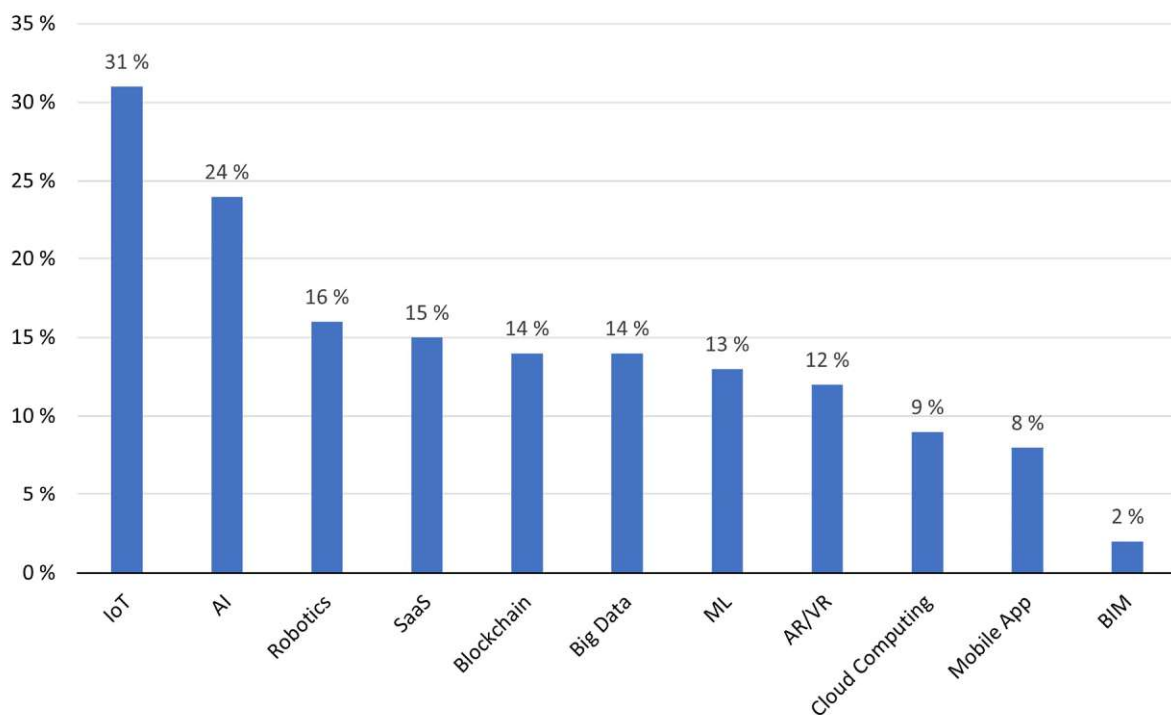


Abbildung 9: Smart-Building Technologien im Immobiliensektor (Redlein & Höhenberger, 2020, S. 145)

Eine zentrale Eigenschaft von IoT-Geräten ist die Fähigkeit der Kommunikation und Interaktion untereinander (M2M) sowie mit dem Internet. Jedes dieser Geräte besitzt eine eingebaute Central Processing Unit (CPU) als auch eine weltweit einzigartige ID, wodurch eine ferngesteuerte Bedienung und Gerätekontrolle möglich ist. Auf Grund der günstigen Preisentwicklung von IoT-Produkten ist deren Nutzung weitverbreitet (Redlein & Höhenberger, 2020).

Der Einsatz von IoT in einem System umfasst zufolge Manoj Kumar & Kumar Mallick (2018) folgende Bestandteile:

- ◆ Sensoren und Aktuatoren: Diese Systembaustein ermöglicht die Kommunikation und Datensammlung ohne menschliche Interaktion.
- ◆ Gateway: Während des Datenflusses gewährleistet das Gateway unter anderem eine Systemsicherheit.
- ◆ Netzwerk-Infrastruktur (Router): Die Netzwerk-Infrastruktur kontrolliert den Datenstrom, welcher in Richtung der Cloud-Infrastruktur fließt.
- ◆ Cloud-Infrastruktur (Datenspeicher): Hier findet die analytische Datenverarbeitung statt.

Alle weiteren relevanten Smart-Building Technologien, welche in Abbildung 9 dargestellt sind, werden wie folgt beschrieben:

- ◆ Artificial Intelligence (AI): Im Allgemeinen wird darunter ein System verstanden, welches sich durch Automatisierung intelligent verhält, sowie die Fähigkeit besitzt wie ein Mensch zu denken und zu handeln (Lukac et al., 2018).
- ◆ Robotics: Unter einem Roboter versteht die ISO 8373 (2021) einen programmierten Mechanismus, welcher bis zu einem gewissen Grad Aufgaben autonom bewältigen kann. Dazu zählt unter anderem die Funktion eines Manipulators oder einer Transportplattform.
- ◆ Software as a Service (SaaS): Hierbei wird dem Nutzer bzw. dem Kunden eine Software über das Internet als Dienstleistung zur Verfügung gestellt. Der Anbieter ist für die Wartung und den Betrieb verantwortlich. Diese Leistung wird seitens des Kunden durch eine Nutzungsgebühr vergütet (Buxmann et al., 2008).
- ◆ Blockchain: Im Wesentlichen handelt es sich bei der Blockchain um eine dezentrale Datenbank, wo Informationen als Blöcke (engl. Blocks) gesammelt und zusammengekettet (engl. Chain) werden. Dadurch wird eine irreversible Zeitachse gebildet (Hayes, 2022).
- ◆ Big Data: Dieser Begriff spiegelt das Potential sowie die Herausforderungen des technischen Fortschritts wider und wird von der Datenspeicherung (engl. Volume), der Datenvielfalt (eng. Variety), Datengenerierung in hoher Geschwindigkeit (engl. Velocity) und der Analytik geprägt (Kempf, 2012).
- ◆ Machine Learning (ML): Als Teil der Künstlichen Intelligenz (engl. Artificial Intelligence) wird ML dazu verwendet, um Systemleistungen weiterzuentwickeln. Basierend auf gesammelten Daten kommen unterschiedliche Ansätze von ML-Algorithmen zum Einsatz (Oracle, 2022).

- ◆ **Augmented/Virtual Reality (AR/VR):** Das AR ist eine Methode, wo die natürliche Umgebung des Menschen mit virtuellen Einheiten erweitert wird. Durch Informationen der nutzerseitigen Umgebung lässt sich die reale Welt digital manipulieren (Selvi K. et al., 2020). Im Gegensatz dazu wird der Nutzer einer VR vollständig in eine virtuelle Umgebung eingebunden, wodurch sich realistische Szenarien inszenieren lassen. Zumeist werden für die VR-Simulation kopfmontierte Displays verwendet (Hürst & Geraerts, 2019).
- ◆ **Cloud Computing:** Unter Cloud Computing wird ein bedarfsorientierter Zugang zu Computerressourcen verstanden. Diese Ressourcen (z.B.: Entwicklungstools, Datenspeicher usw.) befindet sich in einem entfernten Rechenzentrum, auf das über via Internet zugegriffen werden kann. Die Ressourcen können gegen eine Nutzungsgebühr verwendet werden (Vennam, 2020).
- ◆ **Mobile App:** Bei mobilen Applikationen handelt es sich um Softwareprogrammen welche über dezentralisierte Plattformen (z.B.: Apple App Store, Google Play usw.) auf ein mobiles Endgerät geladen werden können. Mobile Applikationen sind auch unter dem Synonym Apps bekannt (Kenton, 2022).
- ◆ **Building Information Modelling (BIM):** „Unter Building Information Modeling (BIM) oder Gebäudedatenmodellierung versteht man die optimierte Planung und Ausführung von Gebäuden mit Hilfe entsprechender Software. BIM ist ein intelligentes digitales Gebäudemodell, das es allen Projektbeteiligten – vom Architekten und Bauherrn über den Haustechniker bis hin zum Facility Manager – ermöglicht, gemeinsam an diesem integralen Modell zu arbeiten und dieses zu realisieren“ (Austrian Standards, 2022)

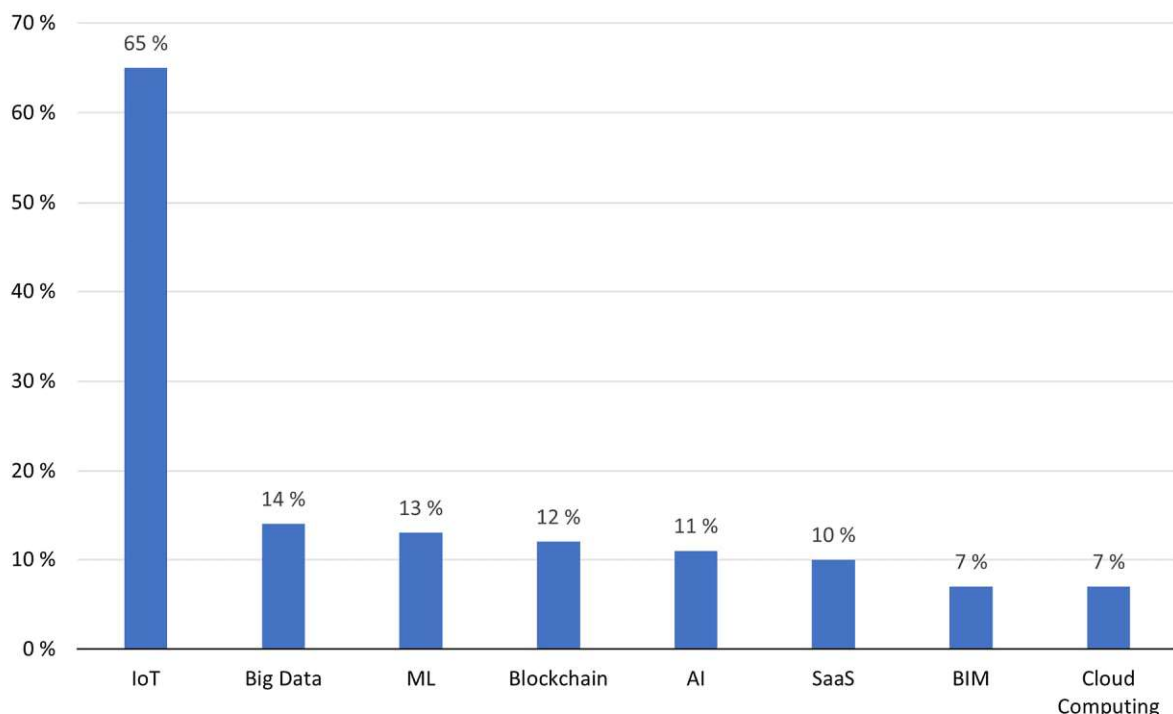


Abbildung 10: Smart-Building Technologien im Bereich „Energie“
(Redlein & Höhenberger, 2020, S. 160)

Der prozentual bewertete Einsatz von IoT-Geräten im Zusammenhang mit Energie in einem Immobilienbetrieb liegt deutlich über den anderen „Smart-Building Technologien“. Wie in Abbildung 10 dargestellt, liegt die Einsatzhäufigkeit bei 65%.

4.2 System-Architektur eines IoT-basierenden EMS

Ein entscheidender Ansatz für ein funktionierendes IoT-basierendes System ist der effektive Aufbau einer System-Architektur. Wie dieser strukturelle Aufbau aussieht, hängt von den Anforderungen und Aufgaben des Systems selbst ab (Manoj Kumar & Kumar Mallick, 2018). Die meistverwendete Architektur von IoT-basierenden Systemen setzt sich aus einem dreischichtigen Aufbau zusammen. Die Literatur bezeichnet diese Schichten als Wahrnehmungsebene, Netzwerkebene und Applikationsebene (Abdellah et al., 2020).

- ◆ Wahrnehmungsebene: Diese Ebene dient der Interaktion von physischen Geräten mit intelligenten Systemkomponenten (Sensoren, Aktoren usw.), welche von Jing et al. (2014) auch als Wahrnehmungsknoten innerhalb eines Netzwerks bezeichnet werden. Das Ziel ist die physischen Geräte in das IoT-Netzwerk einzubinden, deren Statusinformationen zu messen sowie zu sammeln und an die nächste Ebene weiterzugeben (Lin et al., 2017). Die Technologien der Wahrnehmungsebene beinhaltet unter anderem Wireless-Sensor-Netzwerk (WSN), Radio-Frequency-Identification (RFID), RFID Sensor-Network (RSN) und GPS (Frustaci et al., 2018).
- ◆ Netzwerkebene: Die Netzwerkebene oder von Frustaci et al. (2018) auch Transportebene genannt, stellt in der System-Architektur die wichtigste Aufbauschiicht dar. Hier soll der Datenaustausch der Geräte und Applikationen, über ein bestehendes Kommunikationsnetzwerk, bidirektional ablaufen. Dafür können unterschiedliche Kommunikationstechnologien (z.B.: WiFi, Bluetooth, Feldbusse etc.) und Kommunikationsprotokolle (z.B.: MQTT) zum Einsatz kommen (Lin et al., 2017).
- ◆ Applikationsebene: Die finale Ebene der Architektur ist die Applikationsebene. Diese Ebene steht im direkten Austausch mit dem Nutzer (Abdellah et al., 2020). Dabei werden jene Daten zur Verfügung gestellt, welche erforderlich sind, um die nutzerseitigen Anforderungen zu erfüllen (z.B.: Messerergebnisse zur Temperatur und Luftfeuchtigkeit) (Frustaci et al., 2018).

Die Anzahl der Ebenen kann entsprechend dem Anforderungsprofil eines IoT-basierenden Systems variieren. So kann bei einem feineren strukturiertem System ein fünf- bis siebenschichtiger Aufbau zum Einsatz kommen (Lin et al., 2017). Unabhängig davon hat Bocheng (2012) gezeigt, dass für das Design und dem Aufbau eines EMS ein dreischichtiges Modell ausreichend ist.

4.3 Komponenten einer EMS-Infrastruktur

Die richtige Wahl der zu verwendenden IoT-Geräte hängt unter anderem von der IoT-Applikation selbst ab und von dem Ziel, welches damit erreicht werden soll (Mudaliar & Sivakumar, 2020).

Für Monitoring-Systeme sind verschiedene Komponenten und Systeme auf dem Markt erhältlich. Die Cloud Native Computing Foundation (2022) gibt dazu einen Überblick von Applikationsanbietern, welcher in Abbildung 11 dargestellt ist. Diese Komponenten können in Abhängigkeit ihrer Eigenschaften in Kombination eingesetzt werden.

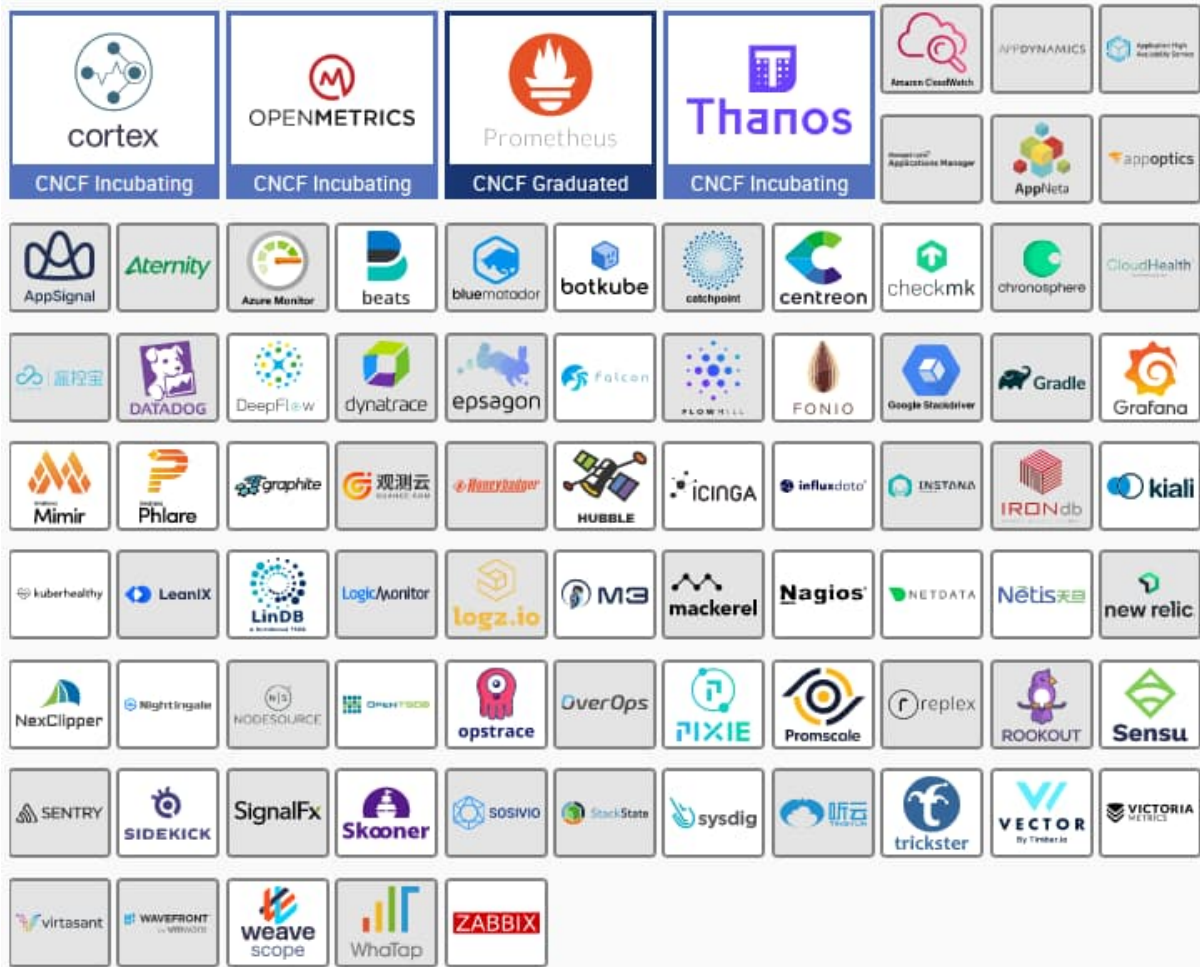


Abbildung 11: Anbieter für Monitoring- und Analytik-Applikationen (Cloud Native Computing Foundation, 2022)

4.3.1 Zentrale Komponente eines IoT-basierenden EMS

Unabhängig von den Monitoring- bzw. Analytik-Applikationen sind zufolge Mudaliar & Sivakumar (2020) die am häufigsten zum Einsatz kommenden IoT-Geräte ein Raspberry Pi oder ein Arduino. Durch ihre einfache Bedienbarkeit und Handhabung, werden sie für unterschiedliche Anwendungsfälle verwendet, unter anderem für ein EMS. Ein wesentlicher Vorteil eines Raspberry Pi oder eines Arduino ist im Vergleich zu anderen IoT-Geräten die preiswerte Marktverfügbarkeit (Mudaliar & Sivakumar, 2020).

4.3.1.1 Arduino

Ein Arduino Board setzt sich aus Open-Source Bestandteilen zusammen. Die freizugängliche Software Arduino IDE als auch die veröffentlichten Pläne der Arduino Boards ermöglichen eine nutzerspezifische Erweiterung sowie eine softwareseitige und hardwareseitige Anpassung. Die Software Arduino IDE ist mit unterschiedlichen Betriebssystemen wie Windows, Macintosh OSX und Linux kompatibel und bietet dem Anwender dadurch eine nutzerfreundliche Flexibilität. Aus diesen genannten Gründen wurden Arduino Boards über die Jahre in einer Vielzahl an Projekten sowie in komplexen wissenschaftliche Instrumenten als zentrale Komponente implementiert (Arduino, 2022b).

Die diversen, angebotenen Arduino Boards unterscheiden sich voneinander und können damit unterschiedliche Aufgaben erfüllen. Trotz alledem gibt es gewisse Komponenten, die aus praktischen Gründen auf allen Boards zu finden sind (Söderby, 2022). Das in Abbildung 12 dargestellte Arduino Board trägt den Produktname Arduino Uno Rev3 und ist das meisteingesetzte Board der Arduino-Familie. Zuzufolge des Arduino-Webshops belaufen sich die Kosten auf 24,00 € exkl. MwSt. (Arduino, 2022a).

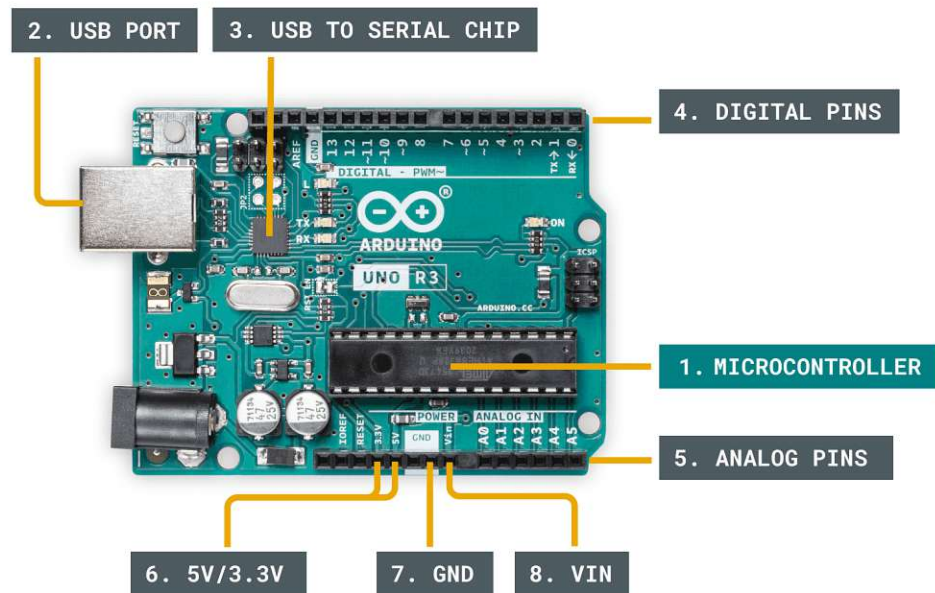


Abbildung 12: Schlüsselkomponenten eines Arduino Board (Söderby, 2022)

Von Söderby (2022) werden die in Abbildung 12 dargestellten, wesentlichen Komponenten eines Arduino Boards wie folgt beschrieben:

- ◆ **Microcontroller:** Die zentrale Komponente des Arduino Boards ist der Microcontroller (ATmega328), welcher im Allgemeinen einen kleinen Computer darstellt. Die meisten Arduino Boards sind dafür entwickelt, um lediglich ein Programm auf dem Microcontroller auszuführen. Das Programm selbst kann eine oder mehrere Aktionen in einer Schleife durchführen.
- ◆ **USB-Port:** Wird für die Verbindung mit einem Computer verwendet (z.B.: Stromversorgung und Datenaustausch).
- ◆ **USB to Serial Chip:** Diese Komponente ermöglicht die Übersetzung von Daten (z.B.: Daten von einem Computer zum Microcontroller). Durch diesen Chip ist eine Programmierung des Boards via Computer möglich.
- ◆ **Digital Pins:** Diese Pins werden für digitale Signale verwendet (für 0 und 1 oder Low/High). In der Regel werden diese Pins für Schalter (Ein/Aus) verwendet.
- ◆ **Analog Pins:** Die Aufgabe der analogen Pins ist das Lesen von Analogen Sensoren. Das analoge Signal ist beim Arduino Board an die Bereiche 0-5 V oder 0-3,3 V gebunden.
- ◆ **5V/3.3V:** Diese Pins dienen der Stromversorgung von externen Geräten/Komponenten.
- ◆ **GND:** Steht für Ground und wird zur Schließung des Stromkreises verwendet (0 Volt).
- ◆ **VIN:** Diese Abkürzung steht für Spannungseingang (Voltage IN) und macht eine externe Stromversorgung möglich.

Ein weiterer zentraler Punkt der Arduino Boards betrifft den Speicher. Dieser setzt sich grundsätzlich aus zwei Speicherarten, mit unterschiedlichen Aufgaben, zusammen. Der SRAM (engl. Static Random-Access Memory) hat die Funktion die Werte von Variablen zu speichern. Bei Trennung der Stromversorgung, setzt sich dieser Speicher wieder zurück. Der Flash-Speicher hat die primäre Aufgabe Programme oder Anweisungen für den Mikrokontroller zu speichern. Im Gegensatz zum SRAM wird dieser Speicher nicht geleert sondern führt seine Anweisungen nach dem Einschalten erneut aus (Söderby, 2022).

Ergänzend zu den Boards werden in der Arduino-Familie sogenannte Shields angeboten, wodurch Arduino Boards erweitert, werden können. Zum Beispiel ermöglicht das Arduino Ethernet Shield die zusätzliche Funktion der Internetverbindung und stellt somit einen wesentlichen Bestandteil der Smart-Building Technologie IoT dar.

4.3.1.2 Raspberry Pi

Beim Raspberry Pi handelt es sich um einen Computer, welcher auf einer einzigen Leiterplatte in der Größe einer Kreditkarte, gebaut ist. Daher wird der Raspberry Pi auch als Single-Board Computer bezeichnet. Die Kernsoftware des Computers wird durch das offizielle Betriebssystem der Raspberry Pi Foundation namens Raspbian verkörpert, welches auf dem freien Betriebssystem Debian Linux. basiert. Unabhängig vom verwendeten Model, ist Raspbian mit allen Geräten der Raspberry Pi-Familie kompatibel (Halfacree, 2019).

In Abbildung 13 wird das aktuelle und leistungsstärkste Board der Raspberry Pi-Familie dargestellt. Die Eigenschaften und Merkmale des Raspberry Pi 4 Model B werden von Halfacree (2019) folgendermaßen beschrieben.

- ◆ Die wichtigste Komponente des Boards ist der System-on-Chip (SoC). Ein Schaltkreis welcher sich aus dem Prozessor CPU (engl. Central Processing Unit) und dem Grafikprozessor GPU (engl. Graphics Processing Unit) zusammensetzt.
- ◆ Eine wesentliche Ergänzung zum SoC, ist die Funktion der Datenspeicherung. Diese erfolgt einerseits durch eine SD-Karte, welche sich auf der Board-Rückseite befindet und andererseits durch einen Arbeitsspeicher RAM (engl. Random-Access-Memory). Während der flüchtige Speicher (RAM) die Daten nur temporär speichert, behält der nicht-flüchtige Speicher (SD-Karte) die Daten dauerhaft. Der Raspberry Pi ist mit einem Arbeitsspeicher von 1GB, 2GB oder 4GB erhältlich.
- ◆ Um Daten zu empfangen oder zu senden sowie eine kabellose Verbindung mit anderen Geräten zu ermöglichen, besitzt der Raspberry Pi eine WiFi/Bluetooth Komponente.
- ◆ Am oberen Rand sitzt die GPIO-Steckleiste (engl. General Purpose Input/Output), die dazu eingesetzt wird, um mit zusätzlicher Hardware zu kommunizieren (z.B.: Lüftung).
- ◆ Der Raspberry Pi ist mit diversen Ports ausgestattet. Dazu zählen USB-Ports (engl. Universal Serial Bus) um externe Geräte wie eine Tastatur oder eine Maus zu verbinden. Ein Ethernet Port ermöglicht die Verbindung zu einem Computernetzwerk mittels Kabel.
- ◆ Die Stromversorgung des Boards kann entweder über den USB-Type-C Port erfolgen oder über eine Netzwerkverbindung durch den Power Over Ethernet (PoE) Anschluss.
- ◆ Die Verbindung mit einem Bildschirm wird durch die Micro-HDMI Anschlüsse sowie dem DSI (engl. Display Serial Interface), welcher für Toch-Displays entwickelt wurde, ermöglicht. Diese Komponenten werden durch Audio- und Kameraanschlüsse ergänzt.

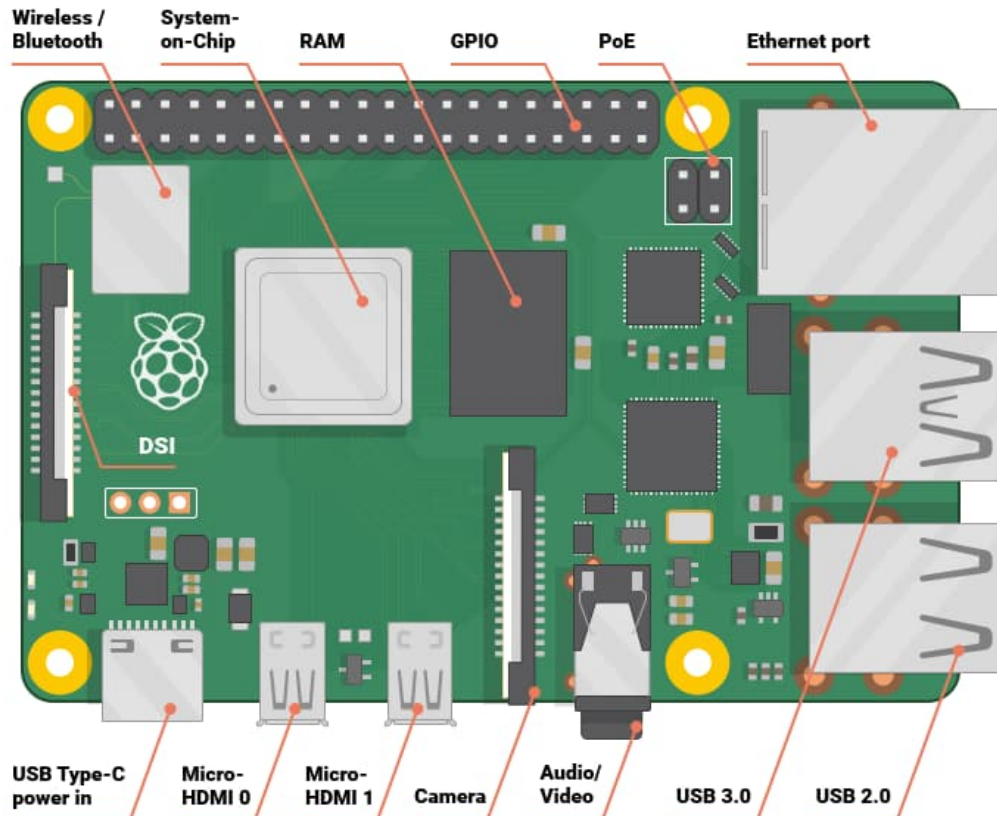


Abbildung 13: Raspberry Pi 4 Model B Hardware (Halfacree, 2019)

Der Einsatz des Single-Board Computers erfolgt auf Grund seiner Leistungsstärke und seines günstigen Preises in unterschiedlichen Bereichen. Dieser wird sowohl für industrielle Zwecke also auch für den private Nutzen im Sinne eines Smart Homes verwendet (Halfacree, 2019). Die Kosten des Raspberry Pi 4 Model B mit 2GB RAM belaufen sich auf etwa 65,00 € exkl. MwSt. (Raspberry Pi, 2023).

4.3.1.3 Komponentenvergleich – Raspberry Pi und Arduino

Seitens Mudaliar & Sivakumar (2020) wurden die unterschiedlichen Eigenschaften eines Raspberry Pi und eines Arduino untersucht, gegenübergestellt und verglichen, um die optimale zentrale Komponente eines IoT-basierenden EMS zu eruieren (siehe Tabelle 4).

Tabelle 4: Unterschied zwischen Raspberry Pi und Arduino (Mudaliar & Sivakumar, 2020)

Merkmale	Raspberry Pi	Arduino
Allgemein	Minicomputer	Minicontroller
Betriebssystem	Raspbian	Arduino IDE
Programme - Kapazität	Mehrere Programme können ausgeführt werden	Nur ein Programm kann ausgeführt werden
Stromversorgung	Keine Verwendung von Akkupacks möglich – zu großer Stromverbrauch	Verwendung von Akkupacks möglich – geringer Stromverbrauch

Sensoren-Schnittstelle	Schnittstellenaufbau mit Sensoren ist komplexer	Einfacher Schnittstellenaufbau mit Sensoren
Kosten	Kostenintensiver als Arduino	Günstig
Internetverbindung	Internetverbindung möglich – Verwendung Ethernet Port	Externe Hardware erforderlich
Speicher	Separate SD-Karte	On-Board Speicher
Ports	4 USB-Ports	1 USB-Port
Prozessor-Architektur	ARM	AVR
Ein-/Ausfunktion	Ordnungsmäßiges Ausschalten erforderlich, um Softwareprobleme zu vermeiden	„Plug and Play“-Gerät, die Programme starten bei Stromversorgung
Programmiersprachen	Scratch, Python, C/C++	C/C++

Als wesentlicher Unterschied ist festzuhalten, dass es sich bei einem Raspberry Pi um einen Computer und bei einem Arduino um einen Minicontroller handelt. Als Microcontroller ist der Arduino lediglich ein Bestandteil des Raspberry Pi und wird hauptsächlich für Hardware-Projekte eingesetzt. Die Auflistung in Tabelle 4 zeigt, dass der Raspberry Pi leistungsstärker als ein Arduino ist und sich somit bessere für ein EMS eignet (Mudaliar & Sivakumar, 2020).

4.3.2 Datengenerierung und Sensorik

Im Allgemeinen werden bei jedem modernen Monitoring sogenannte Zeitreihendaten über einen Zeitraum generiert, welche sich in Metriken (engl. Metrics) und Ereignissen (engl. Events) unterteilen lassen. Dabei sind Metriken Messwerte bzw. KPI's die zufolge einer regelmäßige Datensammlung über eine Zeitperiode (z.B.: Frequenz: täglich, wöchentlich) aufgezeichnet werden. Neben dieser regelmäßigen Datenaufzeichnung helfen unregelmäßige Daten, sogenannte Ereignisse, eine eventuelle Verhaltensänderung im System zu erkennen (Chakraborty & Kundan, 2021d). Diese Ereignisse können in unterschiedliche Typen klassifiziert werden (siehe Tabelle 5).

Tabelle 5: Klassifizierung von Ereignissen (Chakraborty & Kundan, 2021d)

Event Typen	Beschreibung
Information	Ein Ereignis, dass die erfolgte Durchführung einer Aufgabe beschreibt.
Warnung	Ein Ereignis, dass die erfolgte Durchführung einer Aufgabe beschreibt. Die Art und Weise wie die Durchführung erfolgt wird jedoch nicht empfohlen.
Error	Ein Ereignis, dass auf das mögliche Auftreten eines Problems hinweist.

Die oben beschriebene Datengenerierung erfolgt durch Sensoren, mit deren Hilfe relevante Parameter (z.B.: physikalische, biologische, klimatische Parameter usw.) in der Umwelt erfasst werden (Hering, 2012). Je nach Art der Messung kommen unterschiedliche Sensoren zum Einsatz. Durch die rasante Entwicklung des „Internet of Things“ bilden Sensoren mittlerweile eine Schnittstelle zwischen der physischen Welt und dem Internet. Ein technologischer Fortschritt, womit die Umsetzung eines IoT-basierenden EMS effizienter gestaltet werden kann. (Shinde et al., 2018).

4.3.3 Datenspeicherung

Als zentrale Rolle eines EMS kann die Fähigkeit der Datenspeicherung genannt werden. Für die Organisation der generierten Datenmengen gibt es unterschiedliche Ansätze, welche in diesem Abschnitt erörtert werden.

Um Daten speichern und bearbeiten zu können ist ein Datenbanksystem erforderlich. Dieses setzt sich aus einer Speicherkomponente und einer Softwarekomponente zusammen. Die Softwarekomponente verfügt über eine Abfrage- und Manipulationssprache, wodurch dem Anwender die Aufbereitung der Daten ermöglicht wird. Der Anwender selbst bleibt jedoch durch die Softwarekomponente von der Speicherkomponente getrennt (Meier, 2018). In Abbildung 14 wird dieses soeben beschriebene Verhältnis dargestellt.

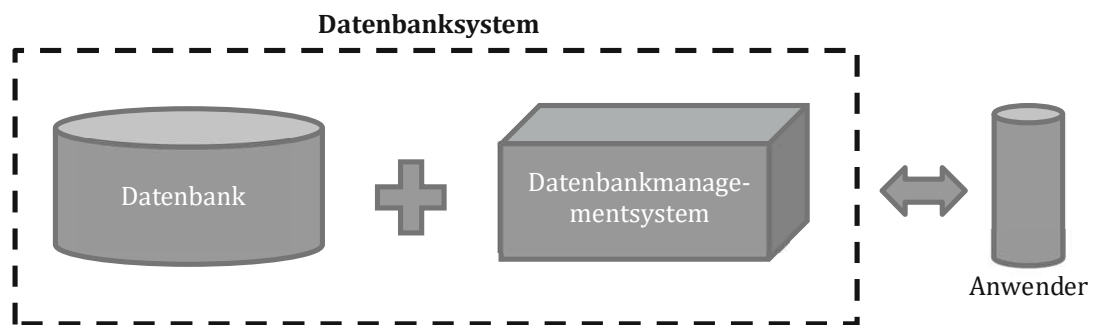


Abbildung 14: Architektur eines Datenbanksystems (Meier, 2018, S. 10)

Im Allgemeinen werden die Daten in einer Datenbank gesammelt. Die Verwaltung dieser Daten obliegt einer Software, einem sogenannten Datenbankmanagementsystem (DMS) (Herrmann, 2018). Grundsätzlich können die meisten Datenbanken in relationalen Datenbanken und in nicht-relationalen Datenbanken kategorisiert werden (MongoDB, 2022). Im Bereich von IoT-basierenden Systemen ist aber ein Trend in Richtung von nicht-relationalen Datenbanken zu erkennen. Dabei präsentiert sich die nicht-relationale Zeitreihendatenbank als optimale Lösung für IoT-Applikationen, da diese große Mengen an zeitgebundenen Datenströme verarbeiten können (Rinaldi et al., 2019).

4.3.3.1 Relationale Datenbank

Relationale Datenbanksysteme werden häufig auch als SQL-Datenbanksysteme bezeichnet (Meier, 2018) und deren DMS als relationales Datenbankmanagementsystem (RDBMS). Eines der größten Open-Source DMS sind PostgreSQL und MySQL von Oracle (Herrmann, 2018). Nachdem im Jahr 2009 MySQL von Oracle gekauft wurde, entwickelte der MySQL-Gründer Michael „Monty“ Widenius ein neues Open-Source DMS namens MariaDB (MariaDB Foundation, 2022).

In einem relationalen Datenbanksystem werden die gesammelten Daten in Tabellen abgelegt und mit der Datenbanksprache SQL (engl. Structured Query Language) bearbeitet. Die Datenbanksprache SQL dient unter anderem für Tabellenabfragen und für Manipulationen von Tabelleninhalten. Die Abfrage wird durch eine Datenabfragesprache DQL (engl. Data Query Language) und das Manipulieren von Tabelleninhalten durch eine Datenmanipulationssprache DML (engl. Data Manipulation Language) ermöglicht. Neben der Datenbanksprache verleiht das Relationsmodell der Datenbank eine physische Struktur (Herrmann, 2018). Ein Beispiel eines solchen relationalen Datenbankmodells ist in Abbildung 15 ersichtlich.

Raumeigenschaften		
Raum_ID	Geschoss	Raumhöhe
Raum_020	Erdgeschoss	2,95m
Raum_003	Erdgeschoss	3,10m
Raum_106	1.Obergeschoss	3,04m

Abbildung 15: Beispiel eines relationalen Datenbankmodell

In einem relationalen Datenbankmodell besteht jede zweidimensionale Tabelle aus Zeilen sowie Spalten und verfügt über einen eindeutigen Tabellennamen. Eine Zeile entspricht einem Datensatz, welcher in der Literatur auch als Record oder Tupel bezeichnet wird. Die Reihenfolge dieser Zeilen ist irrelevant, jedoch müssen sich die einzelnen Datensätze eindeutig voneinander unterscheiden. Mit Hilfe eines Identifikationsschlüssels, der für jeden Datensatz einmalig sein muss, wird diese Eindeutigkeit sichergestellt. Die weiteren Eigenschaften eines Tupels werden durch Attribute oder einer Kombination von Attributen beschrieben. Die Anzahl an Attribute bestimmt den Grad eines Datensatzes und jeder Datenwert eines Attributs hat einen vordefinierten Wertebereich (engl. Domain) (Herrmann, 2018; Meier, 2010).

Um unterschiedliche Datensätze zwischen einzelnen Tabellen in einer Datenbank zu verbinden, muss eine Beziehung zwischen den Identifikationsschlüsseln hergestellt werden. Diese Beziehungen lassen sich zufolge Studer (2019) in folgende Typen unterteilen:

- ◆ 1:1-Beziehung: Für jeden Datensatz der Tabelle A existiert nur eine Datensatz in der Tabelle B und umgekehrt.
- ◆ 1:N-Beziehung: Für jeden Datensatz der Tabelle A gibt es mehrere Datensätze in der Tabelle B. Einem Tupel der Tabelle B kann jedoch nur ein Datensatz in der Tabelle A zugewiesen werden.
- ◆ M:N-Beziehung: Für jeden Datensatz der Tabelle A existierten mehrere Datensätze in der Tabelle B und umgekehrt.

4.3.3.2 Zeitreihendatenbank

Eine Zeitreihendatenbank TSDB (engl. Time Series Database) ist eine nicht-relationale Datenbank, deren primäre Aufgabe die Verwaltung von Zeitreihendaten ist (Rinaldi et al., 2019). Im Allgemeinen sind Zeitreihendaten Messungen oder Ereignisse, die über einen Zeitraum, in einem definierten Intervall generiert und mit einem Zeitstempel versehen werden. Diese Eigenschaft ermöglicht die Datenerfassung und Datenauswertung in Echtzeit, wodurch der Einsatz bei IoT-Applikationen stark zunimmt (Pail, 2020).

Eine der führenden Zeitreihendatenbanken ist zufolge der Untersuchung von Petrik et al., (2021) die Open-Source TSDB namens InfluxDB. Diese Technologie ist speziell für die Verarbeitung von großen zeitabhängigen Datenmengen, wie diese bei IoT-Geräten anfallen, entwickelt worden. Ähnlich zu relationalen DMS werden die Daten bei InfluxDB über eine Datenbanksprache namens InfluxQL (engl. Influx Query Language) bearbeitet. Eine Sprache welche mit SQL verwandt

ist (influxdata, 2022c). Außerdem ist InfluxDB ein Teil des sogenannten TICK Stack. Eine Abkürzung die für Telegraf, InfluxDB, Chronograf und Kapacitor steht. Gemeinsam bilden diese Technologien eine Plattform für Datensammlung, Datenspeicherung und Datenvisualisierung. Mit Hilfe des Agenten Telegraf können Daten gesammelt und unter anderem an InfluxDB gesendet werden. Die Funktion des Kapacitors ermöglicht die Implementierung von benutzerdefinierter Alarmierung und ist ein wesentlicher Bestandteil der Datenverarbeitung. Die grafische Oberfläche der Stack-Infrastruktur wird durch den Chronografen gebildet, womit eine Datenvisualisierung stattfindet (influxdata, 2022d). Das Schlüsselkonzept von InfluxDB wird in Abbildung 16 dargestellt.

Timestamp	Tag Key	Tag Value	Field Key	Field Value
	name	Energy_Consumer		
	time		Sensor	Energy_Today
2021-07-26T10:23:45Z		Plug1		0.104
2021-07-26T10:23:45Z		Plug2		0.112
2021-07-26T10:28:45Z		Plug1		0.107
2021-07-26T10:28:45Z		Plug2		0.119
2021-07-26T10:33:45Z		Plug1		0.110

Abbildung 16: Konzept von InfluxDB

Bei einer TSDB wird jede Datenreihe durch einen Zeitstempel definiert. Wie bei einem RDBMS hat die Zeit die Funktion eines Identifikationsschlüssels und stellt somit einen wesentlichen Teil im Konzept von InfluxDB dar. Die weitere Datenstruktur kann ebenfalls mit einem RDBMS wie folgt verglichen werden:

- ◆ Der Name der Datenstruktur wird in InfluxDB als Measurement bezeichnet und ist mit einem Tabellennamen gleichzusetzen.
- ◆ Ein Point kann mit einer Zeile verglichen werden. Dabei besteht jeder Point aus einem Measurement, einem Tag Set und einem Field Set.
- ◆ Das Tag Set setzt sich aus einem Tag Key und einem Tag Value zusammen und ist ähnlich zu einer Spalte eines RDBMS. Ein Tag Set speichert Metadaten und ist ein optionaler Teil der Datenstruktur.
- ◆ Das Field Set setzt sich aus einem Field Key und einem Field Value zusammen und ist ähnlich zu einer Spalte eines RDBMS. Ein Field Set ist ein notwendiger Bestandteil der Datenstruktur. Die eigentlichen Daten werden als Field Value bezeichnet und sind immer in Kombination mit einem Zeitstempel vorhanden.

Obwohl InfluxDB in diversen Bereichen mit einem RDBMS korrespondiert, ist festzuhalten, dass diese TSDB speziell für Zeitreihendaten entwickelt wurde. Auch wenn RDBMS ebenfalls in der Lage sind Zeitreihendaten zu verarbeiten, ist das größere Potential der schnellen Echtzeitanalyse bei InfluxDB verortet (influxdata, 2022b, 2022a).

4.3.3.3 Vergleich zwischen SQL-Datenbanken und InfluxDB

In der untersuchten Literatur konnte unter den vorgeschlagenen EMS-Systemarchitekturen keine klare Präferenz hinsichtlich einer Datenbankenart festgestellt werden. Je nach Bedarf kommen sowohl relationale Datenbanken als auch Zeitreihendatenbanken zum Einsatz. Aus diesem Grund soll ein Performancevergleich für die Verarbeitung von Echtzeitdaten zwischen einer SQL-Datenbank und der Zeitreihendatenbank die Datenbankenwahl vereinfachen.

In der Arbeit von Musa et al. (2019) wurde die Performance des DMS InfluxDB, in Vertretung für eine Zeitreihendatenbank und des RDMS PostgreSQL, in Vertretung für eine relationalen Datenbank auf das Einfüge-Potential und Abfrage-Potential untersucht. Als Ergebnis ist dabei festzuhalten, dass die Ausführungsdauer von InfluxDB bei Aggregationsoperationen bis zu 78% schneller und bei Datengruppierungen nach Zeitintervallen bis zu 95% schneller im Vergleich zu PostgreSQL ist. Im Gegensatz dazu kann durch PostgreSQL die Abfrage-Geschwindigkeit von nicht aggregierten Funktionen reduziert und die Einfüge-Geschwindigkeit von Datensätzen erhöht werden. Diese Datenbankeneigenschaften konnten durch die Arbeit von Grzesik & Mrozek (2020) im Wesentlichen bestätigt werden.

Unabhängig davon wird von Giacobbe et al. (2018) auch eine hybride Variante vorgeschlagen, um die Vorteile einer Zeitreihendatenbank und einer SQL-Datenbank zu vereinen. Dabei sollen strukturierte Daten mit Hilfe einer relationalen Datenbank und unstrukturierte Daten durch eine Zeitreihendatenbank verarbeitet werden.

4.3.4 Datenvisualisierung und Analytik

Visualisierungstools sollen dabei helfen generierte Daten grafisch aufzubereiten und die erforderliche Datenanalyse zu ermöglichen. Auf dem Markt sind mehrere Anbieter mit unterschiedlichen Softwareangeboten vertreten, welche sowohl kostenpflichtig als auch in einer Open-Source Variante zur Verfügung stehen. Im Kontext des EMS ist es jedoch von Bedeutung, dass das ausgewählte Visualisierungswerkzeug mit IoT-Applikationen kompatibel ist. Aus der Sicht von Peddoju & Himanshu (2020) können dafür unter anderem Power BI, Kibana und Grafana angewendet werden.

4.3.4.1 Power-BI

Power BI (engl. Business Intelligence) ist eine Sammlung von Softwaredienstleistungen, um eine Verbindung mit Datenquellen herzustellen, diese in Form von Berichten oder Dashboards zu visualisieren und zu teilen. Die Grundstruktur von Power BI setzt sich derzeit aus drei Komponenten zusammen (Microsoft, 2022c).

- ◆ Power BI Desktop: Diese Anwendung kann kostenlos auf dem persönlichen Rechner installiert werden, um eine Verbindung mit diversen Datenquellen aufzubauen. Die Freigabe und das Teilen von Berichten erfolgt über den Power BI-Dienst (Microsoft, 2022d).
- ◆ Power BI-Dienst: Der Power BI-Dienst wird auch als Power BI-Online bezeichnet und bildet die SaaS-Teil von Power BI. Nach der Erstellung eines Berichtes durch Power BI Desktop, kann dieser über den Power BI-Dienst veröffentlicht werden. Unabhängig von diesem Standard-Workflow ist die Erstellung von Berichten direkt in der Online-Applikation möglich (Microsoft, 2022b).

- ◆ Mobile Power BI-Apps: Die geteilten Berichte können ebenfalls über eine mobile Applikation gesichtet werden. Diese lässt sich auf Windows, IOS und Android Geräte installieren (Microsoft, 2022c)

Die Anwendung von Power BI ist Abbildung 17 exemplarisch dargestellt. Im abgebildeten Dashboard werden gesammelte Energiedaten visualisiert.

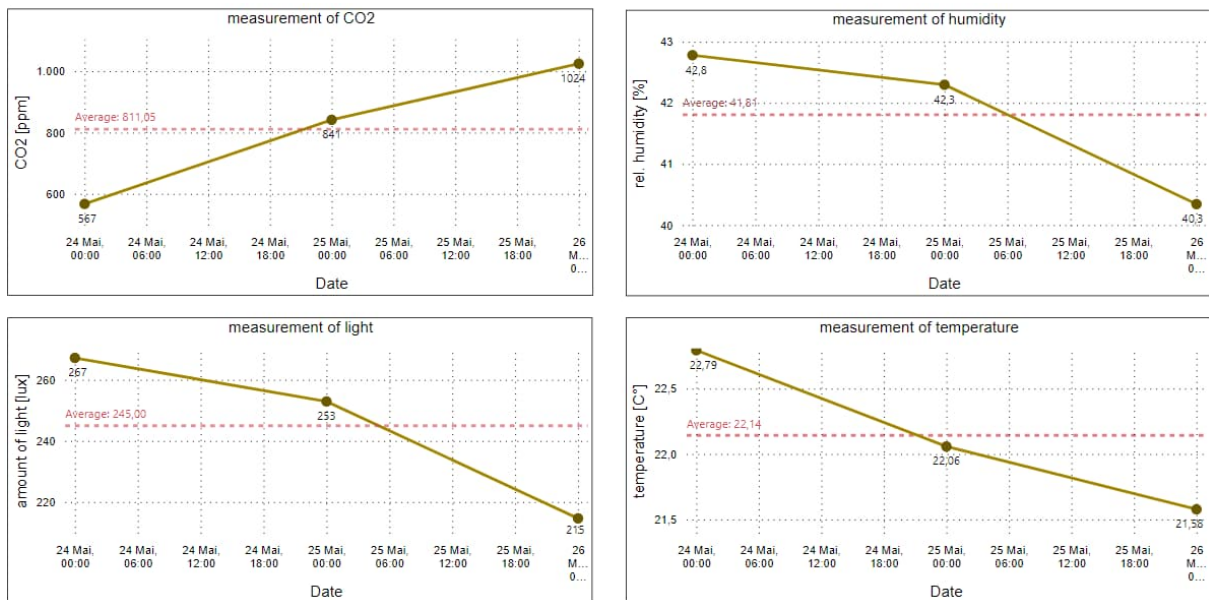


Abbildung 17: Auszug eines Power BI - Dashboard

Eine wichtige Eigenschaft eines EMS ist, dass die Visualisierung von Energiedaten in Echtzeit abläuft. An dieser Stelle sei erwähnt, dass Power BI ein solches Echtzeit-Monitoring ermöglicht. Dafür werden unterschiedliche Echtzeitdatasets angeboten. Beim sogenannten Pushdataset erstellt Power BI automatisch eine Datenbank im Power BI-Dienst. Durch diesen Push-Modus werden die gesammelten Daten permanent gespeichert, wodurch eine historische Analyse ermöglicht wird. Im Gegensatz dazu finden beim Streamingdataset eine zeitlich begrenzte Speicherung statt und die Datenvisualisierung verfügt über einen flüchtigen Verlauf (Microsoft, 2022a).

4.3.4.2 Kibana

Kibana ist ein Open-Source Visualisierungs Tool von Elastic und Teil des Elastic Stack. Als zentrale Komponente des Stacks fungiert Elasticsearch. Dabei handelt es sich um eine Such sowie Analytik Engine wo gesammelte Echtzeitdaten gespeichert werden. Die gespeicherten Daten werden anschließend durch Kibana durch Dashboards kombiniert (Elastic, 2022b, 2022a).

4.3.4.3 Grafana

Als Alternative zu Kibana wurde Grafana als ein TSDB-Dashboarding Tool von Torkel Ödegaard im Jahr 2014 entwickelt. Das Open-Source Werkzeug ist in der Lage Daten von diversen TSDB wie Prometheus, InfluxDB und OpenTSDB zu visualisieren. Zusätzlich können auch relationale DMS wie MySQL und PostgreSQL eine Verbindung mit der Software aufbauen. Eine weitere positive Eigenschaft von Grafana ist die Fähigkeit Daten aus unterschiedlichen DMS zu kombinieren, wodurch aussagekräftigere Dashboards entstehen können (Chakraborty & Kundan, 2021b).

4.3.4.4 Schlussfolgerung

In der untersuchten Literatur wurde weder Power-Bi noch Kibana als integriertes Visualisierungswerkzeug eines EMS gefunden. Neben nutzerspezifischen, selbstgeschriebenen Web-Applikationen sowie Mobile-Applikationen wie in der Arbeit von Agyeman et al. (2019) ersichtlich, wurde vor Allem Grafana eingesetzt. Zum Beispiel wurde Grafana zur Darstellung des industriellen Stromverbrauchs von Mudaliar & Sivakumar (2020) verwendet und von Chooruang & Meekul (2018) um den Energieverbrauch im eigenen Smart Home zu überwachen.

Als Schlussfolgerung für den bevorzugten Einsatz von Grafana im Zuge eines EMS kann folgendes festgehalten werden. Grafana ist im Vergleich zu Kibana in der Lage unterschiedliche DMS zu integrieren und Datenquellen zu kombinieren. Das Visualisierungs-Tool Kibana funktioniert lediglich in Kombination mit Elasticsearch des Elastic Stack und ist somit in der Flexibilität beschränkt. Als Open-Source Software ist Grafana für die Umsetzung von kostengünstigem System ideal. Im Gegensatz dazu kann bei Power BI nur die Desktop-Komponente kostenlos erworben werden, welche für ein EMS nicht ausreichend ist.

5 Prototypische Umsetzung

Basierend auf den Ergebnissen der vorherigen Kapitel findet in diesem Abschnitt die Ausarbeitung des Energie-Monitoring-Systems (EMS) für Büroimmobilien statt. Dafür erfolgt in einem ersten Schritt ein Konzeptvorschlag eines möglichen strukturellen EMS-Aufbaus, welcher mit Hilfe einer System-Architektur beschrieben wird. Das Zusammenspiel der einzelnen Systemkomponenten sowie der funktionale Ablauf des Prototypens lässt sich anhand eines Flussdiagrammes dargestellt. In einem weiteren Schritt wird der Prototyp im Zuge eines Validierungsprozesses angepasst.

5.1 Allgemein

Die prototypische Umsetzung des EMS soll sich vor Allem auf Büroimmobilien von historischen Gebäuden fokussieren. Als Grund dafür lassen sich der geringe Gebäudeautomatisierungsgrad bei historische Bestandsimmobilien sowie die unzureichende Verfügbarkeit von validen Energieverbraucherdaten nennen. Eine kontinuierliche Überwachung der Energieverbräuche mittels Energie-Monitoring soll diese genannte Lücke schließen, zur Dekarbonisierung des Bürosegments beitragen und einen effizienteren Gebäudebetrieb unter Berücksichtigung der „Well-Being“ Faktoren sicherstellen.

Für die Ausarbeitung des Prototyps werden Büroräumlichkeiten innerhalb der Hofburg Wien seitens der Burghauptmannschaft zur Verfügung gestellt. Die betreffenden Flächen befinden sich im Erdgeschoss sowie im Mezzanin des Schweizertraktes. In Abbildung 18 wird dazu beispielhaft am EG-Grundriss eine mögliche Hardwarebelegung (Server und Sensoren) der einzelnen Räume abgebildet. Die Belegung im Mezzanin erfolgt analog zu der im Erdgeschoss dargestellten Komponentenverteilung und wird nicht gesondert gezeigt.



Abbildung 18: Flächenlayout Schweizertrakt (Erdgeschoss) – Systemhardware (Pohl, 2021)

Zufolge Abbildung 18 sind im Erdgeschoss 8 Sensoren je zu messender Parameter und für das Mezzanin 4 Sensoren je zu messender Parameter vorzuhalten. Um einen stetigen Datenaustausch zu gewährleisten, wird in jedem Geschoss ein Raspberry Pi als Server installiert. Folgende Energieparameter bzw. Verbrauchergruppen werden im vorliegenden Prototyp berücksichtigt:

- ◆ Betriebsstromverbrauch (BSV)
- ◆ Temperatur
- ◆ Relative Luftfeuchtigkeit
- ◆ CO₂-Gehalt

Mit der Messung der aufgelisteten Parameter Temperatur, rel. Luftfeuchtigkeit sowie des CO₂-Gehalts kann das klimatische Raumverhalten im Auge behalten werden. Des Weiteren decken diese Werte die sozialen Faktoren des „Well-Being“ ab. Neben den sozialen Faktoren ist auch die Überwachung des Energieverbrauchs erforderlich. Durch die Messung der Verbrauchergruppe BSV wird ein Anteil des mittleren Nutzenergiebedarfs von Büroimmobilien abgedeckt.

Es ist zu erwähnen, dass Energieverbräuche unter anderem auch von Transmissionsverlusten sowie Transmissionsgewinnen durch entsprechende Bauteilkonstruktionen beeinflusst werden. In dieser Arbeit bleiben jedoch Bauteilaufbauten sowie Materialeigenschaften (Wärmeleitfähigkeit des Stoffes) unberücksichtigt.

5.2 System-Architektur

Die Architektur des EMS sowie dessen Komponenten wird in Abbildung 19 dargestellt. Diese bildet einen dreischichtigen Aufbau und setzt sich aus einem Sensor Layer, einem Netzwerk Layer und einem Applikation Layer zusammen. Der strukturelle Aufbau des Prototyps kann wie folgt beschrieben werden:

- ◆ Die Sammlung der Energiedaten erfolgt durch unterschiedliche IoT-Geräte (Sensoren für definierte Energieparameter), welche ihre Information an die nächste Ebene dem „Netzwerk Layer“ weitergeben.
- ◆ Die Kommunikation und der Datentransport zwischen den IoT-Geräten wird mittels MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) umgesetzt. Als Knotenpunkt dafür fungiert ein MQTT-Broker. Hier laufen die Energiedaten zusammen, werden standardisiert und an einen Server übermittelt.
- ◆ Der gesamte Datenaustausch erfolgt über ein eigenes lokales WLAN bzw. Ethernet-Kabeln, um den Sicherheitsgrad des Systems zu erhöhen.
- ◆ Für die Datenvisualisierung wird ein webbasiertes Dashboard-Werkzeug eingesetzt, um einen direkten Austausch mit den Nutzern zu ermöglichen und notwendige Entscheidungen für eine Systemoptimierung zu treffen.

Das oben angeführte Kommunikationsprotokoll MQTT wird in der Industrie standardisiert bei IoT-Geräten eingesetzt und ist ideal für Machine-to-Machine-Kommunikation (M2M). Dabei funktioniert MQTT nach einem Publisher-/Subscriber-Prinzip mit einem MQTT-Broker in zentraler

Rolle. Der Broker hat die Aufgabe Nachrichten mit einem sogenannten Payload (Nachrichteninhalt) zu verteilen, welche von MQTT-Clients sowohl empfangen als auch versandt werden können (Inray Industriesoftware GmbH, 2022; MQTT, 2022).

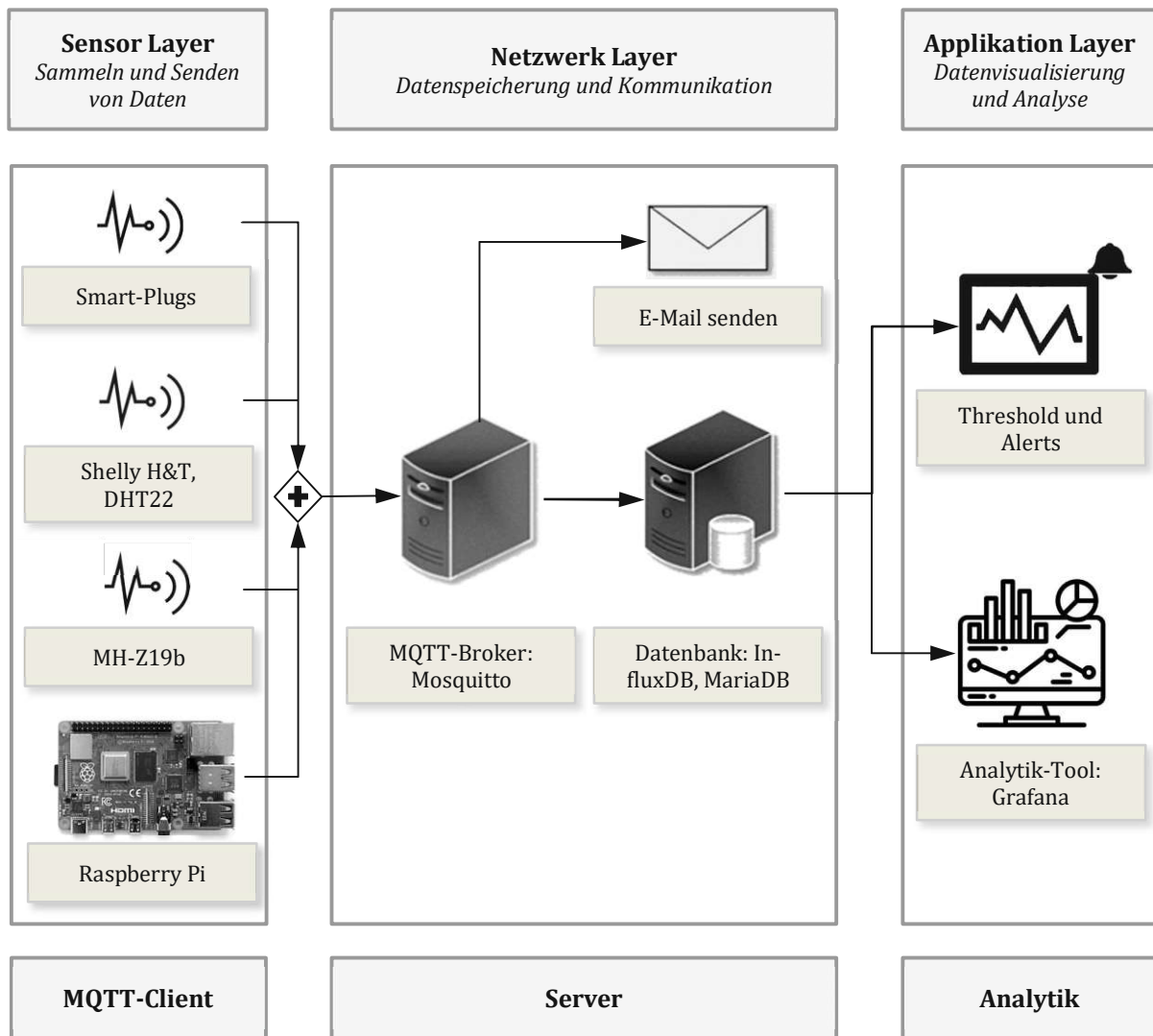


Abbildung 19: System-Architektur des Prototyps

Als wesentliche Komponente des EMS übernimmt der Raspberry Pi sowohl die Funktion des MQTT-Brokers als auch die Funktion einer Datenbank. Als Broker wird die Open Source Software Mosquitto von Eclipse verwendet und für die Speicherung der Daten kommt eine Hybridversion zum Einsatz. Die Zeitreihendaten werden durch eine TSDB (InfluxDB) und strukturierte Daten werden mittels RDMS (MariaDB) lokal auf einer SD-Karte gespeichert. Die anschließende analytische Verarbeitung der Daten wird über das Analytik-Tool Grafana aufbereitet.

5.3 Sensor Layer – MQTT-Client

Ein MQTT-Client kann jedes beliebige Gerät sein, welches über eine MQTT-Bibliothek verfügt und mit einem MQTT-Broker verbunden ist (HiveMQ, 2020). Im vorliegenden EMS erfüllen die Sensoren des Sensor-Layer die Eigenschaften eines MQTT-Clients. Die in den Prototypen verwendete Sensoren werden im folgenden Abschnitt aufgelistet.

5.3.1 Messung des Betriebsstromverbrauchs

Die Messung des BSV erfolgt über Smart Plugs (siehe Abbildung 20). Smart Plugs sind kostengünstige Geräte, welche einfach in das lokale Netzwerk eingebunden werden können und eine ideale Komponente im EMS zur Energieverbrauchsüberwachung darstellen. Unabhängig davon ist für die Installation kein Fachpersonal (z.B.: Elektriker) erforderlich.



Abbildung 20: Smart Plug (Gosund, 2023) und Software Tasmota

Je nach Hersteller sind diese Sensoren mit einer Firmenhardware ausgestattet, die über eine Cloud-Anbindung verfügen und über das Internet nach Außen kommunizieren. Um diesen Kommunikationsweg zu trennen, werden diese ESP8266 Chip basierte Geräte mit der alternativen Software Tasmota geflasht. Dadurch kann ein Cloudfreies System geschaffen werden.

Für jeden Arbeitsplatz bzw. Büro wird ein Smart-Plug vorgesehen. Ausgehend davon erfolgt die Messung einzelner Bürogeräte (z.B.: Computer, Drucker, Tischlampe usw.) mittels Steckdosenverteiler. Die Kosten pro Stecker liegen ca. bei ca. 10,00€ exkl. MwSt. (Gosund, 2023)

5.3.2 Messung des CO₂-Gehalts

In Abbildung 21 sind die Sensorkomponenten für die Messung des CO₂-Gehalts von Büroräumlichkeiten abgebildet. Das Infrarotsensor Modul MH-Z19b von Winsensor bildet zusammen mit dem ESP8266-Board D1mini das Grundgerüst für das Messgerät. Um die Kommunikation via MQTT sicherzustellen, wird der ESP-Prozessor mit der Firmenware Tasmota geladen.

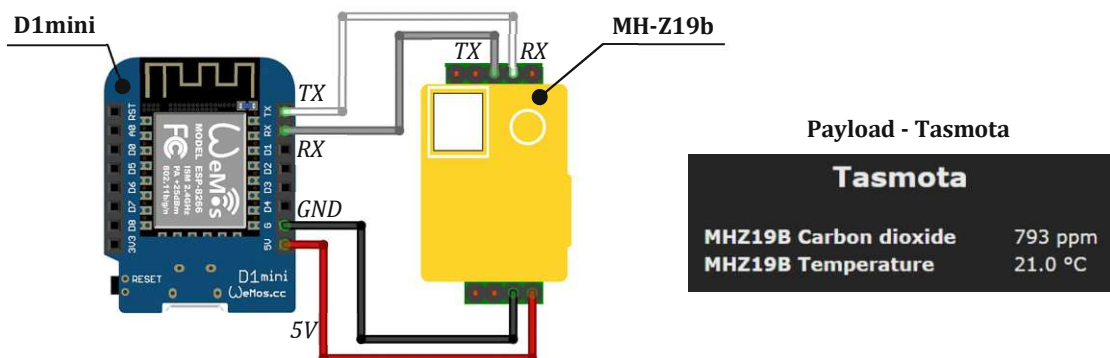


Abbildung 21: CO₂-Sensor Komponenten (eMariete, 2022) und Software Tasmota

Der MH-Z19b basiert auf dem nicht-dispersivem Infrarotprinzip (NDIR). Dieses Prinzip eignet sich für die Identifikation von Luftschadstoffen aus Emissionsquellen wie CO₂. Um den Schadstoffgehalt in der Luft nachweisen zu können, wird infrarote Strahlung mittels einer Infrarotlampe durch eine Probekammer geschickt. In der Kammer absorbiert das zu analysierende Gasgemisch diese Strahlung entsprechend der Wellenlänge im Infrarotspektrum. Die Konzentration des gesuchten Gases (in diesem Fall CO₂) wird mit Hilfe eines Detektor am Ender der Kammer anhand des Absorptionsgrad von infraroter Strahlung ermittelt (Dinh et al., 2016).

Für jedes Büro wird ein CO₂-Messgerät positioniert. Die Stromzufuhr erfolgt über ein USB-Microladekabel, welches am D1mini angeschlossen ist. Die Kosten eines solchen Sensors liegen bei ca. 38,00 € exkl. MwSt. Die Summe resultiert aus den Kosten von 30,00€ exkl. MwSt. für den MH-Z19b (Amazone, 2023) und von 8,00€ exkl. MwSt. für den D1mini (AZ-Delivery, 2018a).

5.3.3 Messung von Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit

Für die Messung der Temperatur sowie der Luftfeuchtigkeit kommt der Sensor Shelly H&T zum Einsatz (siehe in Abbildung 22 links). Dieser Sensor verfügt bereits über einen MQTT-Support und muss daher nicht gesondert mit einer weiteren Software bespielt werden. Die Stromversorgung kann sowohl mittels Batterie als auch über ein USB-Microkabel erfolgen.



Abbildung 22: Sensor Shelly H&T (Shelly, 2023) und DHT22 (AZ-Delivery, 2018b)

Ergänzend dazu ist jeder Raspberry Pi (pro Stockwerk ein Gerät) mit einem Temperatursensor DHT22 verbunden (siehe Abbildung 22 rechts). Die Kosten des Shelly H&T liegen mit ca. 20,00€ exkl. MwSt. (Shelly, 2023) deutlich über den Kosten des DHT22 mit ca. 8,00€ exkl. MwSt. (AZ-Delivery, 2018b).

Die Positionierung und Anzahl der Temperatur-/Luftfeuchtigkeit Sensoren erfolgt analog zu den bereits angeführten Messeinheiten.

5.4 Funktionsablauf des EMS

Der Funktionsablauf des EMS wird in Abbildung 23 anhand eines Flussdiagrammes dargestellt. Dabei startet der Prozess mit der Messung relevanter Energieparameter sowie der Datengenerierung durch die in Kapitel 5.3 angeführten Sensoren. Für jeden MQTT-Client ist vorab ein Topic zu definieren, um zu entscheiden, welche Benachrichtigung an welchen Empfänger gehen kann. Das Topic ist hierarchisch strukturiert und unterteilt die Topic-Leveln durch Schrägstriche. Im vorliegenden Prototyp könnte ein solches Topic wie folgt definiert sein:

Topic zur Ermittlung des BSV mittels Smart Plug: *Schweizertrakt/Erdgeschoss/Büro02/Plug01*

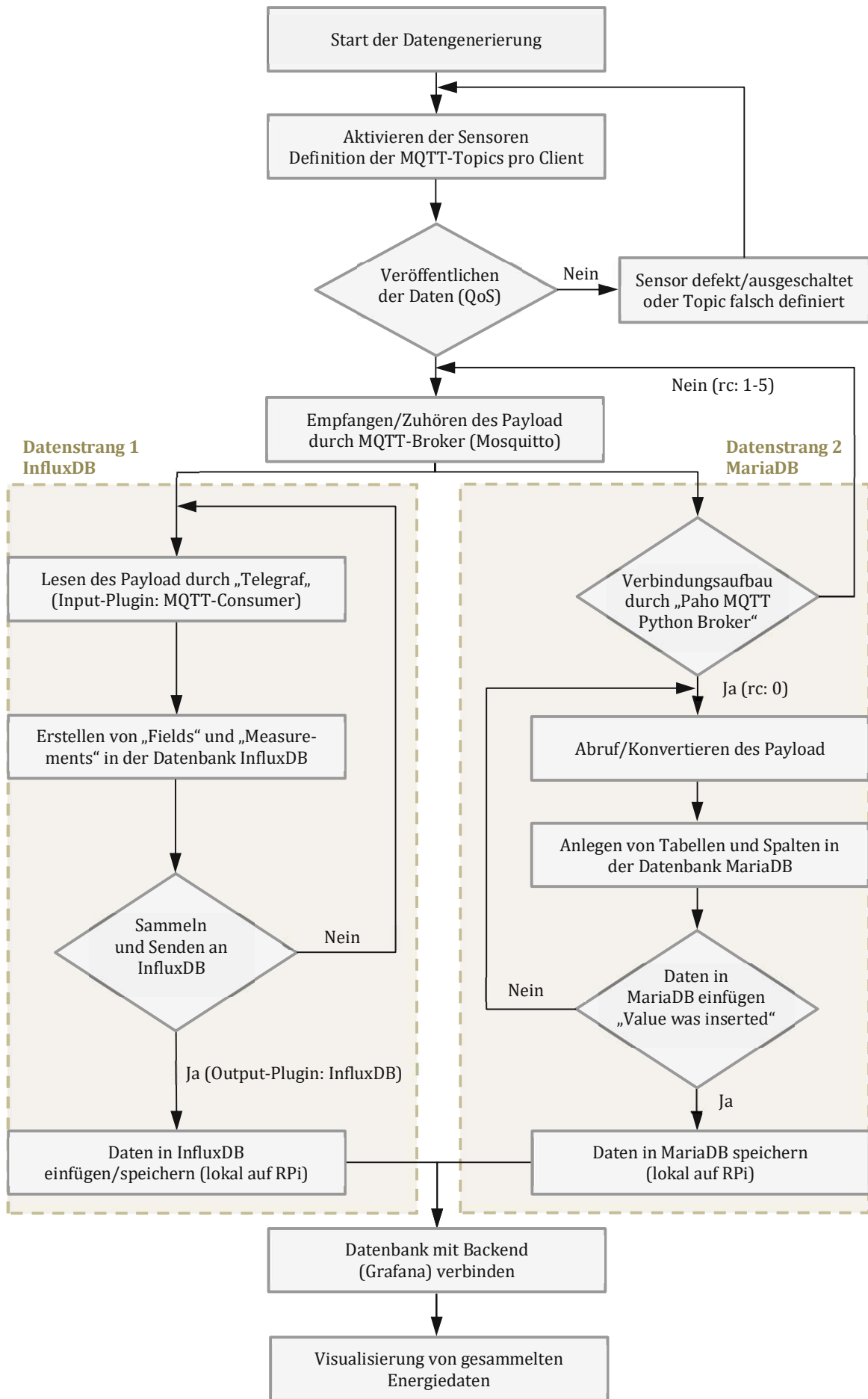


Abbildung 23: Flussdiagramm Energie Monitoring System

Die Übermittlung der Nachrichten jedes Sensors (Sender) findet mit einem Quality of Service (QoS) Level von 1 in einem Zeitabstand von 5min an den Mosquitto-Broker statt. Ein QoS Level 1 garantiert, dass jeder Payload des Sensors zumindest einmal an den Broker ergeht. Der Sender speichert dabei die Nachricht solange, bis ein PUBACK-Paket seitens Broker erfolgreich retourniert und vom Client empfangen wird (HiveMQ, 2020). Unter der Voraussetzung, dass ein entsprechendes Topic vom Server (Empfänger) abonniert wurde, leitet der Broker die Nachrichten mit QoS Level 1 weiter. Durch die hybride Datenspeicherung erfolgt diese Weiterleitung in zwei Datenstränge.

5.4.1 Datenstrang 1 – InfluxDB

Im ersten Datenstrang des EMS werden Metriken sowie Ergebnisse durch den sogenannten „Telegraf“ gesammelt, verarbeitet und an die TSDB-InfluxDB zur Speicherung gesendet.

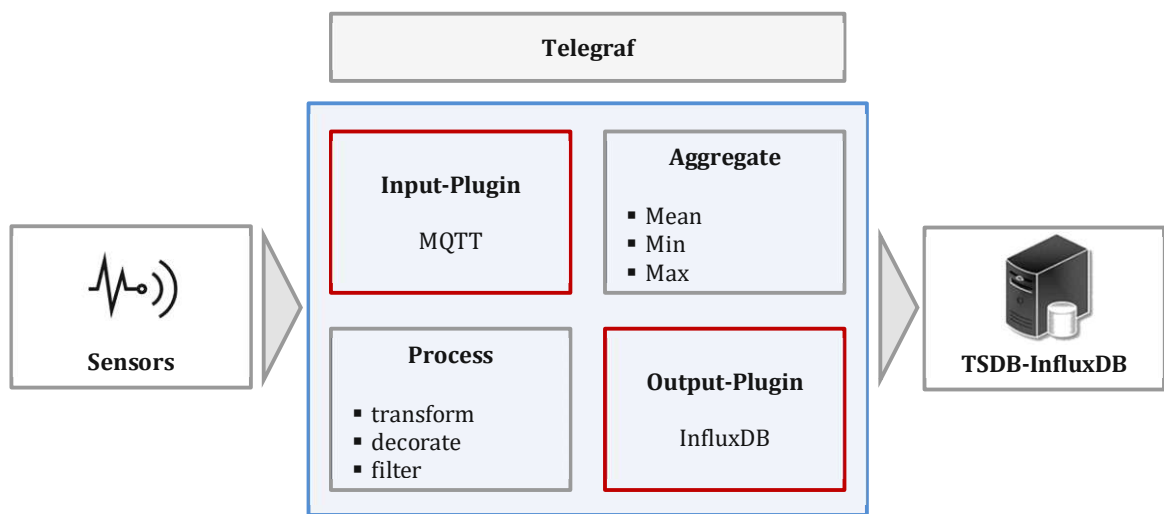


Abbildung 24: Plugin Überblick des Telegraf (influxdata, 2022e)

Der „Telegraf“ ist ein Open-Source Daten-Agent von InfluxData und entspricht einem Plugin-System. Im Allgemeinen gibt es vier verschiedene Arten von Plugins: Input-Plugin, Aggregate, Process und Output Plugin (influxdata, 2022e). Für den vorliegenden Prototyp kommen, wie in Abbildung 24 dargestellt, ein Input-Plugin sowie ein Output-Plugin zum Einsatz.

```

pi@raspberrypi: ~
influx -execute 'select topic,ENERGY Current,ENERGY_Today,ENERGY_Yesterday from mqtt_consumer
-database 'ME310' -precision 'rfc3339'
name: mqtt_consumer
time                topic                ENERGY_Current  ENERGY_Today  ENERGY_Yesterday
-----
2021-07-21T12:37:51.999265897Z tele/Plug2/SENSOR 0.053            0.022          0.027
2021-07-21T12:41:08.525084334Z tele/Plug1/SENSOR 0.182            0.014          0.405
2021-07-21T12:42:51.542213812Z tele/Plug2/SENSOR 0.053            0.023          0.027
2021-07-21T12:46:06.360273753Z tele/Plug1/SENSOR 0.2              0.017          0.405
2021-07-21T12:47:51.53927584Z tele/Plug2/SENSOR 0.052            0.023          0.027

```

Abbildung 25: Measurement-Ausschnitt der TSDB InfluxDB – Smart Plugs

Die Daten des Brokers werden durch das MQTT-Plugin gesammelt und durch das InfluxDB-Plugin an die Datenbank weitergeleitet. Anschließend organisiert die TSDB-InfluxDB den übermittelten

Payload nach der Zeit. Ein Ausschnitt von gemessenen Werten ist in Abbildung 25 veranschaulicht.

5.4.2 Datenstrang 2 – MariaDB

Die Datensammlung und Datenweiterleitung im zweiten Datenstrang erfolgen mit Hilfe eines Python Skript. Die entsprechenden Skripts sind im Anhang angeführt (siehe Kapitel 9). Unter Verwendung des Paho-MQTT-Python-Client können ausgewählte Topics des Brokers abonniert, konvertiert sowie erneut versendet werden. (siehe Abbildung 26).



```

pi@raspberrypi: ~
python3 convert_ht.py
Connecting to broker: 127.0.0.1
Subscribing to TOPIC: shellies/#
Connection successful! Return code: 0
Data 1 published successfully!
Data 2 published successfully!
Data 3 published successfully!
Data 4 published successfully!

pi@raspberrypi: ~
python3 db_ht.py
Connection successful! Return code: 0
Value was inserted!
Value was inserted!
Value was inserted!
Value was inserted!

```

Abbildung 26: Konvertieren und Einfügen des Payload – Sensor_Hum_Temp

Voraussetzung für eine Datenübertragung an die Datenbank ist eine erfolgreiche Verbindungsanfrage an den Broker. Diese wird durch eine Rückmeldung von rc=0 bestätigt (bei einer Rückmeldung von rc=1-5 liegt ein Verbindungsfehler vor). Anschließend wird der Payload an die entsprechenden Tabellen der MariaDB weitergeleitet und gespeichert. Ein Ausschnitt von gemessenen Werten ist in Abbildung 27 veranschaulicht.



```

MariaDB [EMS]> select time,temp,humidity from Sensor_Temp_Hum;
+-----+-----+-----+
| time                | temp | humidity |
+-----+-----+-----+
| 2021-10-29 14:22:10.237950 | 25.12 | 39.0    |
| 2021-10-29 14:27:05.031631 | 23.5  | 42.0    |
| 2021-10-29 14:31:59.656009 | 22.75 | 43.5    |
| 2021-10-29 14:36:54.472580 | 22.5  | 44.0    |
| 2021-10-29 14:41:49.164633 | 22.38 | 44.5    |
+-----+-----+-----+
5 rows in set (0.001 sec)

MariaDB [EMS]> select time,date,topic,yesterday,today from Plugs_General;
+-----+-----+-----+-----+-----+
| time                | date   | topic                                     | yesterday | today |
+-----+-----+-----+-----+-----+
| 2022-04-09 19:27:10.321787 | 2022-04-09 | tele/Plugs/ST/EG/EG83/SENSOR | 0.01      | 1.232 |
| 2022-04-10 19:27:30.724029 | 2022-04-10 | tele/Plugs/ST/EG/EG68/SENSOR | 0.045     | 1.154 |
| 2022-04-11 00:01:47.782465 | 2022-04-11 | tele/Plugs/ST/MEZZ/M52/SENSOR | 0.017     | 2.552 |
| 2022-04-12 00:04:32.918027 | 2022-04-12 | tele/Plugs/ST/MEZZ/M48/SENSOR | 0.017     | 3.44  |
+-----+-----+-----+-----+-----+
4 rows in set (0.001 sec)

```

Abbildung 27: Tabellenausschnitt der RDMS MariaDB

6 Validierungsprozess – Prototyp mittels Experteninterview

Der prototypische Systemvorschlag des vorangegangenen Kapitels soll in einem zweiten Schritt mittels Experteninterview evaluiert werden. Die Schwerpunktsetzung der Erhebung liegt dabei auf den Themenbereichen der Datenvisualisierung und der Datenauswertung. Die Ergebnisse werden anschließend in den Prototypen eingearbeitet sowie in Form von EMS-Dashboards umgesetzt.

6.1 Experteninterview

Das Experteninterview ist eine Erhebungsmethode zur Ermittlung von verbalen und qualitativen Daten in einem definierten Forschungsgebiet. Dabei richtet sich der Fokus auf Personen, die über ein spezielles Verständnis für den untersuchten Bereich verfügen und daher den Status eines Experten zugesprochen bekommen (Misoch, 2019). Im Zuge der Befragung kann dieses Expertenwissen zufolge Meuser & Nagel (2009) in ein Kontextwissen und in ein Betriebswissen kategorisieren werden.

- ◆ Das Kontextwissen bezieht sich auf den Kenntnisstand des Experten über das Handeln und Verhalten von anderen Personen oder Personengruppen.
- ◆ Bei der Befragung nach dem Betriebswissen steht der Experte selbst im Mittelpunkt. Hierbei wird das Expertenverhalten analysiert.

In der vorliegenden Arbeit wird das Experteninterview unter dem Gesichtspunkt der Untersuchung des Betriebswissens durchgeführt. Als zentraler Wissensträger fungiert unter anderem ein Experte der Burghauptmannschaft Wien, da dieser für den Betrieb der Hofburg verantwortlich ist. Der Inhalt der Befragung konzentriert sich auf die Arbeit und Wahrnehmung des Experten im Kontext des Bürobetriebs innerhalb der Hofburg und den zusammenhängenden energetischen Verbräuchen. Im Wesentlichen soll ausgehend vom prototypischen Systemvorschlag die optimale grafische Aufbereitung der Energieverbräuche im Sinne eines Entscheidungs- sowie Steuerungswerkzeugs erörtert werden.

6.1.1 Leitfaden

Als zentrales Element eines Experteninterviews dient der Leitfaden. Dieser wirkt als Steuerungswerkzeug und ermöglicht einen strukturierten Befragungsablauf. Der Leitfaden selbst ist in relevante Themenbereiche strukturiert, welche sich aus den Forschungsfragen ergeben. Um eine genauere Beschreibung des Befragten zu den einzelnen Themenbereichen zu erhalten, werden offene Fragen gestellt. Daraus resultiert eine höhere Flexibilität in der Befragung und ermöglicht einen tieferen Einblick in die Expertensichtweise (Misoch, 2019).

Für den Validierungsprozess des EMS wurde ein Leitfaden mit zwei wesentlichen Themenblöcken zusammengestellt: Einleitung, Rückmeldung zum prototypischen Systemvorschlag, Datendarstellung und Datenauswertung. Der erste Themenblock beschäftigt sich im Allgemeinen mit der Optimierung des Energieverbrauchs. Der zweite Themenblock behandelt die Rückmeldung des prototypischen Systemvorschlag im Zusammenhang mit den Systemkosten und den gewählten Verbrauchergruppen. Der dritte Themenblock legt den Fokus auf mögliche Darstellungsfor-

men von Verbrauchergruppen hinsichtlich der Datenzusammenfassung und der Beziehung zwischen den einzelnen „Entitäten“ (z.B.: Büroräume, Stockwerke) zueinander. Der vierte Themenblock nimmt Bezug auf die Datenauswertung in der Form von Aggregationszustände sowie die Berechnung von wesentlichen Key-Performance-Indikatoren (KPI's).

Neben der Aufbereitung der methodischen Vorgehensweise in Form eines Leitfadens, fand eine inhaltliche Vorbereitung für die Durchführung des Interviews statt. Dafür wurden zum Zeitpunkt des Interviews bereits Verbraucherdaten auf Basis des in Kapitel 5 beschriebenen Prototypens (in leicht abgeänderter bzw. angepasster Form hinsichtlich der Hardwarebelegung) mit dem Visualisierungstool Power BI vereinfacht zusammengefasst und aufbereitet. Diese Datenvisualisierungen wurden lediglich als Unterstützung für das Expertengespräch herangezogen und sind daher in der vorliegenden Arbeit nicht gesondert dargestellt.

6.1.2 Ergebnis

Die Hofburg Wien wurde ursprünglich als Burganlage konzipiert und im Zuge der Jahrhunderte umgebaut sowie erweitert. Dabei bildet der Schweizertrakt, jener Bereich, welcher für die Umsetzung des EMS herangezogen wird, den ältesten Teil der Hofburg und dient unter anderem als Bürofläche der Burghauptmannschaft. Die Burghauptmannschaft selbst ist mit der Betreuung und dem Betrieb der Hofburg Wien beauftragt.

In der Vergangenheit gab es eine Vielzahl an Vorprojekten hinsichtlich der Optimierung des Energieverbrauchs des historischen Gebäudes. Unabhängig davon ist aus Sicht des Experten zuerst die Feststellung des Energieverbrauchs entscheidend, um daraus weitere Steuerungs- bzw. Optimierungsmaßnahmen ableiten zu können. Aus diesem Grund werden derzeit bauliche Optimierungsmaßnahmen als nachrangig bewertet.

Im Sinne des zweiten Themenblocks des Leitfadens wurde im Zuge des Gespräches der ausgearbeitete Systemvorschlag des EMS vorgestellt. Im Wesentlichen ist dabei festzuhalten, dass die System-Architektur zufolge der kostengünstigen Umsetzung positive Zustimmung seitens Experten fand. Die Software-Architektur setzt sich primär aus „Open-Source“ Applikationen zusammen und bei der Auswahl der Hardware-Komponenten wurde auf eine kostengünstige Lösung gesetzt. Neben einem effizienten sowie kostengünstigen EMS wurde seitens Experten angeregt, eine möglichst hohe Flexibilität in der Erweiterung und Nachrüstbarkeit der Systemarchitektur in der weiteren Ausarbeitung zu berücksichtigen.

Liegenschaft/Wirtschaftseinheit	Trennzeichen	Objektnummer	Trennzeichen	Traktnummer/Traktkennzeichen (z.B.: ST = Schweizertrakt)	Trennzeichen	Geschoss (z.B.: EG = Erdgeschoss)	Trennzeichen	Raumbezeichnung	Trennzeichen	Anlagennummer (KG 480 - Gebäude und Anlagenautomation der DIN 276:2018)	Anlagenindex (fortlaufend)	Trennzeichen	Komponentenbezeichnung - Sensor (z.B.: T=Temperatur)	Komponentenindex (fortlaufend)
690005	-	010	-	ST	-	EG	-	EG87	-	480	001	-	T	001
Örtliches Kennzeichensystem									Funktionales Kennzeichensystem					

Abbildung 28: Kennzeichensystem

In Hinblick auf die Datendarstellung gab der Experte den Hinweis, die Energieverbräuche auf unterschiedlichen Ebenen abzubilden. Im konkreten Fall bedeutet dies die Gliederung in eine Trakt-Ebene (Summenebene), einer Geschossebene, eine Raumgruppen-Ebene (Büroräume) und eine Geräte-Ebene (Sensoren). Ausgehend von der kleinsten Ebene (Geräte-Ebene) folgt die Darstellung einem Bottom-Up-Ansatz. Um eine eindeutige Identifikation unterschiedlicher Ebenen zu gewährleisten, soll ein Kennzeichensystem für das EMS angewendet und in den Dashboards integriert werden. Dieses Kennzeichensystem ist in der Abbildung 28 beispielhaft dargestellt.

Die generierten Energieverbräuche der gewählten Verbrauchergruppen (BSV) sowie der gewählten „Well-Being“-Faktoren (Temperatur, rel. Luftfeuchtigkeit, CO₂-Gehalt) sind aus Sicht des Experten für den Validierungsprozess ausreichend. Im Sinne eines erhöhten Informationsgehaltes wird jedoch empfohlen, im Zuge einer detaillierteren Ausarbeitung alle weiteren Verbrauchergruppen des Gebäudes zu berücksichtigen.

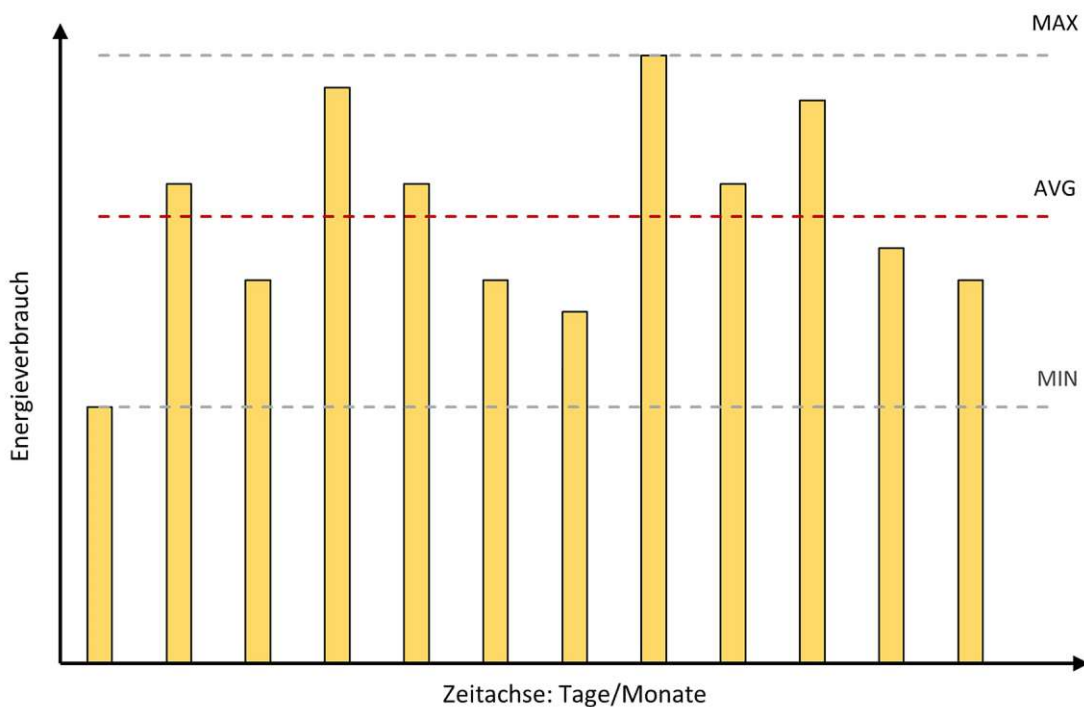


Abbildung 29: Skizze – Energieverbrauch mit Aggregatfunktionen

Des Weiteren wurde seitens Experten darauf hingewiesen, dass der zeitliche Verlauf der generierten Energieverbräuche in einem Intervall von Stunden, Tagen, Wochen, Monaten und Jahren zu unterteilen und aufzusummieren ist. Für die weitere Datenauswertung sind die Aggregatfunktionen Max, Min und AVG zu verwenden. Im Zuge des Interviews wurde dazu eine Skizze angefertigt (siehe Abbildung 29). Ergänzend zu der Datenverarbeitung über eine bestimmte Zeitperiode soll für die Darstellung der Energieeffizienz der KPI für den BSV „kWh/m²“ berechnet werden. Außerdem sollen für die Darstellung der „Well-Being“ Faktoren (Temperatur, rel. Luftfeuchtigkeit, CO₂-Gehalt) die entsprechenden Grenzwerte gemäß Kapitel 2.2.2 als MAX-Funktion sowie MIN-Funktion berücksichtigt werden, um den für den Nutzer zumutbaren Bereich im Sinne der Behaglichkeit abzubilden. Die Auswertung dieser Parameter erfolgt in einem Stundenintervall.

6.2 Prototyp nach dem Validierungsprozess

Auf Basis der vorgeschlagenen Systemarchitektur in Kapitel 5 und dem durchgeführten Validierungsprozess in Kapitel 6 wird das EMS in diesem Abschnitt finalisiert. Im Wesentlichen gilt es die Rückmeldungen aus dem Experteninterview hinsichtlich der energetischen Datendarstellung (dritter Themenblock) sowie energetischen Datenauswertung (vierter Themenblock) in den Prototypen einzuarbeiten. Der Systemvorschlag hinsichtlich der Hardware-Architektur sowie Software-Architektur wurde seitens Experten positiv bewertet und wird daher nicht mehr angepasst. Die Anforderung der Erweiterbarkeit wird mit Hilfe von gesondert programmierten Eingabe- bzw. Ausgabemasken gelöst (siehe Kapitel 6.2.2). Die Darstellung und Auswertung der generierten Systemdaten erfolgt mit Hilfe von sogenannten Dashboards. Drauf werden mittels grafischer Elemente Energieverbräuche in einem unterschiedlichen Detaillierungsgrad veranschaulicht. Je nach Informationsgehalt und in Abhängigkeit der Informationstiefe stehen diese Dashboards in einer entsprechenden Anordnungsbeziehung zueinander. Daraus resultiert ein struktureller Aufbau hinsichtlich der EMS-Datenvisualisierung, wie in Abbildung 30 gezeigt wird.

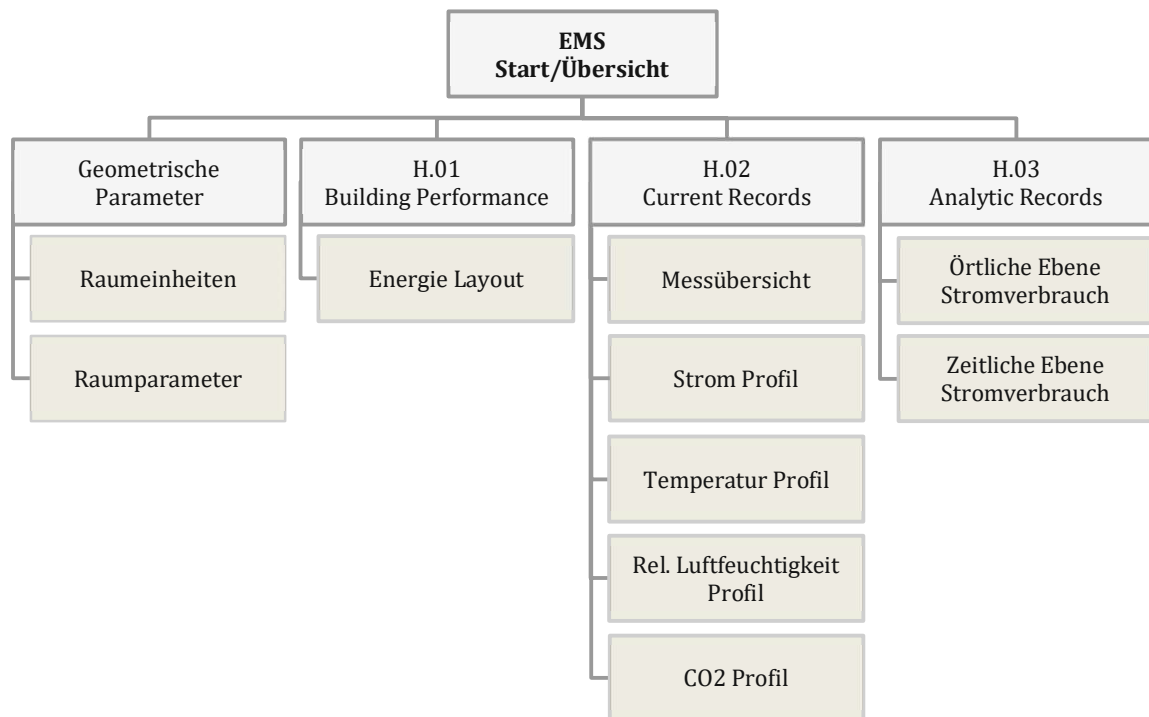


Abbildung 30: Strukturaufbau des EMS

Im Sinne des Bottom-Up-Prinzips sind die Dashboards hierarchisch zufolge der Informationstiefe angeordnet. Ausgehend vom Start-Dashboard bildet die darunterliegende Hierarchiestufe die Haupt-Dashboard-Ebene. Diese setzt sich aus der allgemeinen Gebäude-Performance, der aktuellen und der analytischen Aufzeichnung zusammen. Ergänzend dazu ermöglicht ein Hilfs-Dashboard die Eingabe von geometrischen Parametern. Die darunterliegende Dashboard-Ebene ermöglicht eine detaillierte Betrachtung der Energieverbräuche sowie „Well-Being“ Faktoren (BSV, Temperatur, rel. Luftfeuchtigkeit, CO₂-Gehalt) in Abhängigkeit der örtlichen Gegebenheiten (Geräte-Ebene, Raum-Ebene, Geschoss-Ebene, Trakt-Ebene) sowie der Zeitachse (Tage, Wochen, Monate, Jahre).

Der Aufbau der einzelnen Dashboards basierend auf dem „Open-Source“ Werkzeug Grafana wird im nachfolgenden Abschnitt näher erläutert. Dabei ist festzuhalten, dass es sich bei den gezeigten Daten um Demodaten handelt. Die Darstellung von Demodaten im Zuge dieser Arbeit wird für die Beschreibung der Funktionen sowie Eigenschaften der Dashboards als ausreichend gesehen. Die Programmierung der Dashboards ist im Anhang (siehe Kapitel 9) ersichtlich.

6.2.1 EMS-Startseite

Die EMS-Startseite bildet die oberste Navigationsebene des EMS und erscheint nach erfolgreicher Anmeldung mittels Benutzername und Passwort bei Grafana (siehe Abbildung 31). Als zentraler Knotenpunkt der Überwachung ist diese Seite über Verlinkungen mit der Haupt-Dashboard-Ebene verbunden.

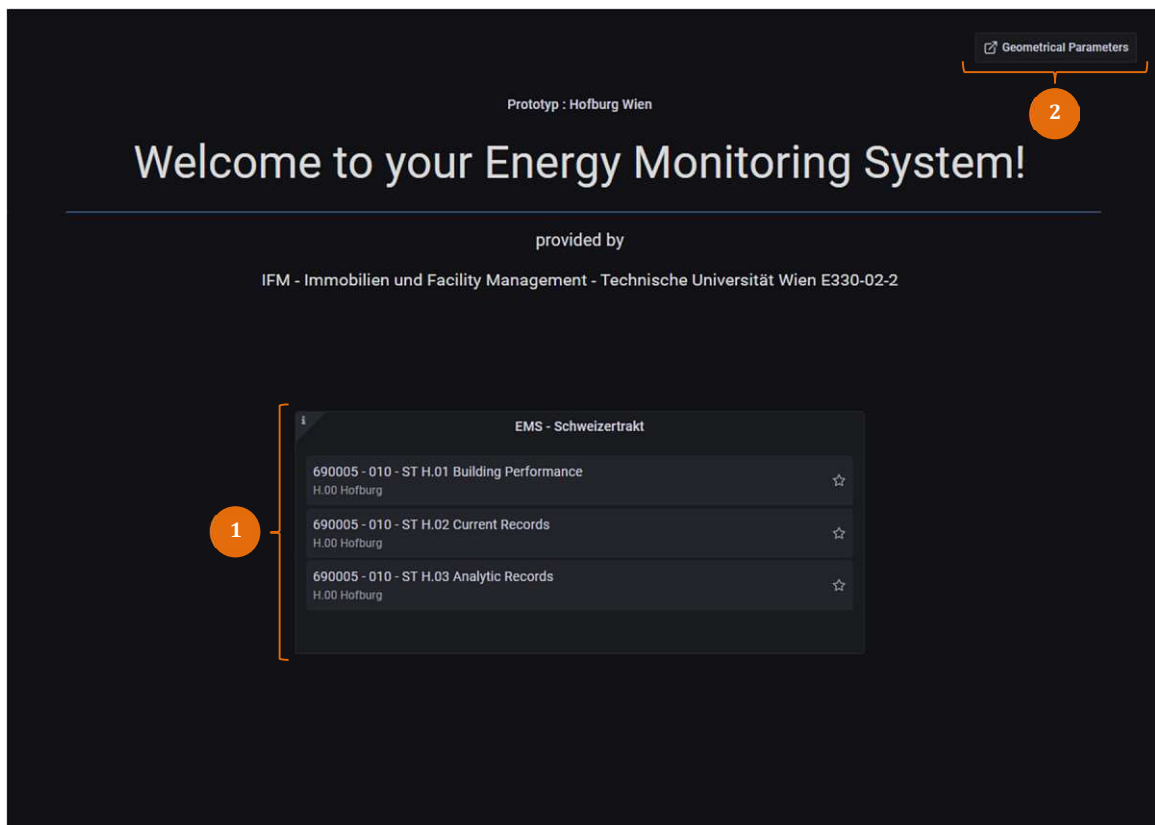


Abbildung 31: EMS – Startseite

Nr.	Funktion	Beschreibung
1	Dashboard-Liste	Auflistung der priorisierten Dashboards durch dynamische Links.
2	Data-Link (URL)	Öffnen eines neuen Tabs und Verlinkung zu den geometrischen Parametern (siehe Kapitel 6.2.2).

Die zentral positionierte Dashboard-Liste sowie die Verlinkung am rechten oberen Rand stellen gemeinsam die erwähnte Verknüpfung zur Haupt-Dashboard-Ebene dar. Ausgehend davon können alle weiteren Dashboards bzw. Hierarchiestufen angesteuert werden.

6.2.2 Geometrische Parameter

Basierend auf dem Interviewergebnis war es erforderlich dem EMS-Nutzer die Eingabe von geometrischen Raumparametern zu ermöglichen. Diese Funktion soll sicherstellen, dass einzelne Büroräume bzw. Bürogruppen je nach Adaptierungsbedarf im Sinne der Nachrüstbarkeit bzw. Erweiterbarkeit in virtueller Form geometrisch angepasst werden können. Resultierend aus dieser Vorgabe wurden zwei eigene Dashboards programmiert, die das Importieren sowie Exportieren von geometrischen Daten in und aus der Datenbank ermöglichen. Die Umsetzung der beiden Dashboards wird in folgendem Abschnitt dargestellt und erklärt.

Dashboard – Raumeinheiten

In einem ersten Schritt ist die Erstellung von Raumeinheiten erforderlich. Diese Erstellung impliziert die Eingabe der aufeinanderfolgenden Kennzeichen (Wirtschaftseinheit, Gebäudenummer, Trakt-Kennzeichen, Geschossbezeichnung, Raumbezeichnung) hinsichtlich dem örtlichen Kennzeichensystem. Die entsprechende Eingabemaske ist in Abbildung 32 veranschaulicht.

Abbildung 32: EMS – Geometrical Parameters (Units)

Nr.	Funktion	Beschreibung
1	Hyperlink	Ermöglicht die Navigation zwischen den beiden Dashboards.
2	Eingabefeld	Speicherung des örtlichen Kennzeichensystem in der Datenbank.
3	Raumliste	Auflistung der abgespeicherten Raumeinheiten inkl. Parameter (wird durch ein gesondertes Dashboard visualisiert).

Betreffend dem Kennzeichensystem werden die eingegebenen örtlichen Daten später auf der Sensor-Ebene mit den funktionalen Daten zusammengeführt (siehe Kapitel 6.2.4).

Dashboard – Raumparameter

In einem zweiten Schritt sind den zuvor erstellen Raumeinheiten die relevanten geometrischen Parameter zuzuweisen. Als relevante Parameter werden die Raumhöhe sowie Raumfläche gesehen. Diese können je nach dem räumlichen Erweiterungsbedarf (physisch sowie virtuell) neu adaptiert und abgespeichert werden. Die Eingabemaske sowie Ausgabemaske sind in Abbildung 33 dargestellt.

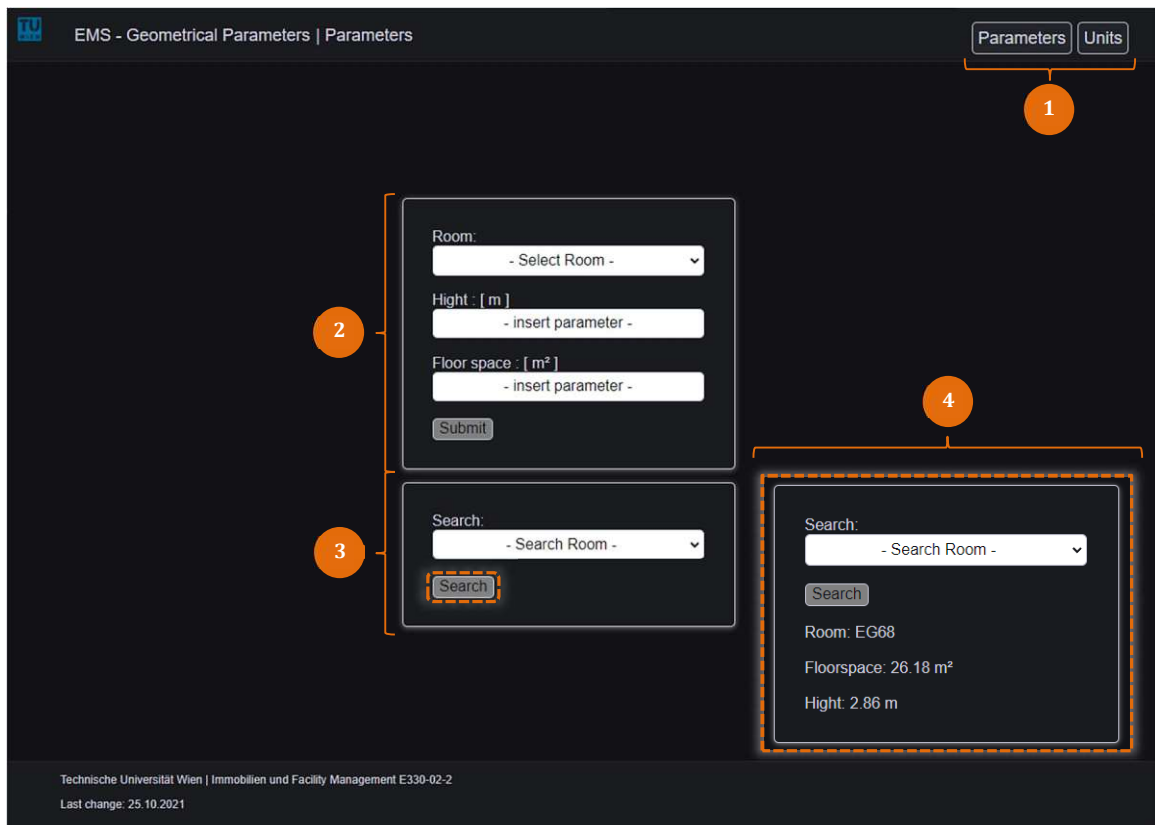


Abbildung 33: EMS – Geometrical Parameters (Parameters)

Nr.	Funktion	Beschreibung
1	Hyperlink	Ermöglicht die Navigation zwischen den beiden Dashboards.
2	Eingabefeld	Ermöglicht die Eingabe von Raumparameter (Fläche, Höhe) sowie deren Speicherung in der Datenbank.
3	Suchfeld	Ermöglicht die Abfrage der abgespeicherten Parameter.
4	Abfrageergebnis	Dieses Feld präsentiert das Abfrageergebnis aus dem Suchfeld.

Die Eingabemöglichkeit sowie Speicherung von Flächenparameter ist nicht nur für die Nachrüstbarkeit relevant, sondern ist auch für die KPI-Ermittlung essenziell. Die Darstellung der aktuellen Echtzeit-Messungen auf Raumebene inklusive der ermittelten KPI's ist in Kapitel 6.2.4 ersichtlich.

6.2.3 Building Performance

Das Dashboard der „Building Performance“ präsentiert einen gesamtheitlichen Überblick über das energetische Verhalten des Gebäudes auf Geschossebene. Mit Hilfe eines Raumstempel werden die relevanten energetischen Parameter je Raum in Echtzeit wiedergegeben. Der Raumstempel enthält Informationen zur Temperatur, rel. Luftfeuchtigkeit, CO₂-Gehalt sowie zum BSV eines Raumes bzw. Arbeitsplatzes (siehe Abbildung 34).

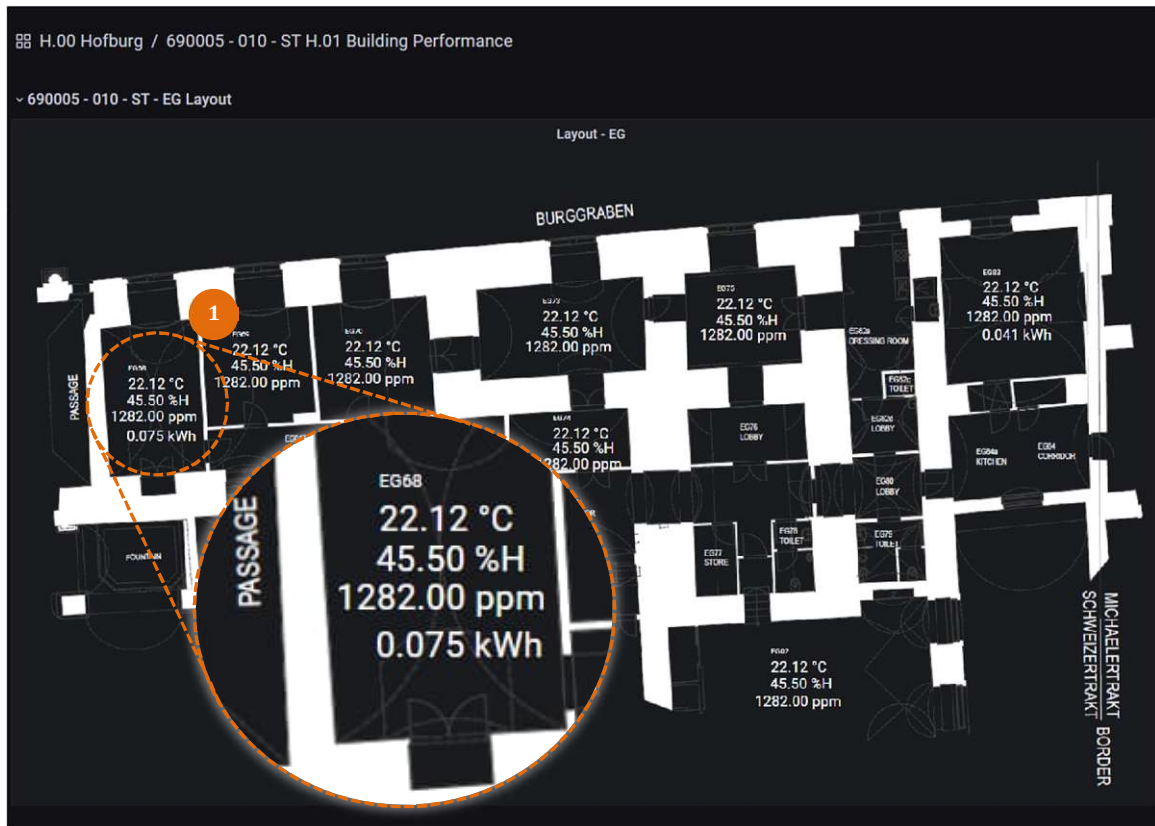


Abbildung 34: EMS – Building Performance EG – Layout

Nr.	Funktion	Beschreibung
1	Raumstempel	Darstellung der energetischen Parameter eines Raums.

Für die Datenvisualisierung kommt ein gesondertes Grafana-Plugin zum Einsatz, um den Plangrundriss in ein Panel umzuwandeln und die entsprechenden Sensordaten mit den Räumen zu verknüpfen. Die Abbildung 34 zeigt exemplarisch die energetische Leistungsfähigkeit des Erdgeschosses des Schweizertraktes. Dabei verfügen die gezeigten Räume bzw. Raumgruppen über detaillierter Energieverbrauchsdaten bzw. weitere Datendarstellungsformen, um eine effektive Steuerung durch den EMS-Nutzer sicherzustellen. In Abhängigkeit des gewünschten Detaillierungsgrad sind die Daten über die Dashboard-Ebene der momentanen Aufzeichnungen (siehe Kapitel 6.2.4) oder analytischen Aufzeichnungen (siehe Kapitel 6.2.5) einsehbar. Die Darstellung des Mezzanins ist identisch zu dieser in Abbildung 34 gezeigten Visualisierung und wird daher nicht gesondert abgebildet.

6.2.4 Momentane Aufzeichnungen

Eine zentrale Eigenschaft des EMS ist die Aufbereitung und Darstellung von Metriken (Messwerte und KPI's) über eine definierte Zeitperiode sowie die Identifikation von Ereignissen inklusive einem integrierten Warnsystem. Um die Umsetzung eines modernen EMS sicherzustellen, wurden diese Eigenschaften in den nachfolgenden Dashboards berücksichtigt.

Dashboard – Messübersicht eines Raumes

Das Dashboard zur Messübersicht eines Raumes visualisiert einzelne Datenpunkte, der gemessenen energetischen Parameter zum aktuellen Zeitpunkt. Die zeitlich dargestellten Metriken lassen sich wie folgt benennen:

- ◆ Momentanes Temperaturverhalten des gewählten Raums
- ◆ Momentaner CO₂-Gehalt des gewählten Raumes
- ◆ Momentane rel. Luftfeuchtigkeit des gewählten Raumes
- ◆ Momentaner kumulierter Energieverbrauch des gewählten Raums
- ◆ Momentaner KPI „kWh/m²“ (kumulierter Energieverbrauch durch die Raumfläche)

In Abhängigkeit der farblichen Darstellung der Zeitreihendaten, liegen die Ist-Werte entweder im (grüne Farbe) oder außerhalb (rote Farbe) des genormten Soll-Bereiches. Der Energieverbrauch und der daraus resultierende KPI unterliegen keinem Grenzwert und werden daher in gelber Farbe dargestellt (siehe Abbildung 35).

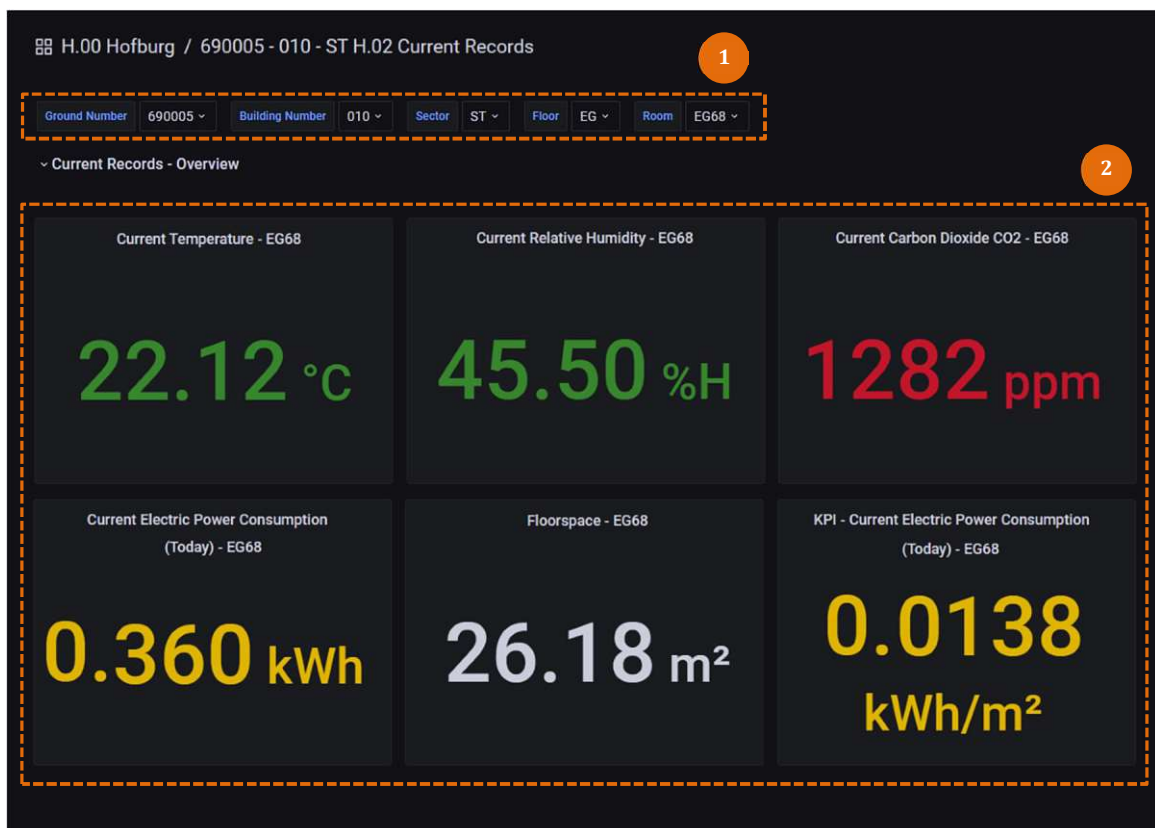


Abbildung 35: EMS – Current Records Overview

Nr.	Funktion	Beschreibung
1	Menüleiste	Entsprechend dem örtlichen Kennzeichensystem kann mittels der Menüleiste auf räumlicher Ebene navigiert werden.
2	Messübersicht	Die Messübersicht repräsentiert die aktuelle energetische Performance eines gewählten Raumes.

Dashboard – Echtzeit Energieverbrauch

Für jeden Raum wird der zeitliche Verlauf des Stromverbrauchs sowie der zeitliche Verlauf der „Well-Being“-Parameter mit Hilfe von Liniendiagramme visualisiert. Diese Form der Darstellung ermöglicht zufolge der Korrelation der Energiedaten mit Zeitachse das energetische Verhalten eines Raumes besser zu verstehen und dadurch entsprechende Steuerungsmaßnahmen abzuleiten. Dazu sind in Abbildung 36 die Dashboards der relevanten Energieverläufe (Stromverbrauch, Temperatur, CO₂-Gehalt, rel. Luftfeuchtigkeit) zusammengefasst

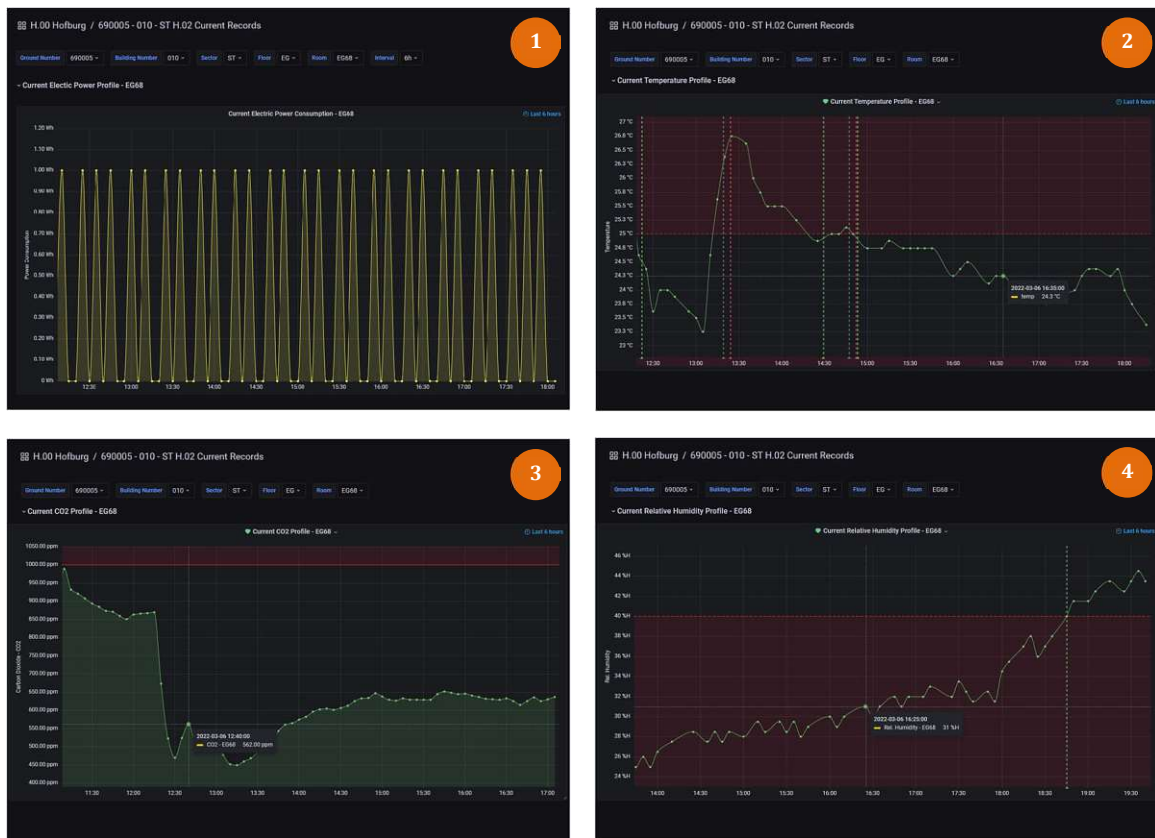


Abbildung 36: Echtzeit Energieverbrauch und „Well-Being“-Aufzeichnung

Nr.	Funktion	Beschreibung
1	Stromverlauf	Die Grafik zeigt den aktuellen Verlauf des Betriebsstromverbrauchs eines Raumes.
2	Temperaturverlauf	Die Grafik zeigt den aktuellen Temperaturverlauf eines Raumes, unter der Berücksichtigung der definierten Grenzwerte.
3	CO ₂ -Verlauf	Die Grafik zeigt den aktuellen CO ₂ -Verlauf eines Raumes, unter der Berücksichtigung der definierten Grenzwerte.

- 4 Verlauf der rel. Luftfeuchtigkeit
Die Grafik zeigt den aktuellen Verlauf der relativen Luftfeuchtigkeit eines Raumes, unter der Berücksichtigung der definierten Grenzwerte.

Warnsystem – Benachrichtigung

Eine wesentliche Voraussetzung für ein modernes Monitorings ist die Fähigkeit bei Überschreiten von vordefinierten Schwellenwerte den EMS-Nutzer warnen sowie in Kontakt treten zu können. Aus diesem Grund wurde im vorliegenden EMS ein Warnsystem eingerichtet, dass über Benachrichtigungen (E-Mails) mit dem EMS-Nutzer kommuniziert. Beispielhafte Benachrichtigungen sind in Abbildung 37 dargestellt.

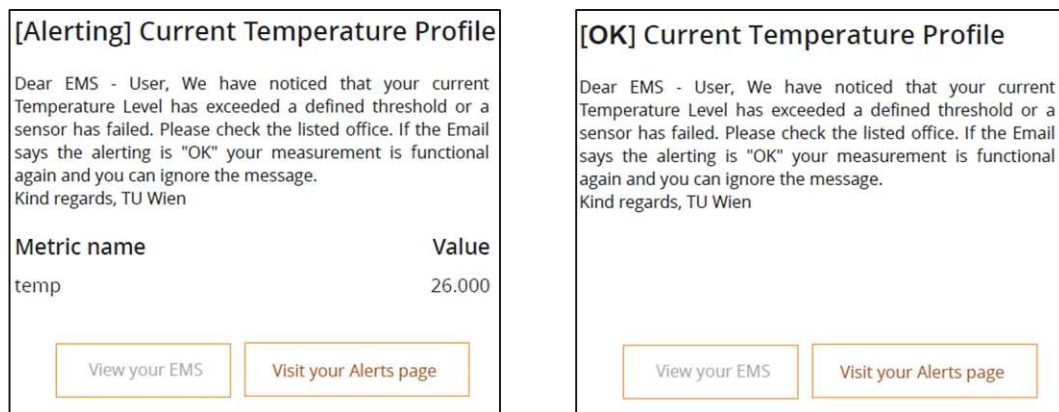


Abbildung 37: EMS – Benachrichtigung

Der Funktionsablauf des Warnsystems wird in Abbildung 38 mit Hilfe eines Flussdiagramms dargestellt. Die erforderlichen Schwellenwerte bzw. Benachrichtigungsregeln wurden gemäß der Literaturrecherche in Kapitel 2.2.2 definiert und sind in den Dashboards grafisch sichtbar.

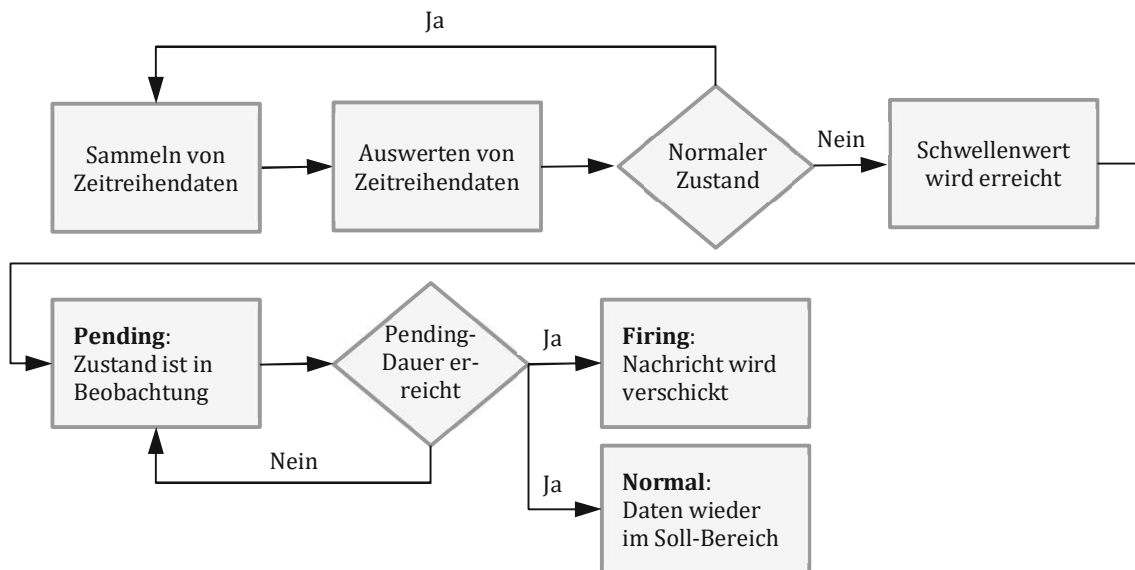


Abbildung 38: Flussdiagramm Warnsystem

Bei Erreichen dieser Schwellenwerte (rote Zonen) wird die Pending-Phase ausgelöst und in den Panels als gelbe vertikale Linie visualisiert. Die Dauer dieser Pending-Phase ist mit fünf Minuten

voreingestellt. Liegen die Metriken nach Ablauf der Zeitdauer wieder im Soll-Bereich, geht das Warnsystem in den Beobachtungsmodus zurück. Befindet sich die generierten Daten jedoch außerhalb des normierten Bereiches, übermittelt das Warnsystem eine Benachrichtigung per E-Mail an den EMS-Nutzer. Dieser Zustand wird als Firing-Phase bezeichnet und in den Panels als roter vertikaler Strich visualisiert.

6.2.5 Analytische Aufzeichnung

Resultierend aus den Ergebnissen des Experteninterviews wurde der Stromverbrauch mit Hilfe von Balkendiagrammen kumulativ ausgewertet und auf einer Raumebene, einer Trakt-Ebene und einer Geschossebene dargestellt. Diese Ausarbeitung ist in Abbildung 39 veranschaulicht.

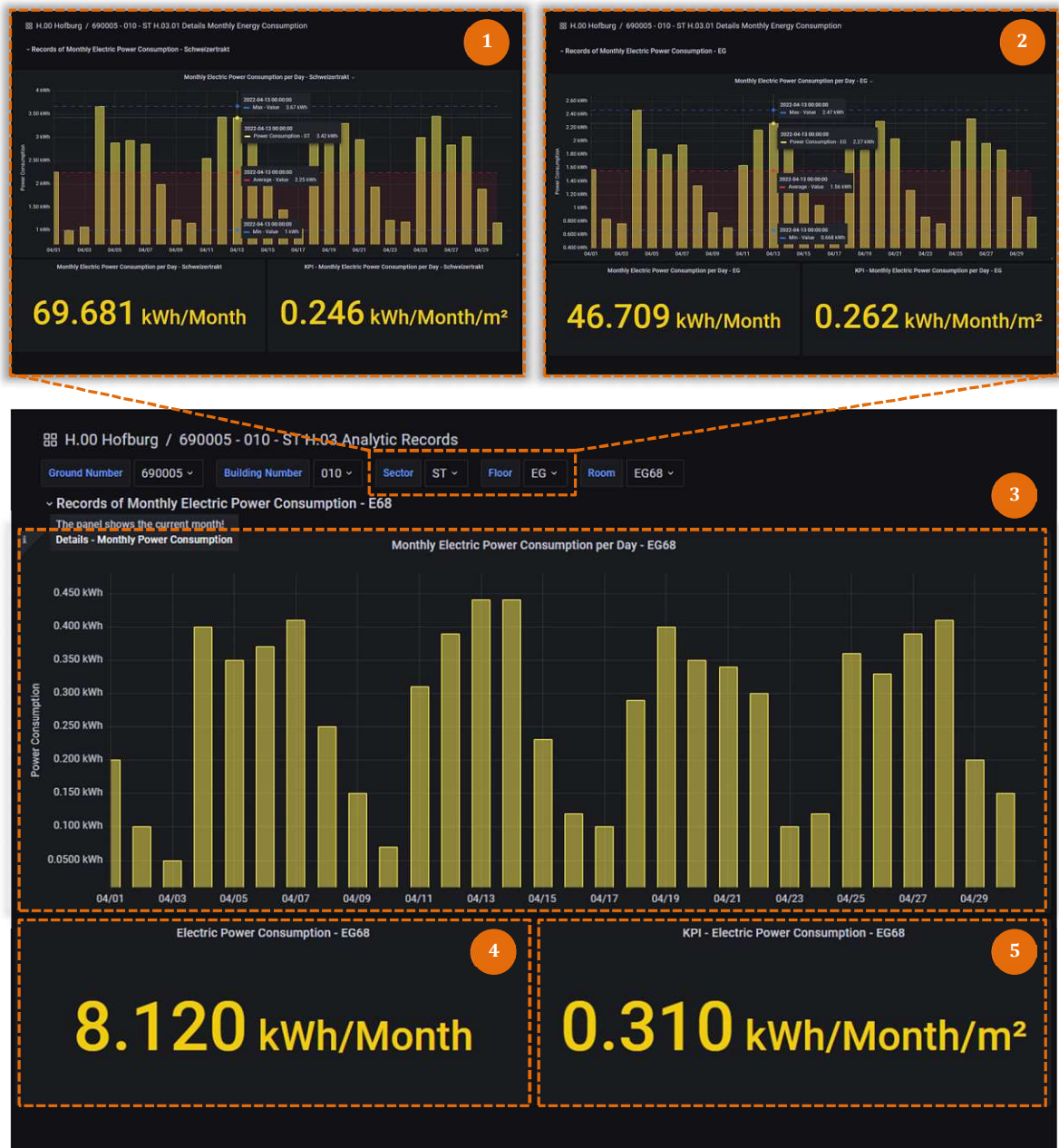


Abbildung 39: EMS – Monatlicher Stromverbrauch je Ebene

Nr.	Funktion	Beschreibung
1	Trakt-Ebene	Der Stromverbrauch wird mittels Balkendiagramm auf Trakt-Ebene über einen definierten Zeitraum abgebildet. Ergänzend dazu sind die ermittelten Max-Werte, Min-Werte und AVG-Werte angegeben.
2	Geschoss-Ebene	Der Stromverbrauch wird mittels Balkendiagramm auf Geschoss-Ebene über einen definierten Zeitraum abgebildet. Ergänzend dazu sind die ermittelten Max-Werte, Min-Werte und AVG-Werte angegeben.
3	Raum-Ebene	Die Grafik zeigt den Stromverbrauch in Form eines Balkendiagramms auf Raum-Ebene.
4	Stromverbrauch	Der Stromverbrauch wird auch auf der zeitlichen Ebene (z.B.: kWh/Monat) kumuliert dargestellt.
5	KPI	Der kumulierte Stromverbrauch wird in Abhängigkeit der Flächenkennzahl in einen KPI übergeführt.

Neben der örtlichen Ebene kann der Stromverbrauch auch auf der zeitlichen Ebene beobachtet werden. Die analytische Aufzeichnung findet in einer Frequenz von Tagen, Wochen, Monate und Jahren statt. Da der Anstieg des Stromverbrauchs von Natur aus inkrementell ist, kann das Verhalten des Verbrauches sowie die Änderungsrate über einen definierten Zeitraum berechnet und in Form von KPI's umgewandelt werden.

Exemplarisch für die analytische Aufzeichnung wurde in Abbildung 39 der monatliche Stromverbrauch auf Raumebene dargestellt. Die Dashboards der anderen Ebenen (räumlich sowie zeitlich) sind ident und werden daher nicht gesondert abgebildet.

7 Fazit

In diesem Abschnitt der Arbeit werden die gewonnen Erkenntnisse aus den vorangegangenen Kapiteln zusammengetragen und auf relevante Punkte für das Energie-Monitoring-System eingegangen. In weiterer Folge werden die zu Beginn gestellten Forschungsfragen beantwortet und das Erreichen der Forschungsziele evaluiert. Abschließend wird ein Ausblick für zukünftige Forschungsbereiche abgegeben.

7.1 Zusammenfassende Erkenntnisse

Ein Monitoring-System ist ein Managementwerkzeug mit der zentralen Funktion das beobachtete System zu steuern, die Entscheidungsfindung zu erleichtern und eventuelle systembedingte Verbesserungsmaßnahmen einzuleiten. Wird bei diesem beobachteten System primär die Energie-Performance gesteuert und bewertet, so ist in diesem Zusammenhang von einem Energie-Monitoring-System die Rede. Für die Beurteilung der Energie-Performance ist eine energetische Gesamtübersicht über das zu kontrollierende System erforderlich. Dabei werden Energiedaten von Energieverbräuchen gesammelt, die anschließend nach Verbrauchergruppen, in Abhängigkeit der eingesetzten Energieträger, kategorisiert werden. In weiterer Folge können daraus energetische Verbesserungsmaßnahmen im Sinne der Energieeffizienz abgeleitet werden. Die Energieeffizienz selbst wird zufolge der ISO 50006 (2014) durch sogenannte Indikatoren des Energieverbrauchs (KPI's) ermittelt und als Verhältniswerte ausgedrückt. Im konkreten Fall des Immobilienbetriebs erfolgt die Darstellung der Indikatoren in Form von Leistungsspitzen (z.B.: kW) und spezifischen Energieverbräuchen (z.B.: kWh/EH).

Im Hinblick auf den technologischen Aufbau eines Energie-Monitoring-Systems ist für eine effektive Systemumsetzung die Implementierung des „Internet of Things“ entscheidend. Bei dieser sogenannten „Smart-Building-Technologie“ handelt es sich um eine mittlerweile weitverbreitete Technologie, die in modernen und intelligenten Immobilien vor Allem zufolge einer kostengünstigen Anwendung zum Einsatz kommt.

In einem IoT-basierenden Energie-Monitoring-System kommt diese Technologie als ein dreischichtiger Aufbau vor. Dieser setzt sich aus einer Wahrnehmungsebene, einer Netzwerkebene sowie einer Applikationsebene zusammen. Während die Applikationsebene sowie Netzwerkebene primär mit einer OSS funktioniert, stellt die Wahrnehmungsebene den kostenintensiveren Systembestandteil dar. Durch die Wahl der Systemkomponenten (z.B.: Sensoren) in der Wahrnehmungsebene, in Abhängigkeit der zu messenden Verbrauchergruppen bzw. Energieträger, können diese Kosten variieren. Aus diesem Grund ist festzuhalten, dass eine kostentechnische Systembewertung immer individuell auf den Einsatzort des IoT-basierenden EMS anzupassen ist.

Eine wesentliche Aufgabe des IoT-basierenden EMS stellt die grafische Aufbereitung von generierten Energiedaten dar. Durch die Generierung von Zeitreihendaten können die Überwachungsinformationen via Kommunikationsprotokoll MQTT in Echtzeit (unter Berücksichtigung der Datensammlungsfrequenz) an den Nutzer übermittelt und visualisiert werden. Als Unterstützung zur Ergebnisinterpretation ist die Wahl eines passenden Analysetools (z.B.: Grafana) notwendig, welches ebenfalls in der Lage ist über Warnsysteme (z.B.: Ticket-System, E-Mail, SMS etc.) zu kommunizieren.

7.2 Beantwortung der Forschungsfragen

Im Anschluss werden die drei formulierten Forschungsfragen (siehe Kapitel 1.2), unter der Berücksichtigung der definierten Forschungsziele, beantwortet:

1. Welche relevanten Messdaten sollen erhoben werden, um eine Büroimmobilie energieeffizienter zu betreiben und um das „Well-Being“ der Immobiliennutzer zu erhöhen?

Für die Evaluierung relevanter Messdaten hinsichtlich des energetischen Verhaltens einer Büroimmobilie muss der Energieverbrauch vorrangig zwischen unterschiedlichen Verbrauchergruppen kategorisiert werden. Diese Verbrauchergruppen lassen sich wie folgt benennen: Heizen (inkludiert das Beheizen von Räumen sowie die Warmwasseraufbereitung), Kühlung, Raumlüftung, Beleuchtung und Betriebsstrom. Im Wesentlichen ist dabei festzuhalten, dass das Heizen den größten Nutzenergieverbraucher darstellt und sich als zentraler Hebel in der Beeinflussung der Energieeffizienz anbietet. Im Vergleich dazu nimmt die Kühlung den zweiten Platz ein, gewinnt jedoch zufolge des signifikant anwachsenden Kühlbedarfs im Gebäudebetrieb immer mehr an Bedeutung. Unabhängig davon stehen die genannten Verbrauchergruppen immer im Konnex mit den eingesetzten Energieträgern (z.B.: Erdgas, Fernwärme usw.), der Mitarbeiteranzahl (Energieverbrauch pro MA) sowie der konditionierten Bürofläche (Energieverbrauch pro Fläche), die den Nutzenergieverbrauch mit beeinflussen können. Aus diesem Grund ist die Generierung von relevanten Energiemessdaten für jede Büroimmobilie individuell je nach Ressourceneinsatz zu bewerten.

Für die Bereitstellung einer gesünderen Arbeitsumgebung und der Steigerung der Behaglichkeit am Arbeitsplatz sieht die ISO 7730:2005 (2005) unter anderem folgende Parameter vor: Temperatur, Luftfeuchtigkeit und CO₂-Gehalt. Die Erhebung dieser Messdaten kann neben dem sozialen Aspekt hinsichtlich des „Well-Being“ der Immobiliennutzer auch für die Beschreibung des thermischen Gebäudeverhaltens herangezogen werden und somit eine Aussage zur Energieeffizienz abgeleitet werden.

2. Wie können generierte Daten bestmöglich zusammengefasst, in einer einheitlichen Darstellungsform aufbereitet und visualisiert werden?

Die Wesentliche Aufgabe einer Datenvisualisierung besteht darin, die generierten Daten in einer lesbaren und interpretierbaren Art und Weise aufzubereiten und somit eine ideale Interaktion zwischen Nutzer und dem Energie-Monitoring-System sicherzustellen. Eine zielführende Ergebnisinterpretation seitens Nutzer kann nur dann sichergestellt werden, wenn effektive Darstellungsformen zur Datenanalyse zur Verfügung stehen.

Für die Darstellung von kumulierten Energieverbraucherdaten über eine Zeitperiode (z.B.: Stromverbrauch über Tage, Wochen, Monate usw.) werden Balkendiagramme verwendet, um Extremstellen leichter erkennen zu können. Durch eine entsprechende Kennzeichnung der Extrema (Max, Min, AVG) mittels horizontaler, strichlierter Linie, können außerdem Anomalien besser identifiziert werden. Im Gegensatz dazu hat die vorangegangene Ausarbeitung gezeigt, dass sich für Visualisierung von Echtzeit-Energieverbraucherdaten das Liniendiagramm als optimale Darstellungsform anbietet. Folglich können Korrelation zwischen dem Energieverbrauch bzw. der generierten Messdaten und der Zeitachse anschaulicher verdeutlicht werden.

Eine Übersicht zur Energie-Performance des Gebäudes kann mit Hilfe von KPI's erfolgen. Dazu werden generierte Nutzerenergieverbrauchsdaten je Verbrauchergruppe zusammengefasst und mit der entsprechenden Flächenkennzahl ins Verhältnis gesetzt (z.B.: kWh/m²).

Die Beantwortung dieser Forschungsfrage steht des Weiteren im Zusammenhang mit dem dritten Forschungsziel: *„Die Darstellungsformen der Energieverbräuche sollen auf unterschiedlichen Ebenen möglich sein (gesamter Trakt, Raumgruppe, einzelne Geräte).“*

Durch die Implementierung eines örtlichen sowie funktionalen Kennzeichnungssystems, welches im Zuge der Ausarbeitung des Energie-Monitoring-Systems durch unterschiedliche Dashboards grafisch berücksichtigt wurde, ist die Einhaltung dieses Forschungsziels gegeben.

3. Wie sieht die Software (SW) und Hardware (HW) Architektur eines Energie-Monitoring-Systems aus?

Die Wahl der Software-Architektur sowie der Hardware-Architektur des IoT-basierenden Energie-Monitoring-Systems ist überwiegend durch die Rahmenbedingung des ersten Forschungsziels beschränkt: *„Der Prototyp soll aus einer SW/HW Architektur bestehen, welche primär auf gratis Applikationen und Tools basiert, um die Entwicklungskosten und Betriebskosten auf ein Minimum zu halten.“*

Die ausgewählte SW-Architektur besteht vollständig aus einer OSS. Der Netzwerk Layer (Datenspeicherung und Kommunikation) sowie der Applikation Layer (Datenvisualisierung und Analyse) setzt sich aus Produkten zusammen, die am Markt kostenlos zur Verfügung stehen und unter anderem keine zeitgebundenen Kosten (z.B.: Lizenzgebühren) verursachen. Im Gegensatz dazu fallen für die Wahl der Systemkomponenten des Sensor Layers (Sammeln und Senden von Daten) Kosten an, die sich aus dem Stückpreis und der Stückzahl je ausgewähltem Produkt ergeben. Eine dazugehörige Auflistung wird in Tabelle 6 gezeigt.

Tabelle 6: Hardware-Kosten des EMS

Nr.	Hardware-Komponente	Stückpreis PB Q1/23	Stückzahl	Hardware-Kosten PB Q1/23
1	Raspberry Pi 4 Modul B	65,00 €	2 Stk.	130,00 €
2	Smart-Plug	10,00 €	11 Stk.	110,00 €
3	CO ₂ -Sensor	38,00 €	11 Stk.	418,00 €
4	Temp./rel.Luftf. (DHT22)	8,00 €	2 Stk.	16,00 €
5	Temp./rel.Luftf. (Shelly)	20,00 €	11 Stk.	220,00 €
Summe (exkl. MwSt.):				<u>894,00 €</u>

Die eingesetzten Produkte und die daraus resultierenden Hardware-Kosten (Stückpreis mal Stückzahl je Produkt) ergeben sich zufolge der spezifischen Eigenschaften des vorgestellten Prototyps. Die Produkte sowie die damit verbundenen Kosten können je nach projektspezifischer Anforderung an das Energie-Monitorings-System und der zumessenden Verbrauchergruppen variieren. Die hardwaregebundenen Kosten sind primär vom Ausmaß der infrastrukturellen Ausstattung abhängig. Eine pauschale kostentechnische Bewertung eines Energie-Monitoring-Systems ist daher nicht möglich.

In weiterer Folge steht diese Forschungsfrage auch mit dem zweiten Forschungsziel in Verbindung: „Der Prototyp soll bei räumlichen Erweiterungen einfach adaptierbar sein.“

Durch die entsprechende Programmierung der Eingabemaske für geometrische Parameter (Raumhöhe, Raumfläche) ist eine Adaptierung des Prototyps auf der virtuellen Seite möglich. Die Erweiterungsmöglichkeit hinsichtlich der Hardwarekomponenten ist ebenfalls gegeben. Dabei ist lediglich auf eine intakte Kommunikation über das Netzwerk zwischen den Clients zu achten.

7.3 Ausblick

Im Zuge der Ausarbeitung der Diplomarbeiten haben sich aus Sicht des Autors, basierend auf den erlangten Erkenntnissen, weiterführende Themenfelder in Bezug auf Energie-Monitoring-Systeme ergeben. Diese Themenfelder lassen sich wie folgt benennen:

Erweiterung der Messdaten

Um ein genaueres Bild zum energetischen Verhalten eines Gebäudes zu bekommen, sollten neben dem BSV weitere Verbrauchergruppen in Abhängigkeit der Energieträger gemessen werden. Neben der Messung von weiteren Verbrauchergruppen ist eine Erweiterung der sozialen Messparameter im Sinne des „Well-Being“ anzudenken. Dazu betrachtet die ISO 7730:2005 (2005) die Luftgeschwindigkeit als einen weiteren Faktor für die Beurteilung der Behaglichkeit sowie für die Beeinflussung der Raumqualität.

Ergänzend dazu ist anzumerken, dass die Information über den Auslastungsgrad eines Raumes (Betriebszeiten, Leerstände usw.) zu einer energieeffizienteren Raumkonditionierung beitragen könnte. Dies würde unter anderem die Installation von Bewegungssensoren bedeuten.

Beurteilung der Energieeffizienz

Für die Beurteilung der Energieeffizienz bzw. energetischen Verbesserung eines Gebäudes sieht die ISO 50006 (2014) einen Vergleich zwischen der Reporting-Periode und der Basislinien-Periode vor. Um diesen Ansatz in weiteren Forschungsfragen nachgehen zu können, ist es entscheidend, Messungen vorab über einen längeren Zeitraum durchzuführen (min. 12 Monate vor Aufzeichnung der Reporting-Periode).

Da für die Beurteilung der Effizienz bei „Well-Being“-Faktoren die Aufzeichnung einer Basislinien-Periode als nicht zielführend erscheint, sollten folgende Parameter für eine Bewertung herangezogen werden:

- ◆ Alerts pro Event: Die Aufzeichnung der Anzahl an Fehlermeldungen in einem definierten Zeitraum. Dadurch kann ein Rückschluss auf das Wohlbefinden des Immobiliennutzers sichergestellt werden.
- ◆ Auslastungsgrad: Die Beurteilung der durchschnittlichen Zeit über einen definierten Betrachtungszeitraum in welcher die Grenzwerte für die „Well-Being“-Faktoren über- bzw. unterschritten werden.

Für eine Beurteilung der Effizienz im Sinne der „Well-Being“-Faktoren sollten beide oben angeführten Parameter kombiniert angewendet werden.

Systemkomponenten

Im Sinne einer Optimierung des Energie-Monitoring-Systems stellt sich die Frage, inwieweit die Systemarchitektur von Komponenten ersetzt bzw. ergänzt werden kann, die dem industriellen Standard entsprechen. In diesem Zusammenhang veranschaulicht Abbildung 40 ein entsprechendes Schema.

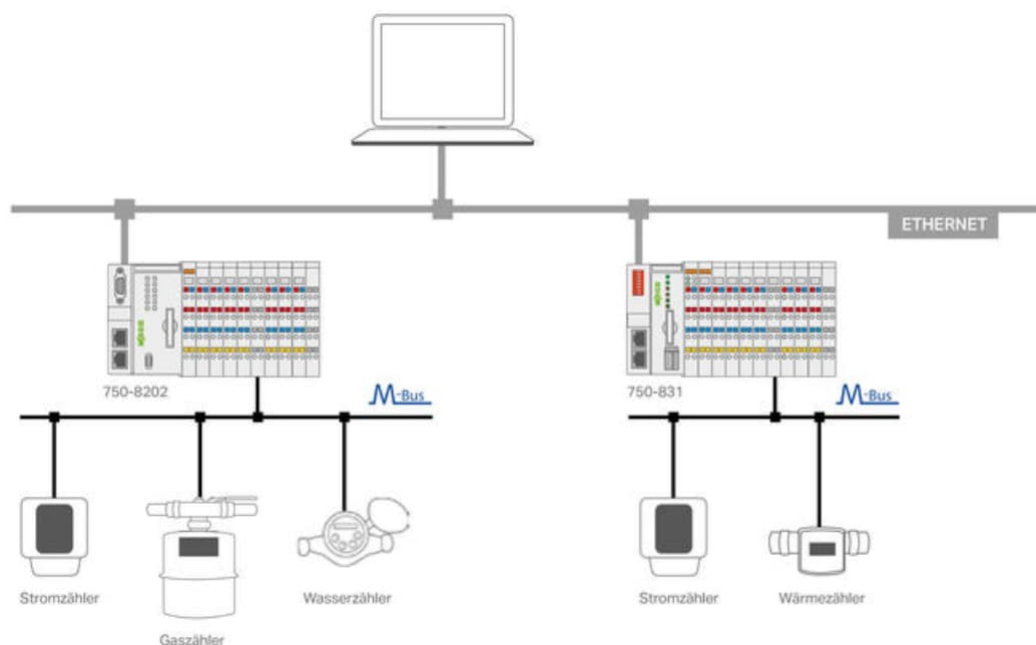


Abbildung 40: Auslesen von Energieverbrauchsdaten (Wago, 2023)

Für weitergehende Überlegungen kann angedacht werden, die M-Bus Systemtechnologie in das Energie-Monitoring-System zu implementieren. Diese Messtechnologie ermöglicht die Erhebung von Energieverbraucherdaten auf industriellen Standard. Dabei erfolgt gemäß Wago (2023) die Kommunikation der unterschiedlichen Zähler (Stromzähler, Gaszähler, Wasserzähler usw.), den sogenannten M-Bus-Slaves, über einen M-Bus-Master (Salve-Master Prinzip).

8 VERZEICHNISSE

8.1 Abkürzungsverzeichnis

AVG	Average
BSV	Betriebsstromverbrauch
BeLEV	Beleuchtungsenergieverbrauch
BSV	Betriebsstromverbrauch
DMS	Datenbankmanagementsystem
EDD	Energy Efficiency Directive
EH	Einheit
EM	Energie-Monitoring
EMS	Energie-Monitoring-System
HEV	Heizenergieverbrauch
HW	Hardware
HWV	Heizwärmeverbrauch
IKT	Informations- und Kommunikationstechnik
KB	Kühlbedarf
KEV	Kälteenergieverbrauch
KPI	Key-Performance-Indikator
MA	Mitarbeiter
MAX	Maximum
MIN	Minimum
MQTT	Message Queuing Telemetry Transport
MS	Monitoring-System
NWG	Nicht-Wohngebäude
RDBMS	Relational Database Management System
RLTEV	Lüftungsenergieverbrauch
SW	Software
SQL	Structured Query Language
OSS	Open-Source-Software
PB	Preisbasis
SW	Software
THG	Treibhausgas
THG-Emissionen	Treibhausgas-Emissionen
TSDB	Time Series Database
WG	Wohngebäude
WWEV	Warmwasserenergieverbrauch
WWVW	Warmwasserwärmeverbrauch

8.2 Begriffsbestimmung

Beleuchtungsenergieverbrauch: Im Gegensatz zum Beleuchtungsenergiebedarf - gemäß Österreichisches Institut für Bautechnik (2019) handelt es sich dabei um eine rechnerische Größe - berücksichtigt der Beleuchtungsenergieverbrauch den tatsächlichen Verbrauch, der auf die Beleuchtung zurückzuführen ist (Bayer et al., 2014).

Betriebsstromverbrauch: Im Gegensatz zum Betriebsstrombedarf - gemäß Österreichisches Institut für Bautechnik (2019) wird hier ein Default-Wert verwendet - berücksichtigt der Betriebsstromverbrauch alle elektrischen Verbräuche sowie jene Verbräuche der IKT (Bayer et al., 2014).

Dekarbonisierung: Die Reduktion von CO₂-Emissionen, die auf fossile Energieträger rückzuführen sind, wird als Dekarbonisierung bezeichnet (Ernst & Young Global Limited, 2023).

Heizenergiebedarf: Ergänzend zum Heiz- und Warmwasserwärmebedarf berücksichtigt diese Größe auch gebäudetechnische Systemverluste (Österreichisches Institut für Bautechnik, 2019).

Heizenergieverbrauch: Dieser Wert berücksichtigt neben dem tatsächlichen Wärmeverbrauch für die Beheizung des Gebäudes auch die Verteilungsverluste (Verluste in Leitungen sowie Wirkungsgradverluste bei Heizkesseln) (Bayer et al., 2014).

Heizwärmebedarf: Dabei handelt es sich um eine rechnerisch ermittelte Wärmemenge, die erforderlich ist Rauminnentemperatur über einen Betrachtungszeitraum von einem Jahr aufrecht zu erhalten (Riccabona & Bednar, 2010).

Heizwärmeverbrauch: Im Gegensatz zum Heizwärmebedarf, der eine rechnerische Größe darstellt, resultiert der Heizwärmeverbrauch aus jener Wärmemenge, die tatsächlich zum Heizen benötigt wird (Bayer et al., 2014).

Kälteenergieverbrauch: Dabei handelt es sich um jenen Energieverbrauch der erforderlich ist, um die das Gebäude zu konditionieren und den Kühlbedarf zu decken (Bayer et al., 2014)

Kühlbedarf: Dabei handelt es sich um jene Wärmemenge die einem Gebäude entzogen werden muss, um eine Solltemperatur zu erreichen (Österreichisches Institut für Bautechnik, 2019).

Kühlenergiebedarf: Dabei handelt es sich um jene Wärmemenge inkl. Systemverluste die einem Gebäude entzogen werden muss, um eine Solltemperatur zu erreichen (Österreichisches Institut für Bautechnik, 2019).

Lachgas: Das Lachgas entsteht in der Industrie bei chemischen Prozessen (z.B.: Düngemittelherstellung und Kunststoffproduktion). Genauso wie das Methan, hat auch N₂O eine geringere Lebensdauer in der Atmosphäre als Kohlenstoff. Die Verweilzeit beträgt in etwa 121 Jahre. Trotz des geringeren Aufenthalts in der Atmosphäre beträgt die Wirksamkeit das 298-fache (Zeithorizont

von 100 Jahre) von Kohlendioxid und macht somit einen überproportionalen Anteil des anthropogenen Treibhauseffekts aus. Die globale Lachgaskonzentration lag im Jahr 2021 über 334,3 ppb (Umweltbundesamt Deutschland, 2022b, 2022a).

Lüftungsenergieverbrauch: Diese Kenngröße bildet den tatsächlichen elektrischen Stromverbrauch ab, der für den Betrieb der Lüftungsanlage erforderlich ist (Bayer et al., 2014).

Methan: Das Methan entsteht vorwiegend in der Landwirtschaft und hat eine durchschnittliche Verweildauer in der Atmosphäre von 12,4 Jahre. Im Vergleich zu Kohlendioxid ist dies eine kurze Lebensdauer. Das CO₂ weist nach 1000 Jahren noch immer 15 bis 40 Prozent auf und kann erst nach mehreren hunderttausend Jahren vollständig abgebaut werden. Dennoch leistet Methan einen Beitrag zum anthropogenen Klimawandel, da es bis zu 25-mal (Zeithorizont 100 Jahre) wirksamer als Kohlendioxid ist. Die globale Methankonzentration stieg im Jahr 2021 auf 1895,6 ppb an (Umweltbundesamt Deutschland, 2022b, 2022a).

Treibhauseffekt: Die Erdoberfläche wird mittels Absorption von kurzwelligem Sonnenstrahlung erwärmt und emittiert anschließend sogenannte infrarote Strahlung. Dabei gelangt jedoch nur ein Teil der Energie in das Weltall. Der Großteil der Strahlung wird von den Treibhausgasen wieder zurück an die Erdoberfläche gesendet, woraus ein Temperaturanstieg an der Erdoberfläche resultiert. Dieser beschriebene Vorgang lässt sich in einen natürlichen sowie in einen anthropogenen Prozess kategorisieren und ist als Treibhauseffekt bekannt (Umweltbundesamt Deutschland, 2022c).

Treibhausgase: Treibhausgase (THG) sind „sowohl die natürlichen als auch die anthropogenen gasförmigen Bestandteile in der Atmosphäre, welche die infrarote Strahlung aufnehmen und wieder abgeben“ (United Nations, 1992, S. 4).

Warmwasserenergieverbrauch: Dieser Wert berücksichtigt neben dem tatsächlichen Wärmeverbrauch für die Bereitstellung von Warmwasser auch die Leitungs- und Kesselverluste (Bayer et al., 2014).

8.3 Literaturverzeichnis

- Abdellah, D., Azedine, B., Lamia, K., & Ahmed, L. (2020). IoT and Big Data Analytics for Smart Buildings: A Survey. *Procedia Computer Science*, 170, 161–168.
- Agyeman, M. O., Al-Waisi, Z., & Hoxha, I. (2019). Design and Implementation of an IoT-Based Energy Monitoring System for Managing Smart Homes. In *2019 Fourth International Conference on Fog and Mobile Edge Computing (FMEC)* (S. 253–258).
- Amazon. (2023). *MH-Z19 Infrarot CO2 Sensor Modul MH-Z19B*. https://www.amazon.de/gp/product/B087R479HH/ref=ppx_yo_dt_b_asin_image_o06_s00?ie=UTF8&psc=1
- Arduino. (2022a). *Arduino Uno Rev3*. Arduino Official Store. <https://store.arduino.cc/products/arduino-uno-rev3>
- Arduino. (2022b). *What is Arduino?* <https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>
- Austrian Standards. (2022). *Building Information Modeling (BIM)*. Austrian Standards. <https://www.austrian-standards.at/de/themengebiete/bau-immobilien/building-information-modeling/alles-zu-bim>
- AZ-Delivery. (2018a). *D1 Mini NodeMcu mit ESP8266-12F WLAN Modul kompatibel mit Arduino*. <https://www.az-delivery.de/products/d1-mini>
- AZ-Delivery. (2018b). *DHT22 AM2302 Temperatursensor und Luftfeuchtigkeitssensor*. <https://www.az-delivery.de/products/dht22>
- Bayer, G., Sturm, T., & Steininger, M. (2014). *Energieflüsse in Bürogebäuden—(NEWID - IST)*. ÖGUT.
- BMK. (2023). *EU-Taxonomie-Verordnung*. <https://www.bmk.gv.at/green-finance/finanzen/eu-strategie/eu-taxonomie-vo.html>
- Bocheng, Z. (2012). Design of Building Energy Monitoring and Management System. In *2012 Second International Conference on Business Computing and Global Informatization* (S. 645–648).
- Buxmann, P., Hess, T., & Lehmann, S. (2008). Software as a Service. *Wirtschaftsinformatik*, 50(6), 500–503. <https://doi.org/10.1007/s11576-008-0095-0>
- Card, S. K., Mackinlay, J. D., & Shneiderman, B. (1999). *Information Visualization: Using Vision to Think*. Morgan Kaufmann Publishers.
- Chakraborty, M., & Kundan, A. P. (2021a). Architecture of a Modern Monitoring System. In *Monitoring Cloud-Native Applications: Lead Agile Operations Confidently Using Open Source Software* (S. 55–96). Apress. https://doi.org/10.1007/978-1-4842-6888-9_3

- Chakraborty, M., & Kundan, A. P. (2021b). Grafana. In *Monitoring Cloud-Native Applications: Lead Agile Operations Confidently Using Open Source Software* (S. 187–240). Apress.
https://doi.org/10.1007/978-1-4842-6888-9_6
- Chakraborty, M., & Kundan, A. P. (2021c). Introduction to Modern Monitoring. In *Monitoring Cloud-Native Applications: Lead Agile Operations Confidently Using Open Source Software* (S. 3–24). Apress. https://doi.org/10.1007/978-1-4842-6888-9_1
- Chakraborty, M., & Kundan, A. P. (2021d). Observability. In *Monitoring Cloud-Native Applications* (S. 25–54). Apress. https://doi.org/10.1007/978-1-4842-6888-9_2
- Chooruang, K., & Meekul, K. (2018). Design of an IoT Energy Monitoring System. *2018 16th International Conference on ICT and Knowledge Engineering*, 1–4.
- Cloud Native Computing Foundation. (2022). *CNCF Landscape Guide—Monitoring*. <https://landscape.cncf.io/>
- Delmastro, C. (2022). *IEA - Buildings: Tracking Report*. <https://www.iea.org/reports/buildings>
- Delmastro, C., & Abergel, T. (2020). *IEA - Is cooling the future of heating?* <https://www.iea.org/commentaries/is-cooling-the-future-of-heating>
- Delmastro, C., & Martinez-Gordon, R. (2022). *IEA - Space Cooling: Tracking Report*. IEA.
<https://www.iea.org/reports/space-cooling>
- Deloitte Österreich. (2023). *Vorschlag zur CSRD*. <https://www2.deloitte.com/at/de/seiten/wirtschaftspruefung/artikel/corporate-sustainability-reporting-directive.html>
- DIN EN 15221-6. (2011). *Facility Management—Teil 6: Flächenbemessung im Facility Management; Deutsche Fassung EN 15221-6:2011*. DIN Deutsches Institut für Normung e.V.
- DIN EN 15221-7. (2013). *Facility Management—Teil 7: Leitlinien für das Leistungs-Benchmarking; Deutsche Fassung EN 15221-7:2012*. DIN Deutsches Institut für Normung e.V.
- Dinh, T.-V., Choi, I.-Y., Son, Y.-S., & Kim, J.-C. (2016). A review on non-dispersive infrared gas sensors: Improvement of sensor detection limit and interference correction. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 231, 529–538. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2016.03.040>
- Dodd, P. S., & Ravishanker, C. V. (1992). Monitoring and Debugging Distributed Real-time Programs. *Software-Practice and Experience*, 22(10), 863–877.
- Elastic. (2022a). *Elastic—What is Elasticsearch?* <https://www.elastic.co/guide/en/elasticsearch/reference/8.4/elasticsearch-intro.html>
- Elastic. (2022b). *Kibana—Your window into Elastic*. <https://www.elastic.co/guide/en/kibana/current/introduction.html>

- eMariate. (2022). *A homemade CO2 meter with Wifi against the coronavirus: The CO2 Easy*.
<https://emariate.com/en/diy-co2-monitor-wifi/>
- Engelmann, D. (2019). Energiedatenmanagement. In J. Bränzel, D. Engelmann, M. Geilhausen, & O. Schulze (Hrsg.), *Energiemanagement: Praxisbuch für Fachkräfte, Berater und Manager* (S. 303–339). Springer Fachmedien Wiesbaden. https://doi.org/10.1007/978-3-658-26919-7_6
- Ernst & Young Global Limited. (2023). *Was bedeutet Dekarbonisierung?*
https://www.ey.com/de_at/decarbonization
- Europäische Kommission. (2021). *Commission proposes new Energy Efficiency Directive*.
https://ec.europa.eu/info/news/commission-proposes-new-energy-efficiency-directive-2021-jul-14_en
- Frustaci, M., Pace, P., Aloï, G., & Fortino, G. (2018). Evaluating Critical Security Issues of the IoT World: Present and Future Challenges. *IEEE Internet of Things Journal*, 5(4), 2483–2495.
- Giacobbe, M., Chaouch, C., Scarpa, M., & Puliafito, A. (2018). An Implementation of InfluxDB for Monitoring and Analytics in Distributed IoT Environments. *Smart Innovation, Systems and Technologies*. Proceedings of the 8th International Conference on Sciences of Electronics, Technologies of Information and Telecommunications (SETIT'18), Italy, Tunisia.
- Global ABC, IEA, & UNEP. (2020). *GlobalABC Roadmap for Buildings and Construction 2020-2050: Towards a zero-emission, efficient, and resilient buildings and construction sector*. IEA.
<https://www.iea.org/reports/globalabc-roadmap-for-buildings-and-construction-2020-2050>
- Gosund. (2023). *Smart Stecker SP1*. <https://de.gosund.com/products/gosund™-smart-wlan-stecker-dose-16a-sp1>
- Grzesik, P., & Mrozek, D. (2020). *Comparative Analysis of Time Series Databases in the Context of Edge Computing for Low Power Sensor Networks*. 371–383.
- Halfacree, G. (2019). *The Official Raspberry Pi Beginner's Guide: How to use your new Computer* (3. Aufl.). Raspberry Pi Trading Ltd.
- Hayes, A. (2022). *Blockchain Facts: What Is It, How It Works, and How It Can Be Used*. Investopedia.
<https://www.investopedia.com/terms/b/blockchain.asp>
- Herrmann, F. (2018). *Datenorganisation und Datenbanken: Praxisorientierte Übungen mit MS Access 2016*. Springer Vieweg.
- HiveMQ. (2020). *MQTT & MQTT 5 Essentials: A comprehensive overview of MQTT facts and features for beginners and experts alike*. HiveMQ GmbH.

- Hoffner, Y. (1994a). *Management in Object-Based Federated Distributed Systems*. Architecture Projects Management Limited.
- Hoffner, Y. (1994b). *Monitoring in Distributed Systems*. Architecture Projects Management Limited.
- Hürst, W., & Geraerts, R. (2019). Augmented and Virtual Reality Interfaces for Crowd Simulation Software—A Position Statement for Research on Use-Case-Dependent Interaction. *2019 IEEE Virtual Humans and Crowds for Immersive Environments (VHCIE)*, 1–3.
<https://doi.org/10.1109/VHCIE.2019.8714733>
- IEA. (2021a). *Energy Efficiency 2021*. IEA.
- IEA. (2021b). *IEA - Renewable heat*. IEA. <https://www.iea.org/reports/renewables-2021/renewable-heat>
- IEA. (2022). *IEA - Tracking Clean Energy Progress*. <https://www.iea.org/topics/tracking-clean-energy-progress>
- influxdata. (2022a). *Compare InfluxDB to SQL databases | InfluxDB OSS 1.8 Documentation*.
<https://docs.influxdata.com/influxdb/v1.8/concepts/crosswalk/>
- influxdata. (2022b). *InfluxDB glossary | InfluxDB OSS 1.8 Documentation*. <https://docs.influxdata.com/influxdb/v1.8/concepts/glossary/#point>
- influxdata. (2022c). *InfluxDB OSS 1.8 Documentation*. <https://docs.influxdata.com/influxdb/v1.8/>
- influxdata. (2022d). *Open Source Time Series Platform—The TICK Stack*. <https://www.influxdata.com/time-series-platform/>
- influxdata. (2022e). *Telegraf open Source Server Agent | InfluxDB*. <https://www.influxdata.com/time-series-platform/telegraf/>
- inray Industriesoftware GmbH. (2022). *Was ist MQTT? Erklärung mit industriellem Fokus*.
<https://www.opc-router.de/was-ist-mqtt/>
- ISO 7730:2005. (2005). *Ergonomics of the thermal environment. Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria*. ISO copyright office.
- ISO 8373. (2021). *Robotics—Vocabulary*. ISO copyright office.
- ISO 50001. (2018). *Energy management systems—Requirements with guidance for use*. ISO copyright office.
- ISO 50006. (2014). *Energy management systems—Measuring energy performance using energy baselines (EnB) and energy performance indicators (EnPI)—General principles and guidance*. ISO copyright office.

- Jandrokovic, M., Mandl, D., & Kapusta, F. (2012). *Energiekennzahlen in Dienstleistungsgebäuden*. Energieinstitut der Wirtschaft GmbH.
- Jing, Q., Vasilakos, A. V., Wan, J., Lu, J., & Qiu, D. (2014). Security of the Internet of Things: Perspectives and challenges. *Wireless Networks*, 20(8), 2481–2501. <https://doi.org/10.1007/s11276-014-0761-7>
- Kempf, D. (2012). *Big Data im Praxiseinsatz—Szenarien, Beispiele, Effekte*. BITKOM.
- Kenton, W. (2022). *Apple App Store*. Investopedia. <https://www.investopedia.com/terms/a/apple-app-store.asp>
- Koppmann, R., & Wiesen, P. (2015). CO2 und Klimawandel. In M. Fishedick, K. Görner, & M. Thomeczek (Hrsg.), *CO2: Abtrennung, Speicherung, Nutzung: Ganzheitliche Bewertung im Bereich Energiewirtschaft und Industrie* (S. 13–36). Springer Vieweg.
- Kosara, R. (2007). Visualization Criticism—The Missing Link Between Information Visualization and Art. *11th International Conference Information Visualization (IV'07)*, 631–636.
- Lane, K. (2022a). *IEA - Appliances and Equipment: Tracking Report*. IEA. <https://www.iea.org/reports/appliances-and-equipment>
- Lane, K. (2022b). *IEA - Lighting: Tracking Report*. IEA. <https://www.iea.org/reports/lighting>
- Leusden, F., & Freymark, H. (1951). *Darstellungen der Raumbeglichkeit für den einfachen praktischen Gebrauch*. *Gesundheitsingenieur 72 Heft 16*, 271–273.
- Lin, J., Yu, W., Zhang, N., Yang, X., Zhang, H., & Zhao, W. (2017). A Survey on Internet of Things: Architecture, Enabling Technologies, Security and Privacy, and Applications. *IEEE Internet of Things Journal*, 4(5), 1125–1142.
- Lukac, D., Milic, M., & Nikolic, J. (2018). From Artificial Intelligence to Augmented Age An Overview. In *2018 Zooming Innovation in Consumer Technologies Conference (ZINC)* (S. 100–103).
- Manoj Kumar, N., & Kumar Mallick, P. (2018). The Internet of Things: Insights into the building blocks, component interactions, and architecture layers. *Procedia Computer Science*, 132, 109–117.
- MariaDB Foundation. (2022). *MariaDB - MariaDB Server*. <https://mariadb.org/de/>
- Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S. L., Péan, C., Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis, M. I., Matthews, J. B. R., Berger, S., Huang, M., Yelekçi, O., Yu, R., Zhou, B., Lonnoy, E., Maycock, T. K., Waterfield, T., Leitzell, K., & Caud, N. (2021). Summary for Policymakers. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis: Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC.
- Meier, A. (2010). *Relationale und postrelationale Datenbanken* (7. Aufl.). Springer.

- Meier, A. (2018). *Werkzeuge der digitalen Wirtschaft: Big Data, NoSQL & Co.: Eine Einführung in relationale und nicht-relationale Datenbanken*. Springer Vieweg.
- Meuser, M., & Nagel, U. (2009). Das Experteninterview—Konzeptionelle Grundlagen und methodische Anlage. In S. Pickel, G. Pickel, H.-J. Lauth, & D. Jahn (Hrsg.), *Methoden der vergleichenden Politik- und Sozialwissenschaft: Neue Entwicklungen und Anwendungen* (S. 465–479). VS Verlag für Sozialwissenschaften. https://doi.org/10.1007/978-3-531-91826-6_23
- Microsoft. (2022a). *Power BI - Echtzeitstreaming in Power BI*. <https://learn.microsoft.com/de-de/power-bi/connect-data/service-real-time-streaming>
- Microsoft. (2022b). *Power BI - Was ist der Power BI-Dienst?* <https://learn.microsoft.com/de-de/power-bi/fundamentals/power-bi-service-overview>
- Microsoft. (2022c). *Power BI - Was ist Power BI?* <https://learn.microsoft.com/de-at/power-bi/fundamentals/power-bi-overview>
- Microsoft. (2022d). *Power BI - Was ist Power BI Desktop?* <https://learn.microsoft.com/de-de/power-bi/fundamentals/desktop-what-is-desktop>
- Misoch, S. (2019). *Qualitative Interviews*. De Gruyter Oldenbourg. <https://doi.org/10.1515/9783110354614>
- MongoDB. (2022). *MongoDB - What Is A Non-Relational Database?* <https://www.mongodb.com/databases/non-relational>
- Moreno, M. V., Ramos, J. L. H., & Skarmeta, A. F. (2014). User role in IoT-based systems. *2014 IEEE World Forum on Internet of Things (WF-IoT)*, 141–146.
- MQTT. (2022). *MQTT - The Standard for IoT Messaging*. <https://mqtt.org/>
- Mudaliar, M. D., & Sivakumar, N. (2020). IoT based real time energy monitoring system using Raspberry Pi. *Internet of Things*, 12.
- Murthy, M. N., & AjaySaiKiran, P. (2018). A Smart Office Automation System Using Raspberry Pi (Model-B). *2018 International Conference on Current Trends towards Converging Technologies (ICCTCT)*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/ICCTCT.2018.8550894>
- Musa, E., Delač, G., Šilić, M., & Vladimir, K. (2019). Comparison od Relational and Time-Series Databases for Real-Time Massive Datasets. *mipro 2019*, 1065–1070.
- Nazemi, K., Kaupp, L., & Below, N. (2021). 5.4 Datenvisualisierung. In M. Putnings, H. Neuroth, & J. Neumann (Hrsg.), *Praxishandbuch Forschungsdatenmanagement* (S. 477–502). De Gruyter Saur.

- Oracle. (2022). *Was ist Machine Learning?* <https://www.oracle.com/at/artificial-intelligence/machine-learning/what-is-machine-learning/>
- Österreichisches Institut für Bautechnik (Hrsg.). (2019). *OIB-Richtlinie 6: Energieeinsparung und Wärmeschutz*. Österreichisches Institut für Bautechnik.
- Pachauri, R. K., & Meyer, L. (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report: Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC.
- Pail, D. (2020). *An Influxdata Case Study: Why Time Series Matters for Metrics, Real-Time Analytics and Sensor Data* (4. Aufl.). InfluxData.
- Peddoju, S. K., & Himanshu, U. (2020). Evaluation of IoT Data Visualization Tools and Techniques. In *Visualization: Trends and Challenges Toward Multidisciplinary Perception* (S. 115–140). Springer Nature Singapore Pte Ltd.
- Petrik, D., Mormul, M., Reimann, P., & Gröger, C. (2021). Anforderungen für Zeitreihendatenbanken im industriellen IoT. In *IoT - Best Practices: Internet der Dinge, Geschäftsmodellinnovationen, IoT-Plattformen, IoT in Fertigung und Logistik* (S. 339–377). Springer Vieweg.
- Pohl, F. (2021). *Alte u. Neue Hofburg: Schweizertrakt—Amts-u. Wohngebäude Erdgeschoss* [Map]. Burghauptmannschaft Österreich.
- Raspberry Pi. (2023). *Buy a Raspberry Pi 4 Model B*. <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-4-model-b/>
- Redlein, A., & Höhenberger, C. (2020). Digitalisation. In *Modern Facility and Workplace Management: Processes, Implementation and Digitalisation* (S. 139–176). Springer Nature Switzerland AG 2020.
- Redlein, A., & Thrainer, L. (2022). *Environmental and Social monitoring in existing building structures – results of a case study within several historical buildings*. 1–6.
- Riccabona, C., & Bednar, T. (2010). *Baukonstruktionslehre 4: Bauphysik* (8. Aufl.). MANZ Verlag Schulbuch GmbH.
- Rinaldi, S., Bonafini, F., Ferrari, P., Flammini, A., Sisinni, E., & Bianchini, D. (2019). Impact of Data Model on Performance of Time Series Database for Internet of Things Applications. 2019 *IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*, 1–6.
- Saket, B., Endert, A., & Demiralp, C. (2019). Task-Based Effectiveness of Basic Visualization. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 25(7), 2505–2512.

- Selvi K., K., Prasannah S.R., Surya., Youdhika, A., Ramprabhu, R., & Benny T., R. (2020). An Overview of Smart Classroom using the Augmented Reality Technology. *2020 6th International Conference on Advanced Computing and Communication Systems (ICACCS)*, 566–570. <https://doi.org/10.1109/ICACCS48705.2020.9074485>
- Shelly. (2023). *Shelly H&T - white*. <https://www.shelly.cloud/de/products/product-overview/ht-w>
- Shinde, V. R., Tasgaonkar, P. P., & Garg, R. D. (2018). Environment Monitoring System through Internet of Things(IOT). *2018 International Conference on Information , Communication, Engineering and Technology (ICICET)*, 1–4.
- Snodgrass, R. (1982). *Monitoring Distributed Systems: A Relational Approach*. Department of Computer Science Carnegie-Mellon University.
- Söderby, K. (2022). *Getting Started with Arduino | Arduino Documentation*. <https://docs.arduino.cc/learn/starting-guide/getting-started-arduino>
- Studer, T. (2019). *Relationale Datenbanken: Von den theoretischen Grundlagen zu Anwendungen mit PostgreSQL (2. Aufl.)*. Springer Vieweg.
- Tappler, P. (2017). Teil 7: Kohlenstoffdioxid als Lüftungsparameter. *Richtlinie zur Bewertung der Innenraumluft*.
- Umweltbundesamt Deutschland. (2022a). *UBA: Atmosphärische Treibhausgas-Konzentrationen*. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/atmosphaerische-treibhausgas-konzentrationen>
- Umweltbundesamt Deutschland. (2022b). *UBA: Die Treibhausgase*. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimaschutz-energiepolitik-in-deutschland/treibhausgas-emissionen/die-treibhausgase>
- Umweltbundesamt Deutschland. (2022c). *UBA Glossar: Treibhauseffekt*. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/service/glossary/t>
- Umweltbundesamt Deutschland. (2022d). *UBA: Kohlendioxid-Emissionen im Bedarfsfeld „Wohnen“*. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/private-haushalte-konsum/wohnen/kohlendioxid-emissionen-im-bedarfsfeld-wohnen>
- United Nations. (1992). *Rahmenübereinkommen der Vereinten Nationen über Klimaänderungen*.
- United Nations. (2022). *World Population Prospects 2022*. <https://population.un.org/wpp/Download/Standard/Population/>
- United Nations. (2023). *THE 17 GOALS | Sustainable Development*. <https://sdgs.un.org/goals>

- United Nations Environment Programme. (2021). *2021 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector*.
- United Nations Environment Programme. (2022). *2022 Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector*.
- Vennam, S. (2020). *What is Cloud Computing?* <https://www.ibm.com/cloud/learn/cloud-computing>
- Wago. (2023). *Anschluss für Verbrauchszähler aller Hersteller: M-Bus: Verwendung von M-Bus*.
<https://www.wago.com/at/m-bus>

8.4 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Forschungsmethode.....	3
Abbildung 2: Anteil des Immobiliensektors am globalen Energiekonsum mit Stand 2020.....	6
Abbildung 3: Anteil des Immobiliensektors am globalen Emissionsausstoß mit Stand 2020	7
Abbildung 4: Mittlerer Nutzenergiebedarf von Büroimmobilien.....	9
Abbildung 5: Behaglichkeit für das Verhältnis rel. Luftfeuchtigkeit und Raumlufttemperatur.....	11
Abbildung 6: Monitoring im Managementprozess.....	13
Abbildung 7: Informationsfluss einer Datenvisualisierung	15
Abbildung 8: Konzept der Basislinien-Periode und Reporting-Periode für einen EnPI.....	19
Abbildung 9: Smart-Building Technologien im Immobiliensektor	22
Abbildung 10: Smart-Building Technologien im Bereich „Energie“.....	24
Abbildung 11: Anbieter für Monitoring und Analytik Applikationen.....	26
Abbildung 12: Schlüsselkomponenten eines Arduino Board	27
Abbildung 13: Raspberry Pi 4 Model B Hardware.....	29
Abbildung 14: Architektur eines Datenbanksystems.....	31
Abbildung 15: Beispiel einer Relation	32
Abbildung 16: Konzept von InfluxDB.....	33
Abbildung 17: Auszug eines Power BI - Dashboard.....	35
Abbildung 18: Flächenlayout Schweizertrakt (Erdgeschoss) – Systemhardware	37
Abbildung 19: System-Architektur des Prototyps.....	39
Abbildung 20: Smart Plug und Software Tasmota	40
Abbildung 21: CO ₂ -Sensor Komponenten und Software Tasmota	40
Abbildung 22: Sensor Shelly H&T und DHT22	41
Abbildung 23: Flussdiagramm Energie Monitoring System.....	42
Abbildung 24: Plugin Überblick des Telegraf	43
Abbildung 25: Measurement-Ausschnitt der TSDB InfluxDB – Smart Plugs.....	43
Abbildung 26: Konvertieren und Einfügen des Payload – Sensor_Hum_Temp	44
Abbildung 27: Tabellenausschnitt der RDMS MariaDB	44
Abbildung 28: Kennzeichensystem	46
Abbildung 29: Skizze – Energieverbrauch mit Aggregatfunktionen.....	47
Abbildung 30: Strukturaufbau des EMS	48
Abbildung 31: EMS – Startseite	49
Abbildung 32: EMS – Geometrical Parameters (Units).....	50
Abbildung 33: EMS – Geometrical Parameters (Parameters).....	51
Abbildung 34: EMS – Building Performance EG – Layout.....	52
Abbildung 35: EMS – Current Records Overview.....	53
Abbildung 36: Echtzeit Energieverbrauch und „Well-Being“-Aufzeichnung	54
Abbildung 37: EMS – Benachrichtigung	55
Abbildung 38: Flussdiagramm Warnsystem.....	55
Abbildung 39: EMS – Monatlicher Stromverbrauch je Ebene	56
Abbildung 40: Auslesen von Energieverbrauchsdaten	62

8.5 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Grenzwerte für CO ₂ -Konzentration in Innenräumen	12
Tabelle 2: Effektive Darstellungsformen von Daten	16
Tabelle 3: Arten und Anwendungen von EnPIs.....	20
Tabelle 4: Unterschied zwischen Raspberry Pi und Arduino.....	29
Tabelle 5: Klassifizierung von Ereignissen	30

9 Anhang

9.1 Programmierung – Codes

Im Zuge der technologischen Umsetzung des Energie Monitoring Systems war es erforderlich Skripten für Sensoren zu programmieren, um die empfangenen Messdaten in die Datenbank zu schreiben und anschließend grafisch darzustellen. Des Weiteren wurden zwei Dashboards programmiert. Die geschriebenen Codes werden im folgenden Abschnitt aufgelistet.

9.1.1 Geometrical Parameters – HTML

Die Programmierung betrifft jene Dashboards die in Abbildung 32 (Geometrische Parameter – Units) und Abbildung 33 (Geometrische Parameter – Parameter) dargestellt sind.

Dashboard – Parameter

```
<!DOCTYPE html>
<html>
  <head>
    <meta charset="utf-8">
    <title> EMS - Parameters </title>
    <link rel="icon" href="img/Logo.jpg" type="image/jpg">
    <link rel="mask-icon" href="img/Logo.jpg">
    <link rel="stylesheet" href="css/EMS2.css" type = "text/css"/>
  </head>
  <body style="background-color:#111217">

  <div class = "header">
    <a style="margin-left:15px;"></a>
    <a style="margin-left:30px;">
      EMS - Geometrical Parameters | Parameters</a>
    <a class="button" style="right:130px;text-decoration:none;"
      href="Parameters.php">Parameters</a>
    <a class="button" style="right:70px;text-decoration:none;"
      href="Units.php">Units</a>
  </div>

  <form class = "geometricalParameters" action="php/insert.php"
    method="POST">
    <label for="Room">Room:</label><br>
    <select class="dropdown" name="Room">
      <option selected>- Select Room -</option>
      <?php
        include "php/connection.php";
        $sql = "SELECT * FROM Units";
        $action = mysqli_query($connection,$sql);
        while($data=mysqli_fetch_array($action))
        {
          echo "<option>".$data['Room'] ."</option>";
        }
      ?>
    </select><br><br>
    <?php mysqli_close($connection);?>

    <label for="Hight">Hight : [ m ]</label><br>
    <input class="geo_inputfield" type="text" id="hight" name="hight"
      value="- insert parameter -" size="30" required><br><br>
```

```

<label for="Floorspace">Floor space : [ m2 ]</label><br>
<input class="geo_inputfield" type="text" id="floorspace"
  name="floorspace" value="- insert parameter -" size="30"
  required><br><br>
<input class="geo_submit" type="submit" name="submit" value="Submit">
</form>

<form class = "geometricalSearch" method="POST">
<label for="Search">Search:</label><br>
<select class="dropdown" name="Search">
  <option selected>- Search Room -</option>
  <?php
  include "php/connection.php";
  $sql = "SELECT * FROM Rooms";
  $action = mysqli_query($connection,$sql);
  while($data=mysqli_fetch_array($action))
  {
    echo "<option>".$data['Room'] . "</option>";
  }
  ?>
</select><br><br>
<input class="geo_submit" type="submit" name="submit" value="Search">
<?php
include "php/connection.php";
if (isset($_POST['submit']))
{
  $Search= $_POST['Search'];
  $sql = "SELECT * FROM Rooms WHERE Room='$Search' ORDER BY id DESC
  LIMIT 1";
  $action = mysqli_query($connection,$sql);
  while($data = mysqli_fetch_array($action))
  {
    echo "<br><br>" . "Room: " . $data["Room"]. "<br><br>" .
      "Floorspace: " . $data["floorspace"]. " m2<br><br>" .
      "Hight: " . $data["hight"]. " m<br>";
  }
}
?>
<?php mysqli_close($connection);?>
</form>

<div class="footer">
  <p style="margin-left:70px">Technische Universität Wien | Immobilien
  und Facility Management E330-02-2</p>
  <p style="margin-left:70px">Last change: 25.10.2021</p>
</div>

</body>
</html>

```

Dashboard – Units

```

<!DOCTYPE html>
<html>
  <head>
    <meta charset="utf-8">
    <title> EMS - Parameters </title>
    <link rel="icon" href="img/Logo.jpg" type="image/jpg">
    <link rel="mask-icon" href="img/Logo.jpg">
    <link rel="stylesheet" href="css/EMS2.css" type = "text/css"/>
  </head>
  <body style="background-color:#111217">

```



```

<div class = "header">
  <a style="margin-left:15px;"></a>
  <a style="margin-left:30px;">
    EMS - Geometrical Parameters | Units</a>
  <a class="button" style="right:130px;text-decoration:none;"
    href="Parameters.php">Parameters</a>
  <a class="button" style="right:70px;text-decoration:none;"
    href="Units.php">Units</a>
</div>

<form class = "geometricalUnits" action="php/insert-units.php"
  method="POST">
  <label for="Ground_Number">Ground Number :</label><br>
  <input class="geo_inputfield" type="text" id="Ground_Number"
    name="Ground_Number" value="690005" size="30" required><br><br>
  <label for="Building_Number">Building Number :</label><br>
  <input class="geo_inputfield" type="text" id="Building_Number"
    name="Building_Number" value="010" size="30" required><br><br>
  <label for="Sector">Sector :</label><br>
  <input class="geo_inputfield" type="text" id="Sector" name="Sector"
    value="ST" size="30" required><br><br>
  <label for="Floor">Floor :</label><br>
  <input class="geo_inputfield" type="text" id="Floor" name="Floor"
    value="- insert Floor -" size="30" required><br><br>
  <label for="Room">Room :</label><br>
  <input class="geo_inputfield" type="text" id="Room" name="Room"
    value="- insert Room -" size="30" required><br><br>
  <input class="geo_submit" type="submit" name="submit" value="Submit">
</form>

<div class="footer">
  <p style="margin-left:70px">Technische Universität Wien | Immobilien
    und Facility Management E330-02-2</p>
  <p style="margin-left:70px">Last change: 25.10.2021</p>
</div>

</body>

</html>

```

9.1.2 Geometrical Parameters – PHP

Die Programmierung betrifft jene Dashboards die in Abbildung 32 (Geometrische Parameter – Units) und Abbildung 33 (Geometrische Parameter – Parameter) dargestellt sind.

Connection

```

<?php
$servername = "127.0.0.1";
$username = "Jan";
$password = "*****";
$database = "EMS";
$conn = mysqli_connect ($servername,$username,$password,$database)
or die ("Unable to build a connection with the database!");
?>

```

Insert Parameters

```
<?php
include "connection.php";

if (isset($_POST['submit']))
{
    $hight= $_POST['hight'];
    $floorspace= $_POST['floorspace'];
    $Room= $_POST['Room'];
    $action= mysqli_query($connection,"INSERT INTO Rooms (Room, hight,
    floorspace) VALUES ('$Room', '$hight', '$floorspace')");

    if (!$action)
    {
        echo "It seems that something went wrong!" .mysqli_error();
    }
    else
    {
        header("Location:http://192.168.1.150/EMS-Parameters.php");
        exit;
    }
}
mysqli_close($connection);

?>
```

Insert Units

```
<?php
include "connection.php";

if (isset($_POST['submit']))
{
    $Ground_Number= $_POST['Ground_Number'];
    $Building_Number= $_POST['Building_Number'];
    $Sector= $_POST['Sector'];
    $Floor= $_POST['Floor'];
    $Room= $_POST['Room'];
    $action= mysqli_query($connection,"INSERT INTO Units
    (Ground_Number, Building_Number, Sector, Floor, Room) VALUES
    ('$Ground_Number', '$Building_Number', '$Sector', '$Floor',
    '$Room')");

    if (!$action)
    {
        echo "It seems that something went wrong!" .mysqli_error();
    }
    else
    {
        header("Location:http://192.168.1.150/EMS-Units.php");
        exit;
    }
}
mysqli_close($connection);

?>
```

9.1.3 Datensammlung der Sensoren

Die Programmierung zur Datensammlung und zum Datentransport für die im Prototyp verwendeten Sensoren, werden im folgenden Abschnitt beschrieben.

Skript 1 für Shelly H&T

```
#!/usr/bin/env python3

import paho.mqtt.client as mqtt
import time
import random
import json
import datetime

#Connection with MQTT-Broker
MQTT_HOST = "127.0.0.1"
MQTT_PORT = 1883
#MQTT_PW = " "
#MQTT_USER = " "
MQTT_TOPIC_SUB ="shellies/#" #topic sub
MQTT_TOPIC_PUB ="htshelly" #topic pub

#Callback function (when the broker responds to the connection request)
def on_connect(client, userdata, flags, rc):
    if rc==0:
        print("Connection successful! Return code: "+ str(rc))
    else:
        print("Something went wrong! Return code: "+ str(rc))

y=0
def on_publish(client, userdata, mid):
    global y
    y=y+1
    print("Data "+str(y)+" published successfully!")
    if y==4:
        y=0

i=0
def on_message(client, userdata, message):
    decoded_message=str(message.payload.decode("utf-8"))
    msg = json.loads(decoded_message)
    #print("Payload: "+decoded_message)
    #print("Topic: "+message.topic)
    global i
    i=i+1
    if i>4:
        i=1

    #New payload
    Timestamp = datetime.datetime.now().strftime('%Y-%m-%dT%H:%M:%S')
    payload_new = {"data"+str(i): msg, "timestamp": Timestamp}
    client.publish(MQTT_TOPIC_PUB, json.dumps(payload_new))

print("Connecting to broker: "+str(MQTT_HOST))
print("Subscribing to TOPIC: "+str(MQTT_TOPIC_SUB))

#MQTT Connection
try:
    numb = random.randrange(1,10000)
```

```

client = mqtt.Client("MyClient-"+str(numb))
client.on_connect = on_connect
client.on_message = on_message
client.on_publish = on_publish
client.connect(MQTT_HOST, MQTT_PORT, 60)
client.subscribe(MQTT_TOPIC_SUB)
client.loop_forever()
except KeyboardInterrupt:
print("\nProgram stopped!")
client.loop_stop()
client.disconnect()

```

Skript 2 für Shelly H&T

```

#!/usr/bin/env python3

import mysql.connector as mariadb
import paho.mqtt.client as mqtt
import time
import random
import json
import datetime

#Connection with database
db_maria = mariadb.connect(
    host="127.0.0.1",
    user="Jan",
    password="*****",
    database="EMS"
)

#Connection with MQTT-Broker
MQTT_HOST = "127.0.0.1"
MQTT_PORT = 1883
#MQTT_PW = " "
#MQTT_USER = " "
MQTT_TOPIC_SUB ="htshelly" #topic sub

#Callback function (when the broker responds to the connection request)
def on_connect(client, userdata, flags, rc):
    if rc==0:
        print("Connection successful! Return code: "+ str(rc))
    else:
        print("Something went wrong! Return code: "+ str(rc))

def on_message(client, userdata, message):
    decoded_message=str(message.payload.decode("utf-8"))
    msg = json.loads(decoded_message)

    temp = msg.get("data1",0.0)
    hum = msg.get("data2",0.0)

    #Insert values into db
    curs = db_maria.cursor()
    sql = "INSERT INTO Sensor_Temp_Hum (temp,humidity)VALUES (%s, %s)"
    data = (temp,hum)
    curs.execute(sql,data)
    db_maria.commit()
    print("Value was inserted!")

```

```
#MQTT Connection
try:
    numb = random.randrange(1,10000)
    client = mqtt.Client("MyClient-"+str(numb))
    client.on_connect = on_connect
    client.on_message = on_message
    client.connect(MQTT_HOST, MQTT_PORT, 60)
    client.subscribe(MQTT_TOPIC_SUB)
    client.loop_forever()
except KeyboardInterrupt:
    print("\nProgram stoppped!")
    client.loop_stop()
    client.disconnect()
```

Skript für CO2

```
#!/usr/bin/env python3

import mysql.connector as mariadb
import paho.mqtt.client as mqtt
import time
import random
import json
import datetime

#Connection with database
db_maria = mariadb.connect(
    host="127.0.0.1",
    user="Jan",
    password="*****",
    database="EMS"
)

#Connection with MQTT-Broker
MQTT_HOST = "127.0.0.1"
MQTT_PORT = 1883
#MQTT_PW = " "
#MQTT_USER = " "
MQTT_TOPIC_SUB ="tele/CO2TEMP/SENSOR" #topic sub

#Callback function (when the broker responds to the connection request)
def on_connect(client, userdata, flags, rc):
    if rc==0:
        print("Connection successful! Return code: "+ str(rc))
    else:
        print("Something went wrong! Return code: "+ str(rc))

def on_message(client, userdata, message):
    decoded_message=str(message.payload.decode("utf-8"))
    msg = json.loads(decoded_message)

    temp = msg.get("MHZ19B").get("Temperature",0.0)
    carbon = msg.get("MHZ19B").get("CarbonDioxide",0.0)

    #Insert values into db
    curs = db_maria.cursor()
    sql = "INSERT INTO Sensor_Carbon (carbon,temp) VALUES (%s, %s)"
    data = (carbon,temp)
    curs.execute(sql,data)
    db_maria.commit()
    print("Value was inserted!")
```

```
#MQTT Connection
try:
    numb = random.randrange(1,10000)
    client = mqtt.Client("MyClient-"+str(numb))
    client.on_connect = on_connect
    client.on_message = on_message
    client.connect(MQTT_HOST, MQTT_PORT, 60)
    client.subscribe(MQTT_TOPIC_SUB)
    client.loop_forever()
except KeyboardInterrupt:
    print("\nProgram stoppped!")
    client.loop_stop()
    client.disconnect()
```

Skript für Smart-Plugs

```
#!/usr/bin/env python3

import mysql.connector as mariadb
import paho.mqtt.client as mqtt
import time
import random
import json
import datetime
from datetime import timedelta

#Connection with database
db_maria = mariadb.connect(
    host="127.0.0.1",
    user="Jan",
    password="*****",
    database="EMS"
)

#Connection with MQTT-Broker
MQTT_HOST = "127.0.0.1"
MQTT_PORT = 1883
#MQTT_PW = " "
#MQTT_USER = " "
MQTT_TOPIC_SUB_1 ="tele/Plugs/ST/EG/+/SENSOR" #topic sub
MQTT_TOPIC_SUB_2 ="tele/Plugs/ST/MEZZ/+/SENSOR" #topic sub

#Callback function (when the broker responds to the connection request)
def on_connect(client, userdata, flags, rc):
    if rc==0:
        print("Connection successful! Return code: "+ str(rc))
    else:
        print("Something went wrong! Return code: "+ str(rc))

def on_message(client, userdata, message):
    decoded_message=str(message.payload.decode("utf-8"))
    msg = json.loads(decoded_message)

    topic = message.topic
    day = datetime.datetime.now().strftime('%d')
    month = datetime.datetime.now().strftime('%m')
    year = datetime.datetime.now().strftime('%y')
    diff = datetime.datetime.now() + timedelta(days=-1)
    datediff = diff.strftime('%y-%m-%d')
    newtopic = topic + " " + datediff
    date = datetime.datetime.now().strftime('%y-%m-%d')
    voltage = msg.get("ENERGY").get("Voltage",0.0)
```



```

ampere = msg.get("ENERGY").get("Current",0.0)
watt = msg.get("ENERGY").get("Power",0.0)
today = msg.get("ENERGY").get("Today",0.0)
yesterday = msg.get("ENERGY").get("Yesterday",0.0)
if "EG" in topic:
    curs = db_maria.cursor()
    sqlEG = "INSERT INTO Plugs_EG (date,diff,day,month,year,
        topic,newtopic,yesterday,today)
        VALUES (%s, %s, %s, %s, %s, %s, %s, %s, %s)
        ON DUPLICATE KEY UPDATE date = VALUES (date),
        diff = VALUES (diff), day = VALUES (day),
        month = VALUES (month), year = VALUES (year),
        topic = VALUES (topic), yesterday = VALUES
        (yesterday), today = VALUES (today)"
    dataEG = (date,diff, day, month, year, topic, newtopic,
        yesterday, today)
    curs.execute(sqlEG,dataEG)
    db_maria.commit()
    print("Value was inserted in EG!")
elif "MEZZ" in topic:
    curs = db_maria.cursor()
    sqlMEZZ = "INSERT INTO Plugs_MEZZ (date,diff,day,month,year,
        topic,newtopic,yesterday,today)
        VALUES (%s, %s, %s, %s, %s, %s, %s, %s, %s)
        ON DUPLICATE KEY UPDATE date = VALUES (date),
        diff = VALUES (diff), day = VALUES (day),
        month = VALUES (month), year = VALUES (year),
        topic = VALUES (topic), yesterday = VALUES
        (yesterday), today = VALUES (today)"
    dataMEZZ = (date, diff, day, month, year, topic, newtopic,
        yesterday, today)
    curs.execute(sqlMEZZ,dataMEZZ)
    db_maria.commit()
    print("Value was inserted in MEZZ!")
if "ST" in topic:
    curs = db_maria.cursor()
    sqlG = "INSERT INTO Plugs_General (date,diff,day,month,year,
        topic,newtopic,yesterday,today)
        VALUES (%s, %s, %s, %s, %s, %s, %s, %s, %s)
        ON DUPLICATE KEY UPDATE date = VALUES (date),
        diff = VALUES (diff), day = VALUES (day),
        month = VALUES (month), year = VALUES (year),
        topic = VALUES (topic), yesterday = VALUES (yesterday),
        today = VALUES (today)"
    dataG = (date, diff, day, month, year, topic, newtopic,
        yesterday, today)
    curs.execute(sqlG,dataG)
    db_maria.commit()
    print("Value was inserted in General!")

#MQTT Connection
try:
    numb = random.randrange(1,10000)
    client = mqtt.Client("MyClient-"+str(numb))
    client.on_connect = on_connect
    client.on_message = on_message
    client.connect(MQTT_HOST, MQTT_PORT, 60)
    client.subscribe(MQTT_TOPIC_SUB_1)
    client.subscribe(MQTT_TOPIC_SUB_2)
    client.loop_forever()
except KeyboardInterrupt:
    print("\nProgram stoppped!")
    client.loop_stop()
    client.disconnect()

```